



# Modelação por elementos finitos de juntas adesivas tubulares de ressalto exterior sujeitas a esforços de tração

ANDRÉ LIMA FARIA

outubro de 2023

# **MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES DE RESSALTO EXTERIOR SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO**

André Lima Faria

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



# **MODELAÇÃO POR ELEMENTOS FINITOS DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES DE RESSALTO EXTERIOR SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO**

André Lima Faria

1181096

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Professor Doutor José Joaquim da Mota Machado e da Professora Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos

**2023**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



## AGRADECIMENTOS

Começo por dizer que foi um prazer frequentar o Instituto Superior de Engenharia do Porto durante os últimos cinco anos. Acredito ter crescido como pessoa. Estou certo de que todos os dias de trabalho investidos na minha formação académica vão continuar a dar frutos, e jamais esquecerei as pessoas com quem me cruzei, desde os colegas de trabalho, a alguns docentes com os quais até hoje mantenho contacto.

A elaboração do presente trabalho de investigação não seria possível sem o apoio de alguns docentes do Instituto Superior de Engenharia do Porto e da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. Primeiramente, não posso esquecer toda a dedicação e atenção do principal orientador da dissertação, o Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho. O Professor foi incansável desde o dia em que decidimos o tema do presente trabalho. Motivou-me durante a realização do mesmo, transmitiu-me conhecimento como ninguém o havia feito até à data, e foi um pilar. Acredito que, em parceria, desenvolvemos um trabalho que acrescenta valor à literatura existente e não podia estar mais satisfeito com a escolha do meu orientador.

Não menos importante foi o contributo dos coorientadores Professor Doutor José Joaquim da Mota Machado, Professora Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos e Professor José Manuel Fernandes da Silva Fecheira.

O Professor Doutor José Joaquim da Mota Machado esteve sempre disponível e posso agradecer-lhe a flexibilidade horária para conseguir reunir comigo, virtual ou presencialmente, mesmo quando esteve sobrecarregado a nível de trabalho. Foi uma pessoa fundamental na elaboração do presente trabalho, transmitiu-me todo conhecimento requerido e foi quem me motivou a realizar uma análise de mercado e adequar todas as análises numéricas realizadas a uma aplicação industrial concreta.

A Professora Doutora Sandra Cristina de Faria Ramos foi a regente de uma Unidade Curricular que frequentei e a experiência foi muito positiva. Foi um prazer voltar a colaborar com a docente e poder acrescentar valor ao presente trabalho, muito por conta da correta aplicação do Método de Taguchi. Esta colaboração permitiu que os modelos e métodos utilizados fossem aplicados criteriosamente de acordo com os pressupostos estatísticos.

O Professor José Manuel Fernandes da Silva Fecheira foi o último docente a integrar este grupo de trabalho, e permitiu concluir a análise de mercado que havia sido recomendada pelo Professor Doutor José Joaquim da Mota Machado. Foi o docente que efetuou a revisão dos desenhos técnicos do molde para hidroformagem tubular e orçamentou a minha proposta para o molde. Permitiu fazer a ponte entre os diferentes temas abordados e tirar conclusões que se estendem para além do valor científico que acrescentam à literatura, com aplicabilidade direta na indústria.

Por último e não menos importante, gostava de agradecer o apoio incondicional da minha família. Ajudaram-me a ultrapassar um período menos positivo e motivaram-me a realizar o melhor trabalho possível.



## RESUMO

As ligações adesivas estão amplamente difundidas na indústria aeroespacial, aeronáutica e automóvel. Quando comparadas com as ligações mecânicas convencionais, as ligações adesivas envolvem um menor número de componentes, reduzem o peso final da estrutura, permitem ligar materiais dissimilares, e resistem a solicitações e carregamentos exigentes com uma distribuição do estado de tensões mais uniforme comparativamente aos métodos de ligação convencionais. A afirmação industrial das juntas adesivas só tem sido possível devido ao desenvolvimento de metodologias de previsão que permitam validar a sua utilização, de modo a contornar o paradigma segundo o qual o sobredimensionamento das juntas adesivas resulta em estruturas mais pesadas e dispendiosas, devido à inexistência de modelos materiais precisos e critérios de rotura adequados. A técnica de dimensionamento mais difundida e validada designa-se por Modelos de Dano Coesivo. No que diz respeito à área de investigação das juntas adesivas tubulares obtidas por hidroformagem, e uma vez que este é um tópico emergente, existem poucos trabalhos de investigação, em comparação com as geometrias tradicionais de sobreposição.

O objetivo principal do desenvolvimento numérico do trabalho consiste na análise numérica de juntas adesivas tubulares hidroformadas solicitadas a esforços de tração, considerando a variação de parâmetros materiais (tipo de adesivo e material do aderente) e geométricos. Para este efeito, é realizada uma validação dos modelos coesivos através dos resultados experimentais e numéricos recuperados de um trabalho de investigação anterior. De seguida, pretende-se avaliar numericamente a resistência mecânica dos conjuntos, a plastificação máxima dos aderentes, a ductilidade das juntas, a evolução da variável do dano para o instante da carga máxima e ainda a distribuição das tensões de corte e arrancamento. Como complemento à análise numérica realizada foi aplicado o Método de Taguchi para a definição de uma junta ótima, considerando a variação de mais do que um fator de controlo, e verificação estatística da significância de cada parâmetro na resistência e ductilidade das juntas. De seguida, foram abordadas as propostas de alterações geométricas com o objetivo de concluir, face à geometria de base, se a variação de um dos parâmetros se traduzia na melhoria das propriedades mecânicas da junta. Por fim, realizou-se uma análise de mercado que procura validar a geometria ideal, e determinar se esta é passível de ser implementada do ponto de vista económico e industrial. Para tal, foi projetado um molde que permite obter os aderentes hidroformados, seguindo-se de uma análise dos custos de maquinaria através do custo das matérias-primas, ferramentas e processos de fabrico.

A validação dos modelos de dano coesivo foi realizada com sucesso. Após realizar um estudo numérico intensivo, optar pelos fatores de controlo mais significativos e analisar uma proposta de aplicação a nível industrial, determinou-se que a geometria ótima utiliza o adesivo Araldite® AV138, ângulo de filete adesivo igual a 15°, comprimento de sobreposição de 10 mm, diâmetro exterior do aderente não hidroformado de 20 mm, ângulo do ressalto exterior de 45°, e espessura dos aderentes de 2 mm. Esta configuração justifica o investimento requerido, uma vez que a proposta garante a melhoria da resistência mecânica e ductilidade em 60 e 75%, respetivamente, quando comparada com a geometria de referência.

### PALAVRAS-CHAVE

Juntas adesivas tubulares; Modelos de Dano Coesivo; Método de Taguchi; Alterações geométricas; Análise de mercado.



## ABSTRACT

Adhesive joints are widespread in the aerospace, aeronautics, and automotive industries. When compared to conventional mechanical joints, adhesive joints involve a smaller number of components, reduce the final weight of the structure, enable joining dissimilar materials, and resist the applied loadings with a more uniform stress state distribution compared to conventional joining methods. The industrial affirmation of adhesive joints has only been possible due to the development of predicting methodologies that allow validating their use, to circumvent the paradigm according to which the oversizing of adhesive joints results in heavier and more expensive structures, and due to the lack of accurate material models and appropriate failure criteria. The most widespread and validated design technique is called Cohesive Zone Models. Regarding the research area of tubular adhesive joints obtained by hydroforming, since this is an emerging topic, there are few research works compared to traditional overlap geometries.

The main objective of this work consists of the numerical analysis of hydroformed tubular adhesive joints subjected to tensile loads, considering the variation of material parameters (type of adhesive and adherent material) and geometric parameters. For this purpose, a validation of cohesive models is carried out through experimental and numerical results retrieved from a previous research work. Next, the aim is to numerically evaluate the mechanical strength of the joints, the plasticization of the adherents, the ductility of the joints, the evolution of the damage variable at maximum load, and the distribution of shear and peel stresses. As a complement to the numerical analysis carried out, the Taguchi Method was applied to determine an optimal joint, considering the variation of more than one control factor, and to statistically verify the significance of each parameter in the strength and ductility of the joints. Then, proposals for geometric changes were addressed with the aim of concluding, in view of the base geometry, whether the variation of one of the parameters would translate into an improvement in the mechanical properties of the joint. Finally, a market analysis was carried out that seeks to validate the ideal geometry and determine if it is possible to be implemented from an economic and industrial point of view. To this end, a mold was designed to obtain hydroformed adherents, followed by an analysis of machining costs through the cost of raw materials, tools and manufacturing processes.

Validation of the cohesive models was successfully performed. After carrying out an intensive numerical study, opting for the most significant control factors and analyzing an application proposal at an industrial level, it was determined that the optimal geometry uses the adhesive Araldite® AV138, adhesive fillet angle equal to 15°, overlap length of 10 mm, outside diameter of the non-hydroformed adherent of 20 mm, exterior joggle angle of 45°, and thickness of the adherents of 2 mm. This configuration justifies the required investment, since the proposal guarantees an improvement in mechanical strength and ductility by 60 and 75%, respectively, when compared to the reference geometry.

### KEYWORDS

Tubular adhesive joints; Cohesive Zone Models; Taguchi Method; Geometric changes; Market analysis.



## ÍNDICE

|                                                          |       |
|----------------------------------------------------------|-------|
| AGRADECIMENTOS.....                                      | 5     |
| RESUMO .....                                             | I     |
| ABSTRACT .....                                           | III   |
| ÍNDICE.....                                              | V     |
| ÍNDICE DE FIGURAS .....                                  | IX    |
| ÍNDICE DE TABELAS .....                                  | XVII  |
| LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES.....               | XXVII |
| 1. INTRODUÇÃO .....                                      | 1     |
| 1.1. Contextualização .....                              | 1     |
| 1.2. Objetivos .....                                     | 2     |
| 1.3. Estrutura da dissertação.....                       | 2     |
| 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....                            | 5     |
| 2.1. Ligações adesivas.....                              | 5     |
| 2.1.1. Contextualização histórica .....                  | 6     |
| 2.1.2. Introdução à técnica de ligação .....             | 6     |
| 2.1.3. Comparação com outras técnicas de ligação.....    | 7     |
| 2.1.4. Configurações de junta comuns.....                | 9     |
| 2.1.5. Ensaios de caracterização de adesivos .....       | 10    |
| 2.1.6. Aplicações das ligações adesivas .....            | 14    |
| 2.2. Previsão de resistência das juntas.....             | 15    |
| 2.2.1. Mecânica dos meios contínuos.....                 | 16    |
| 2.2.2. Mecânica da fratura .....                         | 17    |
| 2.2.3. Modelos de dano coesivo .....                     | 18    |
| 2.2.3.1. Determinação dos parâmetros coesivos .....      | 19    |
| 2.2.4. Mecânica do dano.....                             | 21    |
| 2.2.5. Método de elementos finitos eXtendido .....       | 21    |
| 2.2.6. Estado-da-arte.....                               | 22    |
| 2.3. Juntas adesivas tubulares.....                      | 26    |
| 2.3.1. Contextualização do uso de juntas tubulares ..... | 27    |
| 2.3.2. Tipos de geometria comuns.....                    | 28    |
| 2.3.3. Esforços e tipos de carregamentos .....           | 29    |
| 2.3.4. Aplicações de juntas tubulares .....              | 31    |
| 2.3.5. Estado-da-arte.....                               | 32    |
| 2.4. Processo de hidroformagem .....                     | 34    |
| 2.5. Método de Taguchi .....                             | 35    |
| 2.6. Juntas tubulares bi-adesivas .....                  | 38    |
| 2.7. Aderente não hidroformado de PRFC .....             | 39    |

|                                                                                 |    |
|---------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3. DESENVOLVIMENTO .....                                                        | 41 |
| 3.1. Objetivos .....                                                            | 41 |
| 3.2. Materiais e métodos .....                                                  | 41 |
| 3.2.1. Metodologia.....                                                         | 41 |
| 3.2.2. Geometrias a analisar .....                                              | 44 |
| 3.2.3. Requisitos e limitações.....                                             | 46 |
| 3.2.4. Caracterização dos materiais selecionados .....                          | 47 |
| 3.2.4.1. Material dos aderentes .....                                           | 47 |
| 3.2.4.2. Material dos adesivos .....                                            | 48 |
| 3.2.4.2.1. Araldite® AV138 .....                                                | 49 |
| 3.2.4.2.2. Araldite® 2015 .....                                                 | 49 |
| 3.2.4.2.3. Sikaforce® 7752 .....                                                | 49 |
| 3.2.5. Modelação numérica .....                                                 | 49 |
| 3.2.5.1. Escolha da técnica .....                                               | 49 |
| 3.2.5.2. Formulação do MDC.....                                                 | 52 |
| 3.2.5.2.1. Tipos de leis coesivas .....                                         | 52 |
| 3.2.5.3. Pré-processamento dos modelos.....                                     | 53 |
| 3.2.5.3.1. Condições da análise numérica .....                                  | 53 |
| 3.2.5.4. Determinação dos parâmetros materiais.....                             | 53 |
| 3.2.5.4.1. Araldite® AV138 .....                                                | 53 |
| 3.2.5.4.2. Araldite® 2015 .....                                                 | 54 |
| 3.2.5.4.3. SikaForce® 7752 .....                                                | 54 |
| 3.3. Validação dos modelos coesivos para previsão da resistência da junta ..... | 55 |
| 3.3.1. Resultados experimentais.....                                            | 55 |
| 3.3.1.1. Araldite® AV138.....                                                   | 55 |
| 3.3.1.2. Araldite® 2015.....                                                    | 57 |
| 3.3.1.3. SikaForce® 7752 .....                                                  | 57 |
| 3.3.1.4. Comparação de resultados.....                                          | 59 |
| 3.3.2. Resultados numéricos.....                                                | 60 |
| 3.3.2.1. Araldite® AV138.....                                                   | 60 |
| 3.3.2.2. Araldite® 2015 .....                                                   | 60 |
| 3.3.2.3. SikaForce® 7752 .....                                                  | 61 |
| 3.3.3. Discussão dos resultados obtidos .....                                   | 61 |
| 3.3.4. Validação dos resultados obtidos pelo MDC .....                          | 62 |
| 3.4. Estudo numérico .....                                                      | 64 |
| 3.4.1. Geometria de base.....                                                   | 64 |
| 3.4.2. Efeito do diâmetro exterior dos aderentes.....                           | 66 |
| 3.4.3. Efeito do comprimento de sobreposição.....                               | 78 |

|                                                                               |     |
|-------------------------------------------------------------------------------|-----|
| 3.4.4. Efeito da espessura dos aderentes .....                                | 89  |
| 3.4.5. Efeito do ângulo do ressalto exterior dos aderentes hidroformados..... | 100 |
| 3.4.6. Método de Taguchi .....                                                | 112 |
| 3.4.6.1. Aplicação do Método de Taguchi com o Minitab® .....                  | 112 |
| 3.4.6.2. Procedimento no Minitab® .....                                       | 113 |
| 3.4.6.3. Discussão de resultados – ANOVA .....                                | 116 |
| 3.4.6.3.1. Araldite® AV138 .....                                              | 119 |
| 3.4.6.3.2. Araldite® 2015 .....                                               | 122 |
| 3.4.6.3.3. Sikaforce® 7752 .....                                              | 125 |
| 3.4.7. Alterações geométricas.....                                            | 129 |
| 3.4.7.1. Efeito da variação do ângulo do filete adesivo.....                  | 130 |
| 3.4.7.2. Efeito da variação do ângulo do chanfro dos aderentes.....           | 137 |
| 3.4.7.3. Juntas tubulares bi-adesivas .....                                   | 142 |
| 3.4.7.3.1. Condições da análise numérica e tratamento de dados.....           | 143 |
| 3.4.7.3.2. Araldite® AV138/Araldite® 2015.....                                | 144 |
| 3.4.7.3.3. Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752.....                              | 149 |
| 3.4.7.4. Juntas tubulares bi-adesivas – Aderente de PRFC.....                 | 154 |
| 3.4.7.4.1. Araldite® AV138/Araldite® 2015.....                                | 156 |
| 3.4.7.4.2. Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752.....                              | 165 |
| 3.5. Análise de mercado .....                                                 | 174 |
| 3.5.1. Orçamento do molde de hidroformagem.....                               | 176 |
| 3.5.2. Comparação de resultados .....                                         | 177 |
| 4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS .....                          | 183 |
| 4.1. Conclusões.....                                                          | 183 |
| 4.2. Trabalhos futuros .....                                                  | 185 |
| 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....                                           | 187 |
| 6. ANEXOS .....                                                               | 201 |
| 7. APÊNDICES .....                                                            | 215 |
| 7.1. APÊNDICE A .....                                                         | 215 |
| 7.2. APÊNDICE B .....                                                         | 225 |
| 7.3. APÊNDICE C .....                                                         | 235 |
| 7.4. APÊNDICE D .....                                                         | 245 |
| 7.5. APÊNDICE E.....                                                          | 251 |
| 7.6. APÊNDICE F.....                                                          | 259 |
| 7.7. APÊNDICE G .....                                                         | 279 |



## ÍNDICE DE FIGURAS

|                                                                                                                                                                                                                                                     |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 1 - Estrutura em aço e placa de madeira compensada (contraplacado) [43].                                                                                                                                                                     | 15 |
| Figura 2 - Diferentes aplicações de ligações adesivas no Airbus A380 [46].                                                                                                                                                                          | 15 |
| Figura 3 – Elementos coesivos para simular modos de rotura de espessura nula – aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo entre aderentes – aproximação contínua (b) numa junta adesiva. Adaptado de Da Silva e Campilho [51]. | 18 |
| Figura 4 - Geometria de um provete para ensaio DCB. Adaptado de Gustafson e Waas [76].                                                                                                                                                              | 20 |
| Figura 5 - Geometria de um provete para ensaio ENF. Adaptado de Gustafson e Waas [76].                                                                                                                                                              | 20 |
| Figura 6 - Junta tubular sem filete (a) e com filete (b). Adaptado de da Silva et al. [11].                                                                                                                                                         | 28 |
| Figura 7 - Juntas cilíndricas tubulares com diferentes configurações. Adaptado de da Silva et al. [11] e Petrie [2].                                                                                                                                | 29 |
| Figura 8 - Distribuição de tensões numa junta adesiva tubular solicitada sob a forma axial (esquerda) e não axial (direita). Adaptado de Petrie [2].                                                                                                | 30 |
| Figura 9 - Dispositivo semiautomático de alinhamento. Adaptado de Mertiny e Ellyin [122].                                                                                                                                                           | 31 |
| Figura 10 - Modelo mecânico simplificado de uma junta tubular sob IPB. Adaptado de Gao et al. [135].                                                                                                                                                | 31 |
| Figura 11 - União e montagem de cateteres à base de Nylon e de PEBA com um adesivo curável por LED [136].                                                                                                                                           | 32 |
| Figura 12 - Sistema de hidroformagem tubular. Adaptado de Leitloff [140].                                                                                                                                                                           | 35 |
| Figura 13 - Configurações esquemáticas de juntas bi-adesivas mais comuns: a) JSS; b) JSD; c) Cobre-Junta; D) Junta em T. Adaptado de Akhavan-Safar et al. [223].                                                                                    | 38 |
| Figura 14 - JSD modificadas pela inclusão de chanfros. Adaptado de Adams [173].                                                                                                                                                                     | 40 |
| Figura 15 – Metodologia em árvore (proposta de valor inicial).                                                                                                                                                                                      | 43 |
| Figura 16 - Metodologia em árvore (Proposta de alterações geométricas).                                                                                                                                                                             | 44 |
| Figura 17 - Geometria de base e simbologia atribuída.                                                                                                                                                                                               | 44 |
| Figura 18 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ para o alumínio AW6082-T651 e aproximação à análise por MEF [180].                                                                                                                                         | 47 |
| Figura 19 - Modelo coesivo triangular. Adaptado de Rocha e Campilho [199].                                                                                                                                                                          | 52 |
| Figura 20 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138. a) Para $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                                                          | 56 |
| Figura 21 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015. a) Para $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                                                           | 57 |
| Figura 22 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752. a) Para $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                                                          | 58 |
| Figura 23 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com $L_0$ para as três famílias de adesivos utilizados. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                                                                                  | 59 |
| Figura 24 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo Araldite® AV138. a) Para $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                          | 60 |
| Figura 25 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo Araldite® 2015. a) Para $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                           | 61 |
| Figura 26 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo SikaForce® 7752. a) Para $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                          | 61 |
| Figura 27 – Evolução dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L_0$ para os três adesivos testados. Comparação dos resultados experimentais e numéricos previstos por MDC. Adaptado de Ferreira et al. [7].                            | 63 |

|                                                                                                                                                                                                      |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figura 28 - Curva $P$ - $\delta$ obtida para a geometria de base.....                                                                                                                                | 64 |
| Figura 29 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de $dEANH=20$ mm. ....                                                           | 65 |
| Figura 30 – Distribuição de a) $\sigma_y/\tau_{avg}$ e b) $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ , em função da $DN$ .....                                                                                           | 65 |
| Figura 31 - Evolução de $sdeg$ em função da $DN$ .....                                                                                                                                               | 66 |
| Figura 32 – Curvas $P$ - $\delta$ obtidas em função de $dEANH$ . Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.....                                                                | 67 |
| Figura 33 – Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $dEANH$ e do adesivo utilizado. ....                                                                                                          | 67 |
| Figura 34 - Evolução de $ER$ em função de $dEANH$ e do adesivo utilizado.....                                                                                                                        | 69 |
| Figura 35 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para $dEANH=$ a) 5 mm, b) 10 mm e c) 15 mm.....                                             | 70 |
| Figura 36 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para $dEANH=$ a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm. ....                                   | 70 |
| Figura 37 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para $dEANH=$ a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm. ....                                  | 71 |
| Figura 38 - Evolução de $PA$ em função de $dEANH$ e do adesivo utilizado. ....                                                                                                                       | 72 |
| Figura 39 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $dEANH$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....  | 73 |
| Figura 40 - Evolução dos valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $dEANH$ e do adesivo utilizado.....                                                                   | 74 |
| Figura 41 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $dEANH$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. .... | 75 |
| Figura 42 - Evolução dos valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $dEANH$ e do adesivo utilizado.....                                                                  | 76 |
| Figura 43 - Evolução de $sdeg$ em função de $dEANH$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....                     | 77 |
| Figura 44 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas em função de $L0$ , para os três adesivos analisados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.....                                 | 78 |
| Figura 45 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados.....                                                                                                           | 79 |
| Figura 46 - Evolução de $ER$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados.....                                                                                                                        | 80 |
| Figura 47 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para $L0=$ a) 5 mm, b) 15 mm e c) 20 mm.....                                                | 81 |
| Figura 48 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para $L0=$ a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm. ....                                      | 82 |
| Figura 49 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para $L0=$ a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm. ....                                     | 83 |
| Figura 50 - Evolução de $PA$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados.....                                                                                                                        | 84 |
| Figura 51 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $L0$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....     | 85 |
| Figura 52 - Evolução dos valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados.....                                                                           | 86 |
| Figura 53 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $L0$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....    | 87 |
| Figura 54 - Evolução dos valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados. ....                                                                         | 87 |

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 55 - Evolução de $sdeg$ em função de $L0$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.....                                   | 88  |
| Figura 56 - Curvas $P-\delta$ obtidas em função de $tAd$ , para os três adesivos analisados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.....                                              | 90  |
| Figura 57 - Evolução de $P_{máx}$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo. ....                                                                                                                            | 90  |
| Figura 58 - Evolução de $ER$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo. ....                                                                                                                                 | 91  |
| Figura 59 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o caso do adesivo Araldite® AV138. Para $tAd$ = a) 1 mm, b) 3 mm e c) 4 mm. ....                                                 | 92  |
| Figura 60 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para $tAd$ = a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm. ....                                                 | 93  |
| Figura 61 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para $tAd$ = a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm. ....                                                | 94  |
| Figura 62 - Evolução de $PA$ em função de $tAd$ .....                                                                                                                                                          | 95  |
| Figura 63 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $tAd$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....              | 96  |
| Figura 64 - Evolução dos valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo. ....                                                                                            | 97  |
| Figura 65 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $tAd$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....             | 98  |
| Figura 66 - Evolução dos valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo. ....                                                                                           | 99  |
| Figura 67 - Evolução de $sdeg$ em função de $tAd$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.....                                  | 100 |
| Figura 68 - Curvas $P-\delta$ em função de $\theta$ e do adesivo utilizado. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....                                                              | 101 |
| Figura 69 - Evolução de $P_{máx}$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo. ....                                                                                                                         | 101 |
| Figura 70 - Evolução de $ER$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo. ....                                                                                                                              | 103 |
| Figura 71 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para $tAd$ = a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm. Para $\theta$ = a) 0°, b) 15°, c) 30° e d) 60°..... | 104 |
| Figura 72 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para $\theta$ = a) 0°, b) 15°, c) 30°, d) 45° e e) 60°.....                                            | 105 |
| Figura 73 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para $\theta$ = a) 0°, b) 15°, c) 30°, d) 45° e e) 60°.....                                           | 106 |
| Figura 74 - Evolução de $PA$ em função de $\theta$ . ....                                                                                                                                                      | 107 |
| Figura 75 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $\theta$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....           | 108 |
| Figura 76 - Evolução dos valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo.....                                                                                          | 109 |
| Figura 77 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $\theta$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. ....          | 110 |
| Figura 78 - Evolução dos valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo. ....                                                                                        | 110 |
| Figura 79 - Evolução de $sdeg$ em função de $\theta$ e ao longo de $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.....                               | 111 |
| Figura 80 - Desconsideração dos efeitos de ruído na ANOVA. ....                                                                                                                                                | 117 |
| Figura 81 - Efeito da variação de: a) $\gamma$ e b) $\beta$ . ....                                                                                                                                             | 129 |

|                                                                                                                                                                                                                            |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 82 - Curvas $P$ - $\delta$ obtidas em função de $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138. ....                                                                                                                     | 130 |
| Figura 83 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para $\gamma$ =a) 15°, b) 30°, c) 45° e d) 60°. ....                                                              | 132 |
| Figura 84 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ ao longo de $x'/L_0$ , para o Araldite® AV138. Para $\gamma$ =a) 15°, b) 30°, c) 45° e d) 60°. ....                                                                      | 133 |
| Figura 85 - Evolução de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de cada path definido e de $\gamma$ .....                                                                                                          | 134 |
| Figura 86 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ ao longo de $x'/L_0$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para $\gamma$ =a) 15°, b) 30°, c) 45° e d) 60°. ....                                                             | 135 |
| Figura 87 - Evolução de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de cada path definido e de $\gamma$ .....                                                                                                         | 136 |
| Figura 88 - Evolução de $sdeg$ em função de $\gamma$ e ao longo de $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138. ....                                                                                                             | 136 |
| Figura 89 - Curvas $P$ - $\delta$ em função de $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138.....                                                                                                                               | 137 |
| Figura 90 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para $\beta$ = a) 15°, b) 30°, c) 45° e d) 60°. ....                                                              | 139 |
| Figura 91 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $\beta$ e ao longo de $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138. ....                                                                                           | 140 |
| Figura 92 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $\beta$ e ao longo de $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138. ....                                                                                          | 141 |
| Figura 93 - Evolução de $sdeg$ em função de $\beta$ e ao longo de $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138. ....                                                                                                              | 142 |
| Figura 94 - Inclusão do parâmetro geométrico $L_1$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                                               | 143 |
| Figura 95 – Definição de uma nova secção que possibilita a atribuição de diferentes propriedades à camada adesiva.....                                                                                                     | 144 |
| Figura 96 - Curvas $P$ - $\delta$ em função de $L_1$ , para o as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. ....                                                                             | 144 |
| Figura 97 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Para $L_1$ = a) 25% $L_0$ , b) 50% $L_0$ e c) 75% $L_0$ .....    | 146 |
| Figura 98 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $L_1$ e ao longo de $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. ....                                            | 147 |
| Figura 99 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $L_1$ e ao longo de $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. ....                                           | 148 |
| Figura 100 - Evolução de $sdeg$ em função de $L_1$ e ao longo de $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.....                                                               | 149 |
| Figura 101 - Curvas $P$ - $\delta$ em função de $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. ....                                                                             | 149 |
| Figura 102 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. Para $L_1$ = a) 25% $L_0$ , b) 50% $L_0$ e c) 75% $L_0$ ... .. | 151 |
| Figura 103 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $L_1$ e ao longo de $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. ....                                          | 152 |
| Figura 104 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $L_1$ e ao longo de $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. ....                                         | 153 |
| Figura 105 - Evolução de $sdeg$ em função de $L_1$ e ao longo de $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.....                                                              | 154 |
| Figura 106 - Parâmetros geométricos associados às camadas interlaminar, a vermelho, e intralaminar, a verde.....                                                                                                           | 156 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                       |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 107 - Curvas $P-\delta$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                                                                                                                                                                    | 157 |
| Figura 108 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                                        | 158 |
| Figura 109 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $L1$ e ao longo de $x/L0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                      | 160 |
| Figura 110 - Evolução dos valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e dos paths correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....   | 161 |
| Figura 111 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $L1$ e ao longo de $x/L0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                     | 162 |
| Figura 112 - Evolução dos valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e dos paths correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....  | 163 |
| Figura 113 - Evolução de $sdeg$ em função de $L1$ e ao longo de $x/L0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                                         | 164 |
| Figura 114 - Curvas $P-\delta$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                                                                                                                                                                   | 165 |
| Figura 115 - Evolução de $P$ e $PA$ no nó crítico em função de $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                                       | 167 |
| Figura 116 - Distribuição de $\sigma_y/\tau_{avg}$ em função de $L1$ e ao longo de $x/L0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                     | 168 |
| Figura 117 - Evolução dos valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e dos paths correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....  | 169 |
| Figura 118 - Distribuição de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ em função de $L1$ e ao longo de $x/L0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                    | 171 |
| Figura 119 - Evolução dos valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e dos paths correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. .... | 172 |
| Figura 120 - Evolução de $sdeg$ em função de $L1$ e ao longo de $x/L0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para $L1=$ a) 25% $L0$ , b) 50% $L0$ e c) 75% $L0$ . ....                                                                                                        | 173 |
| Figura 121 - Molde de hidroformagem em vista explodida. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                          | 175 |

|                                                                                                                                                        |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 122 – Determinação do volume das partições concordantes com as direções ortogonais no plano. ....                                               | 176 |
| Figura 123 - Determinação da distância do baricentro ao eixo de revolução para as partições não concordantes com as direções ortogonais no plano. .... | 176 |
| Figura 124 – Eixo de revolução, parâmetros e pormenores geométricos, restrições e aspetos construtivos da JST, a), e da JRE, b). ....                  | 215 |
| Figura 125 - Pormenor construtivo do partition sketch da JTRE. ....                                                                                    | 216 |
| Figura 126 - Comportamento plástico dos aderentes de alumínio. ....                                                                                    | 217 |
| Figura 127 - Menu section manager, que especifica os materiais e o tipo de secções atribuídas aos aderentes e adesivos.....                            | 217 |
| Figura 128 - Atribuição das secções criadas às partições delimitadas por traços contínuos de cor escura. ....                                          | 218 |
| Figura 129 - Parâmetros de computação da análise numérica, no módulo step. ....                                                                        | 219 |
| Figura 130 - Set deslocamentos e reações.....                                                                                                          | 219 |
| Figura 131 – Alterações no módulo step para melhorar a convergência da solução em cada incremento.....                                                 | 220 |
| Figura 132 - Simulação do efeito de Poisson, e aplicação do $\delta$ imposto numa das extremidades da junta adesiva. ....                              | 220 |
| Figura 133 - Simbologia respetiva do encastramento (à direita) e do $\delta$ (à esquerda) impostos... ..                                               | 221 |
| Figura 134 - Atribuição dos diferentes controlos de malha, de acordo com o código de cores. ..                                                         | 221 |
| Figura 135 - Sementes atribuídas às arestas correspondentes aos contornos exteriores dos constituintes da junta adesiva e às partições definidas. .... | 222 |
| Figura 136 - Malha obtida para a geometria de base. ....                                                                                               | 222 |
| Figura 137 - Monitorização da análise numérica, no caso da geometria de base.....                                                                      | 223 |
| Figura 138 - Representação da degradação dos elementos coesivos (variável <i>sdeg</i> ). ....                                                          | 223 |
| Figura 139 - Representação dos elementos coesivos que ainda não romperam (variável status). ....                                                       | 224 |
| Figura 140 – Criação de uma base de dados correspondente à reação global na extremidade da junta. ....                                                 | 225 |
| Figura 141 - Criação de uma base de dados correspondente ao $\delta$ nos elementos coincidentes com a extremidade da junta adesiva. ....               | 225 |
| Figura 142 - Curva $P$ - $\delta$ obtida para a geometria de base. ....                                                                                | 226 |
| Figura 143 - Direção do path coincidente com a interface entre o aderente e o adesivo, idêntico para todas as configurações de junta analisadas.....   | 227 |
| Figura 144 – Aplicação das instruções ao path para obter a variável de dano no instante da carga máxima.....                                           | 228 |
| Figura 145 - Obtenção da variável de dano no instante da carga máxima para a geometria de base. ....                                                   | 228 |
| Figura 146 - Determinação da distância entre uma linha que define o limite de uma partição e o nó mais crítico. ....                                   | 229 |
| Figura 147 - Traçagem de uma linha auxiliar e a possibilidade de definir a distância que define o limite de uma partição e o nó mais crítico.....      | 229 |
| Figura 148 - Set coincidente com ponto amarelado que representa o nó mais crítico. ....                                                                | 229 |
| Figura 149 - Numeração associada a cada nó com uma cor predefinida. ....                                                                               | 230 |

|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 150 - Seleção da variável de saída PEEQ e posição da variável de saída correspondente com um dos elementos nodais que inclua o nó mais crítico a analisar.....                                                                  | 230 |
| Figura 151 - Combinação das variáveis de saída, de acordo com a Figura 57. ....                                                                                                                                                        | 231 |
| Figura 152 - Combinação da curva $P-\delta$ e de $PA$ em função de $\delta$ , para a geometria de base. ....                                                                                                                           | 231 |
| Figura 153 - Malha estruturada do adesivo formada por quadriláteros coincidentes com as direções ortogonais, em concordância com as áreas retangulares definidas pelas partições nos aderentes (modelo para obtenção de tensões). .... | 232 |
| Figura 154 – Aumento do refinamento da malha em 1000%, para obtenção das tensões de corte e arrancamento.....                                                                                                                          | 232 |
| Figura 155 - Malha gerada no modelo de base nas regiões mais críticas, especialmente na transição entre o aderente e o adesivo, para a geometria de base para o modelo de obtenção de tensões. ....                                    | 233 |
| Figura 156 - Direção do path criado compatível com as análises realizadas à posteriori para as diferentes configurações (de cima para baixo). ....                                                                                     | 233 |
| Figura 157 - Aplicação das instruções ao path. ....                                                                                                                                                                                    | 234 |
| Figura 158 - Tensões de arrancamento e de corte ao longo do path criado, obtidas para a geometria de base. ....                                                                                                                        | 234 |
| Figura 159 - Contornos exteriores da junta adesiva com filete adesivo para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de $\gamma=15^\circ$ . ....                                                                                           | 235 |
| Figura 160 - Definição das novas partições e a remoção de uma secção com recurso ao menu remove faces, para o adesivo Araldite® AV138 e $\gamma=15^\circ$ . ....                                                                       | 235 |
| Figura 161 - Alteração dos controlos gerais de solução, e melhoria da convergência da solução para cada incremento. ....                                                                                                               | 236 |
| Figura 162 - Elementos coesivos ligados a um nó da interface interior do aderente hidroformado e a um nó coincidente com o contorno exterior do aderente não hidroformado, para o adesivo Araldite® AV138 e $\gamma=15^\circ$ . ....   | 236 |
| Figura 163 - Atribuição dos diferentes controlos de malha, de acordo com o código de cores, para o adesivo Araldite® AV138 e $\gamma=15^\circ$ . ....                                                                                  | 237 |
| Figura 164 - Sementes atribuídas às arestas correspondentes aos contornos exteriores dos constituintes da junta adesiva e às partições definidas, para o adesivo Araldite® AV138 e $\gamma=15^\circ$ . ....                            | 237 |
| Figura 165 - Malha obtida para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de $\gamma=15^\circ$ . ....                                                                                                                                       | 237 |
| Figura 166 - Curva $P-\delta$ obtida para a junta com adesivo Araldite® AV138 e $\gamma=15^\circ$ . ....                                                                                                                               | 237 |
| Figura 167 - Direção dos <i>paths</i> criados para análise da distribuição de tensões em função de $\gamma$ . ....                                                                                                                     | 238 |
| Figura 168 - Referencial para o qual os dados são extraídos do <i>software</i> ( $x'y'$ ), e referencial compatível com as direções ortogonais e que permite obter o campo de tensões ao longo de $L0(xy)$ . ....                      | 239 |
| Figura 169 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de arrancamento ao longo do <i>path</i> 1. ....                                                                                                                             | 240 |
| Figura 170 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de arrancamento ao longo do <i>path</i> 2. ....                                                                                                                             | 240 |
| Figura 171 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de arrancamento para o caso do <i>path</i> 3. ....                                                                                                                          | 241 |
| Figura 172 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de corte ao longo do <i>path</i> 1. ....                                                                                                                                    | 241 |
| Figura 173 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de corte ao longo do <i>path</i> 2. ....                                                                                                                                    | 242 |

|                                                                                                                                                                                                                |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Figura 174 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de corte no <i>path</i> 3.....                                                                                                                      | 242 |
| Figura 175 - Definição do caminho mais curto entre a aresta mais próxima da extremidade não hidroformada e o filete de adesivo incluído na análise para a geometria de junta cujo $\gamma=15^\circ$ .<br>..... | 243 |
| Figura 176 - Aplicação das instruções ao <i>path</i> para obter a variável de dano no instante da carga máxima, para a geometria de junta cujo $\gamma=15^\circ$ .....                                         | 244 |
| Figura 177 - Determinação da distância entre a extremidade superior da camada adesiva e o nó que coincide com o início da sobreposição relativamente à geometria de base. ....                                 | 244 |
| Figura 178 - Tratamento de dados para obtenção de <i>sdeg</i> no instante correspondente a <i>P<sub>máx</sub></i> , para $\gamma=15^\circ$ .....                                                               | 244 |
| Figura 179 - Adição das partições referentes às camadas interlaminar e intralaminar do aderente não hidroformado de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                              | 245 |
| Figura 180 - Definição das partições para uma geometria de junta para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo valor de $L1=25\%$ $L0=1,25$ mm. ..                     | 245 |
| Figura 181 - Sistema de coordenadas do tipo retangular formado por três pontos que permite atribuir as constantes de engenharia à secção sólida homogénea do aderente não hidroformado de PRFC. ....           | 246 |
| Figura 182 - Direções principais do sistema de eixos definido para atribuir as propriedades ao aderente não hidroformado. ....                                                                                 | 246 |
| Figura 183 - Constantes de engenharia que definem o PRFC correspondente à secção sólida homogénea do aderente não hidroformado. ....                                                                           | 246 |
| Figura 184 - Propriedades coesivas e elásticas das camadas interlaminar e intralaminar do compósito da união.....                                                                                              | 247 |
| Figura 185 - Atribuição dos controlos de malha aos elementos coesivos, em concordância com os pressupostos da discretização da malha. ....                                                                     | 247 |
| Figura 186 - Definição do tipo de elemento e das sementes locais no caso dos elementos coesivos que constituem a junta bi-adesiva, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                              | 247 |
| Figura 187 - Path 1, coincidente com a direção longitudinal da união adesiva e a interface entre o adesivo e o aderente não hidroformado. ....                                                                 | 248 |
| Figura 188 - Path 2, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e a interface entre a camada intralaminar e o espaço reservado entre lâminas do PRFC. ....                                             | 248 |
| Figura 189 - Path 3, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e a interface entre a camada interlaminar e a secção sólida homogénea do PRFC. ....                                                    | 248 |
| Figura 190 - Path 1, coincidente com a direção longitudinal da união adesiva e o meio da espessura da camada adesiva. ....                                                                                     | 249 |
| Figura 191 - Path 2, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e o meio da espessura da camada intralaminar do PRFC.....                                                                              | 249 |
| Figura 192 - Path 3, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e o meio da espessura da camada interlaminar do PRFC.....                                                                              | 249 |

## ÍNDICE DE TABELAS

|                                                                                                                                                                                     |    |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Tabela 1 - Comparação entre diferentes técnicas de ligação. Adaptado de Petrie [2].                                                                                                 | 8  |
| Tabela 2 - Configurações de juntas adesivas comuns.                                                                                                                                 | 9  |
| Tabela 3 – Estado-da-arte (Métodos analíticos/Mecânica dos meios contínuos; mecânica da fratura; mecânica do dano; MDC; MEFX).                                                      | 23 |
| Tabela 4 - Estado-da-arte (MDC).                                                                                                                                                    | 32 |
| Tabela 5 - Parâmetros geométricos relativos à geometria de base proposta e analisada numericamente.                                                                                 | 45 |
| Tabela 6 - Diferentes configurações de juntas adesivas tubulares analisadas, em função da variação dos parâmetros geométricos.                                                      | 45 |
| Tabela 7 - Propriedades mecânicas atribuídas aos aderentes (Liga alumínio AW6082-T651).                                                                                             | 47 |
| Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos adesivos de ligação utilizados [149,151,152].                                                                                                 | 48 |
| Tabela 9 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138. Adaptado de Campilho et al. [180].                                                                 | 54 |
| Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015. Adaptado de [216].                                                                                 | 54 |
| Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [219].                                                                                             | 55 |
| Tabela 12 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                     | 56 |
| Tabela 13 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                      | 57 |
| Tabela 14 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752. Adaptado de Ferreira et al. [7].                                                     | 58 |
| Tabela 15 – $P_{m\acute{a}x\ med}$ [N] e $\Delta P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para os três adesivos em análise. Adaptado de Ferreira et al. [7].                             | 60 |
| Tabela 16 – Resumo dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada adesivo estudado, em função de $L_0$ . Adaptado de Ferreira et al. [7].                 | 62 |
| Tabela 17 – Resumo dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos em função de $L_0$ para os três adesivos testados, e respetiva diferença relativa. Adaptado de Ferreira et al. [7]. | 63 |
| Tabela 18 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ , $P_{Am\acute{a}x}$ , $ER$ , $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ e $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos.                      | 66 |
| Tabela 19 - Diminuição percentual da resistência da junta em função de $d_{EANH}$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.                                        | 68 |
| Tabela 20 – Aumento/diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base, para os três adesivos testados.                         | 68 |
| Tabela 21 - Diminuição percentual de $ER$ em função de $d_{EANH}$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.                                                        | 69 |
| Tabela 22 - Aumento/diminuição percentual de $\delta_{IPA}$ em função de $d_{EANH}$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.                                      | 72 |
| Tabela 23 – Diminuição percentual de $PIPA$ em função de $d_{EANH}$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.                                                      | 72 |
| Tabela 24 - Diminuição percentual de $PA$ em função de $d_{EANH}$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.                                                        | 73 |
| Tabela 25 - Diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $d_{EANH}$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.                       | 74 |

|                                                                                                                                                                          |     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 26 – Aumento/diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $dEANH$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. .... | 76  |
| Tabela 27 – Aumento/diminuição percentual de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. ....                      | 79  |
| Tabela 28 - Valores de $\delta_{rotura}$ obtidos em função de $L0$ , para os três adesivos testados. ....                                                                | 80  |
| Tabela 29 – Aumento/diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $L0$ , relativamente à geometria de base, para os três adesivos testados. ....               | 80  |
| Tabela 30 – Aumento/diminuição percentual de $ER$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. ....                                   | 81  |
| Tabela 31 - Aumento/diminuição percentual de $\delta_{IPA}$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. ....                         | 83  |
| Tabela 32 – Aumento/diminuição percentual de $PIPA$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. ....                                 | 84  |
| Tabela 33 – Aumento/diminuição percentual de $PA$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. ....                                   | 84  |
| Tabela 34 – Aumento/diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. ....  | 86  |
| Tabela 35 – Aumento/diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L0$ e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. .... | 88  |
| Tabela 36 – Aumento/diminuição percentual de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                      | 91  |
| Tabela 37 – Aumento/diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $tAd$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. ....                        | 91  |
| Tabela 38 – Aumento/diminuição percentual de $ER$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                                   | 92  |
| Tabela 39 - Aumento/diminuição percentual de $\delta_{IPA}$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                         | 94  |
| Tabela 40 – Aumento/diminuição percentual de $PIPA$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                                 | 95  |
| Tabela 41 – Aumento/diminuição percentual de $PA$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                                   | 95  |
| Tabela 42 – Aumento/diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....  | 97  |
| Tabela 43 – Aumento/diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $tAd$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. .... | 99  |
| Tabela 44 – Aumento/diminuição percentual de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                   | 102 |
| Tabela 45 – Aumento/diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $\theta$ e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. ....                     | 102 |
| Tabela 46 – Aumento/diminuição percentual de $ER$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                                | 103 |
| Tabela 47 - Aumento/diminuição percentual de $\delta_{IPA}$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                      | 106 |
| Tabela 48 – Aumento/diminuição percentual de $PIPA$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                              | 106 |

|                                                                                                                                                                                                    |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 49 – Aumento/diminuição percentual de $PA$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                                                          | 107 |
| Tabela 50 – Aumento/diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                         | 109 |
| Tabela 51 – Aumento/diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $\theta$ e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. ....                        | 111 |
| Tabela 52 - Fatores de controlo e os níveis associados a cada um que devem ser considerados para realizar uma análise pelo MT no Minitab®. ....                                                    | 113 |
| Tabela 53 - Número de combinações propostas pelo software, relativamente aos fatores e níveis de controlo definidos. ....                                                                          | 114 |
| Tabela 54 - Valores de $\delta rotura$ e $P_{m\acute{a}x}$ obtidos para cada uma das geometrias propostas pelo Minitab®, para o caso do adesivo Araldite® AV138. ....                              | 114 |
| Tabela 55 - Valores de $\delta rotura$ e $P_{m\acute{a}x}$ obtidos para cada uma das geometrias propostas pelo Minitab®, para o adesivo Araldite® 2015. ....                                       | 115 |
| Tabela 56 - Valores de $\delta rotura$ e $P_{m\acute{a}x}$ obtidos para cada uma das geometrias propostas pelo Minitab®, para o adesivo Sikaforce® 7752. ....                                      | 115 |
| Tabela 57 - Aumento/diminuição percentual da ductilidade e da resistência da junta em função da variação dos níveis de controlo definidos para cada fator, relativamente à geometria de base. .... | 116 |
| Tabela 58 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....               | 119 |
| Tabela 59 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® AV138 e variável de saída $\delta rotura$ ..                                                                                               | 119 |
| Tabela 60 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....                                                                                      | 120 |
| Tabela 61 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....                                                                        | 120 |
| Tabela 62 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída $P_{m\acute{a}x}$ . ....             | 121 |
| Tabela 63 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída $P_{m\acute{a}x}$ . ...                                                                                        | 121 |
| Tabela 64 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída $P_{m\acute{a}x}$ . ....                                                                                    | 121 |
| Tabela 65 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída $P_{m\acute{a}x}$ . ....                                                                      | 122 |
| Tabela 66 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....                | 122 |
| Tabela 67 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $\delta rotura$ . .                                                                                             | 123 |
| Tabela 68 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....                                                                                       | 123 |
| Tabela 69 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....                                                                         | 123 |
| Tabela 70 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $P_{m\acute{a}x}$ . ....              | 124 |
| Tabela 71 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $P_{m\acute{a}x}$ . ....                                                                                        | 124 |
| Tabela 72 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $P_{m\acute{a}x}$ . ....                                                                                     | 125 |

|                                                                                                                                                                                     |     |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 73 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída $P_{máx}$ .....                                                                 | 125 |
| Tabela 74 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $\delta rotura$ ..... | 125 |
| Tabela 75 - Sumário do modelo, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $\delta rotura$ .                                                                               | 126 |
| Tabela 76 - ANOVA para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $\delta rotura$ .<br>.....                                                                   | 126 |
| Tabela 77 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....                                                         | 127 |
| Tabela 78 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $P_{máx}$ . ....      | 127 |
| Tabela 79 - Sumário do modelo, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $P_{máx}$ ....                                                                                  | 128 |
| Tabela 80 - ANOVA para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $P_{máx}$ .<br>.....                                                                         | 128 |
| Tabela 81 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída $\delta rotura$ . ....                                                         | 128 |
| Tabela 82 - Geometrias de juntas tubulares a analisar, em função da variação de $\gamma$ e $\beta$ .....                                                                            | 130 |
| Tabela 83 – Aumento percentual de $P_{máx}$ em função de $\gamma$ , relativamente à geometria de base.<br>.....                                                                     | 131 |
| Tabela 84 - Aumento percentual de $\delta rotura$ em função de $\gamma$ , relativamente à geometria de base, para o caso do adesivo Araldite® AV138. ....                           | 131 |
| Tabela 85 – Aumento percentual de $ER$ em função de $\gamma$ , relativamente à geometria de base. ..                                                                                | 131 |
| Tabela 86 – Aumento percentual de $PA$ em função de $\gamma$ , relativamente à geometria de base. ..                                                                                | 132 |
| Tabela 87 - Aumento percentual de $\delta IPA$ em função de $\gamma$ , relativamente à geometria de base.                                                                           | 133 |
| Tabela 88 – Aumento percentual de $PIPA$ em função de $\gamma$ , relativamente à geometria de base.<br>.....                                                                        | 133 |
| Tabela 89 – Aumento/diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$ em função do path 1 e de $\gamma$ , relativamente à geometria de base. ....                              | 134 |
| Tabela 90 – Aumento percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$ em função do path 1 e de $\gamma$ , relativamente à geometria de base. ....                                        | 136 |
| Tabela 91 – Aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de $\beta$ e de $P_{máx}$ , relativamente à geometria de base. ....                                     | 138 |
| Tabela 92 - Aumento/diminuição percentual de $\delta rotura$ em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base. ....                                                         | 138 |
| Tabela 93 – Aumento/diminuição percentual de $ER$ em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                    | 138 |
| Tabela 94 – Aumento/diminuição percentual de $PA$ em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                    | 139 |
| Tabela 95 - Diminuição percentual de $\delta IPA$ em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base.<br>.....                                                                | 139 |
| Tabela 96 – Diminuição percentual de $PIPA$ em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base.<br>.....                                                                      | 140 |
| Tabela 97 – Aumento/diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$ em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base. ....                                           | 140 |

|                                                                                                                                                                                                                                        |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 98 – Aumento/diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                     | 141 |
| Tabela 99 - Geometrias de juntas tubulares bi-adesivas a analisar, em função de $L1$ . ....                                                                                                                                            | 143 |
| Tabela 100 – Aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de $L1$ e de $P_{m\acute{a}x}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. .... | 144 |
| Tabela 101 – Aumento/diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. ....                           | 145 |
| Tabela 102 – Aumento/diminuição percentual de $ER$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de referência. ....                                  | 145 |
| Tabela 103 – Diminuição percentual de $PA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. ....                                                | 146 |
| Tabela 104 - Aumento percentual de $\delta IPA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. ....                                           | 146 |
| Tabela 105 – Aumento percentual de $PIPA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. ....                                                 | 147 |
| Tabela 106 – Diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. ....               | 147 |
| Tabela 107 – Diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. ....              | 148 |
| Tabela 108 – Diminuição percentual da resistência da junta em função de $L1$ e de $P_{m\acute{a}x}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base. ....        | 150 |
| Tabela 109 - Diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. ....                                                                     | 150 |
| Tabela 110 – Diminuição percentual de $ER$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base. ....                                               | 150 |
| Tabela 111 – Diminuição percentual de $PA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base. ....                                               | 151 |
| Tabela 112 – Aumento/diminuição percentual de $\delta IPA$ em função de $L1$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                                 | 152 |
| Tabela 113 – Aumento/diminuição percentual de $PIPA$ em função de $L1$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                                       | 152 |
| Tabela 114 – Diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base. ....              | 153 |
| Tabela 115 – Diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base. ....             | 153 |
| Tabela 116 - Propriedades elásticas do PRFC. Adaptado de Campilho et al. [5]. ....                                                                                                                                                     | 155 |
| Tabela 117 - Propriedades coesivas interlaminares do PRFC. Adaptado de Araújo et al. [229]. ....                                                                                                                                       | 155 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 118 - Geometrias de juntas tubulares bi-adesivas a analisar em função de $L1$ , para o caso em que o aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                                                                                                                                     | 156 |
| Tabela 119 – Aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de $L1$ e de $P_{máx}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.....                                   | 157 |
| Tabela 120 – Aumento/diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.....                                                      | 157 |
| Tabela 121 – Aumento/diminuição percentual de $ER$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                 | 158 |
| Tabela 122 – Diminuição percentual de $PA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                          | 159 |
| Tabela 123 - Aumento/diminuição percentual de $\delta_{IPA}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                        | 159 |
| Tabela 124 – Diminuição percentual de $PIPA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                        | 159 |
| Tabela 125 – Diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$ em função de $L1$ e do path correspondente à sobreposição adesiva, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....  | 161 |
| Tabela 126 - Valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                   | 161 |
| Tabela 127 - Valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                   | 161 |
| Tabela 128 – Diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$ em função de $L1$ e do path correspondente à sobreposição adesiva, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. .... | 163 |
| Tabela 129 - Valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                  | 163 |
| Tabela 130 - Valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                  | 164 |
| Tabela 131 – Diminuição percentual da resistência da junta em função de $L1$ e de $P_{máx}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.....                                           | 166 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                           |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 132 – Diminuição percentual de $\delta_{rotura}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                            | 166 |
| Tabela 133 – Diminuição percentual de $ER$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                                         | 166 |
| Tabela 134 - Diminuição percentual de $PA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                                         | 167 |
| Tabela 135 - Aumento/diminuição percentual de $\delta_{IPA}$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                       | 167 |
| Tabela 136 – Diminuição percentual de $PIPA$ em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....                                                                                       | 168 |
| Tabela 137 – Diminuição percentual de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L1$ e do path correspondente à sobreposição adesiva para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. ....          | 169 |
| Tabela 138 - Valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                          | 170 |
| Tabela 139 - Valores de $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                          | 170 |
| Tabela 140 – Aumento/diminuição percentual de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ em função de $L1$ e do path correspondente à sobreposição adesiva para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. .... | 172 |
| Tabela 141 - Valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                         | 172 |
| Tabela 142 - Valores de $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ obtidos em função de $L1$ e do path correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                         | 172 |
| Tabela 143 - Preço dos adesivos por kg, de acordo com o revendedor oficial de adesivos estruturais SILMID [230]. ....                                                                                                                                                                                                     | 175 |
| Tabela 144 – Custo de produção das partes que integram o molde, considerando o tempo estimado dos ciclos majorado e de preparação das máquinas. ....                                                                                                                                                                      | 177 |
| Tabela 145 – Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas, em função do adesivo utilizado e de $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                         | 178 |
| Tabela 146 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função do adesivo utilizado e de $L0$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                | 178 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                          |     |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 147 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função do adesivo utilizado e de $tAd$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                              | 179 |
| Tabela 148 - Comparação do aumento percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função de $\gamma$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                             | 180 |
| Tabela 149 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função de $\beta$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                   | 180 |
| Tabela 150 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas tubulares bi-adesivas analisadas, em função dos adesivos utilizados e de $L1$ , relativamente à geometria de base. ....                                          | 181 |
| Tabela 151 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas tubulares bi-adesivas analisadas cujo aderente não hidroformado é de PRFC, em função dos adesivos utilizados e de $L1$ , relativamente à geometria de base. .... | 181 |
| Tabela 152 - Parâmetros coesivos em tração e corte para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce®. ....                                                                                                                                                                                   | 217 |
| Tabela 153 - Variáveis de saída a extrair em função do <i>path</i> a analisar, no âmbito do estudo do efeito de $\gamma$ . ....                                                                                                                                                                          | 238 |
| Tabela 154 - Folha de configuração para a programação da fresadora, para o caso da parte inferior do molde. ....                                                                                                                                                                                         | 260 |
| Tabela 155 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela primeira operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. ....                                                                                                                                                           | 261 |
| Tabela 156 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela segunda operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. ....                                                                                                                                                            | 262 |
| Tabela 157 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela terceira operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. ....                                                                                                                                                           | 263 |
| Tabela 158 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. ....                                                                                                                                                             | 264 |
| Tabela 159 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quinta operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. ....                                                                                                                                                             | 265 |
| Tabela 160 - Folha de configuração para a programação da máquina, para o caso da parte superior do molde. ....                                                                                                                                                                                           | 267 |
| Tabela 161 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela primeira operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde. ....                                                                                                                                                           | 268 |
| Tabela 162 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela segunda operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde. ....                                                                                                                                                            | 269 |
| Tabela 163 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela terceira operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde. ....                                                                                                                                                           | 270 |
| Tabela 164 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde. ....                                                                                                                                                             | 271 |
| Tabela 165 - Folha de configuração para a programação do torno de dois eixos, para o caso do pistão/êmbolo. ....                                                                                                                                                                                         | 273 |
| Tabela 166 - Folha de configuração da ferramenta responsável pelas primeiras três operações de torneamento para obter o pistão/êmbolo. ....                                                                                                                                                              | 274 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 167 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo. ....                                                                                                                                   | 276 |
| Tabela 168 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quinta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo. ....                                                                                                                                   | 277 |
| Tabela 169 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela sexta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo. ....                                                                                                                                    | 278 |
| Tabela 170 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $dEANH$ . ....                                                                                                                                                          | 279 |
| Tabela 171 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $dEANH$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                                      | 279 |
| Tabela 172 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $L0$ . ....                                                                                                                                                             | 280 |
| Tabela 173 - Aumento/diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $L0$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                                 | 280 |
| Tabela 174 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $tAd$ . ....                                                                                                                                                            | 281 |
| Tabela 175 - Aumento/diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $tAd$ , relativamente à geometria de base. ....                                                                                                                | 281 |
| Tabela 176 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138. ....                                                                                                                         | 281 |
| Tabela 177 - Aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138, relativamente à geometria de base. ....                                                                                        | 282 |
| Tabela 178 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138. ....                                                                                                                          | 282 |
| Tabela 179 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138, relativamente à geometria de base. ....                                                                                      | 282 |
| Tabela 180 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. ....                                                                            | 283 |
| Tabela 181 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base. ....                                        | 283 |
| Tabela 182 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. ....                                                                           | 283 |
| Tabela 183 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base. ....                                       | 284 |
| Tabela 184 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                  | 284 |
| Tabela 185 - Aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. .... | 284 |
| Tabela 186 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. ....                                 | 285 |

|                                                                                                                                                                                                                                                                     |     |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|
| Tabela 187 - Aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de $L1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base..... | 285 |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----|

## LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES

### Lista de Siglas

|         |                                                   |
|---------|---------------------------------------------------|
| 4ENF    | <i>Four-Point End-Notched Flexure</i>             |
| AAT     | Adesivo de Altas Temperaturas                     |
| ABT     | Adesivo de Baixas Temperaturas                    |
| ADCB    | <i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i>          |
| Adj MS  | Quadrados Médios Ajustados                        |
| Adj SS  | Somas Ajustadas dos Quadrados                     |
| ANOVA   | Análise de (of) Variância                         |
| ATDCB   | <i>Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam</i>  |
| CAX4    | <i>4-Node Bilinear Axisymmetric Quadrilateral</i> |
| CLS     | <i>Cracked-Lap Shear</i>                          |
| CNS     | <i>Critical Normal Strain</i>                     |
| COHAX4  | <i>4-Node Axisymmetric Cohesive Element</i>       |
| DCB     | <i>Double-Cantilever Beam</i>                     |
| DOE     | <i>Design of Experiments</i>                      |
| EF      | Elementos Finitos                                 |
| ELS     | <i>End-Loaded Split</i>                           |
| ENF     | <i>End-Notched Flexure</i>                        |
| EUA     | Estados Unidos da América                         |
| GL      | Graus totais de Liberdade                         |
| H0      | Hipótese Nula                                     |
| HRR     | Hutchinson-Rice-Rosengreen                        |
| ISEP    | Instituto Superior de Engenharia do Porto         |
| ISSF    | <i>Intensity of Singular Stress Fields</i>        |
| JSS     | Junta de Sobreposição Simples                     |
| JST     | Junta de Sobreposição Tubular                     |
| JTRE    | Junta Tubular de Ressalto Exterior                |
| LED     | <i>Light-Emitting Diode</i>                       |
| MDC     | Modelos de Dano Coesivo                           |
| MEF     | Método de Elementos Finitos                       |
| MEFX    | Método de Elementos Finitos eXtendido             |
| MFF     | Mecânica da Fratura Finita                        |
| MFLE    | Mecânica da Fratura Linear Elástica               |
| MMB     | <i>Mixed-Mode Bending</i>                         |
| MMF     | <i>Mixed-Mode Flexure</i>                         |
| MT      | Método de Taguchi                                 |
| P.Porto | Instituto Politécnico do Porto                    |

|         |                                               |
|---------|-----------------------------------------------|
| PEBA    | <i>Polyether Block Amide</i>                  |
| PEEQ    | <i>Equivalent Plastic Strain</i>              |
| PRFC    | Polímero Reforçado com Fibra de Carbono       |
| PU      | Poliuretano                                   |
| SCG     | Sistema de Coordenadas Global                 |
| SDEG    | <i>Scalar Stiffness Degradation</i>           |
| SE Coef | Erro Padrão dos Coeficientes Estimados        |
| Seq SS  | Somas Sequenciais de Quadrados                |
| SERR    | <i>Strain Energy Release Rates</i>            |
| SI      | Sistema Internacional                         |
| SIF     | <i>Stress Intensity Factors</i>               |
| SIGTERM | <i>Process Terminated by External Request</i> |
| SMC     | <i>Sheet Moulding Compound</i>                |
| SN      | Sinal-para-Ruído                              |
| TAST    | <i>Thick-Adherend Shear Test</i>              |
| TDCB    | <i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>         |
| TFFV    | Técnica do Fecho da Fenda Virtual             |
| THF     | <i>Tubular Hydroforming</i>                   |

### Lista de Símbolos

|                  |                                                      |         |
|------------------|------------------------------------------------------|---------|
| T                | 150% de $P_{máx}$ para iniciar a propagação da fenda | N       |
| h                | Altura mínima do aderente                            | mm      |
| $\alpha$         | Ângulo do chanfro                                    | °       |
| $\beta$          | Ângulo do chanfro do aderente exterior hidroformado  | °       |
| $\gamma$         | Ângulo do filete adesivo                             | °       |
| $\theta$         | Ângulo do ressalto exterior                          | °       |
| $\Delta P_{máx}$ | Aumento percentual de $P_{máx}$                      | %       |
| Coef             | Coeficientes estimados do modelo                     | N ou mm |
| $\nu$            | Coeficiente de Poisson                               | -       |
| p                | Comprimento da fenda                                 | mm      |
| $a_0$            | Comprimento de pré-fenda inicial                     | mm      |
| $L_0$            | Comprimento de sobreposição                          | mm      |
| $L_{AH}$         | Comprimento do aderente hidroformado                 | mm      |
| $L_T$            | Comprimento total da junta adesiva tubular           | mm      |
| k                | Constante de proporcionalidade                       | -       |
| $\varepsilon$    | Deformação                                           | -       |
| $\varepsilon_f$  | Deformação de rotura à tração                        | %       |
| $\gamma_f$       | Deformação de rotura ao corte                        | %       |
| $\delta$         | Deslocamento                                         | mm      |

|                               |                                                              |         |
|-------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------|
| $\delta_{IPA}$                | Deslocamento correspondente ao início de PA                  | mm      |
| $\delta_{rotura}$             | Deslocamento de rotura                                       | mm      |
| $U_2$                         | Deslocamento na direção axial da junta                       | mm      |
| $S_p$                         | Desvio padrão dos valores reais e estimados                  | N ou mm |
| $d_{EAH}$                     | Diâmetro exterior do aderente hidroformado                   | mm      |
| $d_{EANH}$                    | Diâmetro exterior do aderente não hidroformado               | mm      |
| $d_{IAH}$                     | Diâmetro interior do aderente hidroformado                   | mm      |
| $d_{IANH}$                    | Diâmetro interior do aderente não hidroformado               | mm      |
| ER                            | Energia de Rotura                                            | N.m     |
| ta                            | Espessura do adesivo                                         | mm      |
| t <sub>SE</sub>               | Espessura do tubo exterior                                   | mm      |
| t <sub>SI</sub>               | Espessura do tubo interior                                   | mm      |
| t <sub>Ad</sub>               | Espessura dos aderentes                                      | mm      |
| F <sub>value</sub> /t         | Estatística de teste                                         | -       |
| P                             | Força/Carga                                                  | N       |
| P <sub>IPA</sub>              | Força/Carga correspondente ao início de PA                   | N       |
| P <sub>máx</sub>              | Força/Carga máxima                                           | N       |
| P <sub>máx méd</sub>          | Força/Carga máxima média                                     | N       |
| B                             | Largura de cada aderente                                     | mm      |
| m                             | Massa                                                        | kg      |
| G                             | Módulo de elasticidade transversal                           | GPa     |
| E                             | Módulo de Young                                              | GPa     |
| M <sub>m</sub>                | Momento torsor máximo                                        | kN.m    |
| n                             | Número de tentativas de cada experiência                     | -       |
| L <sub>1</sub>                | Percentagem de adesivo dúctil relativamente a L <sub>0</sub> | mm      |
| R <sup>2</sup>                | Percentagem de variação na resposta                          | %       |
| R <sup>2</sup> <sub>adj</sub> | Percentagem de variação na resposta ajustada                 | %       |
| PA                            | Plastificação dos aderentes                                  | %       |
| P <sub>value</sub>            | Probabilidade que mede a verosimilhança de H <sub>0</sub>    | -       |
| R <sub>ER</sub>               | Raio exterior ressalto                                       | mm      |
| R <sub>IR</sub>               | Raio interior ressalto                                       | mm      |
| RF <sub>2</sub>               | Reação ao longo da direção axial da junta                    | N       |
| y <sub>i</sub>                | Resposta i                                                   | -       |
| G <sub>iC</sub>               | Taxa de libertação de energia no modo i (i = I, II e III)    | N/m     |
| T                             | Temperatura                                                  | °C      |
| G <sub>IC</sub>               | Tenacidade à tração                                          | N/mm    |
| G <sub>IIC</sub>              | Tenacidade ao corte                                          | N/mm    |
| $\sigma_y$                    | Tensão de arrancamento                                       | MPa     |
| $\sigma_{y\text{ máx}}$       | Tensão de arrancamento máxima                                | MPa     |

|                         |                                                |     |
|-------------------------|------------------------------------------------|-----|
| $\sigma_{yt}$           | Tensão de cedência à tração                    | MPa |
| $\tau_y$                | Tensão de cedência ao corte                    | MPa |
| $\tau_{xy}$             | Tensão de corte                                | MPa |
| $\tau_{xy \text{ máx}}$ | Tensão de corte máxima                         | MPa |
| $\tau_{avg}$            | Tensão de corte média                          | MPa |
| $\sigma_f$              | Tensão de rotura à tração                      | MPa |
| $\tau_f$                | Tensão de rotura ao corte                      | MPa |
| S                       | Tensão de Von Mises                            | MPa |
| $y_0$                   | Valor alvo                                     | -   |
| $y$                     | Valor observado da característica da qualidade | -   |
| $s^2$                   | Variância dos resultados (resposta)            | -   |
| $\mu$                   | Variável de dano viscosa                       | -   |

### Lista de Unidades

|     |              |
|-----|--------------|
| °   | Grau         |
| GPa | Giga Pascal  |
| h   | Hora         |
| J   | Joule        |
| kg  | Quilograma   |
| kN  | Quilo Newton |
| min | Minuto       |
| mm  | Milímetro    |
| MPa | Mega Pascal  |
| N   | Newton       |
| s   | Segundo      |

## 1. INTRODUÇÃO

A presente dissertação foi realizada no âmbito da Unidade Curricular (UC) Dissertação/Projeto/Estágio, que se inclui no segundo semestre do segundo ano do plano de estudos do Mestrado em Engenharia Mecânica – Construções Mecânicas do ISEP. O Capítulo 0 é reservado à contextualização do tema da presente dissertação, aos objetivos da revisão bibliográfica e do desenvolvimento numérico, e ainda à estrutura do presente relatório. O presente Capítulo visa apresentar o trabalho de investigação, orientando a leitura dos Capítulos seguintes.

### 1.1. Contextualização

A união de materiais e os processos de ligação associados ao fabrico de estruturas têm vindo a ser aprimorados. Historicamente, foram desenvolvidos diferentes métodos e técnicas dissimilares de ligação adesiva, e esta prática data de uma época cujos registos históricos nunca se recuperaram. Ainda que um projeto de junta corrente difira de uma união pré-histórica, ambos os períodos se aproximam pela necessidade de unir componentes dissimilares [1]. As ligações adesivas envolvem tecnologias, ciências e áreas de investigação como a Física, Química e Mecânica. As ligações adesivas têm um vasto campo de aplicações e são utilizadas há vários séculos. No entanto, estas só evoluíram significativamente nas últimas décadas [2]. Este tipo de ligações permite uma distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada, redução da concentração das tensões, melhor resistência à fadiga das ligações, elevada capacidade de amortecer vibrações, vedação das ligações e o isolamento acústico, e permite ainda a redução do peso da estrutura. Este processo de ligação permite a união de materiais homólogos e/ou dissimilares, apresenta uma boa resistência à corrosão, do ponto de vista estético é muitas das vezes invisível e permite unir materiais sem limitações geométricas, agilizando o projeto. No entanto, também apresenta desvantagens, de entre as quais se destacam a fraca resistência à propagação de fissuras, esforços de arrancamento e de clivagem, debilidade quando exposta de forma contínua a temperaturas elevadas, tempo de vida limitado, e a exigência de precauções ambientais e de saúde pública por conta da toxicidade de alguns adesivos. Uma junta adesiva pode ser de difícil inspeção e não existe um critério de dimensionamento universal que permita validar o projeto de uma estrutura [3].

O recurso a técnicas de ligação adesiva como um processo de ligação deve ser tido em conta relativamente à soldadura e aos processos de ligação aparafusada e rebitada. É de notar que em determinadas aplicações, as ligações adesivas simplificam os problemas que eram resolvidos pelos métodos mais convencionais, pela redução da concentração de tensões e do peso final da estrutura, facilitando ainda a automatização do processo [4]. Uma vez que a fiabilidade das estruturas adesivas é determinada pela durabilidade das suas ligações, é fundamental, para o projeto destas estruturas, a disponibilidade de métodos numéricos ou modelos de dano que devem ser aplicados para prever o comportamento à fratura das mesmas, de modo a minimizar os custos e acelerar o processo de fabrico. Como exemplo, a aplicação de Modelos de Dano Coesivo (MDC) é a técnica mais difundida e validada na área de investigação, e a que conduz a maior eficiência e velocidade de execução de um determinado projeto, permitindo a análise numérica de uma junta de ligação adesiva com base no Método de Elementos Finitos (MEF) [5].

Com base nas exigências e nos requisitos de um gabinete de projeto, é um bom princípio definir antecipadamente as condições, os processos de ligação envolvidos e validar as diferentes propostas

de solução (numericamente). Desta maneira, é estritamente necessário definir um modelo de dano que se adeque à geometria das juntas a analisar e que permita estimar a resistência mecânica da ligação, evitando o desperdício de material para definir uma geometria ótima. A opção por juntas adesivas tubulares pode assentar na necessidade de reduzir o peso final da estrutura, na capacidade de resistir a solicitações e carregamentos exigentes e na homogeneidade da distribuição do campo de tensões, uma vez que a transferência de carga é efetuada por meio de áreas substancialmente maiores, o que permite evitar a concentração de tensões singulares decorrentes da furação dos aderentes para fixação dos parafusos. Estes requisitos não são cumpridos por outro processo de ligação de forma tão satisfatória nem por outra geometria de junta, o que implica que as juntas adesivas tubulares sejam amplamente utilizadas em estruturas na indústria aeroespacial e automóvel [6, 7]. No entanto, é de notar uma lacuna no conhecimento atual, sendo esta a principal motivação da escolha do tema de dissertação. No que diz respeito à área de investigação das juntas adesivas tubulares, e uma vez que é um tópico emergente, existe ainda uma escassez de trabalhos de investigação, quando comparado com as geometrias de juntas planas.

## 1.2. Objetivos

Os objetivos da presente dissertação consistem em: caracterizar pormenorizadamente as diferentes geometrias de junta a analisar; determinar os parâmetros materiais de cada adesivo; validar os modelos coesivos utilizados na previsão da resistência mecânica das juntas adesivas; avaliar de forma criteriosa a resistência mecânica dos conjuntos, a plastificação máxima dos aderentes, a ductilidade das juntas, a evolução da variável do dano para a carga máxima e ainda a distribuição do quociente das tensões de corte,  $\tau_{xy}$ , e arrancamento,  $\sigma_y$ , sobre a tensão de corte média,  $\tau_{avg}$ ; apresentar uma técnica estatística que permita obter uma menor combinação de juntas com possibilidade de melhoria das propriedades mecânicas; acrescentar valor à literatura existente através de propostas de alterações geométricas e abordagem da técnica de hidroformagem; realizar uma análise de mercado e comparar os ganhos percentuais de resistência e ductilidade com o investimento requerido em moldes, matéria-prima e trabalho de maquinagem suplementar.

## 1.3. Estrutura da dissertação

Para uma melhor compreensão da estrutura da dissertação, o presente trabalho encontra-se subdividido em quatro Capítulos principais, seguidos das referências bibliográficas, anexos e apêndices. No início de cada Capítulo foi realizada uma breve introdução acerca dos temas em estudo e respetiva análise.

No presente Capítulo, é feita uma contextualização acerca do tema da presente dissertação, são abordados os objetivos do trabalho de investigação e a estrutura do relatório.

O Capítulo 2 é o espaço reservado à revisão bibliográfica propriamente dita. É apresentada toda a informação considerada relevante, que visa promover o entendimento dos conceitos afetos ao trabalho de investigação, assim como é exposto o estado da arte em cada Subcapítulo. A revisão bibliográfica subdivide-se em 5 Subcapítulos. No Subcapítulo 2.1 é introduzida a técnica de ligação e esta é comparada com outros métodos mais convencionais, são apresentadas as vantagens e desvantagens das configurações das juntas adesivas mais comercializadas e a aplicação destas no mercado. O Subcapítulo 2.2 é reservado aos modelos e métodos de previsão de resistência

aplicáveis a juntas de ligação adesiva. Nesta secção da dissertação, são abordados todos os modelos considerados relevantes e que permitem prever a resistência e os modos de falha das juntas adesivas, traçar possíveis caminhos de propagação de fissuras, e perceber até que ponto as geometrias podem ser otimizadas. O Subcapítulo 2.3 é responsável pela análise e revisão bibliográfica de juntas adesivas tubulares, cuja configuração foi empregue no desenvolvimento numérico. No presente Subcapítulo é conferido especial ênfase aos MDC, que contemplam as análises experimental e numérica da dissertação. Os Subcapítulos 2.4 e 2.5 foram criados com o propósito de introduzir o processo de hidroformagem tubular e o Método de Taguchi (MT), respetivamente, que consistem numa técnica e num modelo estatístico abordado em detalhe ao longo do Capítulo 3. O desenvolvimento numérico da dissertação contempla propostas de alterações geométricas, e os Subcapítulos 2.6 e 2.7 foram criados com o objetivo de apresentar toda a informação teórica considerada relevante para realizar o estudo do comportamento de juntas tubulares bi-adesivas, cujo aderente não hidroformado é de alumínio ou de um material compósito, respetivamente.

O Capítulo 3 é reservado ao desenvolvimento numérico da presente dissertação e encontra-se subdividido em cinco Subcapítulos principais, que correspondem aos Objetivos do desenvolvimento numérico, Materiais e métodos utilizados, Validação dos modelos coesivos para previsão da resistência da junta, Estudo numérico e Análise de mercado. O Subcapítulo 3.1 é reservado aos objetivos do desenvolvimento numérico da dissertação. No Subcapítulo 3.2, correspondente aos Materiais e métodos utilizados, foram abordadas as diferentes geometrias a analisar, requisitos e limitações do presente trabalho e foram caracterizados os materiais selecionados. De seguida abordaram-se as condições de pré-processamento dos modelos e da análise numérica; e os parâmetros materiais de cada adesivo e aderente utilizado. O Subcapítulo 3.3 foi reservado para validar os modelos coesivos utilizados na previsão da resistência mecânica das juntas adesivas. O Subcapítulo 3.4 representa a grande maioria do volume de trabalho numérico realizado no presente trabalho de investigação, e contempla o efeito da variação dos parâmetros em estudo de forma individual e as propostas de alterações geométricas. O MT foi apresentado como uma técnica fundamental para auxiliar um gabinete de projeto, muito por conta das vantagens que apresenta face ao estudo intensivo de fazer variar cada parâmetro geométrico das geometrias de junta analisadas. No Subcapítulo 3.5 foi realizada uma análise de mercado. A avaliação das variáveis de saída pretendidas e do comportamento das juntas adesivas analisadas numericamente permite ao utilizador obter conclusões muito precisas acerca da sua aplicabilidade a nível industrial.

O Capítulo 4 antecede os Capítulos referentes às Referências Bibliográficas, Anexos e Apêndices, e é um espaço reservado para as conclusões finais e propostas de trabalhos futuros.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente Capítulo pretende alargar a compreensão das ligações adesivas como um meio para a montagem e acréscimo de valor a produtos acabados. Ao longo do Capítulo 2, o leitor agregará conhecimento suficiente ao nível dos processos complexos relativos às ligações adesivas e os diferentes critérios e modelos que formam a sua base.

### 2.1. Ligações adesivas

A união de materiais e os processos de ligação para o projeto de estruturas têm vindo a ser aprimorados. Ao longo dos anos, diferentes métodos foram adotados para acrescentar valor a uma junta de ligação. A origem da aplicação desta técnica data de uma época cujos registos históricos nunca se recuperaram. Ainda que um projeto de junta corrente difira de uma união pré-histórica, ambos os períodos se aproximam pela necessidade de montar vários componentes e, por vezes, unir materiais dissimilares. Inicialmente, foram utilizados métodos rudimentares para garantir a união de materiais, e com a evolução do tempo, as técnicas foram sendo aprimoradas. De acordo com evidências arqueológicas, a matéria-prima utilizada neste tipo de ligações existia em abundância na natureza e era de fácil obtenção e transformação. Os pioneiros procuravam aproveitar o melhor das características e propriedades dos materiais envolvidos. A sofisticação destas técnicas e investigações mais recentes abrangem uma ampla variedade de uniões mecânicas, processos de soldadura, ligações adesivas, vedantes, argamassas e outros ligantes. Os modelos e técnicas mais recentes permitem obter estruturas de dimensões muito superiores, assim como promovem o transporte do conjunto como uma unidade. O aprimorar das técnicas de ligação permite combinar materiais dissimilares, assim como à estrutura final adquirir características singulares de cada um dos constituintes. As propriedades do produto final são normalmente superiores às dos aderentes [1].

As ligações adesivas envolvem tecnologias, ciências e áreas de investigação como a Física, Química e Mecânica. Da interseção das anteriores destacam-se a ciência das superfícies, o projeto de junta, materiais poliméricos e a ciência da adesão. As ligações adesivas têm um vasto campo de aplicações e são aplicadas desde há vários séculos, no entanto, estas só evoluíram significativamente nas últimas décadas [2].

Estão associadas inúmeras vantagens a este tipo de ligação, de entre as quais se destacam: distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada; redução da concentração das tensões; melhoria da resistência à fadiga das ligações; elevada capacidade de amortecimento de vibrações; vedação das ligações e o isolamento acústico; redução do peso da estrutura. Este processo de ligação permite a união de materiais homólogos e/ou dissimilares e apresenta uma boa resistência à corrosão. Do ponto de vista estético, as ligações adesivas são maioritariamente invisíveis e permitem unir materiais sem limitações geométricas [2]. No entanto, também apresenta desvantagens, de entre as quais se destacam: fraca resistência à propagação de fissuras, aos esforços de arrancamento e de clivagem; debilidade quando exposta de forma contínua a temperaturas elevadas (fluência); tempo de vida limitado e a toxicidade de alguns adesivos que exigem precauções ambientais e de saúde pública. Uma junta adesiva pode ser de difícil inspeção e não existe um critério de dimensionamento universal que permita validar o projeto de uma estrutura [3].

### 2.1.1.Contextualização histórica

Quando o âmbito do estudo são as ligações adesivas, é desafiante redigir acerca da sua origem, por não ser fácil datar com exatidão a primeira aplicação e respetivo método empregue, assim como não é possível identificar os pioneiros desta área de estudo. Algumas evidências arqueológicas sugerem que estes métodos são utilizados há milhares de anos. Acredita-se que as motivações dos pioneiros se resumem na procura por uma maior resistência global da estrutura projetada, na minimização dos custos de fabrico e na conceção de um produto final mais acessível para o comprador. Paul Fay (Ford *Motor Company*) acredita que a evolução natural desta área de estudo começou pela aplicação de matérias-primas dotadas de elevada viscosidade para garantir a união dos materiais. Embora forneça poucos detalhes sobre o tema, Pliny the Elder, autor e cientista romano, afirmou que o primeiro adesivo foi proposto por Daedalus (Pliny, 50 d.C.), ainda que sustente a sua crença no facto de este ter dedicado grande parte da sua vida a aprimorar técnicas afetas à escultura, arte e ainda construção [8]. Evidências arqueológicas mais atuais contrariam este pressuposto, e datam a origem do uso dos adesivos anterior a Daedalus. Foram encontrados utensílios e ferramentas na Alemanha da era Neandertal (80.000 anos), com vestígios de uma substância cujas propriedades adesivas eram obtidas a partir da resina de bétula [9]. Ferramentas em betume com 40000 anos de idade foram encontradas na Síria, e existem evidências de que estes utensílios foram submetidos a elevadas temperaturas, de modo a promover a união das ferramentas aos respetivos cabos. É de notar que o fabrico destes produtos exigiu um processo complexo e minucioso do controlo de temperatura, possivelmente na ausência de oxigénio, e revelou apetências dos Neandertais para conceber adesivos sofisticados [8].

### 2.1.2.Introdução à técnica de ligação

Este tipo de ligação consiste na união de dois materiais através da aplicação de um adesivo. Designam-se os materiais a ligar por aderentes, no caso de se tratar do material a incorporar na ligação, ou aderentes, quando a ligação já tiver sido efetuada. A adesão molecular é explicada como a atração entre moléculas de diferentes substâncias, resultante das forças intermoleculares que se estabelecem. A adesão mecânica entende-se como a adesão entre superfícies nas quais o adesivo une o conjunto por ancoragem e encravamento mecânico nas irregularidades superficiais dos aderentes. Um adesivo pode ser entendido como um material de natureza polimérica capaz de garantir a união entre dois aderentes e de resistir à sua separação, pela combinação de forças adesivas e/ou coesivas. Um adesivo é considerado estrutural se a resistência ao corte da ligação exceder o 6,9 [MPa], sendo responsável pela rigidez e resistência da estrutura [10]. Uma junta adesiva é o conjunto formado pelos aderentes, o adesivo, o primário, sempre que exista, e todas as interfaces associadas. A cura garante um aumento do grau de reticulação e consequente aumento da temperatura de transição vítrea e das propriedades mecânicas. O tempo de cura é o intervalo de tempo durante o qual o adesivo é sujeito a determinadas condições de pressão e temperatura para processar a reação [11]. O processo de ligação resume-se nas seguintes etapas: seleção do adesivo em função das informações do material (condições de carregamento, temperaturas de serviço e informações sobre o fabrico, entre outras); projeto da junta, onde o nível de tensão no adesivo não pode exceder a sua resistência; preparação da superfície, que depende dos materiais a unir e do adesivo selecionado; fabrico da junta, que engloba a aplicação do adesivo e a sua cura, e ainda o controlo do processo através de ensaios destrutivos e não destrutivos [3].

### 2.1.3. Comparação com outras técnicas de ligação

Este Subcapítulo é reservado à comparação entre as diferentes técnicas e processos de ligação correntes, e tem como foco evidenciar as semelhanças e divergências entre os métodos enunciados com base em critérios de seleção comuns, que muitas vezes ditam a preferência por um processo de ligação em específico.

As ligações adesivas envolvem um menor número de componentes, pelo que estas podem tornar-se mais simples e fáceis de aplicar do que algumas ligações mecânicas em particular. Nas ligações adesivas não ocorrem alterações estruturais, pelo que estas podem ser concebidas a temperaturas próximas do ambiente. Deste modo, não se danifica o aderente ao contrário das ligações mecânicas tradicionais [12].

Parafusos e rebites são amplamente utilizados como fixadores mecânicos de forma criteriosa e satisfatória na construção de infraestruturas modernas, e o aparecimento e desenvolvimento de técnicas mais recentes de ligação de materiais não invalida as vantagens afetas a estes processos, que dificilmente se replicam por outros métodos. A sua utilização usualmente não requer preparação superficial, embora a furação seja um requisito na grande maioria das aplicações. Dillard [13] afirma que os elementos de fixação mecânica apresentam uma vida útil superior à maioria dos adesivos, permitem a reparação e/ou substituição de componentes sem danificar a estrutura e a adaptação dos substitutos danificando de forma mínima os componentes da ligação. As ligações que recorrem a elementos de fixação mecânica são facilmente inspecionáveis, a impraticabilidade dos processos de ligação aparafusada reduz-se na furação de um componente induzindo concentrações de tensão que enfraquecem os componentes a ser ligados, implicando a seleção de materiais de maior espessura para colmatar o efeito dos furos [14]. Como exemplo, a previsão analítica da resistência individual de uma placa encastrada solicitada à tração segundo o Eurocódigo 3, 1-1 não é suficiente para validar a união, uma vez que não considera o efeito da concentração de tensões nos furos da placa, e normalmente é exigida uma análise numérica por meio de um *software* específico. Alguns aderentes são particularmente adequados à união por meio de juntas adesivas, uma vez que são dificilmente perfuráveis e incompatíveis com o processo de soldadura e fixadores mecânicos comuns [2].

Do ponto de vista do desempenho, os adesivos oferecem inúmeras vantagens, permitindo eliminar as concentrações de tensão induzidas pelos elementos de ligação mecânicos, colmatar as desvantagens afetas à soldadura e limitar o peso final da estrutura final, que tende a ser incrementado de forma problemática pelo acumular de ligações que acrescentam mais peso do que as adesivas [15].

A Tabela 1 apresentada em anexo é adaptada de Petrie [2], cujo objetivo passa por evidenciar as semelhanças e divergências entre os métodos enunciados com base em critérios de seleção comuns que muitas vezes ditam a preferência por um processo de ligação em específico.

Tabela 1 - Comparação entre diferentes técnicas de ligação. Adaptado de Petrie [2].

|                           | Ligações adesivas                                                                      | Soldadura                                                           | Fixações mecânicas                                               |
|---------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|------------------------------------------------------------------|
| Permanência               | Junta tipicamente permanente.                                                          | Junta permanente.                                                   | Permite desmontagem.                                             |
| Distribuição de tensões   | Boa distribuição de tensões pela área colada <sup>1</sup> .                            | São criadas tensões internas.                                       | Pontos de alta tensão gerados perto das zonas de ligação.        |
| Aparência                 | Boa aparência <sup>2</sup> .                                                           | A obtenção de superfícies mais lisas implica maquinagem.            | Implica a descontinuidade de superfícies.                        |
| Materiais ligados         | Ideal para unir a maioria de pares de materiais dissimilares.                          | Indicado para unir materiais similares.                             | Aplicável à maioria das combinações de materiais.                |
| Resistência à temperatura | Fraca resistência a elevada temperatura.                                               | Resistente a altas temperaturas.                                    | Resistente a altas temperaturas.                                 |
| Resistência mecânica      | Má resistência à fluência, boa resistência à corrosão e fadiga.                        | Boa resistência à fadiga depende de outros tratamentos.             | Baixa resistência à fadiga <sup>6</sup> .                        |
| Preparação da junta       | Tratamentos de preparação superficial complexos ou limpeza de superfícies.             | Para chapas espessas requer preparação dos bordos <sup>5</sup> .    | Exige preparação de furos e em alguns casos roscas.              |
| Pós – processamento       | Não necessário.                                                                        | Tratamentos térmicos.                                               | Muitas vezes é recomendado o reaperto em serviço.                |
| Equipamento               | Alguns dispensadores exigem um elevado investimento <sup>3</sup> .                     | Dispendioso, de difícil transporte e de elevado consumo de energia. | Acessível e de fácil mobilidade.                                 |
| Consumíveis               | Alguns adesivos estruturais são caros.                                                 | Geralmente acessíveis.                                              | Custos elevados.                                                 |
| Taxa de produção          | Desde alguns segundos a várias horas <sup>4</sup> .                                    | Pode ser rápido.                                                    | Se o aperto for automatizado colmata a velocidade baixa.         |
| Garantia de qualidade     | Limitações nos critérios de dimensionamento e na aplicação de ensaios não destrutivos. | Os ensaios não destrutivos são aplicáveis à maioria dos processos.  | Razoavelmente confiável, quando se controla o binário de aperto. |

1. Exceto no arrancamento e clivagem;

2. Praticamente invisível;

3. No entanto, na maioria das aplicações, o custo para a sua aplicação é reduzido e simples;

4. De acordo com o tempo de cura do adesivo;

5. Chanfragem;

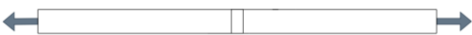
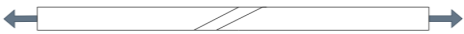
6. Pode ocorrer o afrouxamento da ligação.

### 2.1.4. Configurações de junta comuns

Os engenheiros de projeto são habitualmente os responsáveis pela escolha adequada ou a combinação de processos de ligação na concepção e *design* das estruturas modernas. De acordo com Dillard [13], e do ponto de vista da aplicabilidade e fiabilidade das uniões, a ligação por meio de juntas adesivas é adequada para unir aderentes de espessura fina, flexíveis e ainda materiais dissimilares [1]. Uma junta adesiva ideal deve ser solicitada na direção segundo a qual resiste mais.

A Tabela 2, adaptada de Petrie [2], ilustra as configurações de juntas adesivas mais comuns. Para as diferentes geometrias apresentadas, são referidas as principais vantagens e desvantagens.

Tabela 2 - Configurações de juntas adesivas comuns.

| Tipos de Juntas                                                                                                                           | Vantagens                                                                                                                                                                                                               | Desvantagens                                                                                                                                                                                                                                  |
|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| <p>Topo a topo simple (<i>Butt joint</i>)</p>            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Simples fabrico.</li> </ul>                                                                                                                                                    | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficácia reduzida (concentração de <math>\sigma_y</math> e corte nas extremidades);</li> <li>• Não promovem a resistência a esforços de flexão (clivagem), a menos que sejam modificadas.</li> </ul> |
| <p>Sobreposição simples (<i>Single lap joint</i>)</p>  | <ul style="list-style-type: none"> <li>• De simples fabrico;</li> <li>• Amplamente utilizada;</li> <li>• Adequada a aderentes finos;</li> <li>• Adesivo maioritariamente solicitado ao corte (preferencial).</li> </ul> | <ul style="list-style-type: none"> <li>• O descentramento na aplicação de carga provoca efeitos de flexão;</li> <li>• Flexão origina <math>\sigma_y</math> significativas.</li> </ul>                                                         |
| <p>Chanfro interior (<i>Scarf joint</i>)</p>           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição dos gradientes de esforço ao longo do adesivo.</li> </ul>                                                                                                           | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em maquinar/produzir o chanfro;</li> <li>• Tempo de fabrico mais elevado;</li> <li>• Processo de fabrico mais caro.</li> </ul>                                                           |
| <p>Degrau (<i>Stepped joint</i>)</p>                   | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Diminuição dos esforços de arrancamento.</li> </ul>                                                                                                                            | <ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de fabrico mais elevado;</li> <li>• Em materiais compósitos, a maquinaria pode danificar as fibras, no entanto, os degraus podem ser executados na etapa do empilhamento.</li> </ul>           |

Chanfro exterior (*Tapered lap joint*)

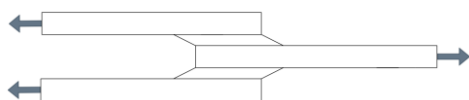
- Diminui os efeitos de arrancamento nas extremidades.

- Difícil de fabricar o chanfro;
- Tempo de fabrico mais elevado;
- Processo de fabrico mais dispendioso.

De ressalto (*Offset lap joint*)

- É garantido o alinhamento das forças aplicadas.

- Dificuldade em fabricar ressalto, principalmente em aderentes frágeis ou de alta resistência.

Sobreposição dupla (*Double lap joint*)

- Redução dos efeitos de flexão;
- Não requer maquinagem.

- Produção mais demorada que as Juntas de Sobreposição Simples (JSS).

Cobre-junta (*Single strap joint*)

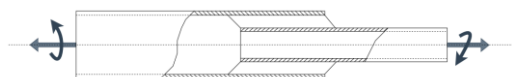
- Resistência superior às juntas de sobreposição simples.

- Sujeita a esforços de arrancamento significativos.

Cobre-junta dupla (*Tapered double strap joint*)

- Reduz o aparecimento de esforços de flexão.

- Maior tempo de fabrico.

Tubular (*Tubular joint*)

- Útil na ligação de tubos.

- Existência de pouca literatura sobre a distribuição de tensões na junta, quando comparado com as geometrias mais comuns.

### 2.1.5. Ensaio de caracterização de adesivos

Um adesivo pode ser caracterizado por meio de ensaios destrutivos e técnicas não destrutivas de inspeção. Os ensaios que permitem caracterizar os adesivos à tração são realizados em provetes de adesivo maciço (*bulk*) aplicando uma força longitudinal no provete até rotura [16], ou realizando um ensaio de tração em juntas topo a topo (*butt joint*). O ensaio em provetes de adesivo maciço pode ser realizado em qualquer máquina de ensaios de tração universal e permite determinar propriedades como a tensão de rotura, tensão de cedência, módulo de elasticidade ( $E$ ) e

coeficiente de Poisson ( $\nu$ ). No entanto, é difícil obter provetes isentos de vazios e defeitos, e a transição elasto-plástica não é sempre perceptível. O ensaio de tração em juntas topo a topo consiste na aplicação de uma força longitudinal no provete até rotura do adesivo. Esta tipologia de ensaio permite determinar o  $E$  e obter  $\nu$ . O ensaio de tração em juntas topo a topo pode ser realizado em qualquer máquina de ensaios à tração universal, é económico, a quantidade de adesivo utilizada é menor do que no ensaio em provetes *bulk* e permite a reutilização dos aderentes, no entanto, apresenta algumas limitações, como a necessidade de elevada precisão no fabrico dos provetes, para garantir o correto alinhamento dos mesmos durante o ensaio e a utilização de gabaritos. O ensaio à compressão, embora pouco utilizado, rege-se pela norma ASTM D 695 [17]. As propriedades de compressão podem ser obtidas nos ensaios à tração e as geometrias normalizadas consistem em juntas topo a topo ou provetes em adesivo maciço.

Os ensaios que permitem avaliar a resistência ao corte dos adesivos designam-se ensaio em JSS [18, 19], ensaio Iosipescu ou *V-Notched beam*, ensaio de borboleta (Arcan), ensaio de junta topo a topo em torção (*Napkin-ring test*) e ainda *Thick-Adherend Shear Test* (TAST). O ensaio em JSS é o mais comum para caracterizar uma junta adesiva, pode ser realizado em máquinas universais, as juntas são de fácil fabrico e o ensaio é económico. Deve ser considerado que a distribuição de  $\tau_{xy}$  no adesivo numa JSS não é uniforme. A JSS é presa por maxilas, os aderentes são solicitados à tração e a junta vai estar solicitada essencialmente ao corte. No entanto, não é considerado corte puro pois o desalinhamento dos aderentes provoca a flexão dos mesmos, introduzindo  $\sigma_y$  nas extremidades da junta. O ensaio Iosipescu ou *V-Notched beam* é normalizado pela ASTM D 5379 [20]. O ensaio é realizado em provetes maciços de adesivo ou em junta solicitados em quatro pontos (secção central está sujeita a corte puro). Os provetes são retangulares com dois entalhes simétricos ao centro. De maneira a evitar a flexão do provete, devem ser adotadas espessuras mais elevadas, o que pode implicar um consumo exagerado de adesivo no fabrico de provetes *bulk* [21]. O ensaio de borboleta (Arcan), que não se encontra normalizado, é aplicável a qualquer tipo de adesivo, incluindo os mais dúcteis. Pode ser utilizado para espessuras reduzidas, que se assemelham às utilizadas nas ligações adesivas, e requer a utilização de um acessório especial de ligação. O provete tem a geometria semelhante a uma borboleta (dois entalhes simétricos com um raio de concordância de 1,5 mm), é fixado em quatro pontos (dois furos em cada metade da ferramenta permitem a fixação numa ferramenta adequada), podem ser realizados testes em provetes *bulk* ou provetes em junta, e a concentração de tensões é dependente da geometria do raio de concordância na ponta do entalhe. É de notar que as deformações podem ser avaliadas através de extensómetros colados na superfície dos provetes, ou utilizando transdutores óticos que não entram em contacto direto com o provete [22]. O ensaio de junta topo a topo em torção (*Napkin-ring test*) é um dos ensaios de tração ou compressão preferíveis para avaliar a resistência da junta. Este ensaio adequa-se a pequenas deformações, requer juntas cilíndricas de paredes finas com o objetivo de reduzir a variação das tensões de corte ao longo do adesivo e promover a obtenção do estado de tensão de corte puro ao longo do adesivo, e as propriedades ao corte são obtidas pela aplicação de um momento torsor à junta adesiva. O ensaio é dispendioso, dificilmente exequível e exige um controlo da rotação proveniente dos aderentes ou dos adesivos, o que implica investir em equipamentos de ensaio, aperto e medição de alta gama [23].

O ensaio TAST pode ser realizado numa máquina de tração convencional e é amplamente utilizado devido à facilidade de obtenção dos provetes e reutilização dos mesmos [24]. O ensaio é normalizado pelas normas ISO 11003-2.2 [25] e ASTM D3983 [26]. Este ensaio pretende avaliar a

resistência ao corte puro do adesivo. Os aderentes são solicitados à tração, utilizando aderentes metálicos de elevada rigidez que não sofrem flexão durante o ensaio. Os resultados obtidos por intermédio de extensómetros óticos ou acoplados, que fazem parte do *setup* de ensaio, devem ser corrigidos de maneira a determinar somente a distribuição das deformações no adesivo.

Os ensaios que permitem caracterizar os adesivos ao arrancamento designam-se por juntas do tipo “T”, arrancamento a 180°, rolete flutuante (*floating roller test*) e ainda *climbing drum test*. O ensaio de arrancamento em junta do tipo “T” permite caracterizar o adesivo em função da preparação superficial dos aderentes e determinar a resistência ao arrancamento. Este ensaio pode ser realizado numa máquina de ensaios à tração universal, é económico e os provetes são obtidos facilmente. No entanto, a geometria dos *fillets* pode ter influência nos resultados e gerar incertezas nas medições. O ensaio de arrancamento a 180° está normalizado pela norma ASTM D 903-93 [27]. Um dos aderentes pode ser dobrado a 180° e o ensaio adequa-se a adesivos não estruturais. O *floating roller test* implica a aplicação de uma força com um ângulo constante, e é regido pela norma ASTM D 3167 [28]. Este ensaio permite caracterizar a resistência ao arrancamento de ligações adesivas entre um aderente rígido e um flexível, no entanto, é necessário adaptar ferramentas adequadas (rolete) às máquinas de ensaio convencionais. Este ensaio é compatível com diferentes materiais e é económico, mas apenas fornece dados comparativos [29]. O ensaio *climbing drum test* é regido pela norma ASTM D 1781 [30] e permite caracterizar a resistência ao arrancamento de ligações adesivas entre aderentes com diferente rigidez. Adequa-se ao estudo de estruturas *sandwich*, uma vez que permite avaliar a resistência da separação da pele e do núcleo. No entanto, este ensaio é limitado a estruturas *sandwich* e a peles de baixa rigidez, necessita de dados passíveis de comparação e ainda de ferramentas próprias.

Os adesivos podem ainda ser caracterizados ao impacto pelo ensaio Charpy, cuja norma ASTM D950 [31] é baseada no ensaio para metais, ou pelo ensaio *drop test*, especificado pelas normas ISO 11343 [32] e ASTM D3433 [33]. O ensaio Charpy não é dos mais utilizados, no entanto, permite obter o valor da resistência ao arrancamento determinando o quociente entre a energia absorvida pelo provete e a área de sobreposição adesiva. No ensaio *drop test*, dois aderentes são sobrepostos com um comprimento de 30 mm e a ferramenta é sujeita a um impacto no sentido longitudinal, o que permite determinar a resistência ao arrancamento do adesivo, mas em condições de impacto.

Também podem ser realizados ensaios de fadiga para caracterizar um adesivo. O ensaio consiste na aplicação de cargas cíclicas em JSS, cujo objetivo é o de determinar a curva S-N, a tensão em função do número de ciclos e ainda a tensão limite de fadiga. O ensaio é normalizado pela norma ASTM D 3166 [34], os aderentes pela norma ASTM D 1002 [18] e as definições das terminologias dos adesivos pela norma ASTM D 907 [35].

As juntas adesivas podem sofrer deformação se lhes for aplicada uma tensão constante ao longo do tempo. A temperatura é também um fator relevante. Desta maneira, podem ser realizados ensaios de fluência em adesivos. Nestes ensaios, as JSS são submetidas a determinadas condições de carga e temperatura, e pode ser obtida uma curva de deformação por fluência.

As curvas de deformação obtidas permitem identificar valores de velocidade de deformação: decrescentes no tempo - fluência primária; aproximadamente constantes – fluência secundária; crescentes no tempo, evoluindo até à rotura - fluência terciária. Os ensaios de fluência para adesivos são regidos pelas normas ASTM D 1780 [36], ASTM D 2293 [37], ASTM D 2294 [38] e ASTM

D 4680 [39], e todas as normas enumeradas adequam as dimensões dos aderentes de acordo com a norma ASTM D 1002 [18].

No âmbito dos ensaios de caracterização à fratura, o parâmetro mais relevante é a taxa crítica de libertação de energia,  $G_{Ic}$ . Os ensaios de caracterização à fratura dividem-se em três modos de carregamento distintos: o modo I, o modo II e o modo III. Nos modos I e II, as juntas estão sujeitas a tensões de tração e de corte. O carregamento no modo I é o mais penalizador, uma vez que promove a abertura e propagação da fissura. No modo III, as tensões de corte são paralelas ao adesivo e à fenda que se está a propagar. Para caracterizar o adesivo à fratura no modo I, são propostos dois ensaios: DCB (*Double-Cantilever Beam*) - é o mais fácil de realizar, é induzida uma pré-fenda de maneira a traçar o caminho de propagação da mesma, é registada a evolução da força ( $P$ ), deslocamento ( $\delta$ ) e dimensão da fissura ao longo do ensaio, e o adesivo é reutilizável; TDCB (*Tapered Double-Cantilever Beam*) - apresenta uma taxa constante de flexibilidade ao longo do comprimento da fenda ( $p$ ), a velocidade de propagação da fenda é superior à observada no DCB e a principal vantagem reside na obtenção da taxa crítica de libertação de energia,  $G_{Ic}$ , independentemente do  $p$ . Caso se pretenda caracterizar o adesivo à fratura no modo II, existem três ensaios não normalizados disponíveis: ELS (*End-Loaded Split*) - o provete é fixo numa extremidade e carregado na extremidade oposta (adesivo solicitado ao corte e o provete à flexão), existem dificuldades na obtenção de  $G_{IIc}$  relacionadas com a existência de elevados valores de  $\delta$  e alguma sensibilidade às condições de aperto do provete; ENF (*End-Notched Flexure*) - é o mais utilizado devido à sua simplicidade, o provete é submetido a flexão em três pontos e o adesivo ao corte, o crescimento da fenda pode ser inesperado caso o comprimento inicial da pré-fenda não seja o mais indicado e a aplicação da força tende a dificultar a visualização da evolução da fenda; 4ENF (*Four-Point End-Notched Flexure*) - requer um dispositivo de ensaio mais elaborado e apresenta problemas relacionados com a influência do atrito na região da pré-fenda. Os adesivos podem ser ainda caracterizados em modo misto, I + II (tensões normais e de corte). No entanto, poucos dos ensaios se encontram normalizados. Entre eles destacam-se o ADCB (*Asymmetric Double-Cantilever Beam*), o ATDCB (*Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam*), o MMB (*Mixed-Mode Bending*), o CLS (*Cracked-Lap Shear*) e o MMF (*Mixed-Mode Flexure*) [3].

Os ensaios que permitem caracterizar a durabilidade de uma junta adesiva, assim como o efeito combinado das condições ambientais e de carregamentos, são regidos pelas normas ASTM D 1002 [18] e ASTM D 2919 [40] e permitem determinar a durabilidade de JSS, e ainda pela norma ASTM D 3762 [41], através do ensaio de cunha.

Petrie [2] afirma que o único método que permite estimar a vida útil de uma junta de ligação adesiva consiste em submeter os conjuntos de teste a condições ambientais, de carga e temperatura que acelerem a evolução da distribuição de tensões na junta, prevendo o seu comportamento a longo prazo. O autor concluiu ainda que testes de inspeção não destrutivos não permitem caracterizar de forma quantitativa a resistência de uma junta adesiva. No que concerne às técnicas não destrutivas de inspeção, a possibilidade de inspecionar um conjunto é fundamental para verificar a qualidade da ligação e evitar roturas prematuras catastróficas.

A inspeção não é um processo simples, porque o adesivo se encontra confinado entre dois aderentes e em muitos casos as ligações são indesejavelmente sobredimensionadas. Existem, no geral, três tipos de defeitos nas ligações adesivas: a fraca adesão, que pode dever-se a uma ineficaz preparação superficial e/ou contaminação do aderente; a fraca resistência coesiva, devido a

incorreta formulação do adesivo, mistura incorreta dos componentes ou tempo de cura insuficiente do adesivo; e vazios, porosidades e faltas de coesão, que podem resultar da presença de bolhas de ar, da contração térmica durante a cura, da aplicação de carga. Estes defeitos podem ser detetados por meio de técnicas de inspeção não destrutivas, de entre as quais se destacam a inspeção visual, líquidos penetrantes, correntes de Foucault e efeito termoelástico [3].

#### **2.1.6. Aplicações das ligações adesivas**

As ligações adesivas têm um amplo mercado e são utilizadas com frequência na indústria marítima, de transportes, automóvel, energias sustentáveis, construção, têxtil, aeronáutica, entre muitas outras. Os fabricantes de adesivos fornecem uma grande variedade de produtos para diferentes aplicações e de acordo com os requisitos dos clientes. Devido à consolidação do mercado e da indústria na qual se insere o fabrico de adesivos, o número de empresas tem vindo a diminuir, ainda que apenas nos Estados Unidos da América (EUA) existam mais de 1500 empresas dedicadas ao desenvolvimento e fabrico de adesivos, que acabam por consumir internamente estes produtos. De acordo com Petrie [2], estarão definidas sete áreas de mercado relevantes, com destaque para o empacotamento, construção e transporte, e cerca de sessenta segmentos de mercado adjacentes. No âmbito do empacotamento, destacam-se o fabrico de papel ondulado, a vedação de caixas com aberturas, a união de produtos descartáveis (fraldas descartáveis, absorventes e material hospitalar), o fabrico de filtros, rótulos, entre outros [42].

No ramo da construção, os adesivos são empregues no fabrico de painéis de isolamento acústico ou instalação de revestimentos na parede, na instalação de piso, na fixação de componentes cerâmicos, no fabrico de vigas e treliças pré-fabricadas, na montagem em tempo mais reduzido de coberturas e divisórias pré-fabricadas [42], entre muitas outras aplicações. No âmbito do projeto de construção em aço e alumínio na construção, estão disponíveis um conjunto de Normas Europeias (EN) relativas ao projeto de estruturas de edifícios e de outras obras de engenharia, que contemplam uma alargada gama de aplicações e condições de carga [43]. No entanto, a aplicação de juntas adesivas não é abrangida por esse conjunto de normas, e as etapas do processo de ligação enunciadas no último parágrafo do Subcapítulo 2.1.2 devem ser respeitadas. A Figura 1 ilustra o exemplo de uma estrutura em aço e placa de madeira compensada (contraplacado), cuja ligação entre os materiais dissimilares é efetuada por intermédio de adesivos [43].

A área de mercado das ligações adesivas afeta ao transporte destaca-se pelo acabamento interno e externo de automóveis ligeiros e outros veículos de transporte de passageiros e mercadorias, pela união de subconjuntos de veículos (painéis, portas, capôs, entre outros), pela união estrutural em aeronaves, pelo amortecimento de vibrações e melhoria da resistência à fadiga, fabrico de móveis [2]. O Boeing 787 e o Airbus A380 [44], assim como outros projetos de aeronaves atuais, recorrem a materiais compósitos unidos por intermédio de ligações adesivas, aliados a outros materiais de outra natureza e diferentes técnicas de ligação. Os adesivos são utilizados para unir os diferentes elementos da fuselagem e o revestimento das asas à estrutura do avião, diminuindo o efeito da encurvadura [45]. A Figura 2 ilustra as diferentes aplicações de ligações adesivas no Airbus A380 [46].



Figura 1 - Estrutura em aço e placa de madeira compensada (contraplacado) [43].

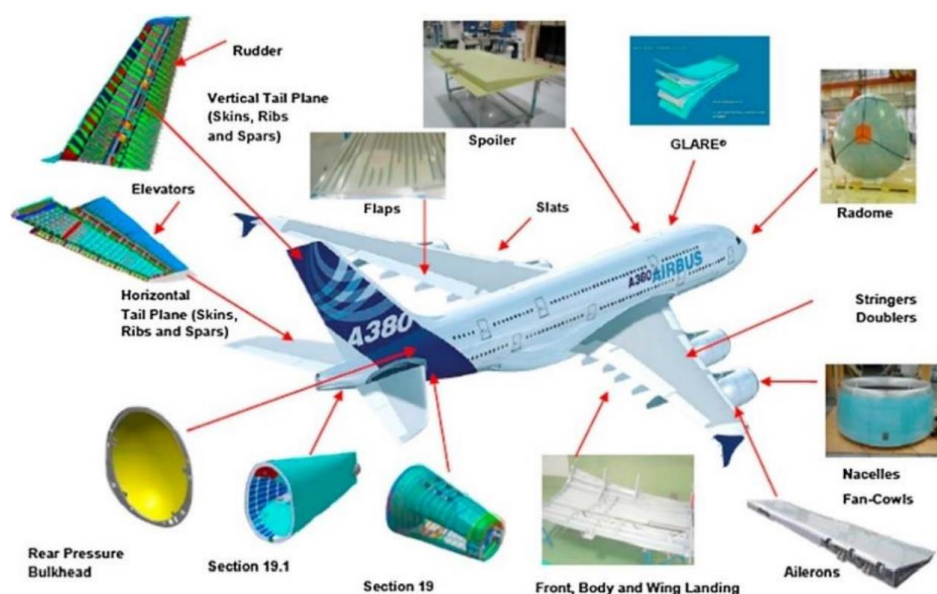


Figura 2 - Diferentes aplicações de ligações adesivas no Airbus A380 [46].

## 2.2. Previsão de resistência das juntas

Uma vez que a fiabilidade das juntas adesivas é determinada pela resistência das suas ligações, é fundamental, para o projeto destas estruturas, a disponibilidade de métodos numéricos ou modelos de dano para prever o comportamento à fratura das mesmas, de modo a minimizar os custos e acelerar o processo de fabrico [4]. De facto, um projeto eficiente e de rápida execução depende de técnicas de avaliação que permitam a análise de uma junta de ligação adesiva por métodos numéricos, como é o caso do MEF [5].

A evolução das juntas adesivas está associada ao desenvolvimento de metodologias de previsão que permitem validar a sua utilização e aumentar a sua eficiência, de modo a contornar o paradigma segundo o qual o sobredimensionamento das juntas adesivas resulta em estruturas mais pesadas e orçamentos mais dispendiosos, devido à inexistência de modelos materiais precisos e critérios de rotura adequados. Podem ser aplicadas duas metodologias distintas para análise das

juntas adesivas, nomeadamente a análise de forma fechada (analiticamente) e os métodos numéricos. Os estudos pioneiros no âmbito das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo de Volkersen [47], que parte do pressuposto que os materiais são inteiramente elásticos e somente ocorre deformação do adesivo em corte. A formulação analítica torna-se complexa no caso de o adesivo se deformar plasticamente, de serem utilizados aderentes à base de materiais compósitos e de se unirem materiais dissimilares. O MEF [48] é a técnica mais utilizada para a análise de juntas adesivas e foi inicialmente aplicada por Harris e Adams [49], que contabilizaram a influência de fatores com a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo, a rotação da junta e ainda a influência do excesso de adesivo. A mecânica dos meios contínuos requer a aplicação de um critério de rotura apropriado e o conhecimento da distribuição do campo de tensões, permitindo desta maneira prever a resistência das juntas adesivas. O MEF pode ser combinado com pressupostos da mecânica da fratura para a previsão da resistência, quer seja pelo fator de intensidade das tensões quer pelas abordagens energéticas como a Técnica Do Fecho Da Fenda Virtual (TFFV). Na eventualidade de ocorrer a propagação de uma fenda, torna-se necessário gerar a malha novamente, o que se traduz num maior esforço computacional [50] e pode complicar o processo. A modelação numérica tem sido alvo de grande evolução e inclui, entre outros métodos, a modelação por MDC. Esta técnica aplica a modelação convencional por MEF para as regiões onde a mecânica da fratura não prevê o dano, e utiliza elementos coesivos de modo a promover a propagação de fendas. O Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX) começou a ser utilizado para modelar o crescimento de fendas, e utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamentos contínuo.

### 2.2.1. Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. Na abordagem da Mecânica dos Meios Contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos pelo MEF, são utilizados no critério de falha e comparados com os valores permitidos pelo material respetivo [51]. Utilizam-se critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma determinada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise do estado limite para a previsão de resultados. Consequentemente, os valores máximos admissíveis pelos materiais em análise são comparados com os valores obtidos por este modelo, e é estimada a resistência das ligações adesivas. O modelo analítico de Volkersen [47] admite que o adesivo é solicitado a corte puro e prevê, de forma simples, a resistência de juntas adesivas de sobreposição. Neste modelo, a tensão máxima de corte é considerada como critério de rotura. Adams et al. [52] conseguiram prever com sucesso a resistência de juntas adesivas utilizando o critério da tensão principal máxima.

Todavia, devido à singularidade das tensões nos cantos reentrantes das juntas, as tensões instaladas vão depender do tamanho de malha utilizado (*mesh size*) e da existência de singularidades de tensão nas extremidades da ligação. Um modelo amplamente utilizado consiste na obtenção dos valores de tensão nos pontos de Gauss ou na extrapolação destes, junto das singularidades. Embora o Método seja sensível ao tamanho da malha utilizada, a percepção física do processo de falha é muito clara, uma vez que a tensão máxima principal é a maior responsável pelos modos de falha em juntas com adesivos frágeis. Este critério ignora por completo todas as restantes tensões principais, ainda que não nulas [51].

Harris e Adams [49] demonstraram teórica e experimentalmente que a resistência de juntas adesivas de sobreposição simples com aderentes arredondados com adesivo de elevada tenacidade aumentou significativamente, quando comparada com juntas adesivas com as extremidades da sobreposição em quina viva. Segundos estes autores, os critérios afetos a este modelo não se adequam à avaliação de juntas adesivas cujo comportamento é dúctil, uma vez que estes ainda suportam deformações elevadas após atingirem a tensão de cedência [51].

### 2.2.2. Mecânica da fratura

A fratura por propagação de fendas pode iniciar-se de variadas formas e ser despoletada por fatores distintos como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda deformações que evoluem ao longo do tempo [3]. Griffith [53] desenvolveu um estudo no âmbito da mecânica da fratura em materiais compósitos de fibra de vidro. Este estudo permitiu concluir que todos os corpos apresentam vazios e imperfeições, e que a fratura ocorre a partir dos defeitos mais críticos. A mecânica dos meios contínuos assume a continuidade do material e respetiva estrutura. No entanto, dois materiais com cantos reentrantes, singularidades de tensão ou imperfeições não se enquadram nesta suposição. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não fornece solução nesses pontos singulares de tensão ou deformação. A mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. As fendas são os defeitos mais comuns em estruturas, para os quais os modelos da mecânica da fratura foram desenvolvidos. Neste modelo, é aceitável as tensões calculadas pela mecânica dos meios contínuos serem singulares na ponta da fenda. De acordo com estudos mais recentes, quando o ângulo formado pela fenda é inferior a  $180^\circ$  vai existir sempre uma singularidade [54]. Neste caso, deixam de existir superfícies livres, ainda que continue a existir descontinuidade de tensões. Williams [55] provou este ponto para singularidades de tensão em entalhes com forma de cunha. Este argumento é aplicável à singularidade de tensão em dois materiais unidos por um canto reentrante. Na realidade, existe descontinuidade da tensão mesmo não existindo nenhuma superfície livre. A mecânica da fratura é aplicada de forma criteriosa e com sucesso a muitos problemas de Engenharia. Este modelo permite avaliar se estes defeitos são capazes de proporcionar uma rotura catastrófica, ou se as dimensões de uma estrutura durante o seu tempo de vida útil se mantêm inferiores às críticas, embora ocorra o risco de propagação de fendas, de modo a zelar pela segurança da estrutura. O conceito de projeto com tolerância ao dano, originalmente adotado pela indústria aeronáutica, foi inspirado no conceito bem estabelecido da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) e é cada vez mais relevante noutros ramos da Engenharia [54]. A teoria afeta ao conceito de LEFM não se aplica a juntas adesivas cujo comportamento é dúctil. Deste modo, Hutchinson [56] e Rice [57] criaram a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) para modelar roturas dúcteis [54]. A maioria dos estudos afetos à ligação por meio de juntas adesivas lida com a taxa de libertação de energia de deformação,  $G_I$  (tração) ou  $G_{II}$  (corte), e o respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura,  $G_c$  [58, 59], ao invés de fatores de intensidade de tensão, que são dificilmente determináveis quando a fenda se propaga numa interface ou na sua proximidade [54]. No caso dos materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e esta propaga-se de forma regular e estável, até que ocorre rotura final [55].

### 2.2.3. Modelos de dano coesivo

O MDC foi inicialmente proposto por Barenblatt [60] e Dugdale [61] para descrever o dano sob cargas estáticas na zona do processo coesivo na região próxima à frente da fenda aparente, dando início ao desenvolvimento de métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. O MDC foi amplamente refinado e testado desde então para simular o início e propagação de fendas em problemas cujo modo de falha era coesivo ou interfacial e ainda em delaminação de compósitos. O MDC é baseado em elementos de mola ou em elementos coesivos [62] que ligam elementos sólidos estruturais, bidimensionais ou tridimensionais.

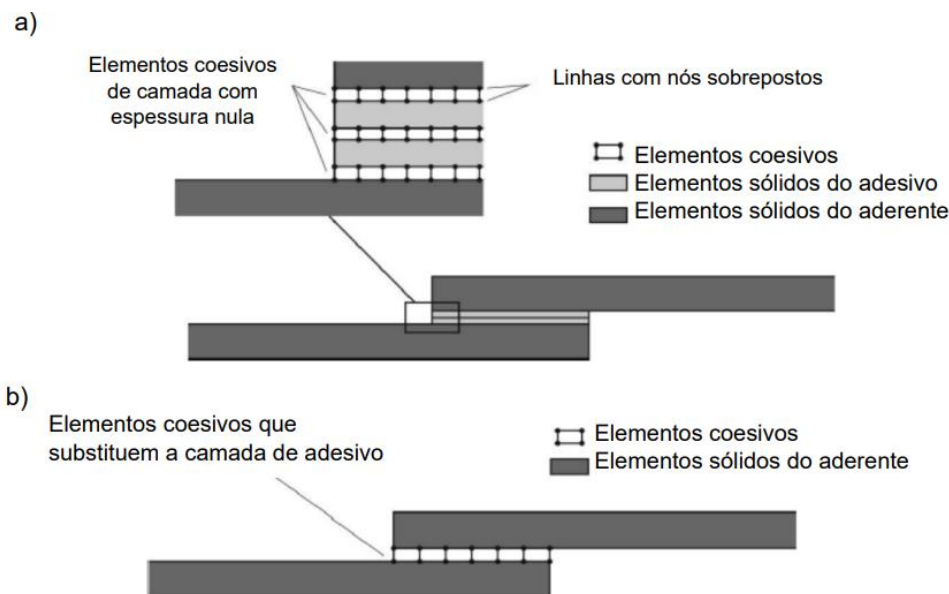


Figura 3 – Elementos coesivos para simular modos de rotura de espessura nula – aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo entre aderentes – aproximação contínua (b) numa junta adesiva. Adaptado de Da Silva e Campilho [51].

É de notar que o MDC é facilmente incorporado nos *softwares* convencionais de Elementos Finitos (EF) para avaliar o comportamento à fratura em vários materiais, inclusivamente em juntas adesivas [63]. O modelo é baseado na suposição de que uma ou múltiplas interfaces podem ser introduzidas propositadamente nas estruturas em análise, permitindo analisar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo de deslocamentos. A técnica consiste no estabelecimento de leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos, e podem ser utilizadas para ligar nós sobrepostos de elementos que representam materiais ou diferentes camadas no caso dos materiais compósitos, para simular uma interface de espessura nula (aproximação local; Figura 3.a), ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais sem contacto entre eles de modo a simular uma espessura fina e finita entre os mesmos, de modo a poder, por exemplo, simular uma junta de ligação adesiva (aproximação contínua; Figura 3.b) [64].

O MDC fornece uma reprodução macroscópica dos danos ao longo de um determinado percurso, e não considera os fenómenos microscópicos ocorrentes na origem da fenda. O MDC é baseado na implementação de leis tensão-deslocamento entre nós partilhados em ambas as faces ao longo do caminho percorrido pela fenda, definidas pela especificação de parâmetros que governam o processo de crescimento da fenda, como o  $G_{Ic}$ ,  $G_{IIc}$  ou  $G_{IIIc}$  [65]. As leis tração-separação são representadas por relações lineares em cada etapa do de carregamento [66], embora possam ser

definidas de maneira diferente, possibilitando a representação mais fidedigna do comportamento dos materiais [67]. O modelo enunciado está incorporado em alguns *softwares*, como o ABAQUS®, e permite solucionar problemas a duas (2D) ou três dimensões (3D) para uma análise estática, e apresenta uma componente adicional associada ao corte no modelo a três dimensões [67].

### 2.2.3.1. Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por intermédio de MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. É de notar que é obrigatório utilizar ensaios experimentais devidamente calibrados e normalizados, que nem sempre estão disponíveis, de modo a determinar os parâmetros coesivos e simular a rotura da ligação com uma maior precisão [68]. Recentemente, vários artigos publicados abordam a definição dos parâmetros coesivos ( $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ). Lee et al. [69] afirmam que alguns parâmetros coesivos como  $t_n^0$  e  $t_s^0$  ainda não estão devidamente padronizados. Desta maneira, surgiram outras técnicas de análise de dados com graus de complexidade e precisão de resultados diferentes, como o método de definição individual de parâmetros, o método direto e indireto. O método da definição individual de cada parâmetro implica definir isoladamente os parâmetros das leis coesivas, através de ensaios adequados. Existe uma contradição na aplicação do método, uma vez que existem desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço (*bulk*) e a ligação adesiva [70]. Este fenómeno ocorre por meio das restrições às deformações de uma camada fina de adesivo que se encontra entre dois aderentes e também devido ao modo misto de propagação de fissuras. As fissuras em materiais maciços apresentam uma tendência para crescer de forma perpendicular à direção da tensão principal máxima [71]. Ainda que não se adeque a todas as aplicações práticas, e uma vez que pode ocorrer rotura coesiva nos aderentes, em ligações adesivas finas o adesivo é tipicamente o elo mais fraco da ligação (se a rotura for coesiva no adesivo, o utilizador obtém o máximo proveito das propriedades individuais de cada componente), o que implica que as fissuras se propaguem no sentido longitudinal da camada coesiva. O método alternativo consiste num processo iterativo de ajuste entre os resultados obtidos nas previsões numéricas e os dados experimentais. Considerando por exemplo a curva  $P-\delta$ , torna-se possível estimar leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste dos parâmetros. Em ambos os métodos de definição dos parâmetros enunciados anteriormente, é escolhida uma forma parametrizada da lei coesiva (bilinear, trilinear, entre outras) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado. O método direto define de forma concreta as leis coesivas, uma vez que calcula os MDC da ligação com base na informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [70], pela diferenciação das curvas  $G_I - \delta_n$  e  $G_{II} - \delta_s$ , sendo que  $\delta_n$  representa o deslocamento à tração e  $\delta_s$  o deslocamento em corte. No entanto,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  são normalmente os principais parâmetros a determinar, uma vez que estes têm uma influência determinante na globalidade dos resultados obtidos. Os métodos baseados na MFLE são facilmente aplicáveis para avaliação de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ . No entanto, não é possível adequar este modelo a adesivos que apresentem uma ductilidade muito acentuada nem a adesivos com grande plastificação, ainda que para estes últimos possa ser utilizado o integral- $J$  como alternativa. Independentemente da técnica utilizada, os ensaios DCB e ENF são normalmente os adequados à determinação de tais parâmetros. O ensaio DCB é o mais comumente utilizado para determinar  $G_{Ic}$  pois a geometria é simples e o tempo de fabrico das juntas é diminuto. Para determinar  $G_{Ic}$ , existem ainda outros métodos, como é o caso da teoria de vigas, métodos baseados no integral -  $J$  [72] ou baseados no comprimento equivalente. Rice [57] propôs uma expressão para o cálculo do  $G_{Ic}$  em provetes

adequados ao ensaio DCB com base no método do integral -  $J$ , que relaciona as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [73]. O ensaio DCB, cujo procedimento experimental está enunciado na norma ASTM D3433-99 [74], é realizado com um conjunto formado por dois aderentes unidos por uma camada fina de adesivo, e durante o fabrico da junta é produzida uma fenda inicial numa das extremidades do provete. Em alguns casos, podem surgir dificuldades na obtenção dos parâmetros pois a propagação de fenda pode ser instável e dificultar a medição do comprimento da mesma durante o ensaio. Assim, a ponta da fissura pode não ser bem visível, o que depende do adesivo utilizado para o efeito [75]. Na norma ASTM D3433-99 é indicada a expressão que permite determinar a altura mínima do aderente ( $h$ ), de maneira a evitar a deformação plástica dos aderentes durante o ensaio DCB, pela Equação (1). Nesta,  $T$  corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a propagação da fenda,  $B$  é a largura de cada aderente e  $\sigma_y$  corresponde à tensão de cedência do material do aderente. A Figura 4, adaptada de Gustafson e Waas [76], ilustra o esquema proposto para este ensaio.

$$h = \sqrt{\frac{6 \times T \times p}{B \times \sigma_y}} \quad (1)$$

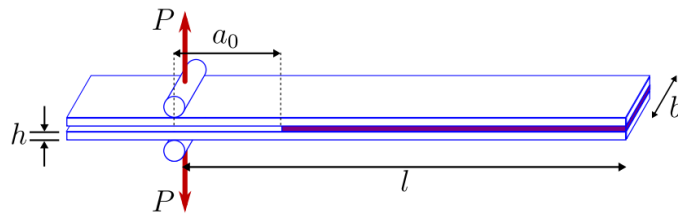


Figura 4 - Geometria de um provete para ensaio DCB. Adaptado de Gustafson e Waas [76].

O ensaio ENF pode ser descrito como um provete simplesmente apoiado nas duas extremidades e carregado a meio vão (flexão em três pontos) e está ilustrado na Figura 5, anexa ao parágrafo, adaptada de Gustafson e Waas [76]. É definido um comprimento de pré-fenda inicial ( $a_0$ ), e a meio do comprimento do provete é aplicada uma carga  $P$  [N]. A propagação da fissura ocorre sem haver separação dos aderentes. No entanto, para que a propagação seja estável,  $a_0$  [mm] tem de ser maior ou igual a metade do comprimento entre apoios simples [77]. Torna-se difícil estimar o parâmetro  $G_{IIc}$ , por dificuldades na medição de  $p$  [mm] durante a sua propagação [78]. O crescimento da fenda pode ser inesperado caso o comprimento inicial proposto não seja adequado e a provete pode tender a fechar com a aplicação da carga a meio vão dificultando a visualização da evolução da fenda.

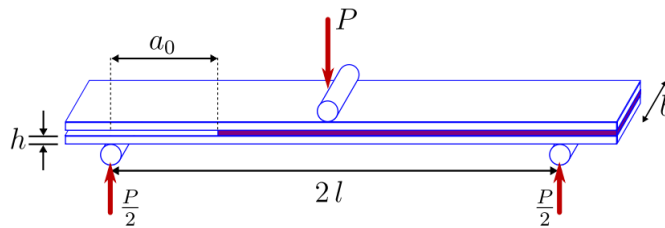


Figura 5 - Geometria de um provete para ensaio ENF. Adaptado de Gustafson e Waas [76].

#### 2.2.4. Mecânica do dano

Os modelos da mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano que modifica a resposta dos materiais pela redução de resistência ou rigidez. A título de exemplo, destacam-se o estudo de Khoramishad et al. [79] sobre ligações adesivas finas, e o estudo de Daudeville e Ladeveze [80] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz. Após definir o parâmetro de dano, é possível simular de forma gradual a evolução do dano e o modo de propagação de uma fenda, com ou sem trajetória pré-estabelecida no interior de uma região finita [81]. As variáveis do dano estão incluídas numa de duas categorias. Na primeira categoria, as variáveis preveem a quantidade de dano pela redefinição das propriedades constitutivas do material, embora não estejam diretamente relacionadas com a técnica. Na segunda categoria, as variáveis estão relacionadas com a definição física de um tipo de dano específico, como porosidades ou a área relativa de microcavidades [82]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga imposta para simulações estáticas [83] ou do número de ciclos para análise do comportamento à fadiga [84, 85].

Lemaitre e Desmorat [86] disponibilizaram modelos genéricos adequados a materiais maciços, assim como modificações para casos particulares da modelação do dano. A investigação de ligações adesivas é escassa segundo este modelo. Quando comparado com o MDC no âmbito da fadiga, os modelos e técnicas da mecânica do dano não fornecem uma distinção clara entre as fases de iniciação e propagação de fenómenos de fadiga, embora sejam adequados para realizar uma análise preditiva [79]. A mecânica do dano pode ser mais adequada do que o modelo de dano coesivo em algumas aplicações específicas, como no caso do dano generalizado, ou quando a fenda se propaga aleatoriamente.

Hua et al. [87] propuseram um modelo da mecânica do dano independente da malha definida para prever a resistência de ligações com juntas adesivas dúcteis e sujeitas à degradação ambiental. Por análise numérica, este efeito seria alcançado com a introdução de um parâmetro de dano na equação constitutiva dos materiais que se baseia no  $\delta$ . Este parâmetro foi calibrado pela realização de ensaios à fratura em provetes submetidos à flexão em modo misto, o que promoveu a redução dos valores de tensão instalada, a obtenção de resultados independentes da malha, a previsão de resistência da junta e a validação dos resultados experimentais. Chen et al. [88] obtiveram resultados próximos dos experimentais com a aplicação de uma técnica da mecânica do dano em JSS que se baseia na energia de deformação plástica média para a previsão do início e modo de propagação do dano, assim como a carga que corresponde à rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obtenção de uma solução convergente para um determinado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida em algum elemento. Os valores do Módulo de Young ( $E$ ) e do  $\nu$  foram anulados de maneira a simular a existência de rotura.

#### 2.2.5. Método de elementos finitos eXtendido

O MEFX é uma técnica relativamente recente, que modela a evolução do dano para prever a fratura em estruturas, e constitui uma melhoria do MEF convencional. Ao contrário do MDC, que recorre aos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $d_n^0/d_s^0$  (deslocamentos de tração e corte correspondentes à força máxima,  $P_{máx}$ ), o MEFX baseia-se na resistência dos materiais para iniciação do dano e em deformações para avaliação da rotura. O MEFX, por não exigir que a fenda se propague por meio de um caminho predefinido, apresenta uma vantagem de relevo sobre o MDC. No interior de um volume de material as fendas crescem livremente, e não se exige que a malha definida coincida

com a geometria das descontinuidades, nem que a mesma seja redefinida na região correspondente à descontinuidade [89].

Belytschko e Black [90] apresentaram, no final do século XX, as bases e princípios fundamentais deste modelo, baseadas no conceito de divisão da unidade, e que pode adequar-se ao MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos próximos da extremidade da fenda, promovendo o crescimento e a separação entre as faces da fenda [91]. Devido à evolução da fenda, a frente de crescimento muda constantemente de posição e orientação, dependendo das condições de carregamento e da geometria da estrutura, simultaneamente à criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF mais próximos da fenda. Este modelo permite simular diversos problemas no âmbito da Engenharia. Sukumar et al. [92] propuseram alterações ao método, o que permitiu simular problemas tridimensionais. Daux et al. [93] abordaram a simulação de fendas que se intersejam com múltiplas frentes de avanço e fendas com origem em furos. O problema associado à propagação coesiva de fendas em estruturas de betão armado foi estudado por Moës e Belytschko [94], cujos provetes foram dimensionados para flexão em três pontos e corte em quatro pontos.

Elguedj et al. [95] foram os responsáveis pela utilização do conceito da plasticidade na simulação em MEFX, na medida em que utilizaram uma nova função de base enriquecida para capturar regiões singulares no âmbito da mecânica da fratura elastoplástica. Dolbow et al. [96] introduziram um modelo que simula o contacto entre dois corpos. Khoei e Nikbakht [97] adaptaram este modelo de maneira a simular o contacto friccional. Em 2006, Fagerström e Larsson [98] implementaram o conceito de não linearidades geométricas no modelo.

#### **2.2.6. Estado-da-arte**

Este espaço está reservado para o estado da arte. A Tabela 3, que se divide em modelos de previsão e duas colunas, autores e descrição, foi criada com o objetivo de expor artigos científicos relevantes e emergentes, no âmbito dos métodos de previsão de resistência das juntas adesivas. A opção por artigos científicos mais atuais visa contemplar a evolução desta área de estudo.

Tabela 3 – Estado-da-arte (Métodos analíticos/Mecânica dos meios contínuos; mecânica da fratura; mecânica do dano; MDC; MEFX).

| Métodos analíticos / Mecânica dos Meios Contínuos |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                  |
|---------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Referências                                       | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                        |
| de Sousa et al. [99]                              | O estudo apresentado compara diferentes métodos de previsão analíticos e numéricos de resistência para JSS com diferentes comprimentos de sobreposição, $L_0$ , e três adesivos distintos. Concluiu-se que modelos analíticos só fornecem resultados precisos em condições muito específicas. O modelo de Volkersen [47] permite obter a previsão do comportamento de adesivos frágeis com pequenas áreas de sobreposição com elevada precisão, todavia não se adequa à análise de adesivos dúcteis ou com valores de $L_0$ superiores. O modelo de Hart-Smith [100] foi o mais preciso para todos os adesivos considerados. Observou-se que o MDC triangular é adequado para efetuar a previsão de resultados, exceto no caso de adesivos com elevada ductilidade. A análise por MEFX não se adequou ao estudo realizado, em particular quando a fenda se propaga em modo misto. Este modelo previu a $P_m$ pela correlação com o aparecimento de fissuras no adesivo.          |
| Razavi et al. [101]                               | Os autores analisaram a ligação de elementos de PRFC com recurso a adesivos. A utilização de chapas em PRFC com adesivos provou ser uma solução eficaz para restaurar estruturas em aço. No estudo atual, um critério emergente designado por deformação normal crítica (CNS - <i>Critical Normal Strain</i> ) foi proposto para prever a resistência da ligação, com base na tensão normal desenvolvida ao longo do plano médio do adesivo. De acordo com este critério, a falha em JSD ocorre quando a deformação na direção normal ao plano médio do adesivo atinge valores críticos, a uma distância designada por distância crítica. Neste estudo, as previsões teóricas foram comparadas com dados experimentais disponíveis na literatura. Os autores realizaram dois procedimentos experimentais com base no critério CNS. Os resultados obtidos foram satisfatórios, e permitiram determinar as cargas de falha em JSD (aço e PRFC), para diferentes valores de $L_0$ . |

| <b>Mecânica da fratura</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|----------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Dionísio et al. [102]      | <p>Este estudo utilizou conceitos da mecânica da fratura com o objetivo de propor e avaliar um novo modelo, que permite determinar as singularidades de tensão pelo critério ISSF (<i>Intensity of Singular Stress Fields</i>), aplicável a juntas adesivas em materiais compósitos. Foram realizados ensaios experimentais em JSS de PRFC e adesivo frágil, com oito valores de <math>L_0</math>. A implementação do critério ISSF [103, 104] implicou a consideração da geometria de zonas reentrantes/canto em materiais distintos. A combinação geométrica e material demonstrou a existência de três expoentes de singularidade, que caracterizam a zona reentrante analisada. O modelo proposto para determinar as singularidades de tensão críticas (<math>H_c</math>) consistiu em aplicar os valores de <math>P_m</math> médios determinados experimentalmente como a carga imposta na simulação numérica do MEF, para cada valor de <math>L_0</math>. Em função dos resultados obtidos, foi aconselhável prever a resistência das juntas com um valor de <math>L_0</math> superior ao utilizado para determinar <math>H_{1c}</math>.</p> |
| <b>Mecânica do dano</b>    |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Zhang et al. [105]         | <p>Os autores testaram quatro grupos de provetes com geometrias de chanfro distintas, para avaliar o comportamento à tração de juntas de chanfro interior (<i>Scarf Bonded Joints</i>) de compósito-metal. Foram estabelecidos e validados diferentes modelos de dano progressivos, por comparação com as curvas experimentais <math>P</math>-<math>\delta</math>, <math>P_{máx}</math> e localização do dano. No caso da placa em material compósito, foram empregues os critérios modificados de Hashin [106, 107], e as regras de degradação de Börgesson [108, 109], de maneira a prever o dano e simular a evolução do dano na placa respetiva. O presente estudo permitiu concluir que a diminuição do ângulo do chanfro, <math>\alpha</math> [°], resulta no aumento gradual de <math>P_{máx}</math> e do estágio da junta adesiva no domínio plástico, que o modo de rotura adesivo se inicia nos cantos reentrantes do laminado, e que os materiais metálicos, a sequência de empilhamento e as propriedades do adesivo aplicado influenciam o comportamento mecânico das juntas.</p>                                                     |

| <b>Modelos de Dano Coesivo</b>               |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
|----------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Lopes et al. [110]                           | <p>Este estudo abordou experimentalmente e numericamente, por MDC, a adesão de SMC (<i>Sheet Molding Composite</i>) [111] e PRFC recorrendo a uma geometria de JSS. A análise de tensões no adesivo em regime elástico mostra que este é preferencialmente solicitado ao corte, ainda que se desenvolvam <math>\sigma_y</math> significativas na extremidade da junta adesiva. Todavia, a concentração de <math>\sigma_y</math> e <math>\tau_{xy}</math> é mais relevante nas juntas à base de SMC do que nas juntas de PRFC. Nas juntas adesivas de PRFC, os melhores resultados foram obtidos para juntas co-curadas, enquanto nas juntas adesivas, o melhor resultado foi obtido na aplicação do adesivo Sikaforce® 7752, devido à maior ductilidade. As previsões numéricas de <math>P_m</math> revelaram-se precisas, apesar das divergências em algumas geometrias de junta, devido a problemas experimentais.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
| Macedo et al. [112]                          | <p>O presente estudo avaliou, por MDC, o efeito da espessura de um adesivo dúctil na fratura em modo misto de juntas adesivas. O ensaio realizado designa-se por <i>single-leg bending</i> (SLB). As curvas <math>P-\delta</math> revelaram resultados concordantes para cada espessura do adesivo, <math>t_a</math>. A propagação da fissura ocorreu com os parâmetros <math>G_I</math> e <math>G_{II}</math> aproximadamente constantes, conforme determinado pelas curvas-<math>R</math>. Ainda que a influência de <math>t_a</math> no cálculo de <math>G_{Ic}/G_{IIc}</math> tenha sido significativa, concluiu-se que um expoente da lei energética de dano em modo misto de <math>\alpha=2</math> consegue reproduzir com precisão o comportamento do adesivo. Os MDC foram capazes de reproduzir o comportamento experimental das curvas <math>P-\delta</math>. As leis do MDC foram consistentes, de forma individual e para cada valor de <math>t_a</math>. Numericamente, o efeito do aumento da espessura dos adesivos nas leis do MDC traduziu-se num aumento de <math>t_n^0</math> e <math>t_s^0</math>. Observou-se que <math>G_{Ic}</math> é o parâmetro que mais afeta o comportamento do provete SLB.</p> |
| <b>Método de Elementos Finitos eXtendido</b> |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             |
| Santos e Campilho [113]                      | <p>O presente estudo procurou avaliar a eficácia do MEFX na previsão de resistência de JSD, por comparação com resultados experimentais. Adesivos com ductilidade dissimilar e valores de <math>L_0</math> diferentes permitiram realizar uma validação abrangente da técnica. Os resultados evidenciaram que os valores de <math>P_m</math> variam em função do tipo de adesivo e de <math>L_0</math>. O aumento da <math>P_m</math> foi superior no caso dos adesivos mais dúcteis, devido à capacidade destes em suportar deformações substancialmente maiores. A análise numérica permitiu compreender e identificar as diferenças no comportamento dos diferentes adesivos, e prever com precisão a resistência das juntas utilizando os critérios de iniciação do dano MAXS e QUADS. Os critérios MAXE e QUAE e os critérios MAXPS e MAXPE não foram precisos, tendo sido registados desvios na ordem dos 100% para alguns adesivos.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                              |

|                       |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                      |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Xará e Campilho [114] | Este trabalho foi realizado com o propósito de estudar o comportamento de juntas adesivas em L com aderentes de alumínio e PRFC, considerando diferentes parâmetros geométricos, como o de $t_{p2}$ (espessura do aderente em L), e diferentes propriedades mecânicas dos adesivos. A análise experimental revelou que o adesivo Sikaforce® 7752 é o que permite obter valores de resistência mais satisfatórios nesta configuração particular e para qualquer valor de $t_{p2}$ testado, revelando que os adesivos dúcteis são mais adequados a este tipo de configuração, quando comparados com adesivos mais rígidos e frágeis. Observou-se que o parâmetro geométrico $t_{p2}$ tem uma influência relevante na resistência da junta adesiva. A análise do efeito do critério de iniciação do dano revelou que os resultados são mais precisos nos critérios QUADS e MAXS. Os critérios baseados na deformação (QUADE, MAXE e MAXPE) sobrestimaram de forma significativa o valor de $P_m$ para ambos os adesivos. O estudo permitiu concluir que o MEFX, pela utilização dos critérios de iniciação QUADS ou MAXS, é uma ferramenta exímia e competitiva para a previsão da resistência de juntas adesivas em L. |
|-----------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|

### 2.3. Juntas adesivas tubulares

A aplicação de juntas adesivas tubulares pode dever-se às restrições do projeto ou assentar na necessidade de reduzir o peso final de uma estrutura, de ligar dois materiais dissimilares sem danificar os aderentes, na capacidade de resistir a solicitações e carregamentos exigentes e na homogeneidade da distribuição do campo de tensões.

De facto, com esta configuração de junta adesiva, a transferência de carga é efetuada por meio de áreas substancialmente maiores, evitando a concentração de tensões singulares análogas à furação dos aderentes para fixação dos parafusos [115]. Estes requisitos não são cumpridos por outro processo de ligação de forma tão satisfatória, o que implica que as juntas adesivas sejam amplamente utilizadas em estruturas na indústria aeroespacial, aeronáutica e automóvel. O rácio peso/resistência que as juntas tubulares apresentam, assim como a resistência à corrosão e fadiga [116], a elevada resistência à flexão devido à sua rigidez global [2], a garantia de estanquicidade e a capacidade de unir materiais de espessuras diminutas e dissimilares justificam o recurso a esta geometria de junta [117]. O projeto de juntas adesivas tubulares pode ser analisado por técnicas de previsão de resistência das juntas analíticas ou numéricas [118]. Atualmente, são desenvolvidos inúmeros trabalhos no âmbito das juntas adesivas, que englobam as diferentes geometrias de juntas disponíveis no mercado. No entanto, apenas uma pequena percentagem se dedica ao desenvolvimento e investigação de juntas adesivas tubulares. As juntas adesivas tubulares, em condições normais de serviço, são sujeitas a esforços axiais ou de torção, que também podem ocorrer simultaneamente. As juntas adesivas tubulares, quando solicitadas à tração e à torção, apresentam semelhanças com as JSS. Ambas apresentam uma concentração de tensões crítica nas extremidades de sobreposição quando carregadas axialmente, e no caso da torção o efeito da deformação diferencial é idêntico [119].

### 2.3.1. Contextualização do uso de juntas tubulares

Apesar da literatura disponível sobre juntas adesivas tubulares ser diminuta quando comparada com outras geometrias de ligação, alguns estudos e trabalhos de pesquisa realizados foram relevantes para a evolução e o aprimorar das técnicas. Kwon e Lee [120] avaliaram a influência da rugosidade superficial na resistência de juntas adesivas tubulares pela análise da rigidez de uma camada interfacial entre aderente e adesivo, segundo uma distribuição estatística normal da rugosidade da superfície dos aderentes. Os autores concluíram que a rugosidade superficial ideal dependia da carga aplicada e da espessura da ligação adesiva [11]. Albiez et al. [121] e Rosas et al. [118] estudaram experimentalmente a influência de parâmetros geométricos na resistência de juntas tubulares em aço pré-tracionadas e com os adesivos Poliuretano e o Epóxico. Os autores concluíram que os adesivos em análise conferem diferentes valores de resistência à ligação. A resistência da junta tubular aumentou com o  $L_0$ , ainda que não de forma proporcional. Os autores inferiram a influência de  $t_a$ , e os resultados experimentais revelaram que o aumento da espessura da camada adesiva aplicada afeta negativamente a resistência da junta, o que permite afirmar que existe uma espessura teórica ideal segundo a qual a resistência do conjunto é máxima. Nguyen e Kedward [122] e Rosas et al. [118] propuseram um modelo analítico para determinar o campo de distribuição de tensões numa junta adesiva tubular com aderentes de alumínio. O respetivo modelo foi validado pelo MEF, apresentando resultados concordantes entre ambas as análises. De acordo com os autores, os aderentes das juntas tubulares com um chanfro de  $10^\circ$  apresentam vantagens quando comparadas com as juntas tubulares sem chanfros, na medida em que a distribuição do campo de tensões é mais uniforme e a magnitude das tensões instaladas é inferior. Lavalette et al. [123] realizaram um estudo de avaliação da influência de parâmetros geométricos como  $L_0$ , diâmetro interno e externo de aderentes em alumínio e polímero reforçado com fibra de carbono (PRFC), numa junta tubular adesiva solicitada à tração. Foram realizados testes experimentais e simulações numéricas de acordo com o MDC. Os resultados obtidos numericamente revelaram coerência e concordância com os experimentais, permitindo concluir que a resistência da ligação aumenta com o  $L_0$  e o diâmetro interno, e que  $t_{Ad}$  e o comprimento do chanfro afetam a distribuição de  $\tau_{xy}$ . Ou seja, os parâmetros geométricos avaliados influenciam diretamente a resistência da ligação e impactam o peso final do conjunto [118].

Lubkin e Reissner [124] alargaram o estudo de juntas adesivas para o caso da simulação axisimétrica, tendo sido pioneiros na avaliação analítica do campo de tensões submetidos a carga axial [115]. Segundo Lubkin e Reissner, a concentração de tensões no adesivo depende da deformação diferencial dos aderentes, da flexão decorrente da não colinearidade dos aderentes sobrepostos e dos efeitos de concentração de tensões [108]. É de notar que as tensões de corte circunferenciais não foram consideradas, uma vez que implicariam a torção da junta adesiva. Esmael e Taheri [117] conduziram uma investigação para a avaliação da delaminação nos aderentes de uma junta adesiva tubular híbrida sujeita a esforços torsionais, e determinação da sua influência no campo de distribuição de tensões dentro da camada adesiva [115]. Dois conjuntos de materiais foram utilizados no fabrico dos aderentes, um compósito vidro/epóxico e um compósito grafite/epóxico. Com recurso ao *software* ABAQUS®, foi realizado uma análise paramétrica abrangente quanto ao efeito de parâmetros geométricos e dos esforços de arrancamento e clivagem. Entre os parâmetros considerados destacam-se a localização e o comprimento da delaminação, as propriedades mecânicas do material compósito e a orientação das fibras do aderente. Este estudo permitiu concluir que a tendência no campo de distribuição das tensões era

passível de comparação entre os dois sistemas, ainda que a magnitude das tensões instaladas fosse significativamente díspar. O estudo numérico e experimental conduzido por Hosseinzadeh et al. [125] visou caracterizar, de forma simplificada, o desempenho de juntas tubulares metálicas ligadas por um adesivo estrutural quando submetidas a esforços torsionais, para diferentes valores de  $L_0$  [7]. O limite correspondente à falha do adesivo, para diferentes valores de  $L_0$ , foi caracterizado pelo modelo de plasticidade de Ramberg-Osgood, modelo este que foi ajustado mediante comparação com os resultados da simulação MEF, pela aplicação de um número limitado de parâmetros conhecidos, o que permitiu validar a aplicabilidade do modelo com base na precisão dos resultados obtidos. Estes dados revelam que a resistência mecânica da junta adesiva está altamente dependente da energia de deformação absorvida. Por exemplo, com o aumento de  $L_0$  aumenta em proporção a energia absorvida, ainda que a união se encontre no domínio plástico. Oh [126] publicou um estudo numérico de juntas adesivas tubulares com aderentes compósitos sujeitos à torção, combinando as análises térmica e mecânica. Foram admitidos três modos de falha, nomeadamente a falha adesiva, coesiva no adesivo e coesiva no aderente [115]. Os resultados foram comparados com os dados disponíveis por Choi e Lee [127] e concluiu-se que, para baixos ângulos de empilhamento do compósito a falha é coesiva no adesivo ou no aderente, enquanto para elevados ângulos de empilhamento a falha é adesiva na interface entre adesivo e aderente (tensões térmicas residuais significantes) [115].

### 2.3.2. Tipos de geometria comuns

Em relação às opções de arquitetura de juntas adesivas aplicáveis na indústria, destacam-se as JSS ou *Single-Lap Joints*, e as Juntas de Sobreposição Dupla (JSD) ou *Double-Lap Joints*.

Apenas uma pequena percentagem desta área de desenvolvimento está relacionada com a utilização de juntas adesivas tubulares, assim como a sua utilização é mais particular [115]. Num projeto que envolve uma junta adesiva tubular, o elemento mais débil não pode ser a própria ligação, e caso algum modo de rotura ocorra deve ser preferencialmente coesivo no aderente ou no adesivo, e nunca na interface entre ambos. De modo a auxiliar o projeto de juntas tubulares, devem ser adotadas técnicas de previsão numérica. Kim et al. [128] dedicaram-se ao estudo de diferentes configurações de juntas tubulares. Os autores realizaram uma análise experimental e uma análise numérica pelo MEF, concluindo que a JSD era a mais resistente. A Figura 6, adaptada de da Silva et al. [11], ilustra uma junta adesiva tubular de sobreposição com aderentes de extremidades angulosas (a) e com acabamento em chanfro (b).

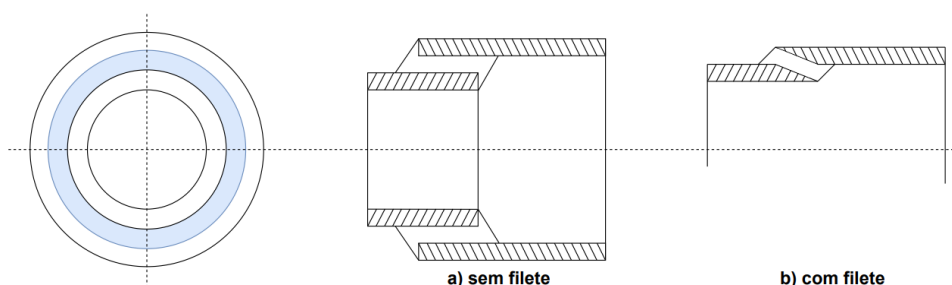


Figura 6 - Junta tubular sem filete (a) e com filete (b). Adaptado de da Silva et al. [11].

A Figura 7 ilustra juntas cilíndricas de aderentes tubulares com diferentes configurações [2, 11]. As diferentes soluções apresentadas são vantajosas quando comparadas com as juntas tubulares topo a topo, na medida em que permitem obter uma área de ligação mais elevada e valores de  $\sigma_y$

inferiores. No entanto, as soluções apresentadas exigem um elevado investimento, na medida em que dependem de processos de maquinagem que encarecem o projeto.

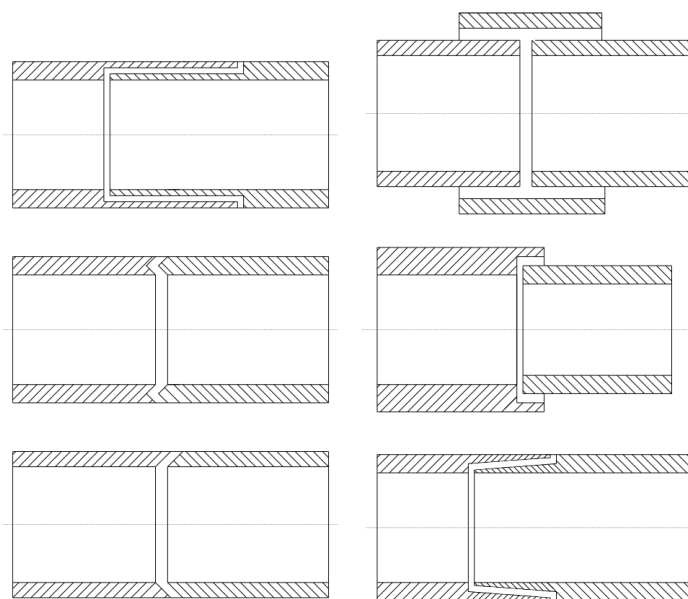


Figura 7 - Juntas cilíndricas tubulares com diferentes configurações. Adaptado de da Silva et al. [11] e Petrie [2].

### 2.3.3. Esforços e tipos de carregamentos

Esta configuração de junta está maioritariamente sujeita a cargas axiais ou torsionais [117]. Quando são aplicadas cargas axiais à junta adesiva tubular, o resultado assemelha-se ao comportamento das juntas de sobreposição planas com o aparecimento de concentração de tensões locais, deformação diferencial, flexão induzida pela não colinearidade dos aderentes e inexistência de pontos de singularidade na área correspondente à sobreposição. A ausência do efeito de colinearidade desaparece quando as juntas tubulares estão sujeitas a cargas torsionais, no entanto os efeitos da sobreposição e deformação diferencial permanecem [129]. Dragoni e Goglio [130] estudaram a eficácia de cinco modelos teóricos para prever a distribuição do campo de tensões produzidas pela aplicação de cargas axiais em juntas adesivas tubulares, e à posteriori compararam os resultados com os obtidos pelo MEF. De entre todos os modelos considerados, somente o de Lubkin e Reissner [124] prevê de forma satisfatória a distribuição de  $\sigma_y$  ao longo da área colada, enquanto os restantes estudos apenas preveem corretamente a componente afeta ao corte,  $\tau_{xy}$ . Foram desenvolvidos inúmeros modelos analíticos que podem ser utilizados para encontrar a melhor solução para a geometria da junta, como o de Lubkin e Reissner [124] para juntas tubulares solicitadas axialmente, e a proposta de Adams e Peppiatt [48] para efeitos de torção. Outros modos de carregamento foram analisados e propostos novos modelos [11], como é o caso do estudo de juntas adesivas tubulares solicitadas a pressão interior e exterior, proposto por Terekhova e Skoryi [131], e a análise do comportamento das ligações solicitadas a forças e momentos axisimétricos, proposto por Kukovyakin e Skoryi [132].

#### Esforços de tração/compressão

Os esforços de tração/compressão resultam da aplicação de uma determinada carga na direção perpendicular à secção reta dos aderentes a analisar. Estes esforços vão originar tensões normais uniformemente distribuídas ao longo da área de sobreposição, e as extremidades do adesivo vão

estar sujeitas a picos de tensão, que podem estar na origem do dano. A iniciação de uma fenda prematura, que tenderá a evoluir ao longo de  $L_0$ , pode resultar na rotura coesiva no adesivo ou adesiva na interface. É de notar que, independentemente da simetria dos esforços enunciados, elementos com elevada esbelteza ou elevada ductilidade podem não ser compatíveis com as solicitações compressivas. A Figura 8, adaptada de Petrie [2], ilustra a distribuição de tensões numa junta adesiva tubular solicitada sob a forma axial (esquerda) e não axial (direita). No âmbito dos trabalhos de investigação de ligações adesivas sujeitas a este tipo de esforços, e que envolvem análises experimentais, deve garantir-se a condição de paralelismo entre os aderentes e a solicitação uniaxial, normal à secção reta dos aderentes. O fabrico de juntas adesivas tubulares pode enfrentar alguns desafios, como o controlo da  $t_a$ , cujo aumento pode dificultar o correto alinhamento dos aderentes e originar esforços de clivagem ou arrancamento, e a rigidez dos aderentes, que deve ser suficiente para que os aderentes mantenham a sua forma original quando forem solicitados [2]. A representação ideal de um ensaio cuja força aplicada seja rigorosamente perpendicular à secção reta é difícil de garantir, o que resulta numa distribuição de tensões menos uniforme [3].

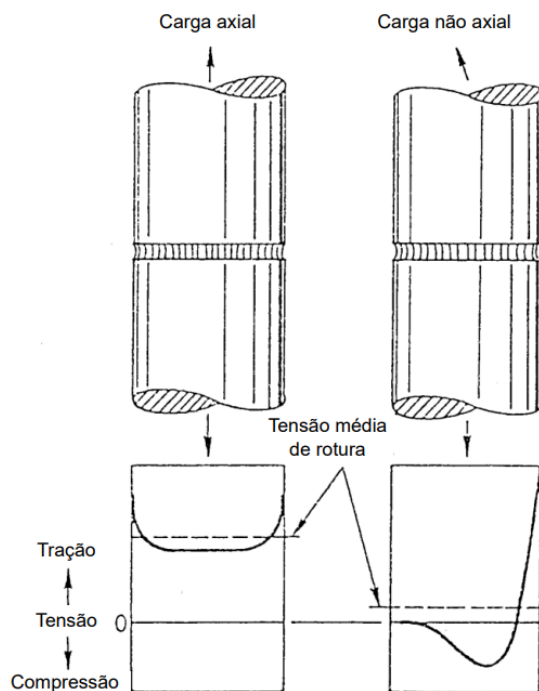


Figura 8 - Distribuição de tensões numa junta adesiva tubular solicitada sob a forma axial (esquerda) e não axial (direita). Adaptado de Petrie [2].

A Figura 9, adaptada de Mertiny e Ellyin [133], ilustra um dispositivo semiautomático de alinhamento implementado para alinhar as extremidades do tubo e garantir que a junta adesiva é solicitada preferencialmente ao corte, garantindo o rigor dos resultados obtidos nos ensaios experimentais. O alinhamento dos aderentes também é relevante para solicitações compressivas, ainda que no caso da compressão pura teoricamente não se justifique utilizar um adesivo, já que os aderentes descarregam os esforços no aderente homólogo, o que não requer uma reação normal à carga [3].

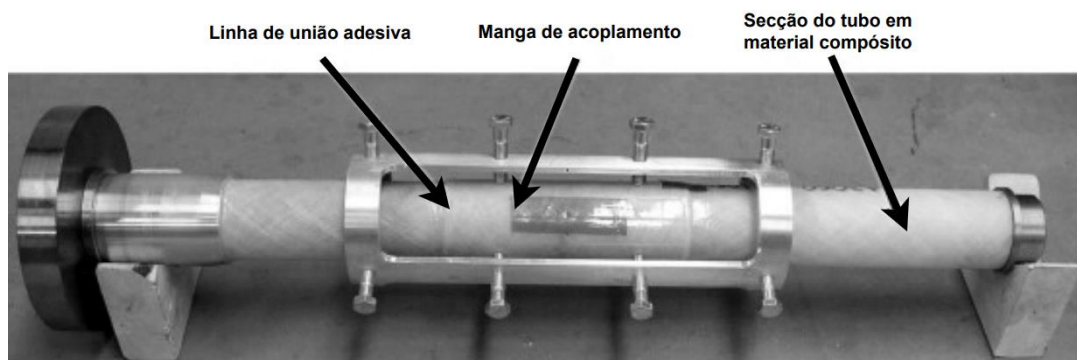


Figura 9 - Dispositivo semiautomático de alinhamento. Adaptado de Mertiny e Ellyin [122].

### 2.3.4. Aplicações de juntas tubulares

O uso de ligações adesivas vem-se tornando cada vez mais popular em vários setores da indústria, e o comércio de adesivos tem por base os benefícios que este processo de ligação apresenta quando comparado com as ligações aparafusadas e rebitadas. As juntas adesivas tubulares têm variadas aplicações, como em treliças, eixos de máquinas, chassis de veículos, tubos de paredes finas e tubagens [115]. O recurso a adesivos estruturais para garantir a ligação entre secções tubulares é um método recorrente e diferenciador na indústria. É de notar que aderentes à base de polímeros e compósitos se têm tornado uma alternativa aos metálicos, devido à elevada resistência à corrosão e em particular à relação resistência-peso. O peso reduzido deste processo de ligação conduz a reduções no consumo de combustível de um veículo e melhora a sua manobrabilidade [119]. É de notar que existe um método conveniente para a união de aderentes de secções tubulares finas, no entanto a literatura correspondente é muito reduzida [7, 134]. É fulcral adequar o tipo de junta adesiva a utilizar mediante as condições térmicas expectáveis, uma vez que a variação térmica pode provocar a contração da camada adesiva. A transferência de calor através da junta adesiva ocorre por condução, no entanto ocorre por convecção das superfícies da junta para o fluido e vice-versa. O contorno das condições térmicas torna complexa a análise de transferência de calor numa junta adesiva, mas é relevante prever as condições práticas de utilização das mesmas [13]. A Figura 10 ilustra um modelo mecânico simplificado de uma junta tubular sob IPB (*In-Plane Bending*), que pode ser integrada no projeto de estruturas treliçadas. É de notar que na fase de projeto as linhas de eixo neutro dos diferentes elementos devem intersestar-se, de maneira a garantir a correta transmissão dos esforços. Um dos principais desafios dos processos de ligação consiste na união de materiais dissimilares, particularmente quando as suas dimensões são diminutas.

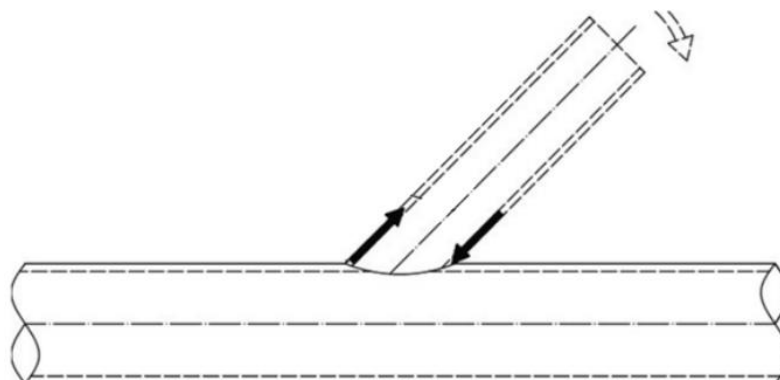


Figura 10 - Modelo mecânico simplificado de uma junta tubular sob IPB. Adaptado de Gao et al. [135].

A Figura 11 ilustra uma proposta inovadora da empresa DYMAX, que permite a união e montagem de cateteres à base de Nylon e de um elastómero termoplástico, PEBA (*Polyether Block Amide*), por intermédio de um adesivo curável por LED (*Light-Emitting Diode*) [136].



Figura 11 - União e montagem de cateteres à base de Nylon e de PEBA com um adesivo curável por LED [136].

### 2.3.5. Estado-da-arte

A Tabela 4, que se divide na identificação das referências e descrição dos trabalhos, foi criada com o objetivo de expor artigos científicos relevantes e emergentes, no âmbito dos métodos de previsão de resistência das juntas adesivas tubulares. A opção por artigos científicos atuais visa contemplar a evolução desta área de estudo. É de notar que, devido à preponderância dos MDC neste tipo de análise, apenas são considerados trabalhos que utilizam este método. A análise e o estudo dos trabalhos de investigação descritos abaixo, no âmbito da modelação por MEF de juntas adesivas tubulares de diferentes configurações, submetidas a diferentes condições fronteira, permitiram alavancar o desenvolvimento numérico da presente dissertação.

Tabela 4 - Estado-da-arte (MDC).

| Referências           | Descrição                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                    |
|-----------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Oliveira et al. [115] | O presente estudo analisou o comportamento à torção de juntas adesivas tubulares de alumínio, por MDC. A validação por intermédio dos valores experimentais foi realizada para ensaios de tração. Os valores obtidos foram satisfatórios e registou-se um desvio máximo de 6,1% entre os valores numéricos e experimentais. Realizaram-se análises numéricas em juntas adesivas à torção, e foram construídos modelos 3D para simular o efeito nos aderentes. A análise da tensão $\tau_{xy}$ revelou uma diferença significativa entre $L_0=20$ e 40 mm. No último caso, desenvolveram-se tensões de pico significativas nas extremidades de $L_0$ . Por outro lado, valores mais elevados da espessura do tubo exterior e interior resultam em tensões de pico $\tau_{xy}$ menores. Esta diferença não se verificou no $M_m$ (momento torsional máximo), na medida em que valores mais elevados de $t_{SI}$ e $t_{SE}$ conduziram a valores de $M_m$ mais elevados. No entanto, $t_{SE}>2$ mm foi ineficaz, levando à fratura prematura na camada adesiva. |

|                     |                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                     |
|---------------------|-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Ferreira et al. [7] | <p>Os autores avaliaram a resistência à tração de juntas tubulares de alumínio numericamente e experimentalmente. Realizaram ensaios experimentais em três adesivos, para <math>L_0=20</math> e 40 mm. Experimentalmente, os adesivos mais frágeis comportaram-se melhor para valores de <math>L_0</math> mais curtos, devido à distribuição de tensões mais uniforme. Adesivos mais dúcteis são mais indicados para anular os picos de tensão nas extremidades da sobreposição. Apesar da elevada ductilidade do Sikaforce® 7752, a resistência mecânica é muito inferior aos restantes adesivos, e acaba por registar os piores resultados. Os MDC foram precisos na previsão de resistência das juntas adesivas para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. A análise em função de <math>L_0</math> confirma a preferência pelo Araldite® 2015, em relação ao Araldite® AV138, para valores de <math>L_0&gt;20</math> mm. Valores de <math>t_{SE}</math> elevados provocam uma redução progressiva de <math>P_m</math>, quando a rotura é coesiva no adesivo. O aumento de <math>t_{SE}</math> e <math>t_{SI}</math> resulta no aumento dos valores de <math>P_m</math>, no caso de a rotura ser coesiva no aderente.</p> |
| Barbosa et al. [6]  | <p>O presente trabalho utilizou ensaios experimentais e MDC para estudar o comportamento à tração de juntas tubulares de alumínio. Concluiu-se que, para valores de <math>L_0=20</math> mm, o adesivo Araldite® AV138 apresenta os valores de <math>P_m</math> mais elevados, apesar da sua natureza mais frágil. Para valores de <math>L_0</math> inferiores, verificou-se que os parâmetros <math>G_{IC}</math> e <math>G_{IIC}</math> não têm influência significativa sobre <math>P_m</math>. Resumindo as análises experimentais, para adesivos cujo <math>L_0</math> é menor, os adesivos mais rígidos são os que apresentam melhor desempenho. Para adesivos dúcteis, o aumento do <math>L_0</math> aliado à capacidade plástica destes materiais permite obter resultados mais satisfatórios do que com adesivos frágeis. Os MDC previram com precisão a resistência de juntas adesivas com Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Concluiu-se que a técnica utilizada prevê com rigor o comportamento de juntas tubulares, para uma ampla gama de propriedades adesivas.</p>                                                                                                                                                    |
| Silva et al. [137]  | <p>O presente estudo teve como objetivo comparar numericamente, através de MDC, o desempenho à tração de juntas tubulares de chanfro interior, para valores de <math>\alpha=45</math> e <math>3,43^\circ</math>. O modelo e os parâmetros do adesivo foram validados, com desvios de 6% entre valores experimentais e numéricos. A análise numérica envolveu a análise de tensões, e concluiu-se que <math>\sigma_y</math> era insignificante para valores de <math>\alpha</math> menores, e que as <math>\tau_{xy}</math> eram praticamente uniformes ao longo da linha de contacto do adesivo. A análise do dano no adesivo permitiu constatar que este se concentra na periferia de <math>L_0</math>. O modo de rotura foi maioritariamente coesivo, ainda que nesta configuração de junta e para o menor valor de <math>\alpha</math>, tenha ocorrido plastificação do aderente.</p>                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                            |

## 2.4. Processo de hidroformagem

O processo de hidroformagem apresenta inúmeras vantagens quando comparado com outros processos de ligação convencionais, e está amplamente difundido na indústria automóvel, em particular no processo de fabrico de aderentes tubulares com ressalto exterior [138]. O processo garante a consolidação da peça final, o aumento de resistência e rigidez torsional, a diminuição do peso final da ligação, e ainda maior eficiência do que os processos homólogos, uma vez que garante melhor acabamento superficial, com uma redução inequívoca das operações de acabamento [139, 140]. O presente método implica um menor investimento por parte das empresas para obter geometrias complexas, inclui um número inferior de componentes e não exige operações de acabamento secundárias.

A hidroformagem de aderentes tubulares, ou *Tubular Hydroforming* (THF), apresenta também algumas desvantagens relativamente aos processos de ligação convencionais, muito por conta de ser emergente e estar em constante desenvolvimento. No caso particular da produção em série, este processo pode tornar-se mais moroso quando comparado a outros, implicando um elevado investimento. Existe ainda pouca literatura associada ao projeto de ferramentas ideais para execução do trabalho [141]. Estes fatores justificam um planeamento cuidadoso da implementação na indústria, implicando a utilização de modelos de análise numérica que têm por base, por exemplo, os MDC.

A hidroformagem remonta para a data de 1939, quando Gray et al. [142] investigaram o fabrico de ligações em cobre sem costuras com saliências em T, utilizando para o efeito uma combinação dos efeitos de pressão interna e carga axial. O presente trabalho foi reconhecido e patenteado pelos EUA, tendo possibilitado a revisão de investigações anteriores a esta e disponibilizando-a para futuros estudos nesta área. Investigadores japoneses, no âmbito da indústria automóvel, alavancaram o processo de união de secções tubulares por intermédio do processo de hidroformagem, no entanto, a afirmação da técnica na indústria remonta para o final do séc. XX. [143]. O processo de hidroformagem tem sofrido alterações, o que resulta numa maior capacidade de adaptação às necessidades do mercado. Atualmente, a técnica de THF encontra-se amplamente difundida na indústria automóvel, aeronáutica, aeroespacial e sanitária, entre outras. No âmbito da indústria automóvel, a presente técnica aplica-se a componentes do sistema de escape (na grande maioria em aço inoxidável), componentes de transmissão e propulsão, painéis, entre outros [143].

### Descrição do processo de hidroformagem

O sistema de THF está ilustrado na Figura 12. O processo de THF consiste numa técnica na qual um aderente tubular, retilíneo ou com um determinado ângulo de dobragem, é posicionado entre duas metades de uma matriz que envolve o aderente em concordância com o eixo de simetria do tubo e o plano de apartação. No interior do componente, é introduzido um fluido incompressível, que é pressurizado após o fecho do molde, expandindo o material contra a superfície interior do molde. O fluido é fornecido através de orifícios maquinados nos êmbolos, evitando a acumulação de ar no seu interior. O aderente tubular é forçado a adotar o mesmo contorno interno do molde, quer pela aplicação de pressão interna, quer pela aplicação de forças axiais via êmbolos. A pressão interna pode ser transmitida por intermédio de um elastómero, como o poliuretano (PU), ou através de um metal macio, como o chumbo. De modo a facilitar o processo de conformação, é comum aplicar um deslocamento axial numa das extremidades dos aderentes. A presença de forças axiais não é

imperativa para que os aderentes possam ser conformados plasticamente, uma vez que o efeito do aumento da pressão interna é suficiente para obter a forma desejada. No entanto, é determinado um limite pelo fabricante do equipamento, que determina a intensidade das cargas axiais a aplicar, de modo a não ocorrerem fugas e a compensar o aumento da pressão interna [144].

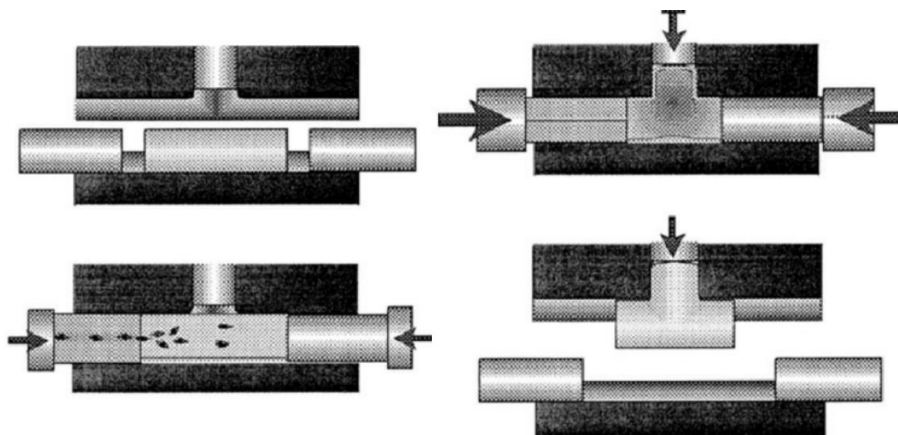


Figura 12 - Sistema de hidroformagem tubular. Adaptado de Leitloff [140].

### Parâmetros do processo de hidroformagem tubular

No âmbito do controlo de qualidade do produto final obtido, devem ser considerados de forma criteriosa alguns fatores como propriedades mecânicas dos aderentes, formabilidade, coeficientes de atrito, tipo de lubrificação e rugosidade superficial, e o projeto de pré-formas ou moldes [145]. É de notar que entraves como o custo, os pesos finais da união, entre outras, devem ser de prioridade secundária quando comparadas com requisitos como a elevada resistência mecânica, a baixa anisotropia, a elevada percentagem de alongamento, a pequena dispersão das propriedades mecânicas face à zona termicamente afetada e ainda a composição química dos aderentes [144, 146]. As condições de lubrificação são de elevada importância, em particular, quando é imposto um deslocamento às extremidades do aderente a ser conformado plasticamente. A rugosidade superficial, o atrito e o regime de lubrificação são de particular importância na fase final de hidroformagem, onde já não existe deslocamento das extremidades dos aderentes e apenas se encontram sujeitos a pressão interna. Em suma, controlar o regime de lubrificação permite facilitar a desmoldagem dos aderentes, reduzir o efeito dos esforços axiais, retardar o desgaste das ferramentas e evitar a encurvadura associada ao deslocamento imposto na direção axial [147].

## 2.5. Método de Taguchi

Genichi Taguchi foi um Engenheiro e estatístico japonês que dedicou a sua vida profissional às áreas da Qualidade e da Gestão da Qualidade. É frequentemente referenciado em trabalhos de investigação, a par de outros nomes, como Kaoru Ishikawa, William Edwards Deming e Joseph Moses Juran [148]. No mundo atual, e tendo em conta o fenómeno da globalização e a elevada competitividade, as empresas sentem uma elevada necessidade de garantir a Qualidade dos produtos e serviços prestados, determinante para a sustentabilidade económica das mesmas. Todavia, a garantia de determinados padrões de Qualidade pode ser incompatível com a minimização de custos. É altamente recomendado aplicar técnicas do sistema de Gestão da Qualidade, a par de modelos que permitam o controlo dos processos, de maneira a garantir melhores resultados na produtividade, e redução de atrasos e não conformidades. O Método de

Taguchi (MT) consiste num método de Controlo da Qualidade focado no produto e no projeto de cada processo, e tornou-se imprescindível por garantir melhorias consideráveis na qualidade do produto final e um rácio custo/benefício muito atrativo para o consumidor. Taguchi afirma que a Qualidade é quantificada pelo desvio que o valor de uma característica fulcral (a controlar) apresenta relativamente ao seu valor-alvo (valor esperado) [149]. Taguchi defende que uma produção focada num valor-alvo reduz a variabilidade, que é inimiga da qualidade. Os desvios registados de uma característica a monitorizar face a um valor-alvo podem ser causados por fatores controláveis/intrínsecos ou fatores não controláveis/extrínsecos. A influência dos fatores mencionados nas características a controlar são avaliadas através de técnicas estatísticas [148].

O MT visa minimizar a variabilidade através da identificação dos meios que conferem robustez ao produto, face às fontes de variação a que este se encontra sujeito [149]. O domínio de processo permite identificar os fatores que possam ter influência sobre os valores exibidos pelas características a controlar, permite ainda identificar fatores de origem externa dificilmente controláveis, e que ocasionam desvios relativamente ao valor alvo. Garantir a qualidade implica considerar todas as combinações de regulação do processo. No entanto, a avaliação de todas as combinações e possibilidades implica um investimento elevado e um longo período de avaliação e preparação. Taguchi propõe realizar um conjunto de experiências devidamente planeadas, e cujas variáveis intrínsecas envolvidas devem intervir em níveis diferentes. O autor sugere o desenho estatístico de experiências. O desenho estatístico das experiências avalia o efeito na variável de saída de alterações propostas ao nível das variáveis de entrada (fatores com ação perturbadora) de um sistema. O MT consiste num método de desenho de experiências fatoriais fracionado, uma vez que executa uma única fração do número de combinações totais dos níveis das variáveis de perturbação. Taguchi propôs a utilização de matrizes compostas por vetores ortogonais para definir o número de experiências a executar, e cada uma deverá corresponder a uma combinação dos níveis para as variáveis intrínsecas e ser replicada para diferentes condições das variáveis extrínsecas. As experiências anteriormente mencionadas permitem simular condições específicas de uma linha de produção, afetas de fatores de variação que permitem identificar as variáveis intrínsecas que mais afetam a variabilidade, assim como os níveis em que estas devem ser mantidas, de maneira a minimizar a variabilidade. O MT considera uma função de perda, que está associada ao desvio entre o valor-alvo e a característica da qualidade, sendo que:  $y$  representa o valor observado da característica da qualidade;  $y_0$ , o valor alvo; e  $k$ , a constante de proporcionalidade [148].

$$L(y) = k \times f(y - y_0)^2 \quad (2)$$

Tendo em consideração a Equação (2), Taguchi obteve diferentes quocientes SN (sinal-para-ruído). O autor definiu cada quociente com um propósito:

- Quanto maior o valor, melhor (resistência mecânica):

$$SN = -10 \times \log_{10}[(1/n) \times \sum_{i=1}^n (1/y_i^2)] \quad (3)$$

- Quanto menor o valor, melhor (picos de tensão nas extremidades da sobreposição):

$$SN = -10 \times \log_{10}[(1/n) \times \sum_{i=1}^n (y_i^2)] \quad (4)$$

- O valor alvo é o melhor (dimensão):

$$SN = 10 \times \log_{10}(y_m^2/s^2) \quad (5)$$

em que,  $y_m$  corresponde à média dos resultados (resposta),  $s^2$  à variância dos resultados (resposta),  $y_i$  à resposta  $i$ , e  $n$  ao número de tentativas de cada experiência.

A minimização da função de perda está diretamente relacionada com a maximização do quociente  $SN$ , ou seja, quanto maior o valor do quociente, melhor [148]. O MT propõe uma série de etapas a seguir que podem enumeradas da seguinte forma:

1. Identificação do problema ou objetivo da análise;
2. Identificação da característica a otimizar;
3. Seleção adequada do quociente  $SN$  que melhor se adapta à resposta e ao presente estudo;
4. Identificação dos fatores de ruído (não controláveis ou cujo controlo implica um elevado investimento) que possam ter impacto na qualidade da linha de produção;
5. Identificação dos fatores controláveis que possam impactar a resposta escolhida, e dos níveis de cada fator que definem o número de ensaios a realizar;
6. Seleção da matriz de experiências, que deve respeitar o número de graus de liberdade dos parâmetros e níveis em estudo, e delineamento do procedimento da análise de dados. Em suma, um estudo que implique quatro fatores e três níveis cada, os parâmetros vão ter dois graus de liberdade. Ou seja, será necessário gerar uma matriz com oito linhas. Se existir uma interação entre fatores, deve optar-se pela matriz mais adequada, sendo que para estudar a interação entre dois fatores é necessário introduzir a informação numa das colunas da matriz. A presente coluna obtém-se cruzando as colunas dos fatores em causa, e caso o nível de interação dos fatores seja o mesmo atribui-se o nível 1, caso contrário, atribui-se o nível 2;
7. Realização das experiências determinadas pela matriz de vetores ortogonais e anotação dos resultados. Apesar das experiências poderem ser realizadas de acordo com uma ordem aleatória, pode ser realizada uma experiência para cada combinação ou várias dependendo do número de fatores de ruído;
8. Determinação dos valores de  $SN$  selecionados;
9. Executar a Análise de Variância (ANOVA) sobre os valores de  $SN$  e sobre as médias das respostas, de maneira a avaliar a importância de cada parâmetro na variação da qualidade do produto;
10. Em seguida, devem ser identificados os fatores significativos (de controlo) sobre os quocientes  $SN$ , e o fator sinal sobre as médias das respostas na tabela ANOVA;
11. Identificação da regulação paramétrica ótima. Esta etapa pode ser feita de diferentes formas, dependendo do problema em questão. Por exemplo, os níveis que produzem menor variabilidade para os fatores de controlo maximizam o quociente  $SN$  e para o fator ruído o nível que aproxima a resposta ao valor médio. Para os demais fatores, devem ser mantidos os níveis utilizados anteriormente;
12. Realização de um ensaio de confirmação.

Para garantir que se verificou uma melhoria no processo deve ser realizado um ensaio de confirmação, caso contrário, o processo deve repetir-se noutras condições [148].

## 2.6. Juntas tubulares bi-adesivas

As juntas bi-adesivas consistem numa união que inclui dois adesivos com características dissimilares, um dúctil e um frágil, e que devem ser aplicados de forma criteriosa ao longo de  $L_0$  [150-154]. O adesivo frágil deve ser aplicado na zona intermédia da união. O adesivo dúctil deverá preencher as extremidades sobrepostas, onde se registam concentrações de tensão mais críticas sob condições de carga quase estática [155]. A implementação de um adesivo dúctil nas extremidades traduz-se na uniformização do campo de tensões ao longo de  $L_0$  e pode ser possível aumentar a resistência mecânica da ligação, caso se registre o aumento do valor de  $P_{máx}$  [156]. É de mencionar que as relações mecânicas, os modos de rotura e a previsão da resistência das juntas bi-adesivas são muito complexos, e o início do dano ocorre geralmente em modo misto [157, 158]. A Figura 13, adaptada de Akhavan-Safar et al. [156], ilustra diferentes configurações comuns de juntas bi-adesivas.

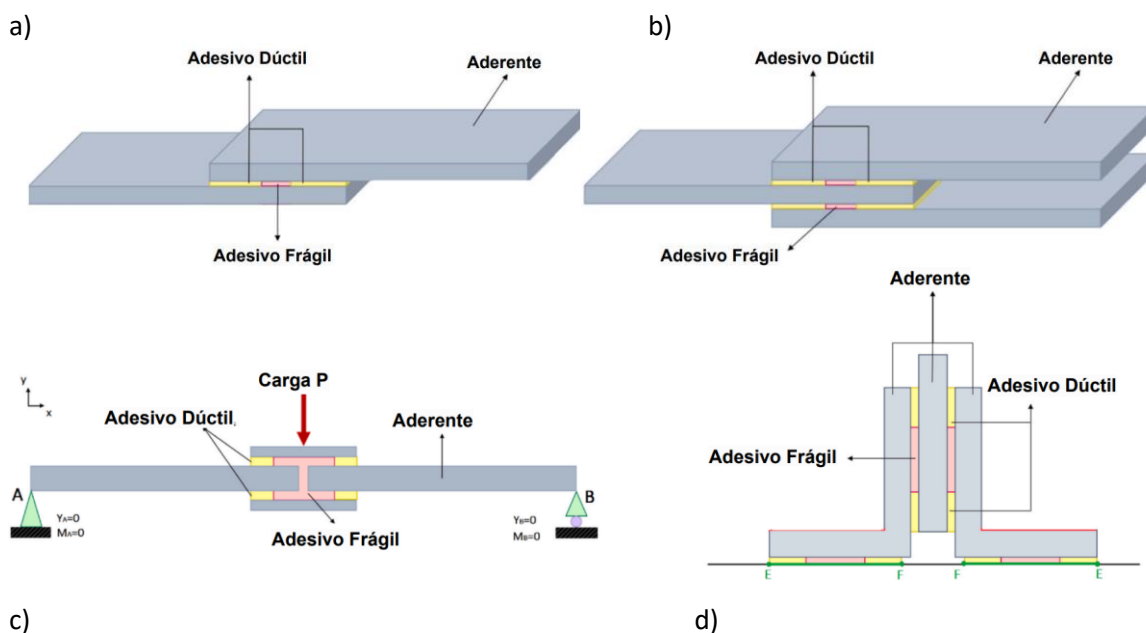


Figura 13 - Configurações esquemáticas de juntas bi-adesivas mais comuns: a) JSS; b) JSD; c) Cobre-Junta; D) Junta em T. Adaptado de Akhavan-Safar et al. [223]

O aumento da deformação máxima registada pode ser desprezado face ao aumento do valor de  $P_{máx}$ , o que indica que a presença do adesivo mais rígido no interior da junta adesiva limita a deformação do adesivo mais dúctil [159-161]. De acordo com a área de investigação associada e a literatura existente, as juntas bi-adesivas são preferencialmente solicitadas à tração e à flexão [162-164], ainda que tenham sido desenvolvidos estudos no âmbito da previsão da resistência ao impacto [165-169]. De acordo com a literatura e os autores mencionados à posteriori, a resistência das juntas bi-adesivas analisadas revelou ser substancialmente superior às geometrias de junta homólogas de adesivo único [165-169]. É de notar que as condições dos ensaios experimentais, como a preparação superficial e o alinhamento dos aderentes, e das análises numéricas, definidas no pré-processamento dos modelos, têm influência na obtenção de resultados. A percentagem de adesivo dúctil face ao valor original de  $L_0$  deve ser rigorosamente definida, na medida em que a partir de uma certa quantidade de adesivo dúctil ocorrem perdas substanciais de resistência das juntas adesivas. É de realçar que a correta seleção da combinação adesiva, assim como o ajuste dos mais variados parâmetros geométricos, tem uma influência significativa nos resultados [156]. A área de investigação dedicada à previsão da resistência mecânica de juntas bi-adesivas encontra-

se limitada relativamente às condições de carregamento, material dos aderentes e geometria de juntas. Uma vez que o fabrico deste tipo de juntas adesivas revela deficiências face às diferenças nos ciclos de cura e ao controlo de  $L_0$  dos diferentes adesivos, tornou-se necessário rever as técnicas de fabrico por intermédio de JSS e placas. Até à data, os trabalhos de investigação propõem a análise de parâmetros e condições como o rácio do comprimento dos adesivos utilizados, o rácio do  $E$  definido pela razão entre a rigidez dos diferentes adesivos, espessura da camada adesiva, entre outros. Os parâmetros geométricos mencionados devem ser estudados de maneira a fazer variar os mesmo de forma individual e interativa.

Os autores da Silva et al. [165] dedicaram-se ao estudo de juntas bi-adesivas de baixas (ABT) e altas temperaturas (AAT), e utilizaram aderentes similares e dissimilares nas diferentes análises. No presente trabalho, só tinha sido considerada uma alteração nas propriedades da camada coesiva. Desta maneira, foi necessário considerar uma evolução por etapas do  $E$  do adesivo ao longo de  $L_0$ , com vista a reduzir a concentração de tensões de corte e arrancamento nas extremidades sobrepostas. O principal objetivo do trabalho proposto consistiu em formular a distribuição de tensões ao longo da camada adesiva relativamente às propriedades geométricas e materiais dos adesivos e aderentes utilizados [170]. Da Silva e Adams [171] abordaram o conceito de juntas bi-adesivas sob o ponto de vista teórico. Os autores propuseram uma geometria de junta que utilizava um AAT na zona intermediária da sobreposição e um ABT nas extremidades de  $L_0$ . A análise teórica demonstrou que a junta bi-adesiva pode ser utilizada com melhorias da resistência da união para uma gama de temperaturas compreendida entre os -55 e 200 [°C], quando comparada com a utilização unicamente de AAT. No entanto, é de notar que para aderentes similares a técnica de módulo misto acrescenta pouco valor à resistência da ligação. Todavia, para juntas cujos aderentes são à base de metais e compósitos ocorre uma melhoria significativa das propriedades, muito por conta da diferença dos coeficientes de dilatação térmica dos diferentes materiais. Quanto maior a diferença da propriedade enunciada, melhores são as propriedades obtidas [172]. O fabrico de juntas com adesivos distintos é particularmente difícil, muito por conta das temperaturas e dos processos de cura não serem compatíveis.

No entanto, no presente trabalho de investigação, os adesivos utilizados curam todos à temperatura ambiente, e não foi necessário considerar a influência desta contraindicação. Da Silva e Adams [171] concluíram que numa junta bi-adesiva, a maior parte da carga aplicada será suportada pelo ABT e não pelo AAT, o que confirma o propósito da aplicação do adesivo duplo na união. Os resultados demonstraram ser válidos para espessuras da camada adesivas inferiores a 1 mm, e até superiores a este valor. Os autores concluíram ainda que uma JSS bi-adesiva pode ser dotada de maior resistência mecânica a altas temperaturas (200 °C) do que uma JSS com AAT sujeito a baixas temperaturas (-55 °C). De maneira a justificar a utilização de um sistema bi-adesivo a baixas e elevada temperaturas, os conjuntos foram submetidos a vários ciclos térmicos. Os autores concluíram que um ABT não se degrada após um estágio a altas temperaturas, e os AAT não entram em rotura após estágios a baixas temperaturas.

## 2.7. Aderente não hidroformado de PRFC

Nas últimas décadas, os materiais compósitos afirmaram-se na indústria aeronáutica e automóvel. Os PRFC (Polímeros Reforçados com Fibra de Carbono) são preferidos aos demais compósitos muito por conta da exigência dos projetos industriais e da elevada rigidez e resistência específica que os caracteriza. Adams [173] desenvolveu um estudo, cujo principal objetivo consistia em minimizar os

problemas associados à rotura transversal em juntas de sobreposição adesivas à base de compósitos. Uma das soluções propostas pelo autor é referente a uma JSD, cujo aderente interior é de PRFC e o aderente exterior é de aço. De acordo com a Figura 14, Adams [173] estudou a influência da inclusão de filetes de adesivo para  $L_0=50$  mm, de maneira a determinar qual a geometria ótima.

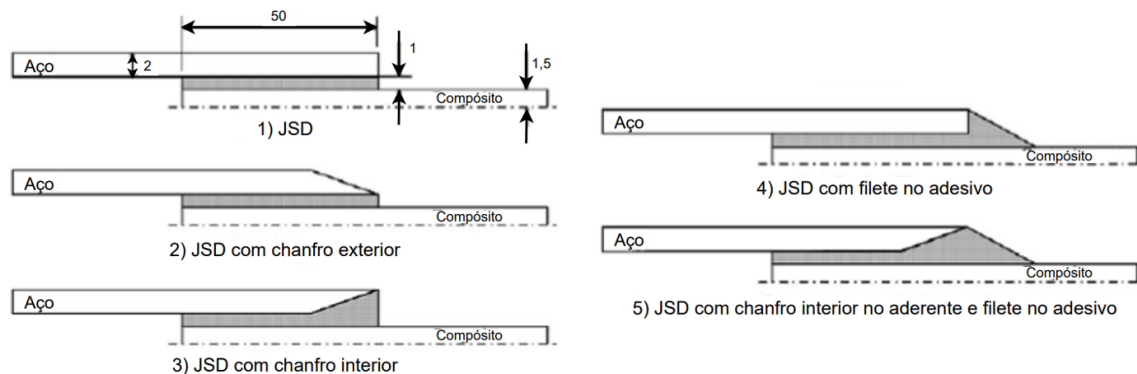


Figura 14 - JSD modificadas pela inclusão de chanfros. Adaptado de Adams [173].

De acordo com a ilustração anterior, o autor concluiu que as juntas adesivas numeradas 2 e 3 não apresentam melhorias significativas face à geometria de base. Todavia, a junta adesiva número 4 garante um aumento significativo da resistência da junta, e a junta número 5 apresenta a resistência mecânica mais elevada, quando comparada com as demais. A adição do filete adesivo promove a redução das tensões transversais ao longo do aderente compósito em cerca de 600%, face à geometria de base [173].

Na indústria da construção civil e mecânica, a união de aderentes de PRFC por intermédio de adesivos estruturais estava associada apenas ao reforço de estruturas de betão armado e alvenaria. Atualmente, os PRFC são materiais de eleição para o projeto de componentes estruturais em coberturas e até em algumas pontes.

### 3. DESENVOLVIMENTO

O Capítulo 3 é reservado ao desenvolvimento numérico da presente dissertação e encontra-se subdividido em cinco Subcapítulos principais, que correspondem aos Objetivos do desenvolvimento numérico, Materiais e métodos utilizados, Validação dos modelos coesivos para previsão da resistência da junta, Estudo numérico e Análise de mercado.

#### 3.1. Objetivos

Os objetivos específicos delineados para o Capítulo 3 consistem em:

- Caraterizar pormenorizadamente as diferentes geometrias de junta a analisar;
- Determinar os parâmetros materiais de cada adesivo utilizado;
- Validar os modelos coesivos utilizados na previsão da resistência mecânica das juntas adesivas;
- Avaliar de forma criteriosa a resistência mecânica dos conjuntos, a plastificação máxima dos aderentes, a ductilidade das juntas, a evolução da variável do dano para a carga máxima e ainda a distribuição das tensões ao longo de  $L_0$ ;
- Apresentar uma técnica estatística como alternativa à metodologia em árvore proposta inicialmente e obter uma menor combinação de juntas a testar, com consequente melhoria das propriedades mecânicas;
- Acrescentar valor à literatura atual através de propostas de alterações geométricas e abordagem da técnica de hidroformagem;
- Realizar uma análise de mercado e comparar os ganhos percentuais de resistência e ductilidade com o investimento requerido em moldes, matéria-prima e trabalho de maquinaria suplementar.

#### 3.2. Materiais e métodos

O Subcapítulo 3.2 aborda as diferentes geometrias de junta a analisar, requisitos e limitações do trabalho de investigação e carateriza os diferentes materiais envolvidos nas análises. Procurou-se mencionar de forma criteriosa todos os pormenores relacionados com a modelação numérica, desde pressupostos teóricos sobre a escolha da técnica e modelo utilizado, até ao pré-processamento dos modelos e condições da análise numérica por etapas. O presente Subcapítulo termina com a determinação dos parâmetros materiais dos aderentes e de cada adesivo utilizado.

##### 3.2.1. Metodologia

No Subcapítulo 3.2, correspondente aos Materiais e métodos utilizados, foram abordadas as diferentes geometrias a analisar, requisitos e limitações do presente trabalho e foram caraterizados os materiais envolvidos nas análises numéricas. Este espaço contempla ainda a escolha da técnica de modelação numérica, assim como a formulação dos Modelos de Dano Coesivo. O presente Subcapítulo termina com a determinação dos parâmetros materiais de cada adesivo utilizado.

O Subcapítulo 3.3 foi reservado para validar os modelos coesivos utilizados na previsão da resistência mecânica das juntas adesivas. É de notar que foram ilustrados e devidamente comentados os resultados experimentais e numéricos para cada adesivo utilizado no estudo numérico. Os resultados obtidos foram discutidos e comparados de maneira a validar os resultados obtidos por MDC, a partir dos resultados experimentais.

O Subcapítulo 3.4 representa a grande maioria do volume de trabalho numérico realizado no presente trabalho de investigação. Uma vez que os objetivos da análise consistiam em avaliar de forma criteriosa a resistência mecânica dos conjuntos, a plastificação máxima dos aderentes, a ductilidade das juntas, a evolução da variável do dano para o instante da carga máxima e ainda a distribuição de  $\tau_{xy}$  e  $\sigma_y$ . Todas as etapas realizadas por intermédio do *software* utilizado foram descritas e devidamente documentadas por intermédio de gráficos e ilustrações, e encontram-se disponíveis para consulta nos APÊNDICES. Para qualquer geometria de junta adesiva analisada, os resultados foram discutidos e comentados, relativamente à geometria de base. A metodologia de trabalho neste Subcapítulo pode ser ilustrada sob a forma de um diagrama de árvore, de acordo com a Figura 15 e a Figura 16. As figuras ilustram a proposta de valor inicial, que consiste na variação de um único parâmetro geométrico e a combinação das diferentes geometrias com os três adesivos estudados, e as propostas de alterações geométricas, respetivamente, relativamente à geometria de referência (Subcapítulo 3.4.1). As variáveis ilustradas nos diagramas são definidas ao longo do presente Capítulo, e estão reunidas nas LISTAS DE SIGLAS, SÍMBOLOS E UNIDADES.

O Subcapítulo 3.4.6 foi criado com o objetivo de propor uma alternativa à metodologia em árvore apresentada na Figura 15 e na Figura 16. O MT foi apresentado como uma técnica que pode ser fundamental para auxiliar um gabinete de projeto, muito por conta das vantagens que apresenta face ao estudo intensivo de fazer variar cada parâmetro geométrico dos conjuntos analisados. Esta abordagem garante uma diminuição do tempo de análise computacional e consequente redução do investimento por parte da entidade patronal, por permitir combinar os diferentes parâmetros entre si e gerar um número mínimo de combinações de juntas adesivas. A análise estatística foi apresentada como uma alternativa ao método adotado. No entanto, foi aplicada após realização do estudo numérico referente à proposta de valor inicial, por existir uma incompatibilidade com as dimensões das matrizes ortogonais propostas pelo autor do presente método.

As propostas de alterações geométricas (Subcapítulo 0) foram incluídas no presente trabalho com o objetivo de concluir, face à geometria de base, se a existência de chanfros ou excesso de adesivo em forma de filete melhoram a resistência da junta e garantem a uniformidade das tensões ao longo de  $DN$ . De acordo com os resultados obtidos no Subcapítulo 3.4, as geometrias de junta que apresentam valores mais elevados de resistência mecânica e ductilidade utilizam o adesivo mais rígido dos três propostos, Araldite® AV138. Por este motivo, foi considerado somente o efeito de variação dos parâmetros geométricos alterados face ao estudo numérico anterior, e o adesivo utilizado manteve-se inalterado. De seguida, foi reservado um espaço com o objetivo de concluir, face à geometria de base, se conciliar adesivos com propriedades dissimilares na mesma união adesiva, e a inclusão de um aderente não hidroformado de PRFC em juntas bi-adesivas, têm como consequência a melhoria das propriedades mecânicas, relativamente à geometria de referência.

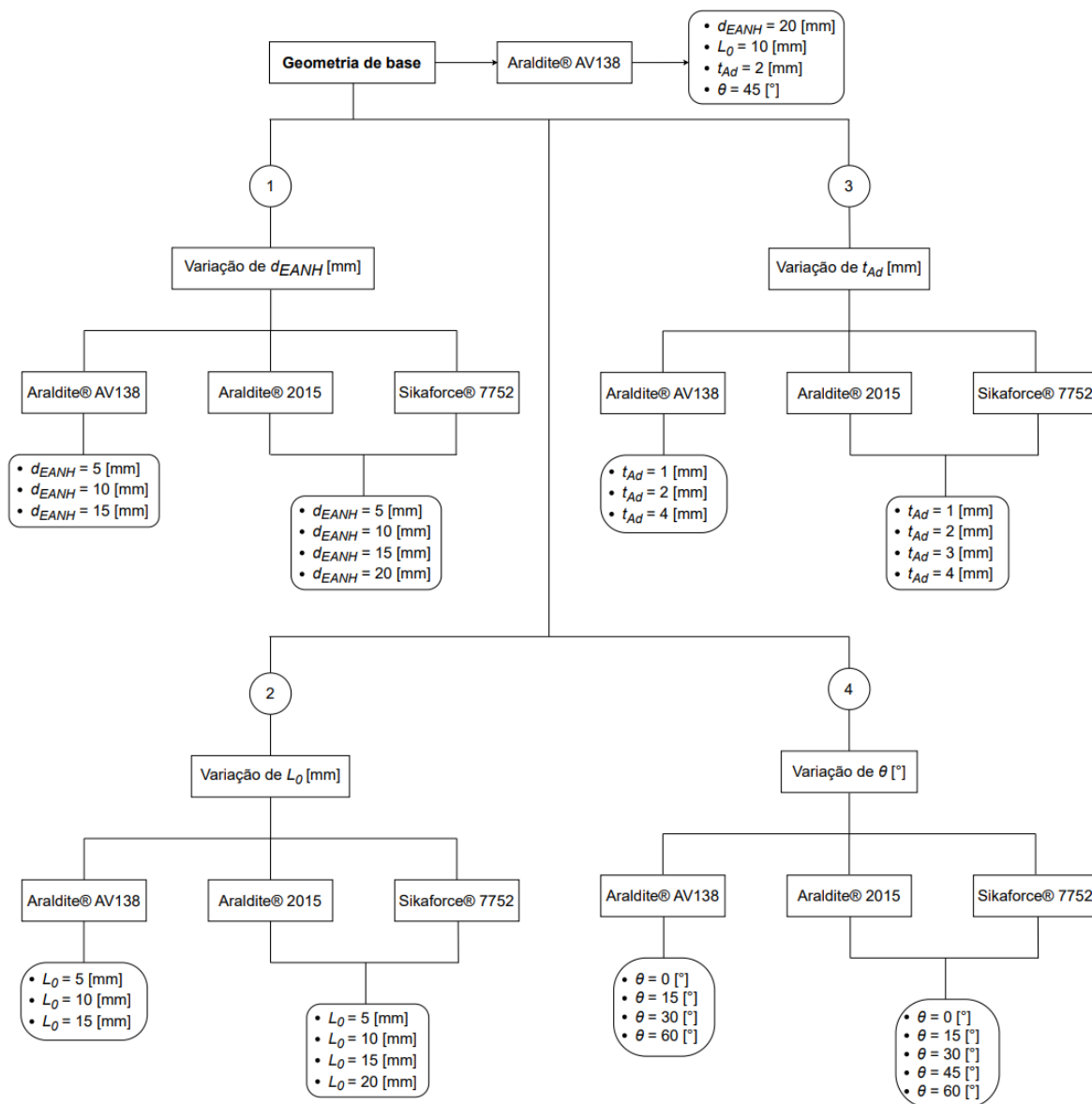


Figura 15 – Metodologia em árvore (proposta de valor inicial).

O Subcapítulo 3.5 foi criado com o objetivo de realizar uma análise de mercado que acrescenta valor ao trabalho de investigação e à literatura existente, e por fim validar se a ideia original é passível de ser implementada, do ponto de vista económico e industrial. Para tal efeito, foi projetado um molde que permite obter os aderentes hidroformados, seguindo-se de uma análise dos custos de maquinaria através do custo das matérias-primas, ferramentas e processos de fabrico.

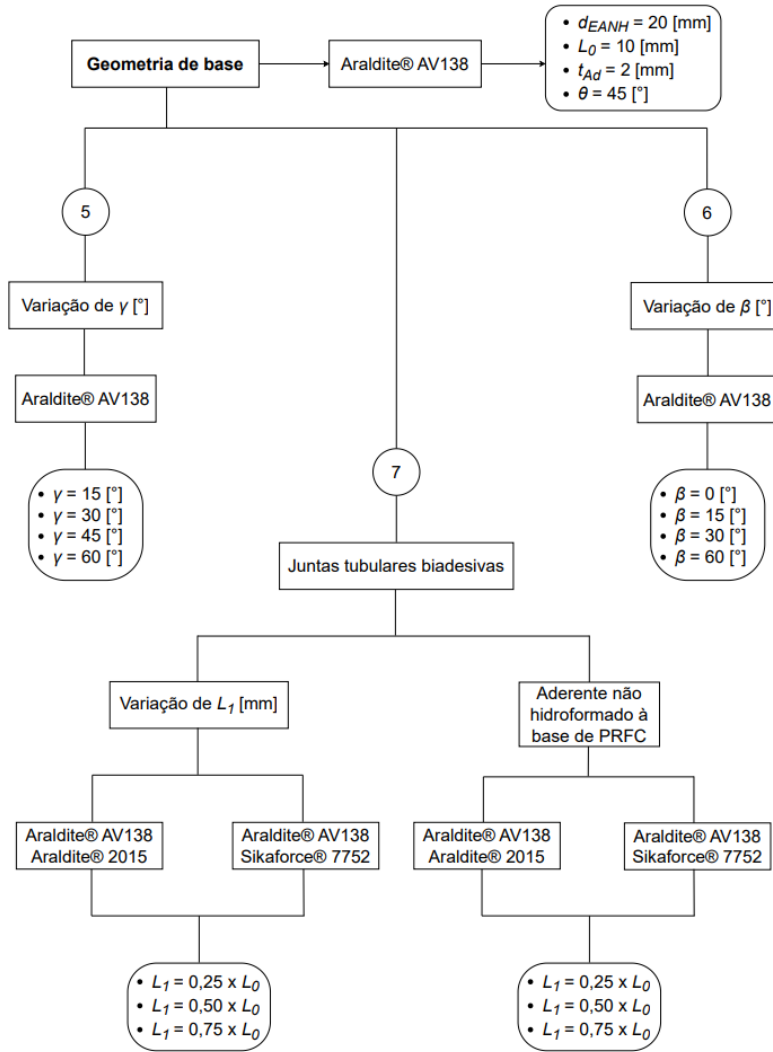


Figura 16 - Metodologia em árvore (Proposta de alterações geométricas).

### 3.2.2. Geometrias a analisar

A geometria de base proposta inicialmente está ilustrada na Figura 17. Esta consiste numa junta adesiva tubular de ressalto exterior, constituída por aderentes em alumínio da liga AW6082-T651 cujo elemento de ligação é um adesivo designado por Araldite® AV138. Os parâmetros que definem completamente a geometria da junta consistem no comprimento de sobreposição,  $L_0=10$  mm, diâmetro exterior do aderente não hidroformado,  $d_{EA\text{NH}}=20$  mm, ângulo do ressalto exterior,  $\theta=45^\circ$ , e espessura dos aderentes,  $t_{Ad}=2$  mm.

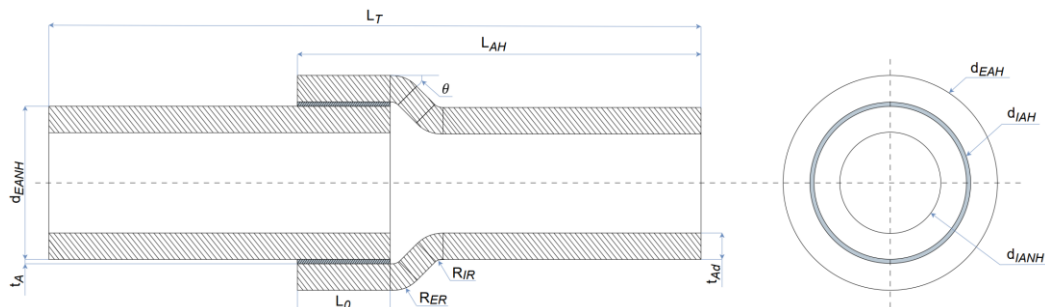


Figura 17 - Geometria de base e simbologia atribuída.

A Tabela 5 ilustra os parâmetros geométricos da geometria de base. A alteração dos parâmetros assinalados a verde em relação à geometria de base permite comparar os resultados das análises numéricas, na tentativa de identificar uma tendência padrão, e acrescentar valor ao trabalho de investigação realizado e à literatura existente. É de notar que as restrições e constrangimentos definidos no módulo *section sketch* de cada junta adesiva garantem a possibilidade de fazer variar um parâmetro geométrico sem desvirtuar a geometria tubular projetada inicialmente, uma vez que os contornos interiores e exteriores da junta se ajustam à redefinição de uma outra dimensão.

Tabela 5 - Parâmetros geométricos relativos à geometria de base proposta e analisada numericamente.

| Designação                                                 | Dimensão   |
|------------------------------------------------------------|------------|
| Comprimento de sobreposição, $L_0$                         | 10 [mm]    |
| Comprimento do aderente hidroformado, $L_{AH}$             | 45,94 [mm] |
| Comprimento total da junta adesiva tubular, $L_T$          | 80 [mm]    |
| Diâmetro exterior do aderente não hidroformado, $d_{EANH}$ | 20 [mm]    |
| Diâmetro interior do aderente não hidroformado, $d_{IANH}$ | 16 [mm]    |
| Diâmetro exterior do aderente hidroformado, $d_{EAH}$      | 24,4 [mm]  |
| Diâmetro interior do aderente hidroformado, $d_{IAH}$      | 20,4 [mm]  |
| Ângulo do ressalto exterior, $\theta$                      | 45 [°]     |
| Raio interior ressalto, $R_{IR}$                           | 1 [mm]     |
| Raio exterior ressalto, $R_{ER}$                           | 3 [mm]     |
| Espessura do adesivo, $t_a$                                | 0,2 [mm]   |
| Espessura dos aderentes, $t_{Ad}$                          | 2 [mm]     |

Na tentativa de obter um número considerável de dados para inferir quaisquer conclusões, e evitando gerar um número de combinações que tornaria o processo de análise confuso e de difícil interpretação, optou-se por uma geometria de base concordante com trabalhos realizados por outros investigadores. Relativamente à geometria de referência, a proposta de valor inicial considera a variação dos seguintes parâmetros geométricos:  $d_{EANH}$ ,  $L_0$ ,  $t_{Ad}$ ,  $\theta$ . A Tabela 6 ilustra, em função dos parâmetros geométricos, as diferentes configurações de juntas adesivas tubulares analisadas, sendo que as células assinaladas remetem para a configuração de base ilustrada na Figura 17. É de notar que apenas um parâmetro geométrico foi alterado por análise, e em nenhum dos casos se conciliou o efeito da variação de mais do que um fator geométrico.

Tabela 6 - Diferentes configurações de juntas adesivas tubulares analisadas, em função da variação dos parâmetros geométricos.

| Adesivo         | $d_{EANH}$ |    |    |    | $L_0$ |    |    |    | $t_{Ad}$ |   |   |   | $\theta$ |    |    |    |    |
|-----------------|------------|----|----|----|-------|----|----|----|----------|---|---|---|----------|----|----|----|----|
| Araldite® AV138 | 5          | 10 | 15 | 20 | 5     | 10 | 15 | 20 | 1        | 2 | 3 | 4 | 0        | 15 | 30 | 45 | 60 |
| Araldite® 2015  | 5          | 10 | 15 | 20 | 5     | 10 | 15 | 20 | 1        | 2 | 3 | 4 | 0        | 15 | 30 | 45 | 60 |
| Sikaforce® 7752 | 5          | 10 | 15 | 20 | 5     | 10 | 15 | 20 | 1        | 2 | 3 | 4 | 0        | 15 | 30 | 45 | 60 |

### 3.2.3. Requisitos e limitações

O trabalho numérico desenvolvido no Capítulo 2.4 implica o cumprimento de determinados requisitos, sem ignorar as limitações adjacentes à aplicação de determinados modelos de cálculo, entre outras. Os principais requisitos da modelação das juntas adesivas tubulares de ressalto exterior consistem na validação dos modelos coesivos para previsão da resistência das juntas adesivas.

Quanto à validação experimental dos modelos coesivos para previsão da resistência das juntas adesivas, e uma vez que a presente dissertação foca a análise numérica por MEF, não foram realizados ensaios experimentais que corroborem os resultados obtidos após o devido tratamento dos dados. O presente trabalho de investigação numérico tem por base a validação dos modelos coesivos através dos resultados experimentais e numéricos obtidos por Ferreira et al. [7]. Para obter as curvas  $P-\delta$  é necessário combinar os dados referentes ao deslocamento e à reação global no encastramento na direção longitudinal, em função do número de incrementos gerados pela análise. A  $ER$  deve ser determinada por intermédio das curvas  $P-\delta$ , uma vez que corresponde à área abaixo de cada curva obtida. Para obter a variável do dano no instante da carga máxima, deve ser maximizado o número de incremento até se atingir  $P_{máx}$ , de forma a melhorar a precisão na obtenção da variável em estudo. No âmbito do estudo da distribuição de  $\tau_{xy}$  e  $\sigma_y$  ao longo de  $L_0$ , é requerida a transformação do modelo inicial. Devem ser eliminadas as propriedades coesivas do adesivo, e admitir-se que o adesivo tem um comportamento isotrópico e o  $\nu=0,3$ . No módulo onde é definida a malha, é necessário realizar alterações no modelo de base ao nível dos controlos de malha e da dimensão das sementes, ou por tamanho aproximado ou por número de elementos. É fundamental aumentar significativamente o refinamento da malha que discretiza o corpo. As soluções devem ser obtidas para o primeiro incremento, através da direção longitudinal coincidente com  $L_0$  e o meio da espessura do adesivo. Os requisitos do sistema para utilizar o *software* de análise numérica incluem *hardware*, versões do sistema operacional e quaisquer outras ferramentas necessárias para executar o programa.

A preferência por juntas adesivas tubulares pode dever-se às restrições do projeto ou assentar na necessidade de reduzir o peso final de uma estrutura, de ligar dois materiais dissimilares sem danificar os aderentes, e na maior uniformidade da distribuição do campo de tensões. Atualmente, existem algumas lacunas sobre a previsão de resistência das juntas adesivas tubulares hidroformadas, quando comparado com as geometrias mais comuns. O tema proposto para a dissertação combina temas emergentes com condições abordadas em estudos do passado.

As principais limitações do desenvolvimento da presente dissertação estão diretamente relacionadas com limitações e lacunas na literatura atual, limitações do fabrico de juntas tubulares hidroformadas, e limitações da lei coesiva triangular aplicada a adesivos dúcteis. No que diz respeito às limitações da aplicação da lei coesiva triangular em adesivos dúcteis, e de acordo com os MDC existentes na literatura, a lei triangular pode não ser a mais adequada para modelar um adesivo menos rígido. A preferência por esta lei justifica-se pela possibilidade de contornar possíveis problemas de convergência face ao modelo analisado, permitindo obter a solução mais rapidamente. De acordo com Campilho et al. [174], adesivos mais dúcteis são altamente influenciados pela forma dos MDC. No âmbito do estudo realizado pelos autores, a lei trapezoidal foi a que melhor se ajustou aos dados experimentais. Os resultados gerais do estudo revelam que juntas formadas por aderentes ligados com adesivos dúcteis são altamente influenciadas pela

forma dos MDC, e a influência da lei utilizada é inversamente proporcional ao valor de  $L_0$ . As principais limitações no fabrico de juntas hidroformadas consistem no maior investimento em capital fixo inicial [175], menor cadência de produção [176], dificuldade em obter raios e ângulos apertados sem o recurso a amplificadores de pressão [177], e perda de ductilidade dos aderentes devido ao encruamento [178].

### 3.2.4. Caraterização dos materiais selecionados

O Subcapítulo 3.2.4 é reservado à caraterização dos materiais que incorporam as juntas adesivas analisadas numericamente. Os aderentes são fabricados em alumínio, mais precisamente da liga AW6082-T651, e os três adesivos utilizados para a previsão da resistência das diferentes geometrias analisadas designam-se por Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. É de notar que todos estes materiais foram caraterizados em trabalhos anteriores, conforme as referências nas devidas subsecções.

#### 3.2.4.1. Material dos aderentes

Os aderentes que constituem as juntas de ligação adesiva são fabricados em alumínio, mais especificamente da liga AW6082-T651. Esta liga de alumínio é particularmente adequada às propostas de geometria tubular estudadas, por conta das suas propriedades mecânicas, maximizando a resistência das juntas adesivas, e por estar amplamente difundida no mercado de aplicações estruturais sob a forma laminada ou extrudida [179]. A obtenção desta liga metálica implica um tratamento térmico a 180°, designado por envelhecimento artificial. A Tabela 7 ilustra as propriedades mecânicas atribuídas aos aderentes.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas atribuídas aos aderentes (Liga alumínio AW6082-T651).

| Material dos aderentes                             | Liga alumínio AW6082-T651 |
|----------------------------------------------------|---------------------------|
| Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]        | 324,00±0,16               |
| Módulo de Young, $E$ [GPa]                         | 70,07±0,83                |
| Tensão de cedência à tração, $\sigma_{yt}$ [MPa]   | 261,67±7,65               |
| Deformação de rotura ao corte, $\varepsilon_f$ [%] | 21,70±4,24                |

A Figura 18 ilustra as curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\varepsilon$ ) obtidas para os aderentes em alumínio em concordância com a norma ASTM-E8M-04, e ainda a aproximação numérica aplicada aos MDC [180]. É de notar que o material foi modelado numericamente com um comportamento perfeitamente plástico, o que retarda ligeiramente a plastificação dos aderentes.

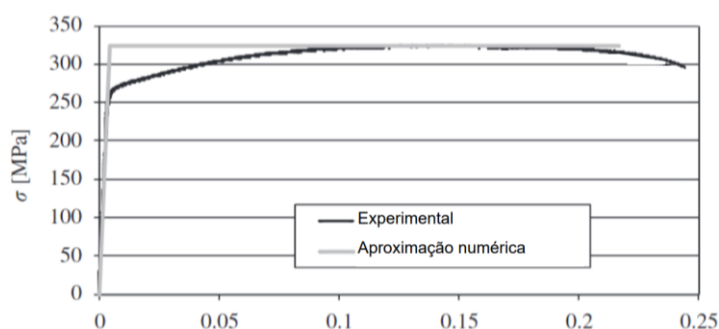


Figura 18 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  para o alumínio AW6082-T651 e aproximação à análise por MEF [180].

É de notar que o ressalto dos aderentes tubulares exteriores foi obtido por um processo de fabrico designado por hidroformagem. A implementação de processos de fabrico que conduzem à obtenção de estruturas tubulares leves em aço ou alumínio assentam em fundamentos onde se realça a padronização do processo de conformação de matéria-prima em pequena e grande escala. A hidroformagem tubular é um dos processos menos convencionais de conformação de metais, no entanto, é indicado para gerar formas complexas, como é o caso das juntas tubulares de ressalto exterior [181, 182]. A revisão bibliográfica do processo pode ser consultada com detalhe no Subcapítulo 2.4.

A resistência e durabilidade das juntas dependem do tratamento das superfícies dos aderentes a ligar. Os tratamentos superficiais podem ser agrupados em dois grupos principais, os processos passivos e ativos. Os processos passivos podem ser químicos ou mecânicos e não alteram a natureza química da superfície. Os processos ativos podem ser processos químicos ou físicos, e são utilizados quando se pretende obter a máxima resistência e permanência, além de garantirem a limpeza das superfícies e a remoção das camadas fracas, alteram a natureza química dos aderentes [183].

### 3.2.4.2. Material dos adesivos

O presente Subcapítulo é dedicado à caracterização dos três adesivos utilizados para a previsão da resistência e ductilidade das juntas adesivas analisadas. A opção pelos adesivos utilizados contempla uma gama de características mais ampla, incluindo adesivos dúcteis e frágeis, o que permite que o estudo realizado tenha um âmbito alargado e uma análise de resultados mais detalhada. Nos ANEXOS, é possível consultar informações relativas a propriedades mecânicas, modos de processamento, propriedades típicas pós-cura, precauções de segurança, guia de armazenamento e ainda alguma notas adicionais de precaução, para cada adesivo utilizado. A Tabela 8 ilustra as propriedades mecânicas dos adesivos de ligação utilizados [149,151,152].

Tabela 8 - Propriedades mecânicas dos adesivos de ligação utilizados [149,151,152].

| Adesivo                                            | Araldite®<br>AV138 [183] | Araldite®<br>2015 [184] | SikaForce®<br>7752 [185] |
|----------------------------------------------------|--------------------------|-------------------------|--------------------------|
| Módulo de Young, $E$ [GPa]                         | 4,89±0,81                | 1,85±0,21               | 0,494±0,896              |
| Coeficiente de Poisson <sup>2</sup> , $\nu$        | 0,35                     | 0,33                    | 0,33                     |
| Tensão de cedência à tração, $\sigma_{yt}$ [MPa]   | 36,49±2,47               | 12,63±0,61              | 3,24±0,5                 |
| Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]        | 39,45±3,18               | 21,63±1,61              | 11,49±0,3                |
| Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%] | 1,21±0,10                | 4,77±0,15               | 19,18±1,4                |
| Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]      | 1,56±0,01                | 0,56±0,21               | 0,1878±16,4              |
| Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]        | 25,10±0,33               | 14,60±1,30              | 5,16±1,1                 |
| Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]          | 30,20±0,40               | 17,90±1,80              | 10,17±0,6                |
| Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]      | 7,80±0,7                 | 43,90±3,40              | 54,82±6,4                |
| Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]               | 0,20 <sup>1</sup>        | 0,43±0,02               | 2,36±0,2                 |
| Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]              | 0,20 <sup>1</sup>        | 4,70±0,34               | 5,41±0,5                 |

<sup>1</sup>Valores de referência [185]

<sup>2</sup>Valores disponibilizados pelo fabricante

#### **3.2.4.2.1. Araldite® AV138**

O adesivo estrutural Araldite® AV138, cujo endurecedor se designa por HV 998, é um adesivo epóxico bicomponente com uma elevada resistência mecânica sob ação de ambientes quimicamente agressivos e temperaturas elevadas. No entanto, é considerado um adesivo frágil. O adesivo em conjunto com o endurecedor, quando combinados nas proporções adequadas, forma um sistema que se apresenta como uma pasta que cura a temperaturas próximas da ambiente. A baixa emissão de gases e perda de volatilidade que caracterizam este sistema, tornam esta família de adesivos especialmente adequada para aplicações na indústria das telecomunicações, eletrónica e aeroespacial. O sistema bicomponente apresenta como principais propriedades a baixa emissão de gases e perda de voláteis, excelente resistência química, resistência a temperaturas compreendidas entre os 5 e os 120°C, tixotropia, e baixo escorrimento.

#### **3.2.4.2.2. Araldite® 2015**

O adesivo Araldite® 2015 é um adesivo estrutural bicomponente de ductilidade moderada que cura à temperatura ambiente e garante uma ligação resistente entre os aderentes. O adesivo é tixotrópico e não escorre para espessuras até aos 10 mm, sendo particularmente indicado para unir compostos de moldação (SMC) e materiais dissimilares. A aplicação deste adesivo garante uma distribuição de tensões mais uniforme do que o Araldite® AV138, embora a resistência mecânica seja inferior. Este adesivo é particularmente resistente a solicitações ao corte. O composto formado pela resina e endurecedor pode ser aplicado de forma manual ou automática, após pré-tratamento das superfícies. Assim como acontece para a generalidade dos adesivos, a durabilidade da união adesiva depende do tratamento das superfícies a ligar. O suporte técnico da Huntsman (fabricante) pode auxiliar o cliente na sugestão de empresas prestadores de serviços na área da manutenção e dosagem do produto comercializado [184].

#### **3.2.4.2.3. Sikaforce® 7752**

O adesivo Sikaforce® 7752 consiste num adesivo bicomponente, formado por uma resina à base de poliuretano e um endurecedor à base de isocianato (FRW L60). O presente adesivo é dotado de elevada ductilidade, quando comparado com os adesivos anteriores, no entanto apresenta uma resistência inferior aos esforços de tração. O sistema formado pelos dois componentes apresenta elevada capacidade de retardar a propagação de incêndio, cura à temperatura ambiente, apresenta elevada ductilidade mesmo a baixas temperaturas, não envolve solventes, garante elevada durabilidade e boa resistência ao impacto [185].

### **3.2.5. Modelação numérica**

O presente Subcapítulo é reservado à escolha da técnica de previsão de resistência das juntas adesivas e ainda à formulação do modelo escolhido. O Subcapítulo 3.2.5 termina com a determinação dos parâmetros materiais a incluir nas análises numéricas, para cada adesivo.

#### **3.2.5.1. Escolha da técnica**

A aplicação de adesivos estruturais é prática cada vez mais comum no meio industrial, e a sua evolução nas últimas décadas é irrefutável. Os trabalhos de investigação desenvolvidos no âmbito

da previsão da resistência e do comportamento das ligações adesivas, assim como o aprimorar das técnicas por parte de alguns setores industriais específicos, alavancaram este processo de ligação [43]. Apesar do enriquecimento contínuo da literatura disponível, ainda existe margem de progresso e crescimento, o que se traduz na investigação contínua dos modos de rotura, na caracterização de adesivos emergentes, no desenvolvimento e otimização de geometrias de junta, e ainda no estudo de soluções híbridas, que conjugam as melhores propriedades e características dos adesivos, com vista a reduzir o impacto de aspetos menos positivos. Os métodos de previsão numérica desempenham um papel fundamental na previsão do comportamento de juntas adesivas, preponderante na obtenção das melhores soluções para os problemas típicos associados [54]. Os modelos de previsão da resistência de uma junta adesiva podem ser divididos em estáticos ou dinâmicos, sendo que o primeiro grupo enunciado é alvo de um esforço de investigação mais amplo por parte da comunidade académica. As técnicas de análise estáticas podem ser analíticas ou numéricas. De acordo com determinadas simplificações assumidas, as técnicas analíticas estão condicionadas a avaliações iniciais ou geometrias de juntas mais conservadoras, que raramente são aplicadas na prática. As técnicas de análise numérica estão amplamente difundidas e permitem analisar qualquer configuração de junta proposta [186]. Com base em trabalhos de investigação anteriores, as opções para a escolha de um método capaz de realizar uma análise estática encontram-se descritas de seguida.

- Nas últimas décadas, foram propostas diferentes técnicas analíticas para prever a resistência de uma junta adesiva. As técnicas propostas estimam as tensões/deformações na camada adesiva e a rotura é avaliada por comparação direta com as propriedades do adesivo. O trabalho realizado por da Silva et al. [165, 166] aborda as diferentes técnicas analíticas até ao ano de 2009 e compara detalhadamente a precisão dos modelos. O trabalho de investigação numérico de Ramalho et al. [187] assemelha-se ao trabalho anteriormente mencionado, e estende a análise até às descobertas mais recentes face ao ano de publicação (2020). Abordagens mais recentes sobre o presente tópico incluem referências [99, 186, 188].
- Técnicas da mecânica dos meios contínuos combinadas com análises por MEF para determinar o estado de tensão ao longo da camada adesiva e prever a resistência da ligação [189]. Os trabalhos de investigação mais recentes incluem as seguintes referências [190, 191]. As principais limitações da presente abordagem consistem nas singularidades de tensão em cantos reentrantes, revelando problemas de convergência do estado de tensão com a diminuição do tamanho dos elementos utilizados para gerar a malha. Foram propostos recentemente novos critérios de rotura para poder realizar uma análise por intermédio da presente técnica, de entre eles destacam-se o critério de deformação longitudinal crítica [192] e o critério de deformação normal crítica [101], que revelaram resultados satisfatórios para configurações particulares de juntas adesivas [186].
- A mecânica da fratura convencional avalia as descontinuidades nos materiais analisados, o que não é possível de realizar através da mecânica dos meios contínuos. No caso das juntas adesivas, estas perturbações geométricas surgem nas extremidades de  $L_0$  ou até mesmo como defeitos. Os fatores de intensidade de tensão ou *Stress Intensity Factors* (SIF) e taxas de libertação da energia de deformação ou *Strain Energy Release Rates* (SERR) constituem as duas abordagens principais [193]. Comeselle-Molares et al. [194] aplicaram a TFFV para avaliar a resistência de juntas adesivas de sobreposição dupla em estruturas de material

compósito. Apesar da coerência entre os resultados numéricos e experimentais obtidos, o presente modelo é aplicável somente a adesivos frágeis, já que não contempla o efeito de eventuais deformações plásticas. O mais recente critério proposto designa-se por mecânica da fratura finita (MFF) [157, 195], aplica-se a adesivos frágeis, e é capaz de prever o início de propagação do dano satisfazendo um critério energético e um de tensão [186].

- A mecânica do dano simula a degradação do adesivo pela redução de rigidez dos EF que constituem a malha até ocorrer a rotura ou a perda total de rigidez. De acordo com este critério, é possível traçar e avaliar diferentes caminhos de propagação do dano para cada configuração de junta adesiva proposta. Stapleton et al. [196] desenvolveram uma formulação da mecânica do dano com funções de forma adaptáveis. A presente proposta tira proveito de um número reduzido de elementos, sendo por isso mais eficaz do que os MDC, fornecendo resultados igualmente precisos [186].
- Os MDC constituem a técnica mais poderosa para modelar o processo de fratura estática em juntas adesivas [197, 198]. As leis coesivas tiram proveito dos critérios de tensão em modo misto para determinar o início de propagação do dano e ainda os critérios de rotura para a propagação deste. Os MDC destacam-se na previsão de resistência independente da malha, já que o crescimento da fenda é despoletado por um critério energético calculado sobre uma área, ao invés de conceitos baseados em tensão [199]. Geleta et al. [200] propuseram recentemente uma abordagem diferenciada, uma vez que discretizaram a camada adesiva de juntas com uma determinada inclinação com elementos contínuos, enquanto foram atribuídos elementos coesivos a todos os elementos que integram a união. Os resultados numéricos não apresentaram desvios significativos face aos resultados experimentais obtidos. Recentemente, foram propostas formas de MDC complexas com o propósito de aumentar a eficácia das formas de MDC mais convencionais.
- O MEFX, proposto em 1999 [91], foi inicialmente testado em problemas genéricos da mecânica da fratura, e a sua aplicação no âmbito das juntas adesivas é relativamente recente. No geral, o MEFX apresenta uma vantagem em relação aos MDC, relacionada com a propagação de fendas independente da malha [201]. Machado et al. [202] investigaram juntas em degrau para diferentes valores de  $L_0$  pelo MEFX. A previsão de resistência e carga máxima suportada pelas juntas foi determinada após escolha dos critérios de propagação do dano mais adequados, com desvios inferiores a 10%. Mubashar et al. [201] propuseram um modelo misto, que conjuga o MEFX com o MDC, para realizar o estudo do comportamento de JSS com filetes constituídos por adesivos nas extremidades da sobreposição. Os autores consideraram aplicar a lei coesiva triangular às interfaces entre o adesivo e os aderentes, e elementos enriquecidos pelo MEFX para as secções correspondentes ao adesivo, incluindo os filetes. Nos elementos enriquecidos pelo MEFX, a iniciação do dano foi desencadeada pelo critério da tensão principal máxima, o que permitiu obter valores precisos de cargas máximas admitidas e ainda prever o caminho de propagação do dano [186].
- Os métodos sem malha são adequados na simulação de fraturas, por não ser requerido reconstruir a malha. Recentemente, passaram a ser aplicados na investigação de juntas adesivas. No presente método, os nós estão ligados por intermédio dos domínios de influência. Tsai et al. [203] aplicaram o método hidrodinâmico de partículas suavizadas

simétricas sem malha com os MDC, com o objetivo de prever a fratura em provetes DCB, sob diferentes condições de carregamento. Os resultados para carregamentos no modo I e no modo misto foram precisos [186].

Em suma, o MEFX apresenta uma vantagem relativamente aos MDC, relacionada com a propagação de fendas independente da malha [201]. Os métodos sem malha são emergentes no âmbito do tema da presente dissertação. No entanto, a inclusão de critérios de rotura que simulam a propagação do dano pode auxiliar a complementar a presente técnica e obter resultados satisfatórios. No que diz respeito a expectativas a longo prazo, é esperado que os MDC beneficiem de ferramentas de calibração otimizadas que facilitem a sua aplicação na indústria. Ainda assim, continuam a ser os modelos mais adequados à análise numérica de juntas adesivas [186].

### 3.2.5.2. Formulação do MDC

O presente Subcapítulo, referente à formulação do modelo escolhido para prever a resistência das juntas adesivas, explora os diferentes tipos de leis coesivas e a determinação dos parâmetros coesivos com base em ensaios experimentais devidamente calibrados.

#### 3.2.5.2.1. Tipos de leis coesivas

Ao longo do tempo, foram estudados inúmeros MDC, como o modelo linear parabólico [204], triangular [205], exponencial [206], polinomial [207] e trapezoidal [208]. De modo a obter resultados mais satisfatórios, é uma boa prática considerar diferentes formas de leis coesivas em função do comportamento do elemento em estudo [184]. A lei triangular é de simples aplicação, na medida em que o número de parâmetros e variáveis a determinar é diminuto, e é o modelo mais utilizado, permitindo obter resultados precisos na maioria dos casos práticos [209]. A lei triangular consiste num modelo coesivo baseado em MEF [184] de quatro nós e espessura nula, que são compatíveis com os elementos sólidos (*brick*) bidimensionais de oito nós do *software* Abaqus®. A Figura 19 é representativa do Modelo Coesivo Triangular, adaptada de Rocha e Campilho [199], e ilustra duas versões distintas do modelo apresentado, nomeadamente a lei do modo puro e de modo misto.

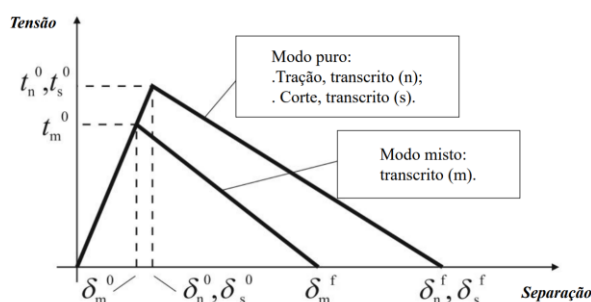


Figura 19 - Modelo coesivo triangular. Adaptado de Rocha e Campilho [199].

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela ocorrência da propagação do dano num conjunto de nós homólogos sempre que, nas leis coesivas correspondentes, os valores das tensões forem anulados no modo respetivo. O modo misto (lei de menores dimensões) combina os modos puros de tração e corte, utilizando critérios energéticos e de tensões [199]. A lei coesiva trapezoidal é amplamente utilizada, uma vez que permite simular de forma criteriosa o comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [210] e II [211].

### 3.2.5.3. Pré-processamento dos modelos

O presente Subcapítulo reúne as condições das análises numéricas consideradas, com base na metodologia em árvore ilustrada na Figura 15. A motivação por detrás da elaboração deste Subcapítulo consiste em ilustrar as etapas realizadas no *software* Abaqus®, de acordo com os módulos e os menus disponibilizados pela presente versão, e ainda orientar trabalhos de investigação futuros.

#### 3.2.5.3.1. Condições da análise numérica

As análises numéricas realizadas têm como base o MEF. Foi considerada uma das versões mais recentes do *software* Abaqus®, Abaqus/CAE 2021.HF5 (*Dassault Systèmes*). O presente programa computacional inclui um módulo integrado de MDC capaz de prever a resistência das juntas adesivas tubulares. A fase de pré-processamento é crucial para a obtenção de valores passíveis de comparação com trabalhos de investigação anteriores, daí ser relevante abordar individualmente cada um dos módulos do *software* onde foram introduzidos os *inputs*, descrevendo de forma detalhada as operações para a modelação de uma Junta de Sobreposição Tubular (JST) e de uma Junta Tubular de Ressalto Exterior (JTRE). À posteriori, será detalhada a forma de obtenção dos valores correspondentes à curva  $P-\delta$ , e a distribuição de  $\sigma_y$  (*peel*) e  $\tau_{xy}$  (*shear*), ao longo do comprimento de ligação. O APÊNDICE A foi criado com o objetivo de aliviar o suporte teórico do presente Subcapítulo, relativo ao pré-processamento dos modelos e condições da análise numérica.

#### 3.2.5.4. Determinação dos parâmetros materiais

Para implementar o modelo de leis coesivas, é necessário conhecer os parâmetros  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ . Estes parâmetros foram determinadores anteriormente na literatura por Campilho et al. [180], Campilho et al. [216] e Faneco et al. [219]. Os processos utilizados por estes autores para determinar as propriedades de cada adesivo são descritos nas seguintes subsecções. Campilho et al. [5] e Pocius [212] foram responsáveis por trabalhos de investigação onde se assumiu que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos por ensaios destrutivos em adesivos maciços. Todavia, a restrição aplicada às deformações na camada adesiva induzida pelos aderentes nestas configurações particulares de juntas adesivas e a propagação da fenda maioritariamente em modo misto, conduzem a desvios entre as propriedades obtidas em provetes de adesivo maciço e de camada fina [213-215]. A disparidade registada implica a utilização de métodos distintos para definir estes parâmetros de acordo com as condições geométricas das juntas a analisar [7].

##### 3.2.5.4.1. Araldite® AV138

De acordo com um estudo realizado por Campilho et al. [216], foi utilizado um método inverso na determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138. Todavia, na falta de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido é o mais aconselhado. Através dos ensaios destrutivos em provetes maciços e TAST, foram definidos os valores de resistência à tração e corte, definindo os parâmetros  $t_n^0$  e  $t_s^0$  a incluir na análise numérica, assim como os valores de  $E$  e  $G$ . Os valores apresentados foram utilizados para construir leis coesivas aproximadas, e foram assumidos valores típicos de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  para adesivos frágeis, como é o caso do Araldite® AV138. As leis construídas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para a JSS analisada com

$L_0=20$  mm, e as leis coesivas foram estimadas por ajuste das curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente e experimentalmente, de forma a obter valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  que reproduzam os resultados experimentais. Campilho et al. [180] concluíram que os parâmetros obtidos reproduzem de forma coerente as propriedades do adesivo [7]. A Tabela 9, adaptada de Campilho et al. [180], ilustra os parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 9 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138. Adaptado de Campilho et al. [180].

| Propriedades    | $E$   | $G$  | $t_n^0$ | $t_s^0$ | $G_{IC}$ | $G_{IIC}$ |
|-----------------|-------|------|---------|---------|----------|-----------|
| Unidades        | [MPa] |      |         |         | [N/mm]   |           |
| Araldite® AV138 | 4890  | 1560 | 39,45   | 30,20   | 0,20     | 0,38      |

### 3.2.5.4.2. Araldite® 2015

Para determinar as leis coesivas do adesivo Araldite® 2015 foi utilizado um método inverso ao aplicado por Campilho et al. [216] num trabalho de investigação anterior a este. Desta maneira, foram definidos os parâmetros  $t_n^0$  e  $t_s^0$  a incluir na análise numérica. Para definir os parâmetros  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  foram realizados os ensaios destrutivos DCB e ENF, respetivamente. O valor de  $G_{IC}$  ou  $G_{IIC}$  é útil para a construção de uma lei coesiva em modo puro, que inicialmente utiliza valores aproximados de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , em função das características do adesivo. A lei coesiva definida foi utilizada na análise numérica correspondente, nomeadamente o ensaio DCB para obter as propriedades à tração e ensaio ENF para obter as propriedades ao corte, cujas dimensões são idênticas ao modelo analisado. Os valores dos parâmetros  $t_n^0$  e  $t_s^0$  foram obtidos através de um ajuste entre as curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente e experimentalmente, em conformidade com o teste de caracterização à fratura, de modo que a lei coesiva estimada reproduza de forma coerente o comportamento da camada adesiva. A Tabela 10 ilustra os parâmetros utilizados para analisar numericamente a camada adesiva à base do Araldite® 2015, de acordo com uma lei coesiva em modo misto [216]. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente através dos ensaios destrutivos em provetes *bulk* [217] e TAST, respetivamente [7].

Tabela 10 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015. Adaptado de [216].

| Propriedades   | $E$   | $G$ | $t_n^0$ | $t_s^0$ | $G_{IC}$ | $G_{IIC}$ |
|----------------|-------|-----|---------|---------|----------|-----------|
| Unidades       | [MPa] |     |         |         | [N/mm]   |           |
| Araldite® 2015 | 1850  | 560 | 21,63   | 17,90   | 0,43     | 4,70      |

### 3.2.5.4.3. SikaForce® 7752

O processo de obtenção das propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 é idêntico ao adesivo Araldite® 2015. Para determinar a lei coesiva ao corte foi seguido um método inverso idêntico, e o parâmetro  $G_{IIC}$  foi determinado por intermédio de um ensaio destrutivo designado por ENF. Foi necessário ajustar manualmente e de forma iterativa os resultados obtidos, para estimar o valor de  $t_s^0$ . Azevedo et al. [218] é o autor do estudo que determina os parâmetros utilizados na presente dissertação. Uma vez que os desvios registados entre os provetes ensaiados não ultrapassaram os 10%, foram utilizados os valores médios de  $t_s^0$  e  $G_{IIC}$ , que traduzem a repetibilidade dos resultados. Para o adesivo Sikaforce® 7752, ainda não existe informação na

literatura atual acerca da determinação da lei coesiva em tração de acordo com o procedimento inverso. O valor do parâmetro  $G_{IC}$  foi determinado pela realização de uma série de ensaios destrutivos DCB [219], a partir dos quais foi assumido o valor médio. Faneco et al. [219] definiu o valor de  $t_n^0$  de acordo com o valor médio obtido para a resistência à tração de provetes *bulk*, e os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente através dos ensaios destrutivos em provetes *bulk* [217] e TAST, respetivamente [7]. A Tabela 11 ilustra os parâmetros utilizados para analisar numericamente a camada adesiva do Sikaforce® 7752, de acordo com uma lei coesiva em modo misto.

Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [219].

| Propriedades    | $E$   | $G$ | $t_n^0$ | $t_s^0$ | $G_{IC}$ | $G_{IIC}$ |
|-----------------|-------|-----|---------|---------|----------|-----------|
| Unidades        | [MPa] |     |         |         | [N/mm]   |           |
| SikaForce® 7752 | 490   | 190 | 11,49   | 10,17   | 2,36     | 5,41      |

### 3.3. Validação dos modelos coesivos para previsão da resistência da junta

O presente Subcapítulo é reservado à validação dos modelos coesivos para previsão da resistência das juntas adesivas. Uma vez que a dissertação foca a análise numérica por MEF, não foram realizados ensaios experimentais que corroborem os resultados obtidos após o devido tratamento dos dados. O presente trabalho tem por base a validação dos modelos coesivos através dos resultados experimentais e numéricos obtidos por Ferreira et al. [7], que vão ao encontro de uma geometria de sobreposição simples ou *overlap* analisada, cujo  $\theta=0^\circ$ .

#### 3.3.1. Resultados experimentais

Neste Subcapítulo apresentam-se as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas para os diferentes adesivos e para os diferentes valores de  $L_0$  considerados. Os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos para os diferentes valores de  $L_0$  considerados e respetiva força máxima média ( $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ ), bem como o desvio padrão fornecem informações acerca da dispersão experimental. Foram realizados cinco ensaios experimentais para cada caso em particular, e o modo de rotura foi coesivo no adesivo em todas as amostras. A correta monitorização e análise dos dados experimentais é de enorme relevância, na medida em que permite validar as diferentes soluções obtidas numericamente [7].

##### 3.3.1.1. Araldite® AV138

A Figura 20 ilustra as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas em função de  $L_0$ , para o adesivo Araldite® AV138. A Tabela 12 resume os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e o desvio padrão associado obtidos experimentalmente em função de  $L_0$ . É de notar que algumas amostras não foram representadas, pelos resultados obtidos serem inválidos [7].

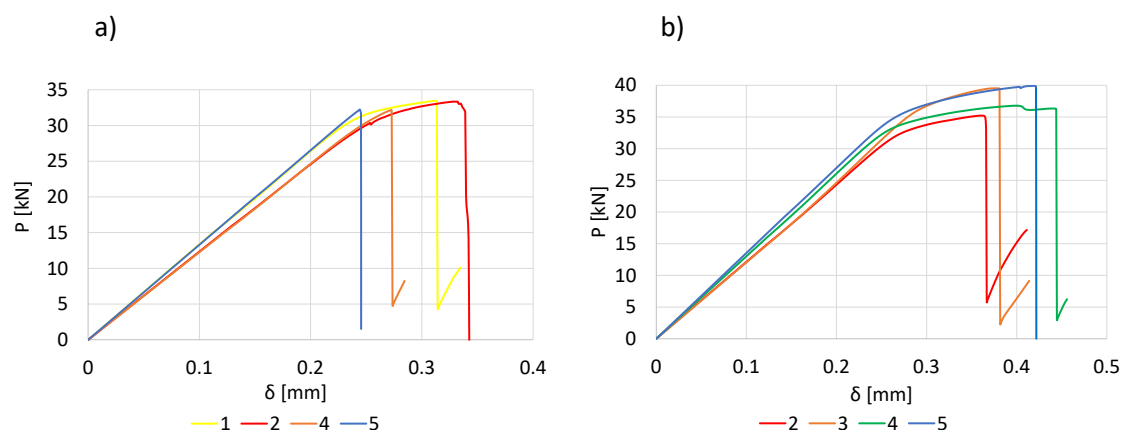


Figura 20 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138. a) Para  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].

De acordo com a Figura 20.a), nos provetes ensaiados à tração cujo valor de  $L_0=20$  mm, verifica-se a ocorrência de plastificação dos aderentes,  $PA$  [%], nas amostras numeradas 1 e 2, representadas pelas curvas vermelha e amarela, respetivamente. Ferreira et al. [7] justificam o ocorrido pela quantidade de adesivo em excesso aplicado, que acabou por se infiltrar dentro do aderente interior, proporcionando uma área de contacto superior à teoricamente prevista. As restantes amostras apresentam um comportamento linear até ao início da rotura. De acordo com a Figura 20.b), nos provetes ensaiados à tração cujo valor de  $L_0=40$  mm, ocorre a plastificação generalizada dos aderentes. De modo geral, verifica-se uma tendência padrão nas curvas  $P$ - $\delta$  obtidas, assim como nos valores registados de  $P_{máx}$  e  $\delta$  correspondente, para ambos os casos de estudo. É de notar o registo de pequenas oscilações nos valores obtidos da rigidez elástica, que se devem à calibração da máquina de ensaios à tração e às condições de amarração. Os resultados descartados por serem considerados inválidos, para os provetes testados experimentalmente, não se encontram apresentados na Tabela 12 [7].

Tabela 12 – Valores de  $P_{máx}$  [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138. Adaptado de Ferreira et al. [7].

| $L_0$ [mm] | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | $P_{máx\ méd}$ | Desvio padrão [%] |      |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------------|-------------------|------|
| 20         | 33468,2 | 33342,3 | -       | 32162,6 | 32216,9 | 32797,5        | 609,7             | 1,86 |
| 40         | -       | 35209,8 | 39546,9 | 36770,2 | 39902,1 | 37857,2        | 1951,1            | 5,15 |

De acordo com Ferreira et al. [7], os valores excluídos da tabela resumo foram considerados inválidos por apresentarem discrepâncias demasiado elevadas entre os valores de  $P_{máx}$  e  $P_{máx\ méd}$ . Desta maneira, garante-se uma redução do desvio padrão percentual respetivamente ao valor médio determinado. O tratamento de dados e a interpretação cuidada de resultados falaciosos possibilita a obtenção de uma tendência de repetibilidade das curvas  $P$ - $\delta$ . Os autores concluíram ainda que a dispersão dos valores obtidos é reduzida e satisfatória, tendo sido registado o maior desvio padrão percentual para o adesivo Araldite® AV138 nos provetes cujo  $L_0=40$  mm (5,15%). Em suma, questões afetas ao fabrico e conceção dos provetes, composição dos materiais envolvidos e ainda aspetos de calibração e amarração da máquina de ensaios podem ter contribuído para esta diferença.

### 3.3.1.2. Araldite® 2015

A Figura 21 ilustra as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas em função de  $L_0$ , para o adesivo Araldite® 2015. A Tabela 13 resume os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e o desvio padrão associado obtidos experimentalmente em função de  $L_0$ . É de notar que não foram excluídos nenhuns resultados da tabela resumo [7].

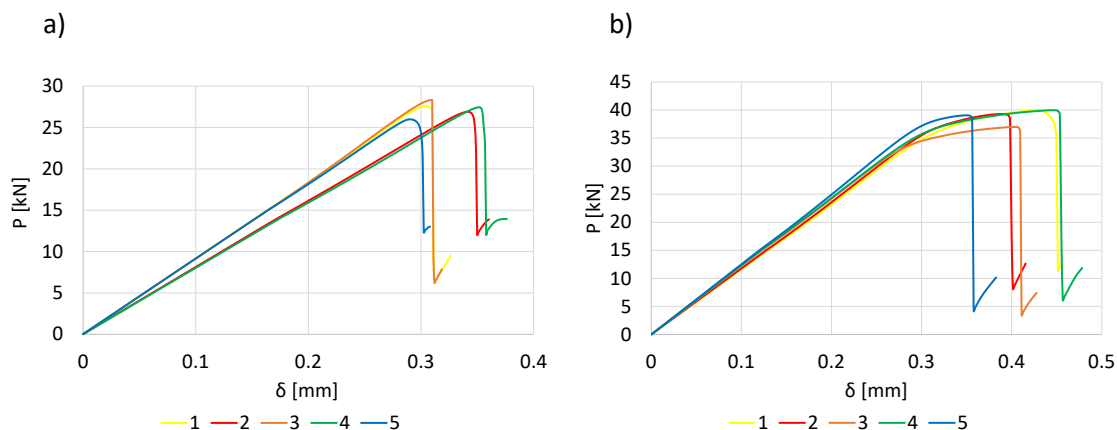


Figura 21 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015. a) Para  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].

De acordo com a Figura 21.a), nos provetes ensaiados à tração cujo valor de  $L_0=20$  mm, verifica-se um comportamento linear até ao início da rotura. De acordo com a Figura 21.b), nos provetes ensaiados à tração cujo valor de  $L_0=40$  mm, verifica-se a ocorrência de  $PA$ . De modo geral, verifica-se uma tendência padrão nas curvas  $P$ - $\delta$  obtidas, assim como nos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo  $\delta$ , para ambos os casos de estudo. É de notar o registo de pequenas oscilações nos valores obtidos da rigidez elástica das juntas adesivas, assim como registado para o adesivo Araldite® AV138, em particular para  $L_0=20$  mm [7].

Tabela 13 - Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015. Adaptado de Ferreira et al. [7].

| $L_0$ [mm] | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | $P_{m\acute{a}x\ med}$ | Desvio padrão [%] |      |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|------------------------|-------------------|------|
| 20         | 27576,1 | 26895,8 | 28306,9 | 27433,8 | 25979,6 | 27238,4                | 774,1             | 2,84 |
| 40         | 40062,5 | 39280,9 | 36980,6 | 39958,7 | 39051,2 | 39066,8                | 1112,2            | 2,84 |

Os resultados obtidos para o adesivo Araldite® 2015 são os que se revelam mais coerentes relativamente à dispersão dos valores obtidos. Quer para  $L_0=20$  ou 40 mm, o desvio padrão percentual registado foi idêntico, na ordem dos 2,84%. Os resultados relativamente ao desvio padrão são satisfatórios, por não se registar um valor significativo, e o facto de não se ter excluído nenhuma das amostras da tabela resumo reforça a coerência dos resultados obtidos.

### 3.3.1.3. SikaForce® 7752

A Figura 22 ilustra as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas em função de  $L_0$ , para o adesivo SikaForce® 7752. A Tabela 14 resume os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e o desvio padrão associado obtidos experimentalmente em função de  $L_0$ . É de notar que no caso do presente adesivo também não foram excluídos nenhuns resultados da tabela resumo [7].

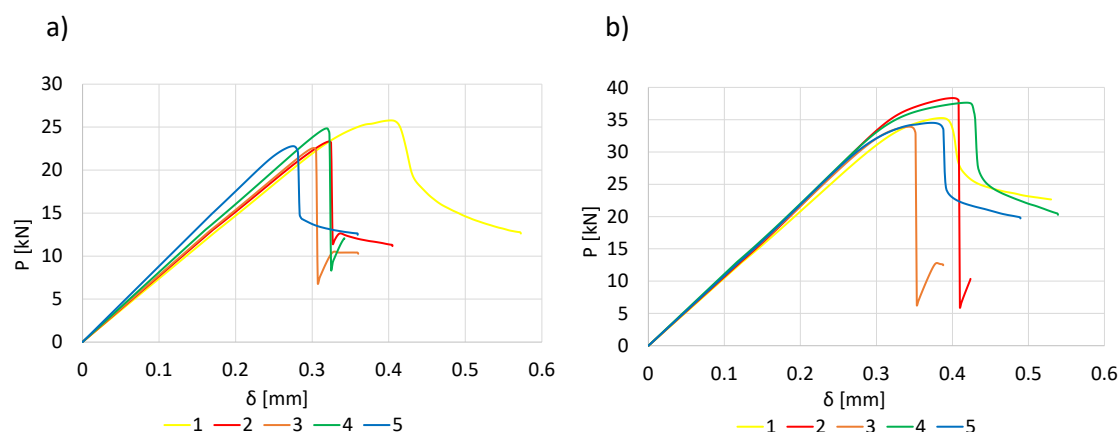


Figura 22 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752. a) Para  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].

De acordo com a Figura 22.a), nos provetes ensaiados à tração cujo valor de  $L_0=20$  mm, verifica-se um comportamento linear das juntas adesivas até rotura, exceto na amostra numerada 1 (curva vermelha). Esta última apresenta um valor de  $PA$  e um deslocamento até à rotura,  $\delta_{rotura}$  [mm], significativamente elevados, quando comparada com as curvas obtidas para os provetes constituídos pelos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Ferreira et al. [7] justificam os resultados obtidos pela quantidade de adesivo em excesso aplicado e pela acumulação do mesmo no interior da junta adesiva. De acordo com a Figura 22.b), para  $L_0=40$  mm, ocorre a plastificação generalizada dos aderentes. O provete número 3 (curva laranja) apresenta uma deformação até rotura inferior aos demais. O resultado apresenta desvios face aos resultados expectáveis, na medida em que não se conseguiu garantir a espessura de adesivo estipulada inicialmente. De modo geral, verifica-se uma tendência padrão nas curvas  $P$ - $\delta$  obtidas, em particular no que diz respeito à rigidez. Assim como acontece nos restantes adesivos testados experimentalmente, é de notar o registo de pequenas oscilações nos valores obtidos da rigidez elástica, que se devem à calibração da máquina de ensaios à tração e às condições de amarração [7].

Tabela 14 - Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752. Adaptado de Ferreira et al. [7].

| $L_0$ [mm] | 1       | 2       | 3       | 4       | 5       | $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$ | Desvio padrão [%] |      |
|------------|---------|---------|---------|---------|---------|--------------------------------|-------------------|------|
| 20         | 25776,6 | 23329,9 | 22552,7 | 24848,6 | 22774,0 | 23856,4                        | 1250,6            | 5,24 |
| 40         | 35247,2 | 38345,6 | 33909,8 | 37634,2 | 34512,8 | 35929,9                        | 1749,0            | 4,87 |

De acordo com o registo tabelar dos valores obtidos para as diferentes famílias de adesivos, o SikaForce® 7752 é o que apresenta dispersões mais elevadas, de 5,24% para  $L_0=20$  mm, e de 4,87% para  $L_0=40$  mm. Todavia, mesmo registando desvios padrão percentuais superiores aos demais adesivos, não são desvios significativos. Os valores individuais dos ensaios relativamente ao respetivo valor médio são desprezáveis. Em suma, questões afetas ao fabrico e conceção dos provetes, a composição dos materiais envolvidos e ainda os aspetos de calibração e de amarração da máquina de ensaios podem ter contribuído para esta diferença [7].

### 3.3.1.4. Comparação de resultados

A Figura 23 ilustra a comparação geral dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  para as juntas adesivas analisadas experimentalmente, para os três adesivos utilizados, assim como o desvio padrão em função de  $L_0$ . Através da realização dos ensaios experimentais, verifica-se a evolução de  $P_{m\acute{a}x}$  de forma dissimilar, de acordo com o adesivo utilizado [7]. O aumento de  $P_{m\acute{a}x}$  varia com  $L_0$ , o que evidencia o comportamento distinto entre adesivos. Deste maneira, os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares analisadas para os diferentes valores de  $L_0$  analisados. O adesivo Sikaforce® 7752 apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos demais. Todavia, o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, por serem os adesivos mais dúcteis, são os que apresentam aumentos percentuais da resistência mecânica mais significativos para valores de  $L_0$  mais elevados.

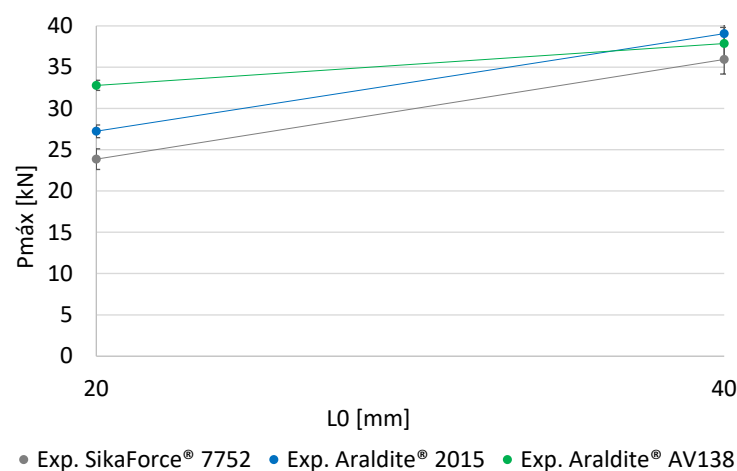


Figura 23 - Variação de  $P_{m\acute{a}x}$  com  $L_0$  para as três famílias de adesivos utilizados. Adaptado de Ferreira et al. [7].

Para  $L_0=20$  mm, o adesivo Araldite® AV138 é o que suporta carregamentos de maior magnitude, por volta dos 32797,5 N. Para  $L_0=40$  mm, no caso do adesivo Araldite® AV138,  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta em aproximadamente 15,4% até um valor igual a 37857,2 N. O aumento relativamente baixo do carregamento máximo que consegue suportar evidencia a sua fragilidade face aos demais.

No caso do adesivo Araldite® 2015, para  $L_0=20$  mm, este apresenta um valor de  $P_{m\acute{a}x}=27238,4$  N. Quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, o Araldite® 2015 apresenta um aumento percentual muito superior ao anterior, por ser um adesivo mais dúctil, e deste modo, são induzidas cargas de magnitude superior com consequente  $PA$ . Para este adesivo em particular, registou-se um aumento percentual de 43,4% para a configuração de junta cujo  $L_0=40$  mm, apresentando para esta geometria de junta adesiva uma resistência superior à do adesivo Araldite® AV138 [7].

O adesivo SikaForce® 7752 foi o que registou um maior aumento percentual de resistência de  $L_0=20$  para 40 mm, na ordem dos 50,6%. Isto deve-se ao facto de este ser o adesivo mais dúctil dos três adesivos em estudo. Para  $L_0=20$  mm,  $P_{m\acute{a}x}=23856,4$  N, para  $L_0=40$  mm,  $P_{m\acute{a}x}=35929,9$  N. É de realçar o facto de o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  se ter mantido abaixo dos restantes adesivos, apesar do aumento substancial de resistência da junta [7].

O desvio padrão tabelado permite comparar os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  individuais de cada provete relativamente à respetiva média. A Tabela 15 ilustra os valores médios da carga máxima em função de  $L_0$ ,  $P_{m\acute{a}x\ med}$ , e o aumento percentual dos mesmos ( $\Delta P_{m\acute{a}x}$ ) para cada adesivo em particular [7].

Tabela 15 –  $P_{m\acute{a}x\ m\acute{e}d}$  [N] e  $\Delta P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para os três adesivos em análise. Adaptado de Ferreira et al. [7].

| Adesivo         | $L_0=20$ [mm] | $L_0=40$ [mm] | $\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%] |
|-----------------|---------------|---------------|------------------------------|
| Araldite® AV138 | 32797,5       | 37857,2       | 15,4                         |
| Araldite® 2015  | 27238,4       | 39066,8       | 43,4                         |
| Sikaforce® 7752 | 23856,4       | 35929,9       | 50,6                         |

### 3.3.2. Resultados numéricos

O presente Subcapítulo é reservado à comparação dos resultados experimentais com as previsões para os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos por intermédio de MDC, de maneira a validar os resultados obtidos numericamente. Desta forma, e uma vez que os valores das constantes de engenharia atribuídas estão em conformidade com os fornecidos pelos fabricantes, torna-se viável realizar o estudo numérico das diferentes configurações de juntas propostas [7].

#### 3.3.2.1. Araldite® AV138

A Figura 24.a) e b) ilustram as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo Araldite® AV138, para  $L_0=20$  e 40 mm, respetivamente.

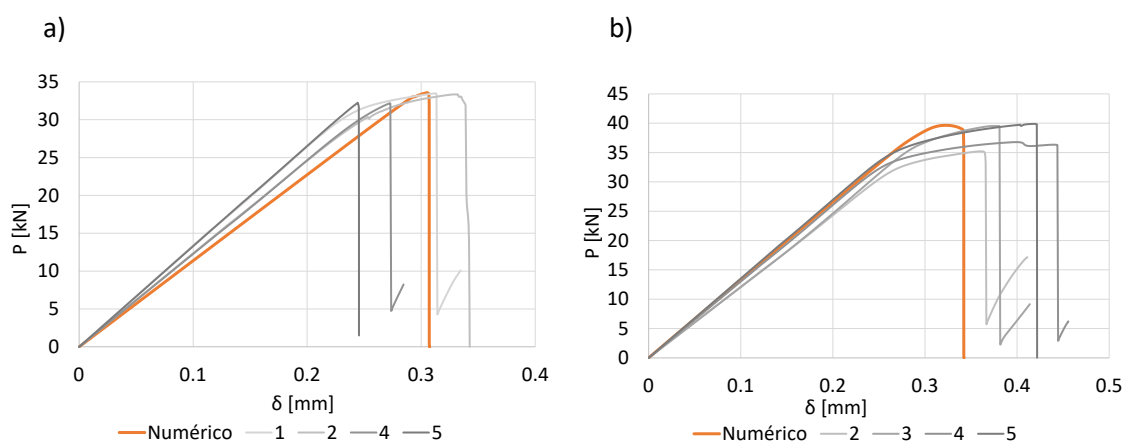


Figura 24 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo Araldite® AV138. a) Para  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].

#### 3.3.2.2. Araldite® 2015

A Figura 25.a) e b) ilustram as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo Araldite® 2015, para  $L_0=20$  e 40 mm, respetivamente.

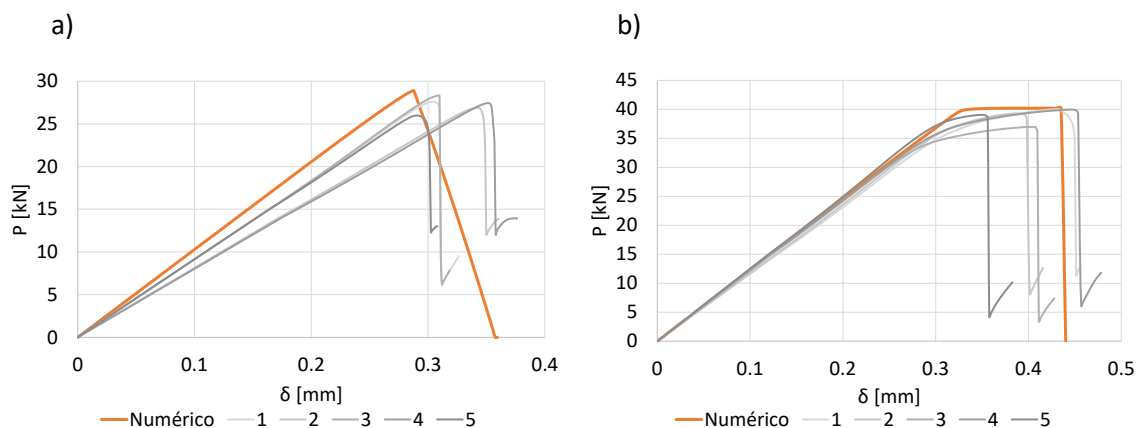


Figura 25 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo Araldite® 2015. a) Para  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].

### 3.3.2.3. SikaForce® 7752

A Figura 26.a) e b) ilustram as curvas  $P$ - $\delta$  obtida experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo SikaForce® 7752, para  $L_0=20$  e 40 mm, respetivamente.

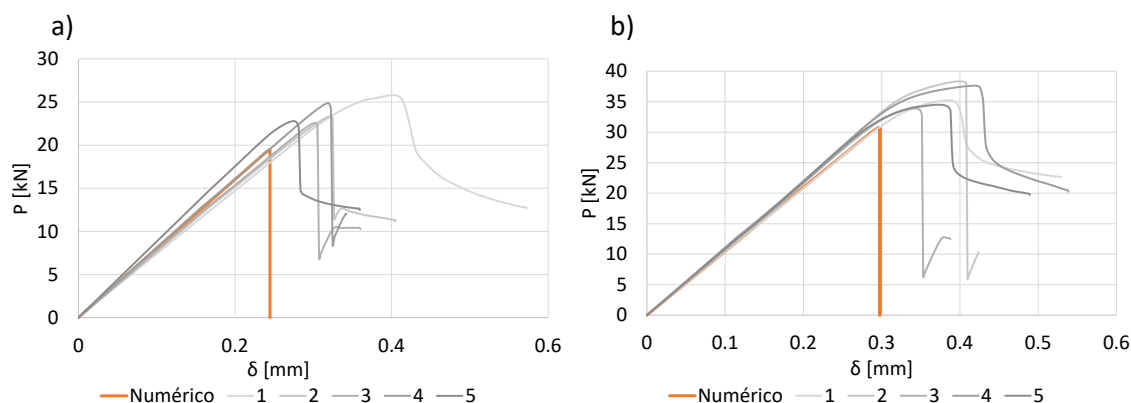


Figura 26 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para o adesivo SikaForce® 7752. a) Para  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm. Adaptado de Ferreira et al. [7].

### 3.3.3. Discussão dos resultados obtidos

A sobreposição das curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente por MDC para as três famílias distintas de adesivos empregues revelou resultados satisfatórios, em particular para os adesivos Araldite® AV138 (Figura 24) e Araldite® 2015 (Figura 25), relativamente à resistência da junta adesiva e ao  $\delta_{rotura}$  [7, 220]. De acordo com a Figura 26, é notório que, para o adesivo SikaForce® 7752, muito dúctil quando comparado com os demais, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais relacionados com a resistência da junta e o  $\delta_{rotura}$ . No geral pode-se considerar que existe uma correlação satisfatória entre os resultados experimentais e numéricos obtidos em função de  $L_0$  e da família de adesivo [7].

De acordo com Ferreira et al. [7], é possível concluir que o adesivo Araldite® AV138 garante uma resistência superior relativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752. Para  $L_0=20$  mm, o adesivo Araldite® 2015 apresenta uma resistência superior ao Araldite® AV138, uma vez que ocorre  $PA$  antes de se atingir a rotura. É de notar que, para determinadas condições de carregamento, um adesivo mais dúctil pode oferecer uma resistência similar ou até mesmo superior à de um adesivo

mais rígido e frágil, devido à capacidade limitada de plastificação deste último [7, 221]. Desta maneira, o adesivo mais frágil Araldite® AV138 permite obter um valor de  $P_{m\acute{a}x}$  mais elevado para  $L_0=20$  mm, mas as propriedades dúcteis do Araldite® 2015 permitem um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  superior para a configuração de junta cujo  $L_0=40$  mm, permitindo obter valores de resistência mais satisfatórios [7].

O adesivo Sikaforce® 7752 apresenta um compromisso satisfatório entre a resistência e a ductilidade, e as condições de rotura remetem para a plastificação generalizada dos aderentes para valores de  $L_0$  elevados [222]. As juntas adesivas que incorporam este adesivo são as que apresentam menor resistência, quer para  $L_0=20$  ou 40 mm, registando valores de  $P_{m\acute{a}x}$  inferiores aos demais. É de realçar que a elevada ductilidade que o caracteriza, e o consequente aumento percentual registado anteriormente (50,6%), aproximam o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para  $L_0=40$  mm aos observados para os restantes adesivos [7].

Em suma, verifica-se que os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 são os mais dúcteis, e apresentam aumentos percentuais de resistência significativos para os diferentes valores de  $L_0$  analisados. O aumento de  $P_{m\acute{a}x}$  proporciona uma melhoria substancial das propriedades mecânicas destes. A elevada rigidez do adesivo Araldite® AV138 fragiliza a união, uma vez que a capacidade de plastificação dos elementos coesivos é muito limitada. O aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\Delta P_{m\acute{a}x}$ , ronda os 15,4%, e a rotura para esta configuração de junta adesiva ocorre praticamente quando as tensões nas extremidades da área colada atingem o valor limite. A Tabela 16 ilustra o resumo dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos experimentalmente para cada adesivo estudado, em função de  $L_0$ .

Tabela 16 – Resumo dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] obtidos experimentalmente para cada adesivo estudado, em função de  $L_0$ . Adaptado de Ferreira et al. [7].

| Adesivo         | $L_0$ [mm] |       |
|-----------------|------------|-------|
|                 | 20         | 40    |
| Araldite® AV138 | 32797      | 37857 |
| Araldite® 2015  | 27238      | 39067 |
| Sikaforce® 7752 | 23856      | 35930 |

### 3.3.4. Validação dos resultados obtidos pelo MDC

O presente Subcapítulo é reservado à comparação entre os resultados obtidos numericamente previstos por MDC, obtidos pela lei coesiva triangular, e os resultados experimentais. A Figura 27, adaptada de Ferreira et al. [7], resume a evolução dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e adesivo utilizado, o que permite comparar os resultados experimentais e numéricos previstos por MDC. A Figura 27 permite concluir que os valores obtidos numericamente e experimentalmente, em função de  $L_0$  e dos três adesivos testados, se assemelham para as duas configurações de junta analisadas por Ferreira et al. [7]. Os resultados obtidos com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 são satisfatórios, quando comparados com a considerável discrepância entre os valores obtidos para o adesivo SikaForce® 7752. A Tabela 17, adaptada de Ferreira et al. [7], resume os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] em função de  $L_0$  para os três adesivos testados, e respetiva diferença relativa os resultados experimentais e numéricos.

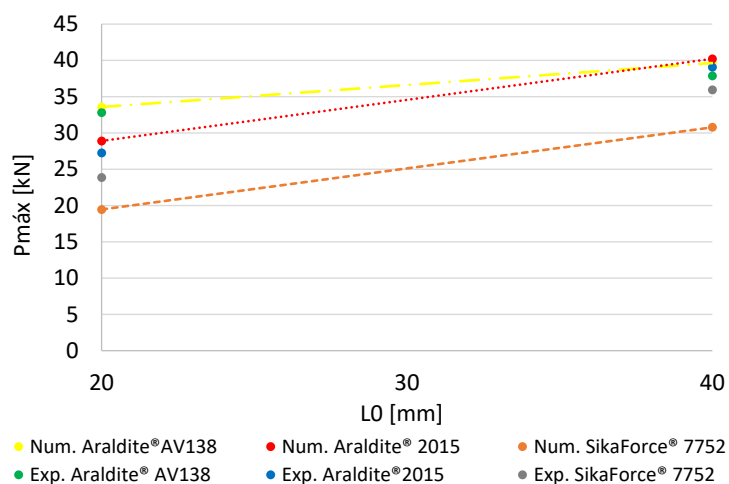


Figura 27 – Evolução dos valores de  $P_{máx}$  obtidos em função de  $L_0$  para os três adesivos testados. Comparação dos resultados experimentais e numéricos previstos por MDC. Adaptado de Ferreira et al. [7].

Tabela 17 – Resumo dos valores de  $P_{máx}$  [N] obtidos em função de  $L_0$  para os três adesivos testados, e respectiva diferença relativa. Adaptado de Ferreira et al. [7].

| Adesivo                  | Araldite® AV138 |       | Araldite® 2015 |       | Sikaforce® 7752 |        |
|--------------------------|-----------------|-------|----------------|-------|-----------------|--------|
| $L_0$ [mm]               | 20              | 40    | 20             | 40    | 20              | 40     |
| Resultados experimentais | 32797           | 37857 | 27238          | 39067 | 23856           | 35930  |
| Resultados numéricos     | 33568           | 39631 | 28897          | 40210 | 19455           | 30779  |
| Diferença relativa [%]   | 2,40            | 4,70  | 6,10           | 2,90  | -18,40          | -14,30 |

Os resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138 são os que apresentam menores diferenças relativas entre resultados experimentais e numéricos. Para  $L_0=20$  mm, a diferença relativa rondou os 2,40%. Para  $L_0=40$  mm, a diferença relativa foi de aproximadamente 4,70%. A diferença relativa é inferior a 10%, e apesar dos resultados não se sobreporem, é uma diferença reduzida, ou seja, os resultados são considerados válidos.

Para o adesivo Araldite® 2015, registaram-se diferenças relativas percentuais em relação aos valores de  $P_{máx}$  obtidos em função de  $L_0$  de aproximadamente 6,10 e os 2,90%, para a configuração de junta com  $L_0=20$  e 40 mm, respetivamente. Os valores de  $P_{máx}$  apresentam desvios inferiores a 10%. Assim, como no caso do adesivo Araldite® AV138, estes resultados são considerados válidos. A diferença entre os valores experimentais e numéricos pode ser desprezada, e os resultados previstos por MDC revelaram-se satisfatórios [7].

No caso das juntas que utilizam o adesivo SikaForce® 7752, os valores de  $P_{máx}$  obtidos pelo método numérico são substancialmente inferiores aos experimentais. Este fenómeno ocorre uma vez que as juntas adesivas modeladas numericamente através das leis coesivas triangulares com adesivos dúcteis podem não conseguir prever com eficácia a resistência da junta. Podem surgir previsões aquém do expectável, ou por diferenças de rigidez apreciáveis entre adesivo e aderente ou dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [184]. Alguns trabalhos de

investigação sobre delaminação em adesivos revelam que certas leis coesivas podem não se adequar à modelação de um determinado material, no entanto, permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento, para isso basta que os valores de resistência coesiva ( $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) e de tenacidade à fratura ( $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ) tenham sido estimados corretamente [223]. Desta maneira, a diferença relativa percentual obtida para o adesivo SikaForce® 7752 é evidente, quer para a configuração de junta com  $L_0=20$  mm (18,40%), quer para  $L_0=40$  mm (14,30%). De acordo com a justificação anterior, apesar da dispersão de valores registada, aceitam-se os valores obtidos numericamente. Após esta análise, consideraram-se os resultados numéricos obtidos válidos e adequados para serem utilizados como fonte de comparação para o estudo paramétrico [7].

### 3.4. Estudo numérico

O Subcapítulo 3.4 representa a grande maioria do volume de trabalho numérico realizado no presente trabalho de investigação, uma vez que os objetivos da análise consistem em avaliar de forma criteriosa a resistência mecânica dos conjuntos, a plastificação máxima dos aderentes, a ductilidade das juntas, a evolução da variável do dano para o instante da carga máxima e ainda a distribuição das tensões ao longo da área colada. Todas as etapas realizadas no *software* encontram-se descritas no APÊNDICE B e devidamente documentadas por intermédio de gráficos e ilustrações. Para todas as juntas analisadas numericamente, os resultados foram discutidos e comentados, relativamente à geometria de referência (Subcapítulo 3.4.1). Ao longo do presente Subcapítulo, as células de tom esverdeado correspondem aos resultados da geometria de base. Relativamente às tabelas que resumem os resultados numéricos, as células de tom azulado e sem tom atribuído correspondem ao aumento e diminuição percentual da variável em análise para as diferentes configurações de junta, respetivamente, relativamente à geometria de referência.

#### 3.4.1. Geometria de base

A Figura 28 ilustra a curva  $P$ - $\delta$  obtida para a geometria de base.

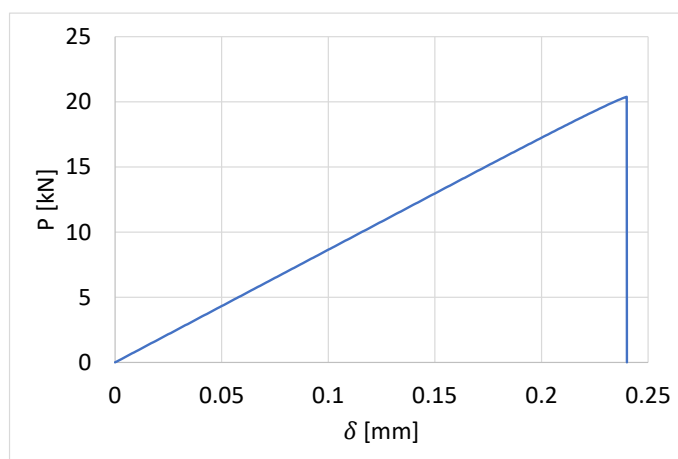


Figura 28 - Curva  $P$ - $\delta$  obtida para a geometria de base.

A geometria de base apresenta um  $\delta_{rotura}=0,240$  mm para um valor de  $P_{m\acute{a}x}=20392,90$  N. Verificou-se um comportamento linear da junta até à rotura. É de notar que os resultados obtidos numericamente não vão ser capazes de reproduzir as oscilações na rigidez elástica da união adesiva que ocorrem devido ao desalinhamento dos provetes e ainda aspetos relacionados com a amarração dos mesmos.

A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $d_{EANH}=20$  mm.

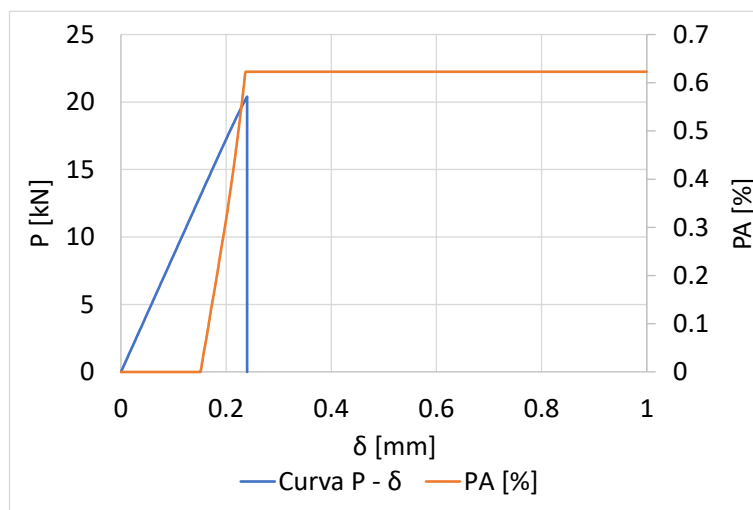


Figura 29 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $d_{EANH}=20$  mm.

No caso da geometria de base, o  $\delta$  correspondente ao início da plastificação dos aderentes ( $\delta_{IPA}$ ) é igual a 0,152 mm, e a força correspondente ao início da plastificação dos aderentes ( $P_{IPA}$ ) é igual a 13142,80 N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 63,33% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força correspondente a 64,45% de  $P_{máx}$ . A rotura da junta foi coesiva no adesivo, embora tenha ocorrido plastificação nos aderentes, na ordem dos 0,63%.

A Figura 30.a) e b) ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  e  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função da  $DN$ , respetivamente.

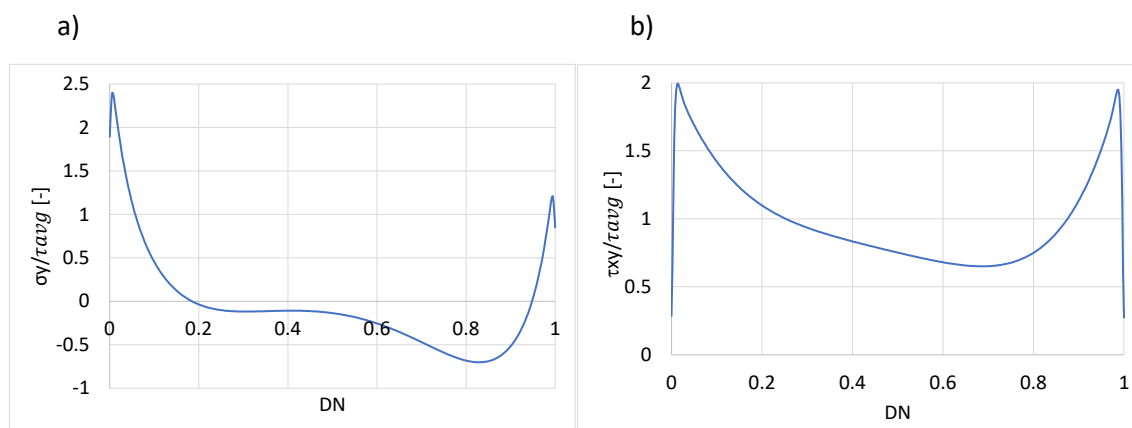


Figura 30 – Distribuição de a)  $\sigma_y/\tau_{avg}$  e b)  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ , em função da  $DN$ .

A distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  apresenta picos de tensão nas extremidades da sobreposição adesiva, ainda que se registem tensões mais elevadas na extremidade oposta à curvatura do aderente. Registou-se uma  $\sigma_{y\,máx}/\tau_{avg}=2,40174$ . O descentramento dos provetes gera o momento fletor responsável pelos picos gerados junto da sobreposição adesiva. Na região central da camada adesiva geram-se tensões compressivas, e nas extremidades da sobreposição desenvolvem-se tensões de tração. As tensões trativas devem-se à curvatura e deformação transversal da junta adesiva, regida pela deformação dos aderentes, e que provoca a separação nas extremidades do filme adesivo e a compressão na zona intermédia. De acordo com Campilho et al. [224] e Campilho

et al. [225], concluiu-se que tensões  $\sigma_y$  elevadas originam uma diminuição da resistência da união, podendo até mesmo ser responsáveis pela rotura prematura das juntas adesivas.

A evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  apresenta também valores mais reduzidos na região intermédia da sobreposição, e o pico de tensão máximo foi registado na extremidade oposta à curvatura do aderente. De facto, este comportamento está relacionado com o efeito de deformação diferencial dos aderentes, já que a deformação é nula na extremidade livre da ligação, e aumenta progressivamente até à extremidade oposta [6, 47, 226]. Na região intermédia da camada adesiva, estes efeitos são anulados, e as tensões  $\tau_{xy}$  desenvolvem-se somente pelo esforço de tração aplicado. Para a geometria de base, registou-se uma  $\tau_{xy}/\tau_{avg}=1,99415$ .

A Figura 31 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função da  $DN$ .

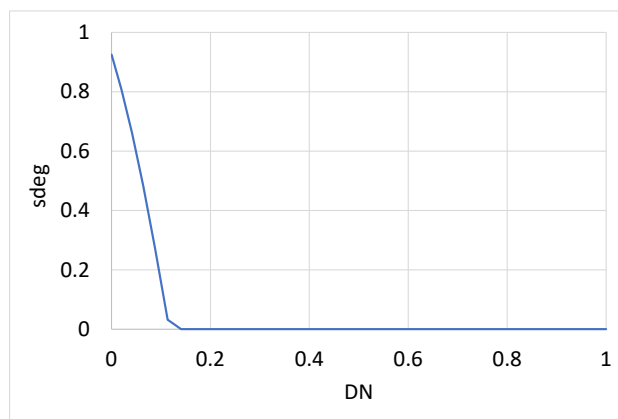


Figura 31 - Evolução de  $sdeg$  em função da  $DN$ .

A variação de  $sdeg$  ocorreu de forma abrupta desde o estado não danificado até à degradação máxima observada dos elementos da camada adesiva, para o incremento correspondente a  $P_{m\acute{a}x}$ . A evolução da variável  $sdeg$  está diretamente relacionada com  $PA$ . A Tabela 18 resume os valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $PA_{m\acute{a}x}$ ,  $ER$ ,  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  e  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos.

Tabela 18 - Valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $PA_{m\acute{a}x}$ ,  $ER$ ,  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  e  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos.

| Adesivo         | $P_{m\acute{a}x}$ [N] | $PA$ [%] | $ER$ [N.m] | $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ | $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ |
|-----------------|-----------------------|----------|------------|---------------------------------------|----------------------------------------|
| Araldite® AV138 | 20392,90              | 0,6228   | 2,47464    | 2,40174                               | 1,99415                                |

### 3.4.2. Efeito do diâmetro exterior dos aderentes

O presente Subcapítulo estuda o efeito da variação de  $d_{EANH}$  nas diferentes juntas adesivas analisadas, para os três adesivos em estudo. A Figura 32 ilustra as curvas  $P-\delta$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo analisado. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. De acordo com a Figura 32.a), para o adesivo Araldite® AV138, verificou-se uma diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 72% para  $d_{EANH}=5$  mm, relativamente à geometria de base. Quanto ao adesivo Araldite® 2015 [Figura 32.b)], de acordo com os valores  $d_{EANH}$  analisados, registou-se uma diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  a rondar os 53%, do valor mais elevado para o mais baixo. No caso do adesivo Sikaforce® 7752, registou-se uma diminuição percentual dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 72%, do valor de  $d_{EANH}$  mais elevado, 20 mm, para o mais baixo, 5 mm, de acordo com a Figura 32.c). Para todos os adesivos utilizados, ocorre um aumento da resistência da junta com  $d_{EANH}$  e a união é tão mais rígida quanto maior for este valor. O  $\delta_{rotura}$  é tanto maior

quanto menor o valor de  $d_{EANH}$ . Relativamente às propriedades mecânicas das juntas, a resistência mecânica e a ductilidade estão diretamente relacionadas com a rigidez dos adesivos utilizados. Os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e de  $\delta_{rotura}$  são tão mais elevados quanto mais rígido for o adesivo.

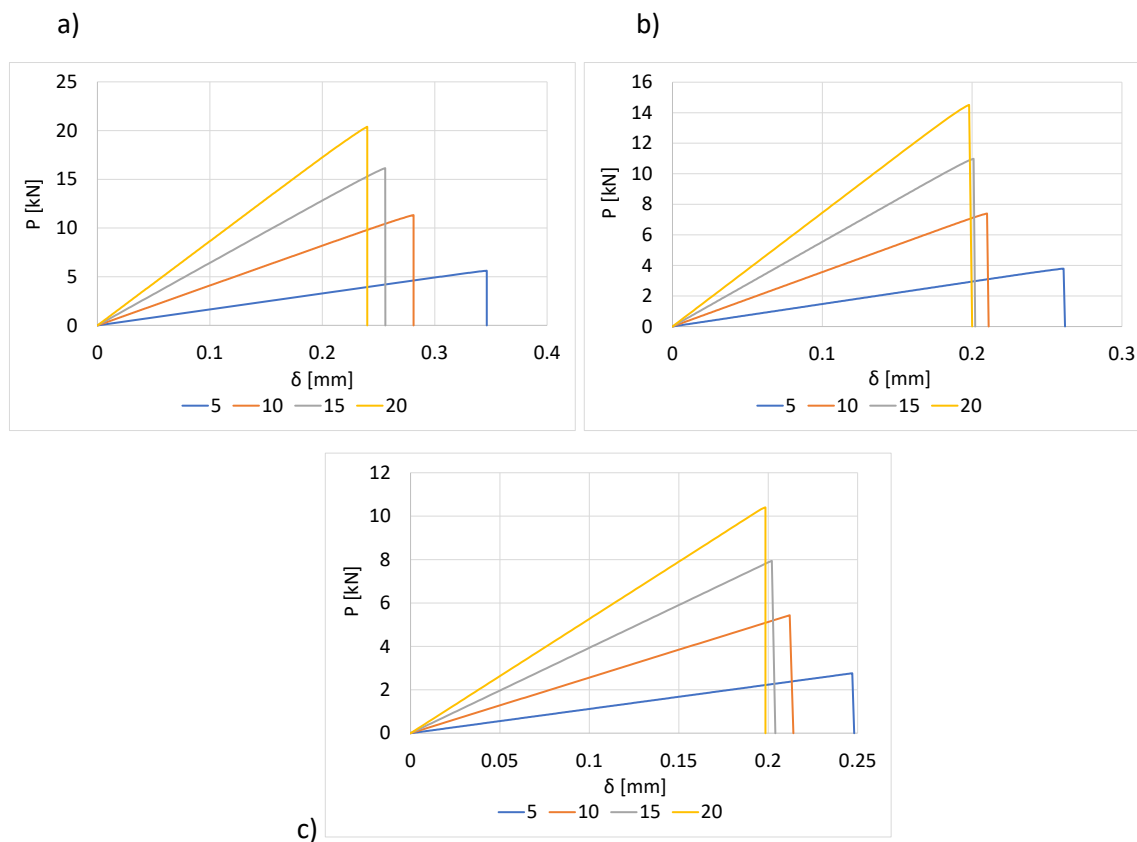


Figura 32 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas em função de  $d_{EANH}$ . Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A Figura 33 ilustra a evolução de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

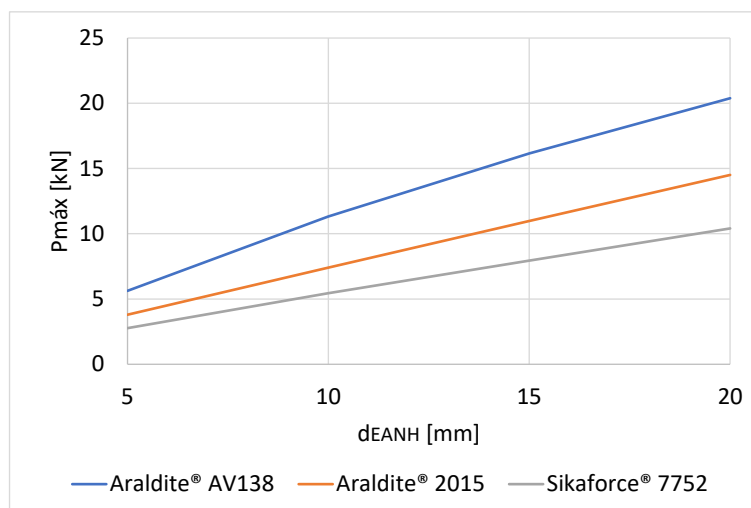


Figura 33 – Evolução de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

A Tabela 19 ilustra a diminuição percentual da resistência das juntas analisadas em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

Tabela 19 - Diminuição percentual da resistência da junta em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5               | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 72,46           | 44,50 | 20,78 | -     |
| Araldite® 2015  | 81,43           | 63,71 | 46,17 | 28,84 |
| Sikaforce® 7752 | 86,45           | 73,35 | 61,07 | 48,98 |

Ao variar o  $d_{EANH}$  e o adesivo utilizado, a junta adesiva com maior resistência mecânica é a geometria de base. O  $\delta_{rotura}$  diminui com o aumento de  $d_{EANH}$  para todos os adesivos, tendo-se registado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura.

A Tabela 20 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base, para os três adesivos testados.

Tabela 20 – Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base, para os três adesivos testados.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5               | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 81,67           | 17,08 | 6,67  | -     |
| Araldite® 2015  | 9,17            | 12,50 | 15,83 | 16,67 |
| Sikaforce® 7752 | 3,33            | 10,83 | 15,00 | 17,50 |

No caso do adesivo Araldite® AV138, a geometria de junta cujo valor de  $\delta_{rotura}$  foi máximo, 0,436 mm, corresponde a uma configuração cujo  $d_{EANH}=5$  mm, tendo-se registado um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de 81,67%, relativamente à geometria de base. Para o Araldite® 2015,  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $d_{EANH}=5$  mm, 0,262 mm, verificando-se um aumento percentual de 9,17%, relativamente à geometria de base. Para o Sikaforce® 7752,  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $d_{EANH}=5$  mm, 0,248 mm, registando-se um aumento percentual de apenas 3,33%, relativamente à geometria de base. De acordo com a Tabela 20, o  $\delta_{rotura}$  é tão mais elevado quanto mais rígido for o adesivo. No entanto, para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 e para valores de  $d_{EANH} \geq 10$  mm, a variação percentual de  $\delta_{rotura}$  é praticamente nula, ou seja, sem influência na ductilidade das juntas adesivas. A Figura 34 ilustra a evolução de  $ER$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

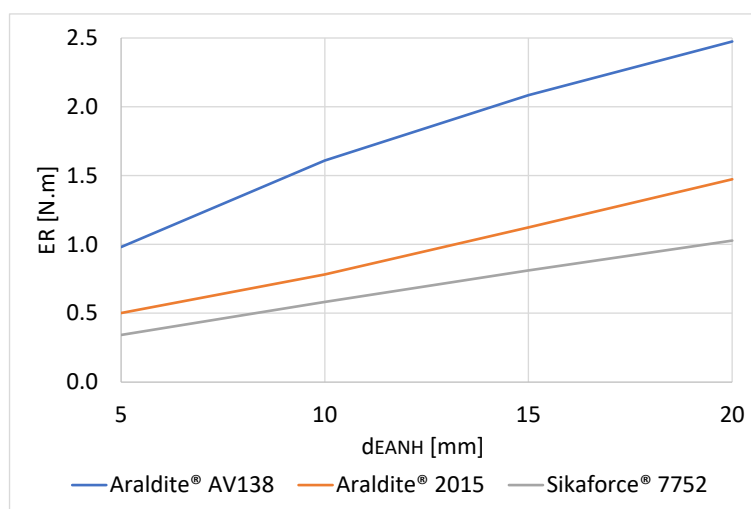


Figura 34 - Evolução de  $ER$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

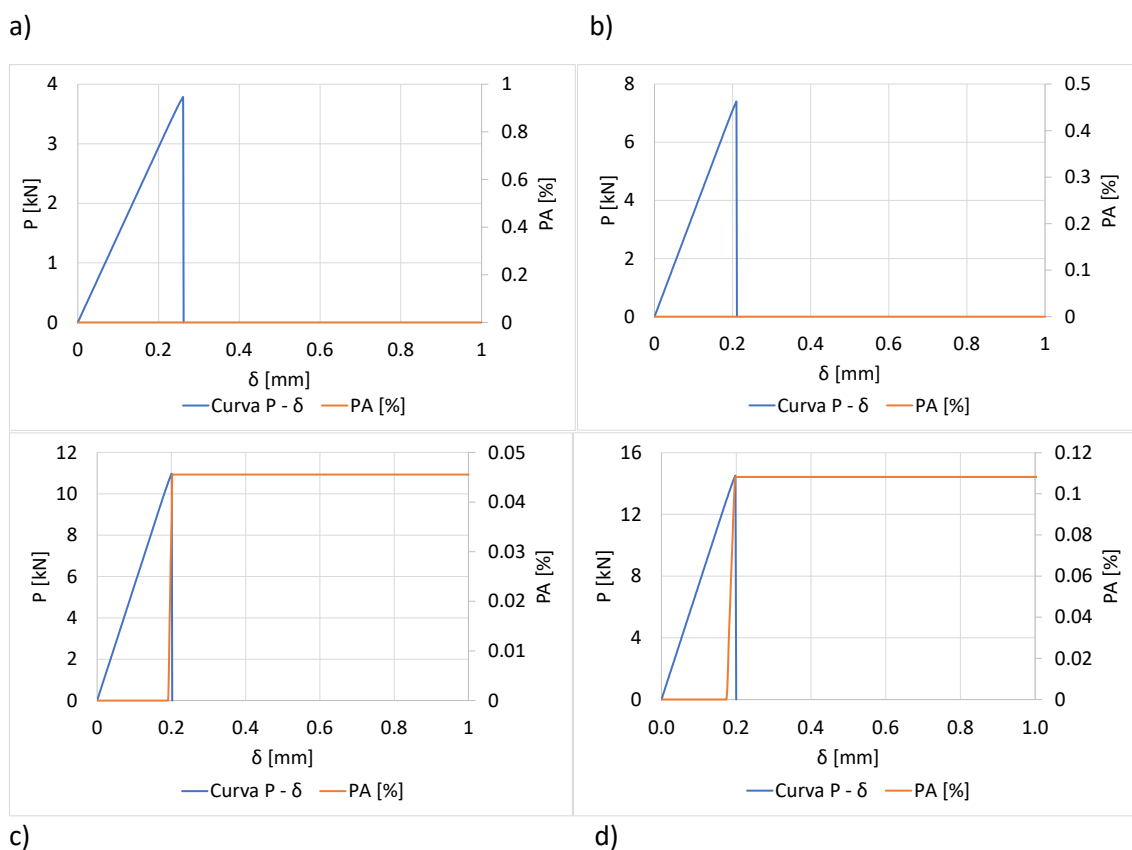
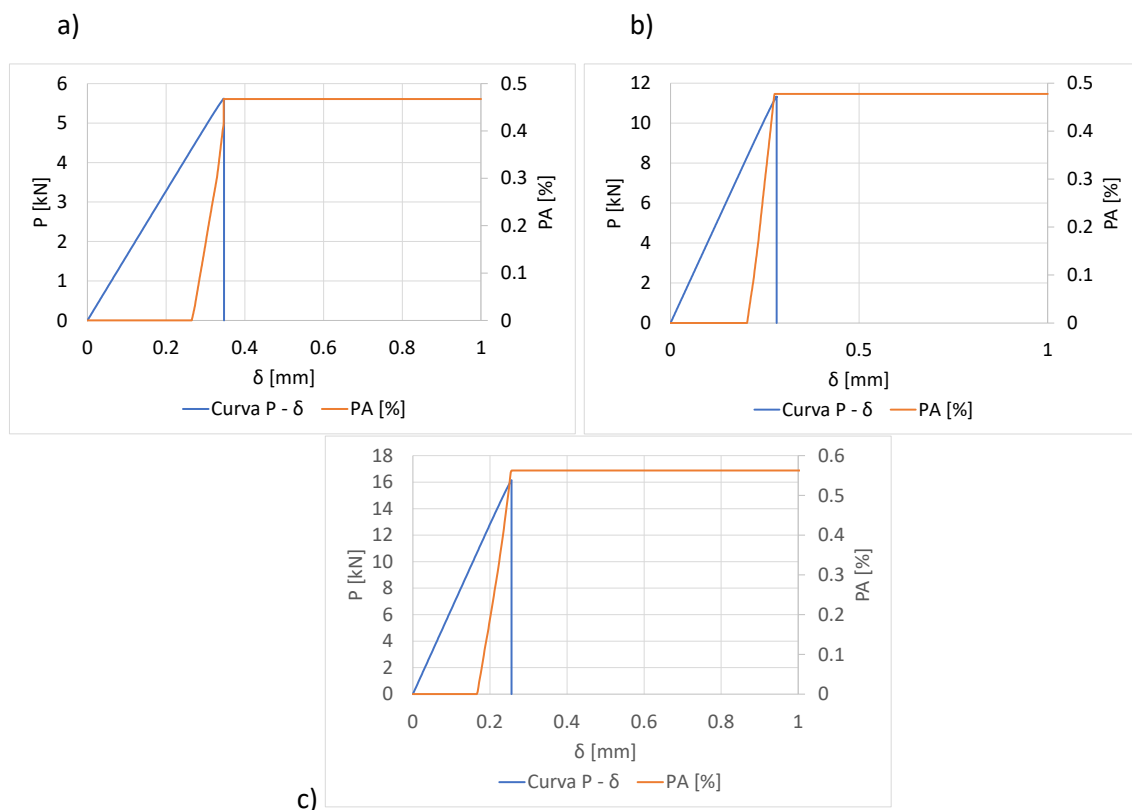
A Tabela 21 ilustra a diminuição percentual de  $ER$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $ER$  corresponde à geometria de base.

Tabela 21 - Diminuição percentual de  $ER$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5               | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 60,36           | 34,94 | 15,78 | -     |
| Araldite® 2015  | 79,70           | 68,43 | 54,58 | 40,49 |
| Sikaforce® 7752 | 86,15           | 76,49 | 67,22 | 58,50 |

A Figura 35 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $d_{EANH}$ = a) 5 mm, b) 10 mm e c) 15 mm. A evolução deste parâmetro pode ser comparada com os resultados obtidos para a geometria de base, de acordo com a Figura 29. A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® AV138. De acordo com a Figura 35.a), para  $d_{EANH}$ =5 mm, o valor de  $\delta_{IPA}$ =0,266 mm e o valor de  $P_{IPA}$ =4364,04 N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 61,01% do  $\delta_{rotura}$  e uma força equivalente a 77,71% de  $P_{máx}$ . Ocorreu plastificação nos aderentes, na ordem dos 0,47%. Para  $d_{EANH}$ =10 mm [Figura 35.b)],  $\delta_{IPA}$ =0,204 mm e  $P_{IPA}$ =8347,75 N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 72,60% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  a 73,75% de  $P_{máx}$ . Registou-se um valor de  $PA$  máximo de aproximadamente 0,48%. De acordo com a Figura 35.c), para  $d_{EANH}$ =15 mm,  $\delta_{IPA}$ =0,168 mm e  $P_{IPA}$ =10786,70 N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 65,63% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  a 66,77% de  $P_{máx}$ . Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 0,56%. Para o adesivo Araldite® AV138, registou-se uma diminuição de  $P_{IPA}$  relativamente ao valor de  $P_{máx}$  correspondente, com o aumento dos valores de  $d_{EANH}$ . Verificou-se um aumento proporcional do  $\delta_{IPA}$  relativamente ao  $\delta_{rotura}$ , para os dois menores valores de  $d_{EANH}$  analisados, e uma diminuição deste parâmetro para os restantes.

A Figura 36 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para  $d_{EANH}$ = a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm.



A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® 2015. Para o adesivo Araldite® 2015, e para  $d_{EANH}=5$  [Figura 36.a)] e 10 mm [Figura 36.b)], não ocorreu  $PA$ . Para  $d_{EANH}=15$  mm,  $\delta_{IPA}=0,192$  mm e  $P_{IPA}=10590,40$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 95,05% do  $\delta_{rotura}$  e a  $P_{IPA}$  a 96,47% de  $P_{m\acute{a}x}$ , de acordo com a Figura 36.c). Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,05%. De acordo com a Figura 36.d), para  $d_{EANH}=20$  mm,  $\delta_{IPA}=0,176$  mm e  $P_{IPA}=13083,00$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 88,00% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  a 90,15% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registrou-se um valor de  $PA$  máximo de aproximadamente 0,11%. Para o adesivo Araldite® 2015, registaram-se valores de  $P_{IPA}$  e  $\delta_{IPA}$  nulos para  $d_{EANH}\leq 10$  mm. Para valores de  $d_{EANH}>10$  mm ocorreu  $PA$ , apesar de ambas as geometrias apresentarem valores de  $P_{IPA}$  e  $\delta_{IPA}$  muito próximos de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{rotura}$ , respetivamente.

A Figura 37 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $d_{EANH}=$  a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm.

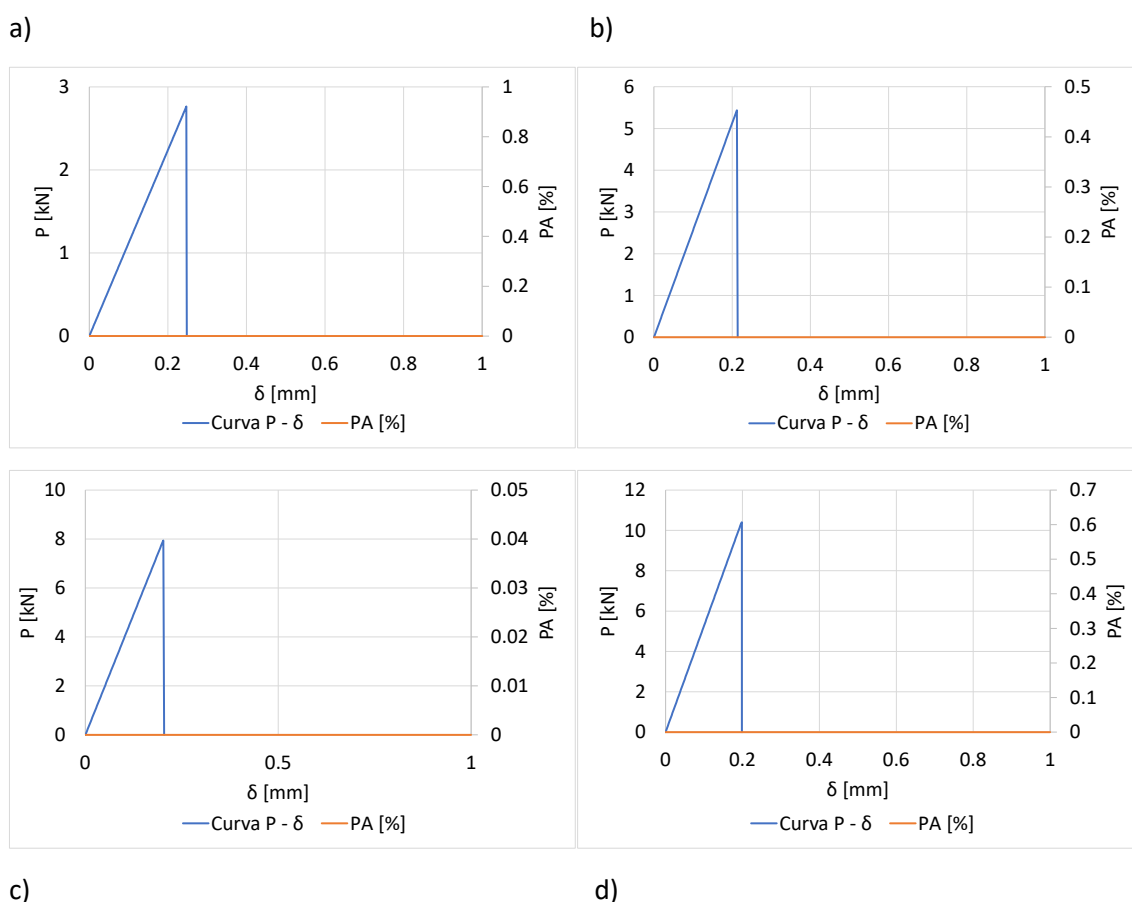


Figura 37 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $d_{EANH}=$  a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm.

De acordo com a Figura 37, para o adesivo Sikaforce® 7752 e para todas as geometrias de junta analisadas, não ocorreu  $PA$  em nenhum caso e a rotura da união foi sempre coesiva no adesivo. A Tabela 22 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

Tabela 22 - Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |        |        |        |
|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 5               | 10     | 15     | 20     |
| Araldite® AV138 | 75,00           | 34,21  | 10,53  | -      |
| Araldite® 2015  | 100,00          | 100,00 | 26,32  | 15,79  |
| Sikaforce® 7752 | 100,00          | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Tabela 23 ilustra a diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

Tabela 23 – Diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |        |        |        |
|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 5               | 10     | 15     | 20     |
| Araldite® AV138 | 66,80           | 36,48  | 17,97  | -      |
| Araldite® 2015  | 100,00          | 100,00 | 19,42  | 0,46   |
| Sikaforce® 7752 | 100,00          | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Figura 38 ilustra a evolução de  $PA$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

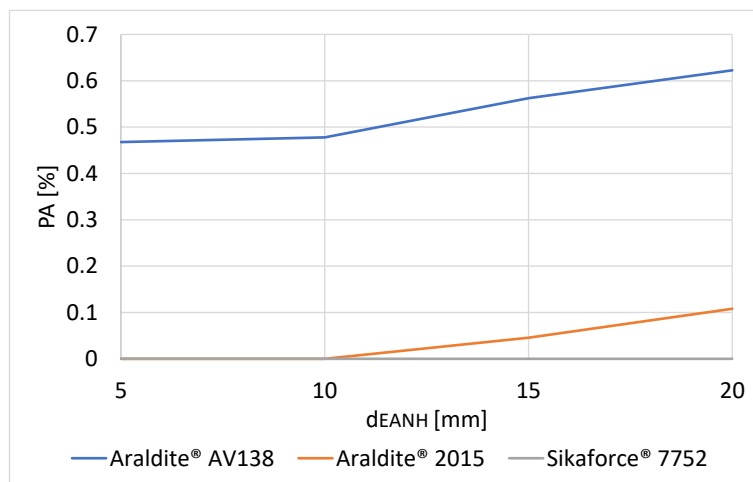


Figura 38 - Evolução de  $PA$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

A Tabela 24 ilustra a diminuição percentual de  $PA$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. Na eventualidade de fazer variar o  $d_{EANH}$  e o adesivo utilizado, a junta adesiva que apresenta o valor de  $PA$  mais elevado é a geometria de base.

Tabela 24 - Diminuição percentual de  $PA$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |        |        |        |
|-----------------|-----------------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 5               | 10     | 15     | 20     |
| Araldite® AV138 | 24,89           | 23,28  | 9,67   | -      |
| Araldite® 2015  | 100,00          | 100,00 | 92,69  | 82,63  |
| Sikaforce® 7752 | 100,00          | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Figura 39 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $d_{EANH}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

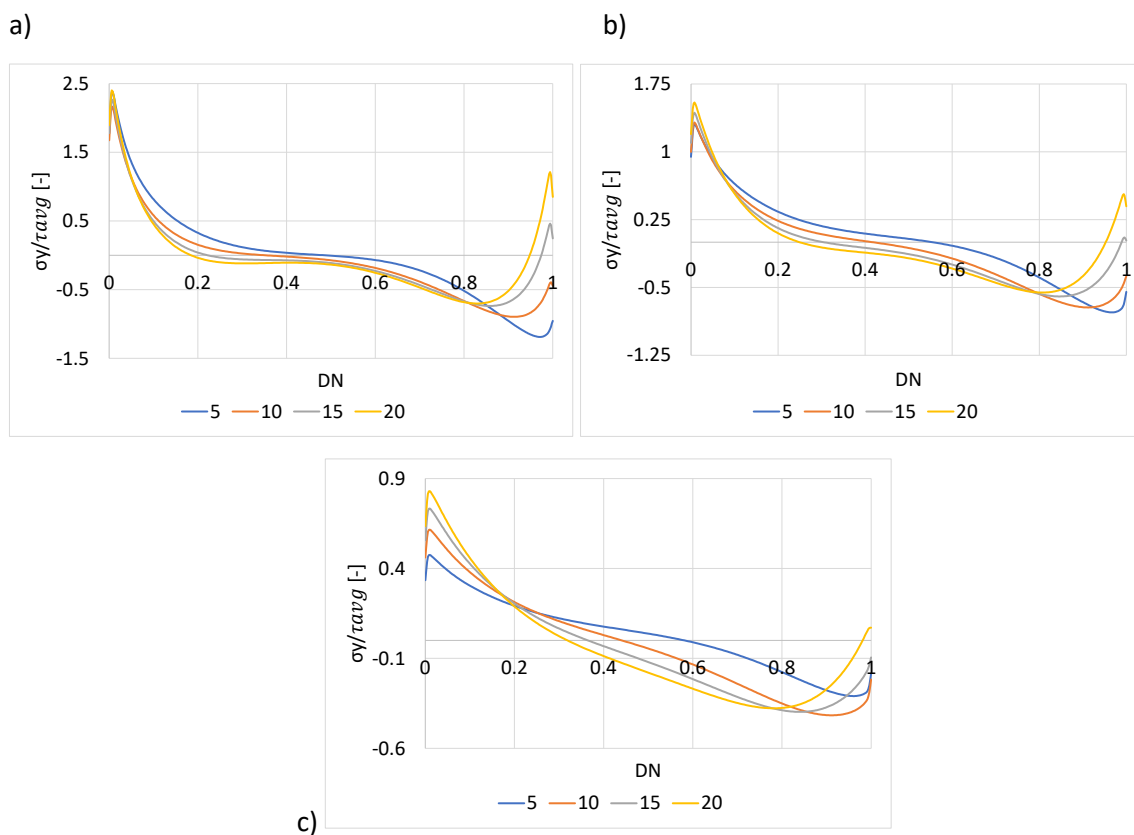


Figura 39 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $d_{EANH}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A geometria que registou os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  mais elevados utiliza um  $d_{EANH}=20$  mm. Os picos de tensão nas extremidades são tão maiores quanto mais rígido for o adesivo utilizado, e a distribuição do estado de tensões mais uniforme para os adesivos dúcteis. De acordo com a Figura 39.a), os picos de tensão registados no adesivo Araldite® AV138 para a extremidade crítica são idênticos. No entanto, para a extremidade oposta, os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto maior for o valor de  $d_{EANH}$ . Registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 1% para  $d_{EANH}=5$  mm, relativamente à geometria de base. De acordo com a Figura 39.b), para o adesivo Araldite® 2015, os picos de tensão registados para a extremidade mais crítica são idênticos, ainda que tão mais elevados quanto maior o valor de  $d_{EANH}$ .

Para a extremidade menos crítica, os valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto maior for o valor de  $d_{EANH}$ . De acordo com os valores de  $d_{EANH}$  analisados, 5 e 20 mm, registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  a rondar os 10%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para estes valores, verificou-se diminuição percentual destes valores de aproximadamente 46 e 36%, relativamente à geometria de base. No caso do adesivo Sikaforce® 7752, os valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registados nas extremidades da sobreposição são tão mais elevados quanto maior o valor de  $d_{EANH}$ , de acordo com a Figura 39.c). Os picos de tensão registados para a extremidade crítica não se sobrepõem, ao contrário dos restantes adesivos. Para o adesivo mais dúctil, verificou-se uma diminuição dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  na ordem dos 15%, do valor de  $d_{EANH}$  mais elevado, 20 mm, para o mais baixo, 5 mm. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição percentual dos valores mais elevados  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 80 e 65%, relativamente à geometria de base. Independentemente da relação entre os valores de tensão registados e o valor de  $d_{EANH}$  utilizado, a utilização de adesivos mais dúcteis traduz-se na redução dos valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registados ao longo de  $DN$ . A Figura 40 ilustra a evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

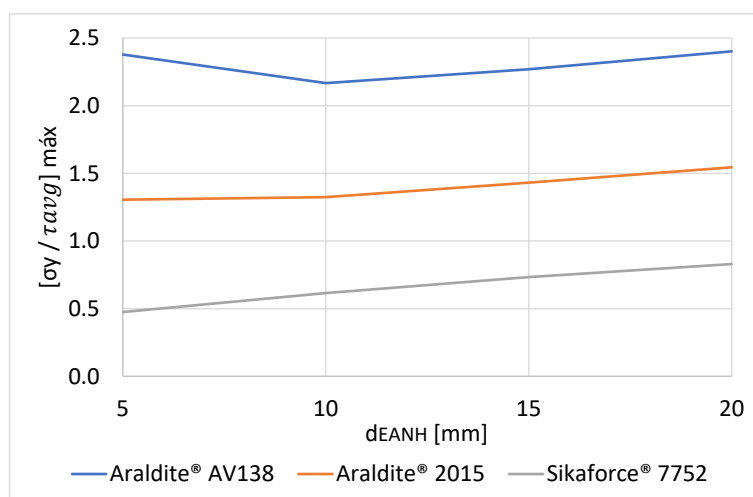


Figura 40 - Evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

A Tabela 25 ilustra a diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

Tabela 25 - Diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5               | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 0,99            | 9,76  | 5,51  | -     |
| Araldite® 2015  | 45,62           | 44,87 | 40,40 | 35,67 |
| Sikaforce® 7752 | 80,21           | 74,35 | 69,49 | 65,46 |

Na eventualidade de fazer variar o  $d_{EANH}$  e o adesivo utilizado, a junta adesiva que registou o valor máximo de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  corresponde à geometria de base.

A Figura 41 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $d_{EANH}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

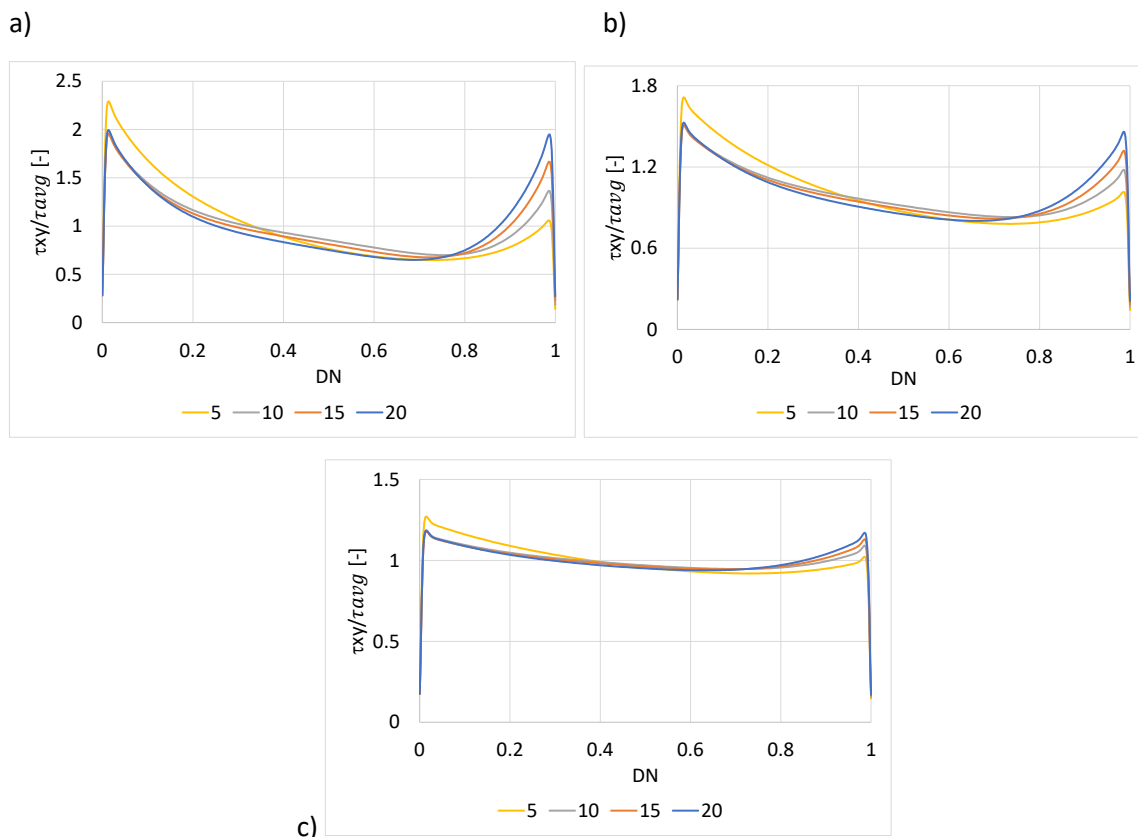


Figura 41 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $d_{EANH}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

Para todos os adesivos utilizados, a configuração de junta que apresentou os valores mais elevados junto da extremidade crítica, corresponde a uma geometria de junta cujo valor de  $d_{EANH}=5$  mm. No caso do adesivo Araldite® AV138 e de acordo com a Figura 41.a), os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registados para as outras configurações encontram-se praticamente sobrepostos na extremidade crítica. Conclui-se que para  $d_{EANH}>10$  mm, ocorre uma diminuição significativa dos valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  relativamente à geometria de base, mas o aumento  $d_{EANH}$  não tem influência no comportamento da junta nesta extremidade, a partir deste intervalo de valores. Na extremidade oposta, os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto maior for o  $d_{EANH}$ , ou seja, a geometria cujo  $d_{EANH}=5$  mm regista os valores mais elevados junto da extremidade crítica. Registou-se um aumento percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 1% para  $d_{EANH}=5$  mm, relativamente à geometria de base. Para o Araldite® 2015, as diferentes geometrias de junta analisadas apresentam picos de tensão muito similares, que se sobrepõem na extremidade crítica. Para valores de  $d_{EANH}>5$  mm, ocorreu uma diminuição dos picos de tensão, de acordo com a Figura 41.b). Na extremidade oposta, os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto maior o valor de  $d_{EANH}$ . A geometria de junta com  $d_{EANH}=5$  mm regista os valores mais elevados junto da extremidade crítica, e os valores mais favoráveis na extremidade oposta da sobreposição. De acordo com os valores mais distantes de  $d_{EANH}$  analisados, 5 e 20 mm, registou-se uma diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  a rondar os 10%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para estes valores, verificou-se uma diminuição percentual de

$\tau_{xy}/\tau_{avg}$  na extremidade crítica de aproximadamente 14 e 23%, relativamente à geometria de base. Relativamente ao adesivo mais dúctil (Figura 41.c)), ocorre sobreposição dos picos de tensão junto da extremidade crítica, e para valores de  $d_{EANH} > 5$  mm, verificou-se uma diminuição dos picos de tensão. Na extremidade oposta, os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  aumentam com o  $d_{EANH}$ . No entanto, a variação de  $d_{EANH}$  praticamente não afeta a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  ao longo de  $DN$ . Para este adesivo, verificou-se um aumento dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  na ordem dos 4%, do valor de  $d_{EANH}$  mais elevado, 20 mm, para o mais baixo, 5 mm. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 36 e 40%, relativamente à geometria de base. A Figura 42 ilustra a evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

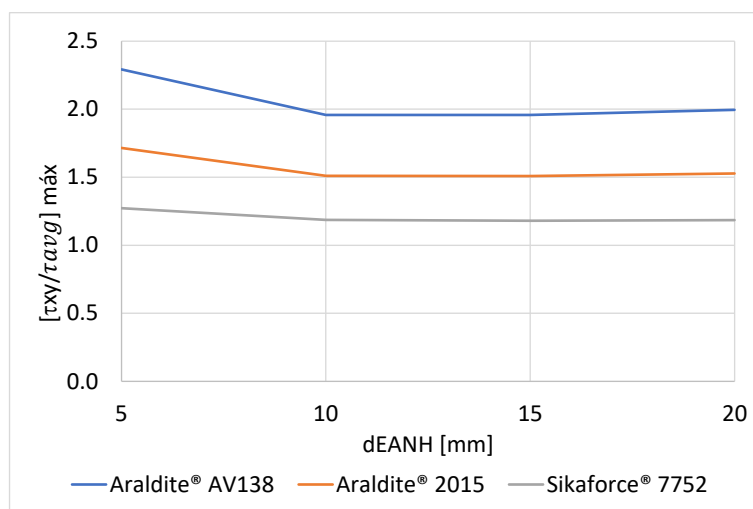


Figura 42 - Evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado.

A Tabela 26 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. Ao variar o  $d_{EANH}$  e o adesivo utilizado, a junta adesiva que registou o valor máximo de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  corresponde à geometria que utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $d_{EANH}=5$  mm.

Tabela 26 – Aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $d_{EANH}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $d_{EANH}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|-----------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5               | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 14,93           | 1,85  | 1,83  | -     |
| Araldite® 2015  | 14,01           | 24,26 | 24,37 | 23,41 |
| Sikaforce® 7752 | 36,24           | 40,53 | 40,84 | 40,62 |

A Figura 43 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $d_{EANH}$  ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. É de notar que parte do eixo das abcissas ( $DN$ ) se encontra suprimido em dois gráficos (truncagem da escala e comportamento não simétrico), por não acrescentar valor à análise e corresponder a valores nulos, facilitando a interpretação da evolução de  $sdeg$ .

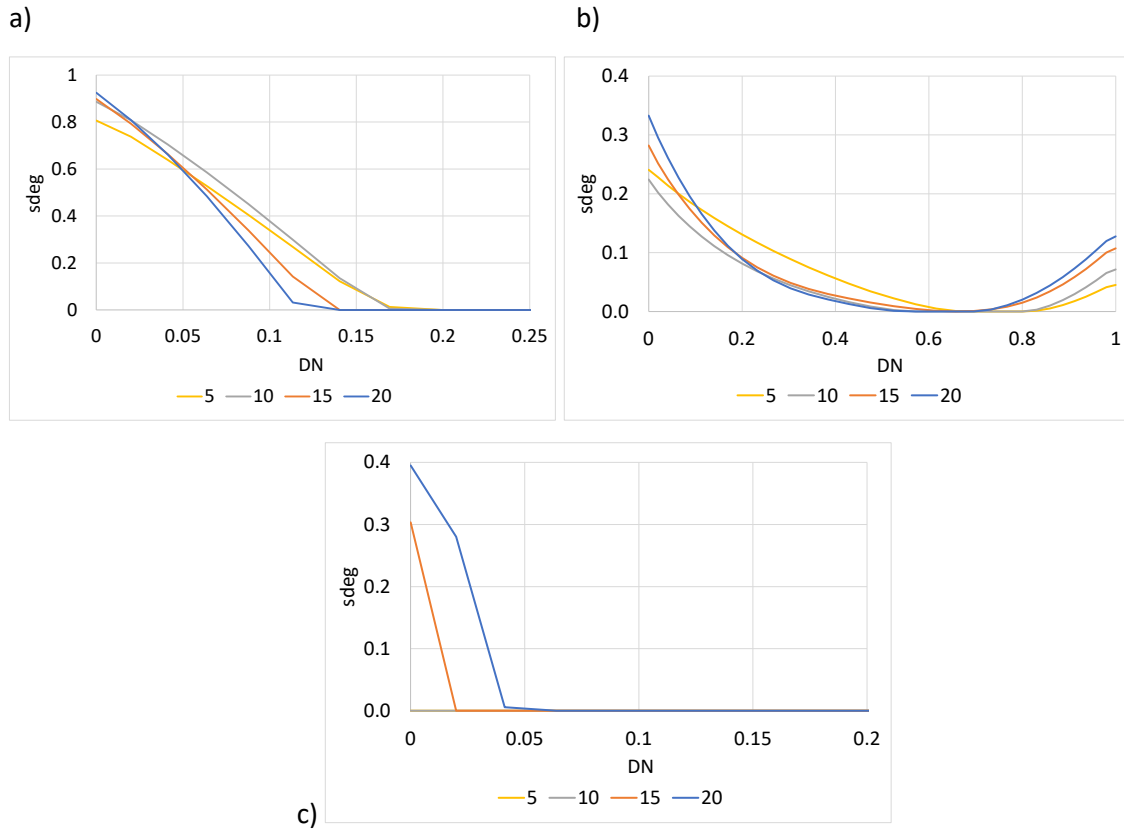


Figura 43 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $d_{EANH}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

De acordo com a Figura 43.a), para o adesivo Araldite® AV138, as geometrias analisadas apresentam uma evolução de  $sdeg$  idêntica. O gradiente de  $sdeg$  é abrupto desde o estado não danificado até à ocorrência de dano, perceptível também pela degradação máxima observada dos elementos coesivos da análise. A variação das curvas está relacionada com a fragilidade do adesivo em estudo, o valor de  $PA$  e ainda a concentração de picos de tensão junto da extremidade mais crítica. A fragilidade do adesivo em estudo explica o gradiente mais vertical das curvas quando comparada com a evolução de  $sdeg$  para os restantes adesivos analisados. Os valores de  $PA$  aumentam com o valor de  $d_{EANH}$ . No entanto, não é possível identificar uma tendência na evolução das diferentes curvas, uma vez que o  $\delta_{IPA}$  não é proporcional aos valores de  $d_{EANH}$ , mas sim máximo para  $d_{EANH}=10$  mm. As diferenças nos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  e  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  na extremidade crítica vão ao encontro da evolução da variável do dano, uma vez que a configuração de junta que apresenta os valores mais elevados junto da extremidade crítica corresponde a uma geometria de junta cujo valor de  $d_{EANH}=5$  mm. Para o adesivo Araldite® 2015 e de acordo com a Figura 43.b), as geometrias analisadas apresentam uma variação de  $sdeg$  menos abrupta, desde o estado não danificado até à rotura dos elementos coesivos, relativamente ao adesivo Araldite® AV138, sendo que são eliminados elementos da camada adesiva em ambas as extremidades. A maior ductilidade do adesivo em estudo explica o facto da evolução das curvas ser mais ténue quando comparada com o Araldite® AV138. Os valores de  $PA$  aumentam com o valor de  $d_{EANH}$ , para valores de  $d_{EANH} \geq 15$  mm. Se não for considerada a geometria mais difícil de garantir a nível industrial, cujo valor de  $d_{EANH}=5$  mm, a evolução das curvas é tão mais ténue quanto menor for o valor de  $d_{EANH}$ . A diferença nos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registados, pelo aumento destes valores com  $d_{EANH}$ , justifica o gradiente mais abrupto de  $sdeg$  para  $d_{EANH}=20$  mm, quando

comparada com as restantes geometrias. Para o Sikaforce® 7752 (Figura 43.c)), as geometrias analisadas apresentam uma evolução da variável do dano dissimilar. A variação de  $sdeg$  ocorreu de forma mais abrupta desde o estado não danificado até à ocorrência do dano, relativamente ao adesivo mais rígido. Para  $d_{EANH}=5$  e 10 mm, o valor de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  é mais elevado na extremidade crítica, ocorreu uma rotura abrupta da união adesiva. Desta maneira, todos os pontos ficam com dano de 100% após o incremento correspondente a  $P_{m\acute{a}x}$ . A evolução das curvas é está diretamente relacionada com a maior ductilidade do adesivo em estudo, o grau de plastificação nulo dos aderentes e ainda a concentração de picos de tensão junto das extremidades da sobreposição adesiva. Após particularizar a evolução das curvas para os diferentes adesivos utilizados, é de notar que a variação de  $sdeg$  é mais suave para o adesivo Araldite® 2015, sendo que são eliminados elementos da camada adesiva em ambas as extremidades da sobreposição. A utilização do adesivo mais dúctil sugere que a rotura ocorra de forma abrupta, e pode estar relacionado com a diferença de rigidez entre os materiais que constituem os aderentes e adesivo.

### 3.4.3. Efeito do comprimento de sobreposição

O presente Subcapítulo estuda o efeito da variação de  $L_0$  nas diferentes juntas adesivas analisadas, para os três adesivos em estudo. A Figura 44 ilustra as curvas  $P-\delta$  em função de  $L_0$ , para os três adesivos analisados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

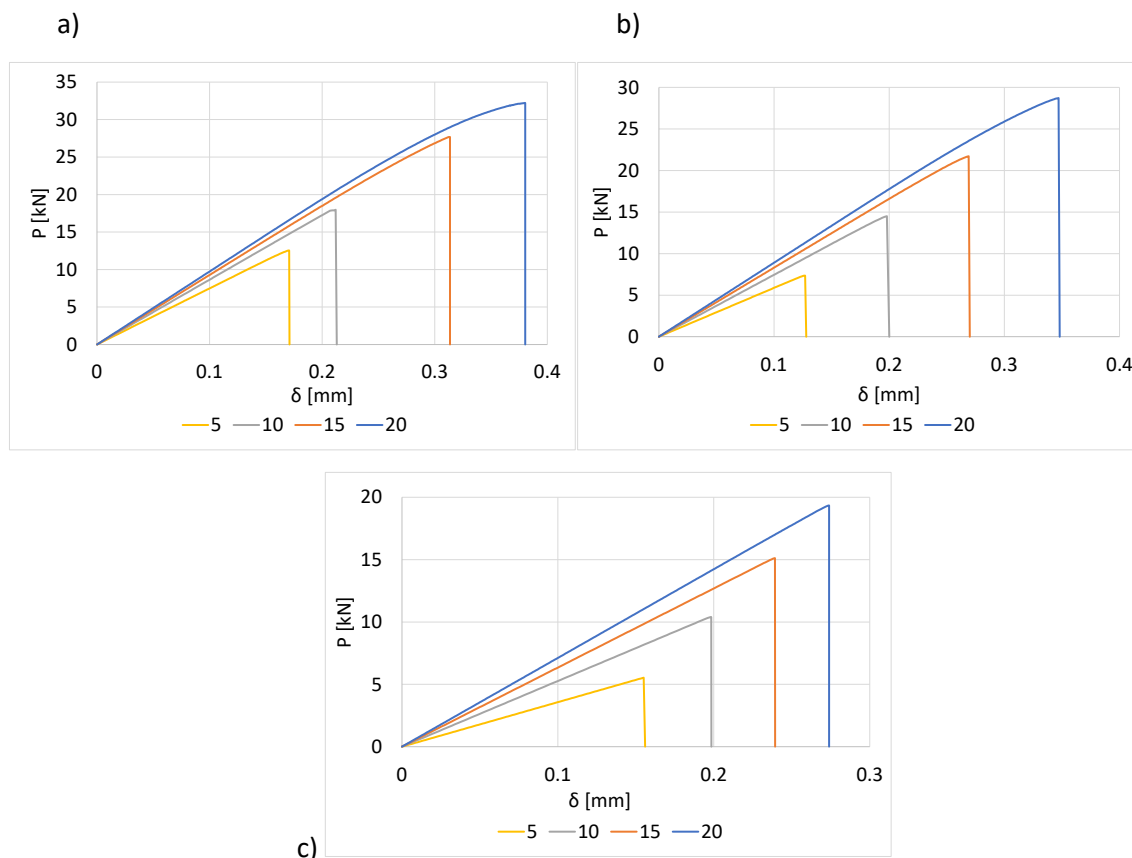


Figura 44 - Curvas  $P-\delta$  obtidas em função de  $L_0$ , para os três adesivos analisados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

De acordo com a Figura 44.a), para o adesivo mais rígido, registou-se uma diminuição dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 96%, do valor de  $L_0$  mais elevado, 20 mm, para o mais baixo, 5 mm. Para o adesivo Araldite® 2015, e de acordo com os valores mais distantes de  $L_0$  analisados, registou-

se uma diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  a rondar os 105%, do valor mais elevado para o mais baixo, de acordo com a Figura 44.b). Relativamente ao adesivo mais dúctil analisado [Figura 44.c)], verificou-se uma diminuição percentual dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 72%, do valor de  $L_0$  mais elevado para o mais baixo. Para os três adesivos analisados, ocorreu um aumento da resistência mecânica e da ductilidade das juntas adesivas para valores de  $L_0$  mais elevados. Registaram-se valores de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{rotura}$  proporcionais à rigidez dos adesivos utilizados. A Figura 45 ilustra os diferentes valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

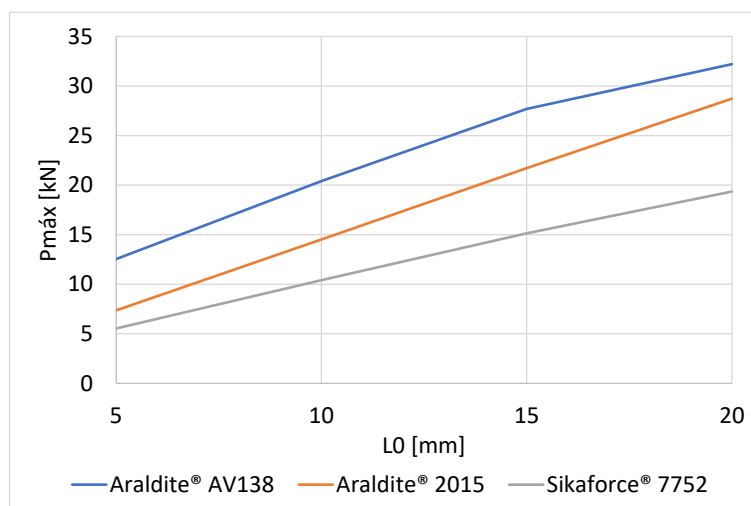


Figura 45 - Evolução de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

A Tabela 27 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. Na eventualidade de fazer variar  $L_0$  e o adesivo analisado, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $L_0=20$  mm. Registou-se um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 58%, relativamente à geometria de base.

Tabela 27 – Aumento/diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

|                 | $L_0$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5          | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 38,50      | -     | 35,73 | 57,95 |
| Araldite® 2015  | 63,93      | 28,84 | 6,50  | 40,86 |
| Sikaforce® 7752 | 72,86      | 48,98 | 25,82 | 5,11  |

A Tabela 28 ilustra os valores de  $\delta_{rotura}$  [mm] em função de  $L_0$  e do adesivo utilizado. O  $\delta_{rotura}$  aumenta com o  $L_0$ , tendo-se registado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura.

Tabela 28 - Valores de  $\delta_{rotura}$  obtidos em função de  $L_0$ , para os três adesivos testados.

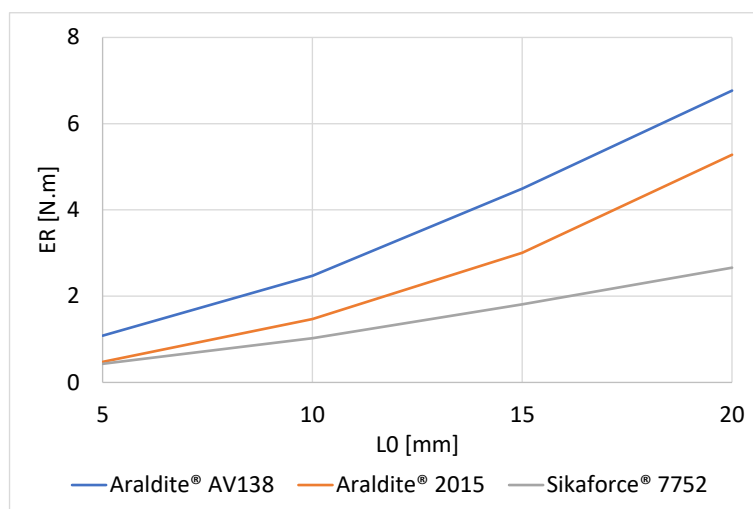
|                 | $L_0$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5          | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 0,171      | 0,240 | 0,314 | 0,380 |
| Araldite® 2015  | 0,128      | 0,200 | 0,269 | 0,347 |
| Sikaforce® 7752 | 0,156      | 0,198 | 0,239 | 0,274 |

A Tabela 29 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_0$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. Para o adesivo Araldite® AV138, a geometria de junta cujo valor de  $\delta_{rotura}$  foi máximo, 0,380 mm, corresponde a uma configuração cujo  $L_0=20$  mm, tendo-se registado um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de 78,40%, relativamente à geometria de base. Relativamente ao Araldite® 2015, o  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $L_0=20$  mm, 0,347 mm, tendo-se registado um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de 44,58%, relativamente à geometria de base. O  $\delta_{rotura}$  para o adesivo mais dúctil foi máximo para  $L_0=20$  mm, 0,274 mm, registando-se um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de 14,17%, relativamente à geometria de base. Para os adesivos utilizados, uma vez que a ductilidade das juntas é proporcional a  $L_0$ , verificou-se um acréscimo percentual de  $\delta_{rotura}$  de aproximadamente 44% do adesivo mais dúctil para o mais rígido.

Tabela 29 – Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_0$ , relativamente à geometria de base, para os três adesivos testados.

|                 | $L_0$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5          | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 28,75      | -     | 30,83 | 58,33 |
| Araldite® 2015  | 46,67      | 16,67 | 12,08 | 44,58 |
| Sikaforce® 7752 | 35,00      | 17,50 | 0,42  | 14,17 |

A Figura 46 ilustra a evolução de  $ER$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

Figura 46 - Evolução de  $ER$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

A Tabela 30 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $ER$  corresponde à geometria que utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $L_0=20$  mm.

Tabela 30 – Aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

|                 | $L_0$ [mm] |       |       |        |
|-----------------|------------|-------|-------|--------|
| Adesivo         | 5          | 10    | 15    | 20     |
| Araldite® AV138 | 56,12      | -     | 81,57 | 173,40 |
| Araldite® 2015  | 80,70      | 40,49 | 21,43 | 113,40 |
| Sikaforce® 7752 | 82,55      | 58,50 | 26,88 | 7,49   |

A Figura 47 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $L_0=$  a) 5 mm, b) 15 mm e c) 20 mm. A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e de  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $L_0=10$  mm, e coincide com a geometria de base.

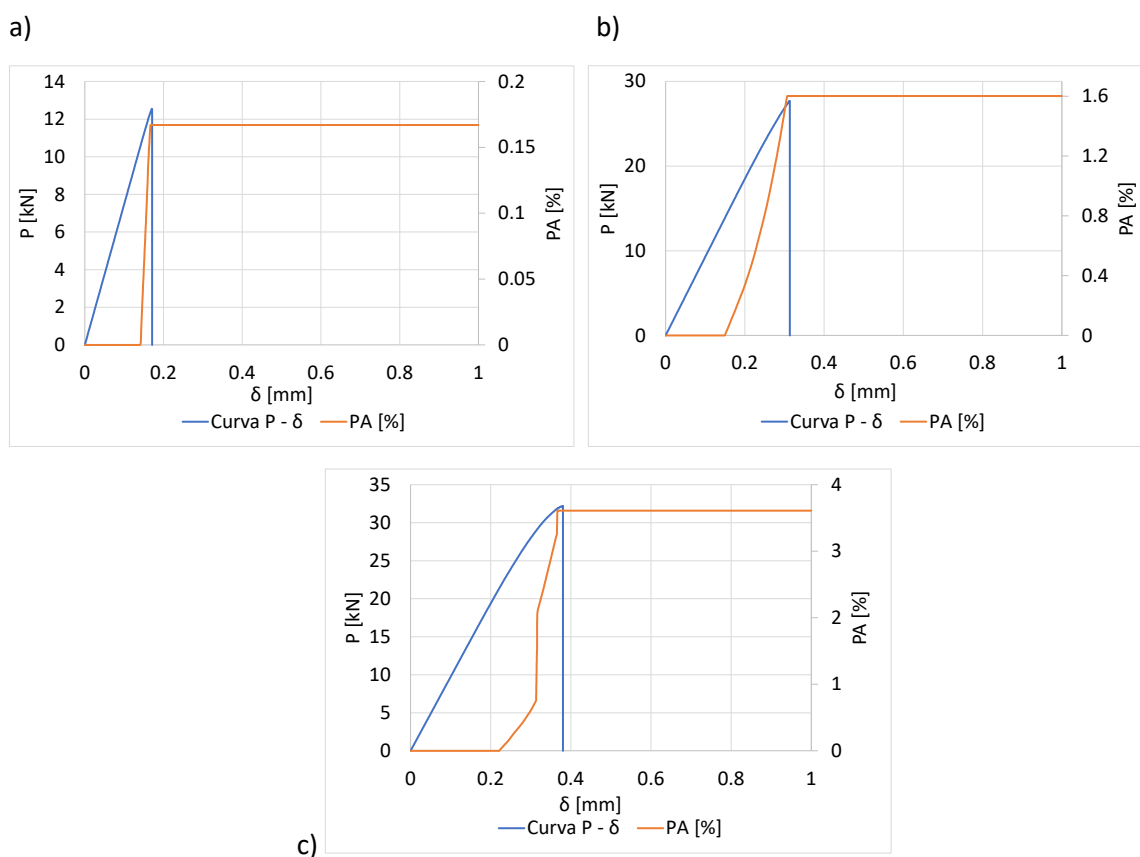


Figura 47 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $L_0=$  a) 5 mm, b) 15 mm e c) 20 mm.

A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® AV138. De acordo com a Figura 47.a), para  $L_0=5$  mm,  $\delta_{IPA}=0,142$  mm e  $P_{IPA}=10623,85$  N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 83,04% do  $\delta_{rotura}$  e uma força equivalente a 84,71% de  $P_{máx}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,17%. Para  $L_0=15$  mm [Figura 47.b)],  $\delta_{IPA}=0,150$  mm e

$P_{IPA}=13912,20$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 47,77% do  $\delta_{rotura}$  e a 50,26% de  $P_{m\acute{a}x}$ , respetivamente. Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 1,60%. Para  $L_0=20$  mm,  $\delta_{IPA}=0,222$  mm e  $P_{IPA}=21437,60$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 58,42% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  a 66,56% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registou-se um valor de  $PA$  máximo de aproximadamente 3,61%, de acordo com a Figura 47.c). Para o presente adesivo e valores de  $L_0$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a diminuir relativamente ao  $\delta_{rotura}$ . O acréscimo percentual de  $\delta_{IPA}$  maximiza o aproveitamento da resistência dos elementos da camada adesiva.

A Figura 48 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para  $L_0=$  a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm.

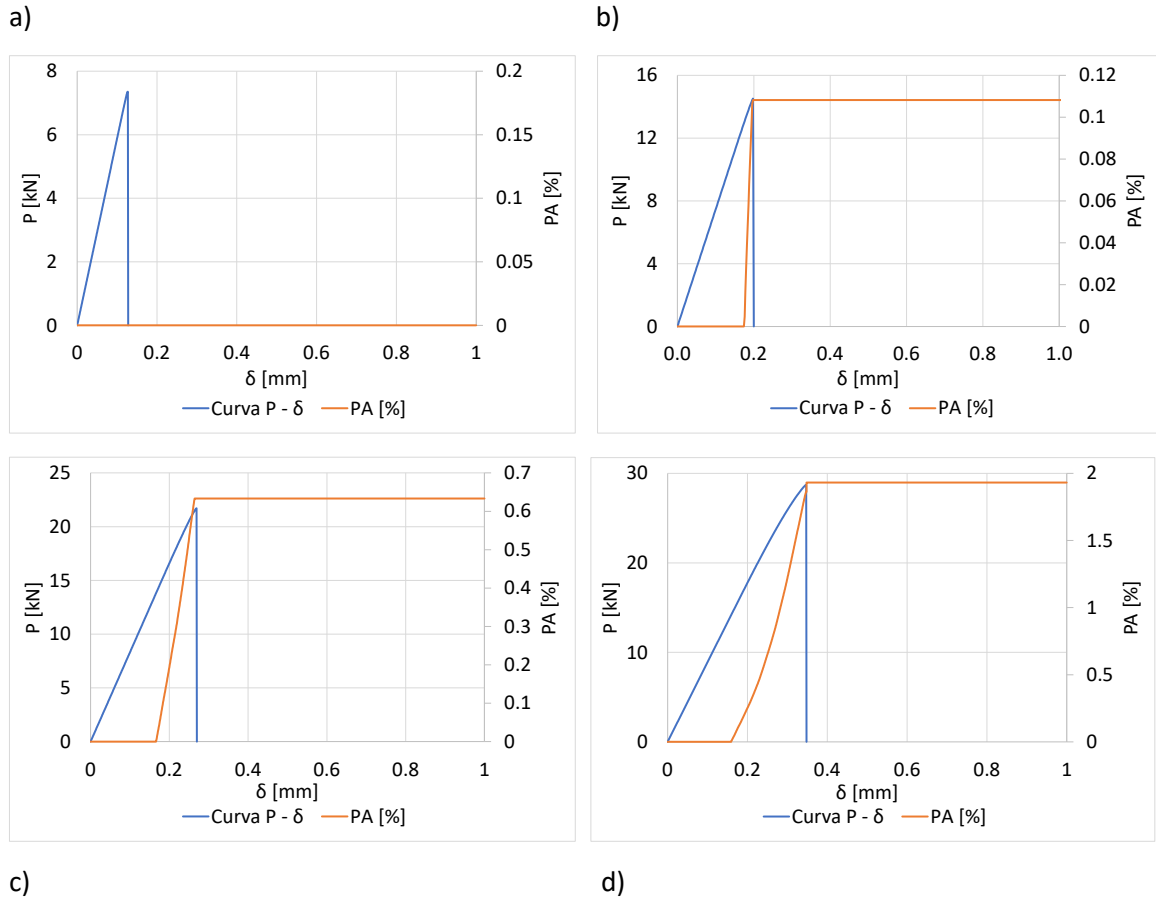


Figura 48 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para  $L_0=$  a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm.

A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® 2015. Para  $L_0=5$  mm, não ocorreu  $PA$ . De acordo com a Figura 48.b), para  $L_0=10$  mm,  $\delta_{IPA}=0,176$  mm e  $P_{IPA}=13083,00$  N. O início da plastificação dos aderentes ocorre para um  $\delta$  correspondente a 88,00% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força equivalente a 90,15% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu plastificação nos aderentes, na ordem dos 0,11%. Para  $L_0=15$  mm,  $\delta_{IPA}=0,167$  mm e  $P_{IPA}=13876,40$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 62,08% do  $\delta_{rotura}$  e a 63,89% de  $P_{m\acute{a}x}$ , respetivamente, de acordo com a Figura 48.c). Registou-se um valor de  $PA$  máximo de aproximadamente 0,63%. Para  $L_0=20$  mm [Figura 48.d)],  $\delta_{IPA}=0,159$  mm e  $P_{IPA}=14155,50$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 45,82% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 49,28% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 1,93%. Para valores de  $L_0$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a diminuir relativamente ao  $\delta_{rotura}$ .

A Figura 49 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $L_0$ = a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm.

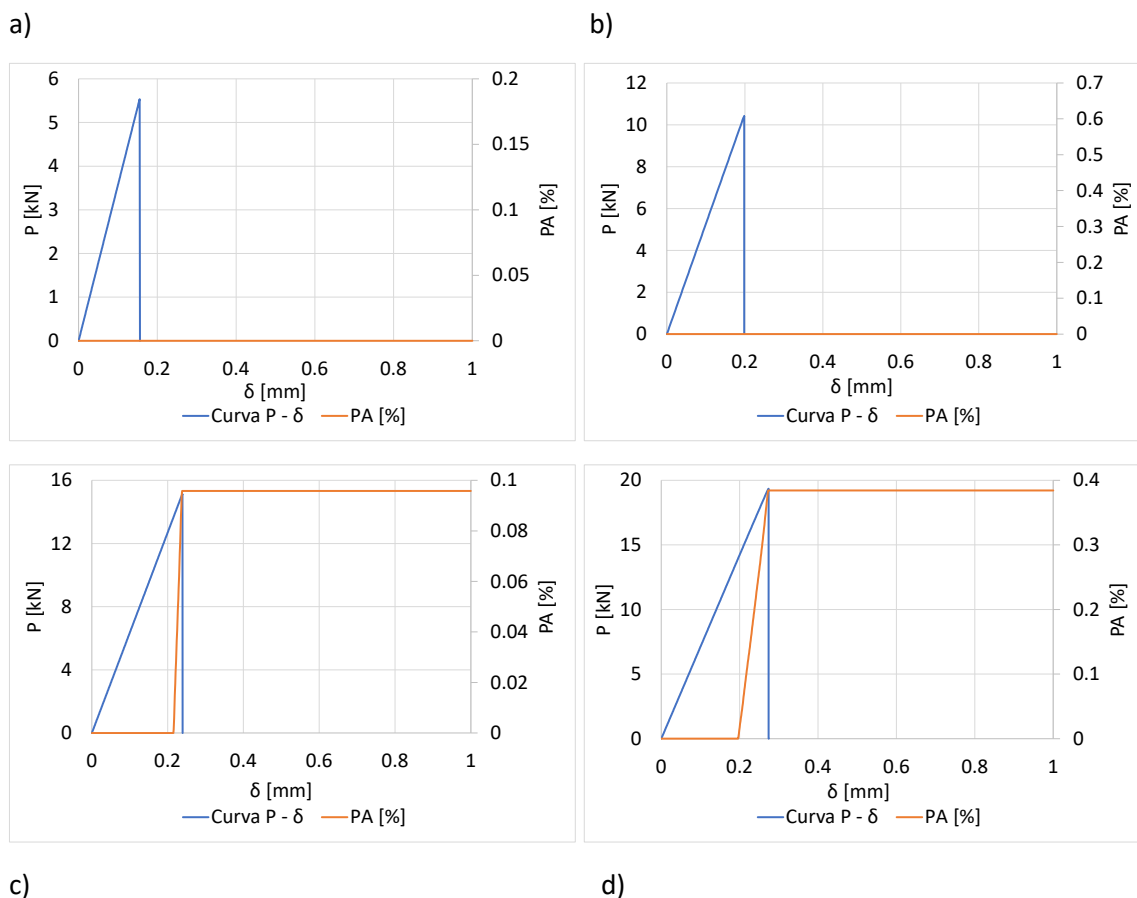


Figura 49 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $L_0$ = a) 5 mm, b) 10 mm, c) 15 mm e d) 20 mm.

A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todos as geometrias que utilizam o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $L_0=5$  [Figura 49.a)] e 10 mm [Figura 49.b)], não ocorreu  $PA$ . Para  $L_0=15$  mm,  $\delta_{IPA}=0,216$  mm e  $P_{IPA}=13706,40$  N, de acordo com a Figura 49.c). O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 90,38% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 90,61% de  $P_{máx}$ . Ocorreu plastificação nos aderentes, na ordem dos 0,10%. De acordo com a Figura 49.d), para  $L_0=20$  mm,  $\delta_{IPA}=0,197$  mm e  $P_{IPA}=14022,50$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 71,90% do  $\delta_{rotura}$  e a 72,46% de  $P_{máx}$ , respetivamente. Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 0,38%. O valor de  $\delta_{IPA}$  tende a diminuir relativamente ao  $\delta_{rotura}$  para valores de  $L_0$  mais elevados. A Tabela 31 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

Tabela 31 - Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

|                 | $L_0$ [mm] |        |       |       |
|-----------------|------------|--------|-------|-------|
| Adesivo         | 5          | 10     | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 6,58       | -      | 1,32  | 46,05 |
| Araldite® 2015  | 100,00     | 15,79  | 9,87  | 4,61  |
| Sikaforce® 7752 | 100,00     | 100,00 | 42,11 | 29,61 |

A Tabela 32 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

Tabela 32 – Aumento/diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

|                 | $L_0$ [mm] |        |      |       |
|-----------------|------------|--------|------|-------|
| Adesivo         | 5          | 10     | 15   | 20    |
| Araldite® AV138 | 19,17      | -      | 5,85 | 63,11 |
| Araldite® 2015  | 100,00     | 0,46   | 5,58 | 7,71  |
| Sikaforce® 7752 | 100,00     | 100,00 | 4,29 | 6,69  |

A Figura 50 ilustra a evolução de  $PA$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

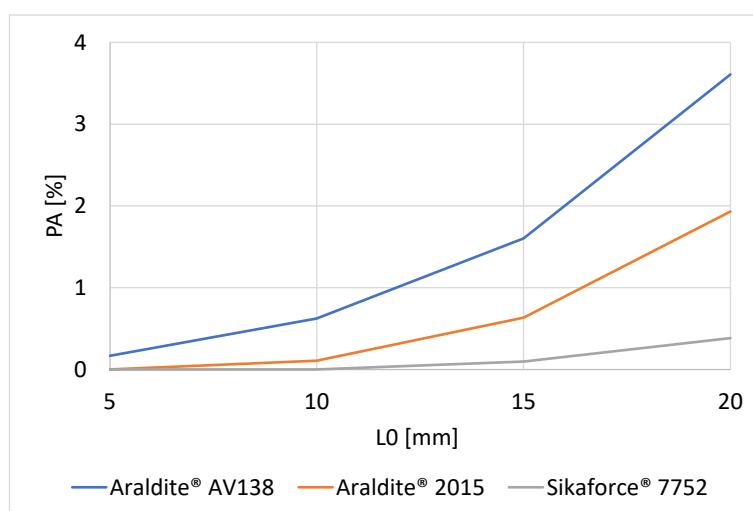


Figura 50 - Evolução de  $PA$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

A Tabela 33 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

Tabela 33 – Aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

|                 | $L_0$ [mm] |        |        |        |
|-----------------|------------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 5          | 10     | 15     | 20     |
| Araldite® AV138 | 73,19      | -      | 157,23 | 479,48 |
| Araldite® 2015  | 100,00     | 82,63  | 1,67   | 210,21 |
| Sikaforce® 7752 | 100,00     | 100,00 | 84,62  | 38,31  |

Na eventualidade de fazer variar  $L_0$  e o adesivo analisado, a junta adesiva que apresenta o valor de  $PA$  mais elevado utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $L_0=20$  mm. A geometria de junta registou um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 480%, relativamente à geometria de base.

A Figura 51 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_0$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

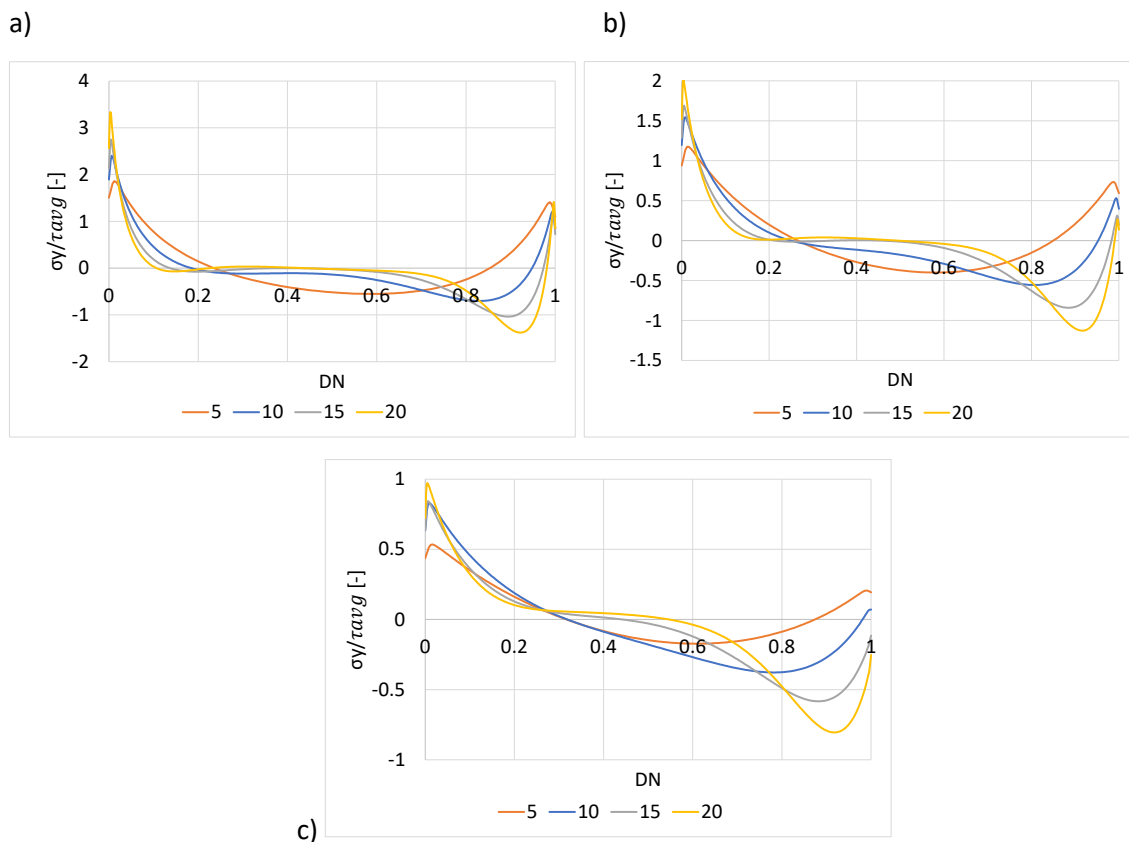


Figura 51 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_0$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A geometria que registou os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  mais elevados utiliza um  $L_0=20$  mm. Os picos de tensão nas extremidades são tão maiores quanto mais rígido for o adesivo utilizado, e a distribuição do estado de tensões é mais uniforme nos adesivos dúcteis. De um modo geral, na extremidade crítica, os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto maior for  $L_0$ . De acordo com a Figura 51.a), para o Araldite® AV138, os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registados na extremidade oposta são muito idênticos, ainda que se destaque o pico de tensão registado para  $L_0=5$  mm. Registou-se uma diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 60% para  $L_0=5$  mm, relativamente à geometria cujo  $L_0=20$  mm. Relativamente aos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, Figura 51.b) e c), respetivamente, para a extremidade adjacente à curvatura do aderente exterior, os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto menor for o valor de  $L_0$ . Relativamente ao Araldite® 2015, de acordo com os valores mais distantes de  $L_0$  analisados, 5 e 20 mm, registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  a rondar os 35%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para estes valores, verificou-se uma diminuição percentual de aproximadamente 51 e 16%, respetivamente, relativamente à geometria de base. Quanto ao adesivo Sikaforce® 7752, verificou-se uma diminuição dos valores críticos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  na ordem dos 18%, do valor de  $L_0$  mais elevado, 20 mm, para o mais baixo, 5 mm. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição percentual de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 78 e 59%, respetivamente, relativamente à geometria de referência. Relativamente aos valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registados e ao valor de  $L_0$ , a utilização de adesivos mais rígidos resulta no aumento dos valores dos picos de

tensão. A Figura 52 ilustra a evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

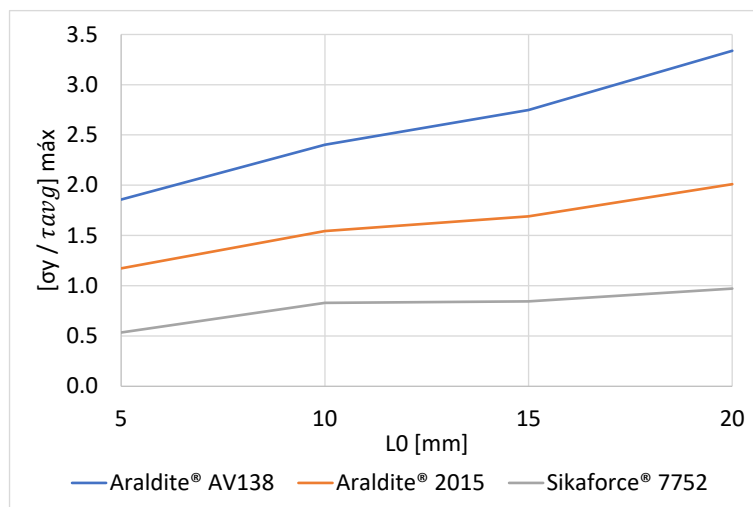


Figura 52 - Evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

A Tabela 34 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

Tabela 34 – Aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

|                 | $L_0$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5          | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 22,61      | -     | 14,46 | 38,94 |
| Araldite® 2015  | 51,17      | 35,67 | 29,66 | 16,29 |
| Sikaforce® 7752 | 77,72      | 65,46 | 64,88 | 59,54 |

A Figura 53 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_0$  e ao longo de DN, para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. A configuração de junta que apresentou os valores mais elevados junto das extremidades da sobreposição, independentemente do adesivo utilizado, corresponde a uma geometria de junta cujo  $L_0=20$  mm. Em suma, os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  são tão mais elevados na extremidade crítica, quanto maior o valor de  $L_0$ . Para o adesivo Araldite® AV138 (Figura 53.a)), registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 82% para  $L_0=5$  mm, relativamente à geometria cujo  $L_0=20$  mm. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição e um aumento percentual destes valores de aproximadamente 23 e 59%, respetivamente, relativamente à geometria de base. De acordo com a Figura 53.b) e para o Araldite® 2015, para os valores mais distantes de  $L_0$  analisados, 5 e 20 mm, registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  a rondar os 48%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para estes valores, verificou-se uma diminuição e um aumento percentual dos valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 36 e 12%, respetivamente, relativamente à geometria de base. Para o adesivo mais dúctil (Figura 53.c)), verificou-se uma diminuição dos valores críticos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  na ordem dos 18%, do valor de  $L_0$  mais elevado, 20 mm, para o mais baixo, 5 mm. Para os valores de  $L_0$

mencionados, ocorreu uma diminuição percentual de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 26 e 44%, respectivamente, relativamente à geometria de base. As tensões de corte são tão mais elevadas quanto mais rígido for o adesivo utilizado, e a distribuição do estado de tensões é mais uniforme para adesivos menos rígidos, uma vez que  $\tau_{xy}$  se aproxima de  $\tau_{avg}$ .

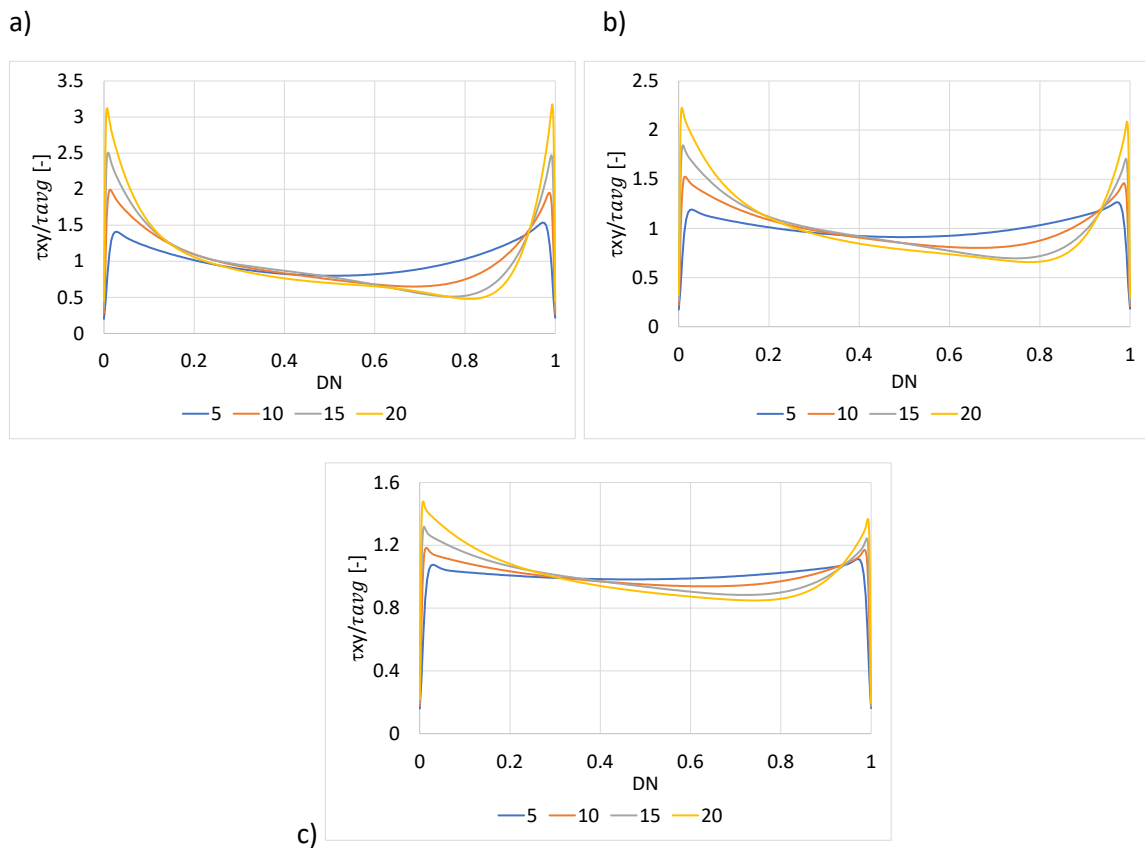


Figura 53 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_0$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A Figura 54 ilustra a evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

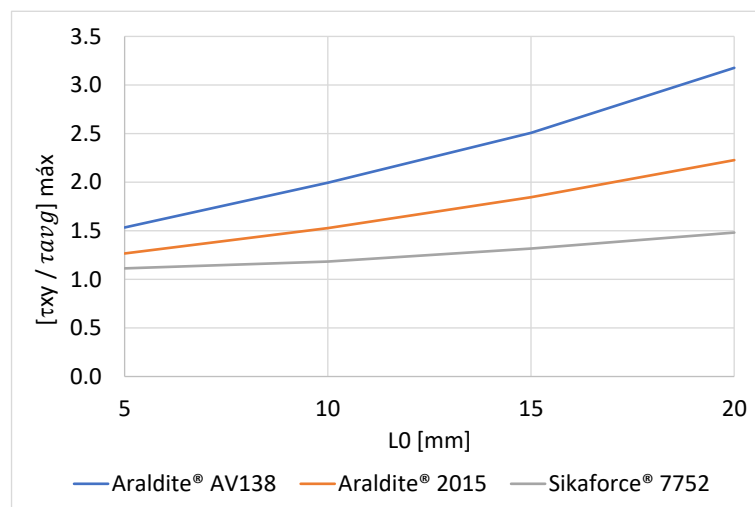


Figura 54 - Evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados.

A Tabela 35 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

Tabela 35 – Aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e dos adesivos analisados, relativamente à geometria de base.

|                 | $L_0$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 5          | 10    | 15    | 20    |
| Araldite® AV138 | 23,05      | -     | 25,74 | 59,26 |
| Araldite® 2015  | 36,47      | 23,41 | 7,44  | 11,71 |
| Sikaforce® 7752 | 44,18      | 40,62 | 33,89 | 25,74 |

A Figura 55 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $L_0$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

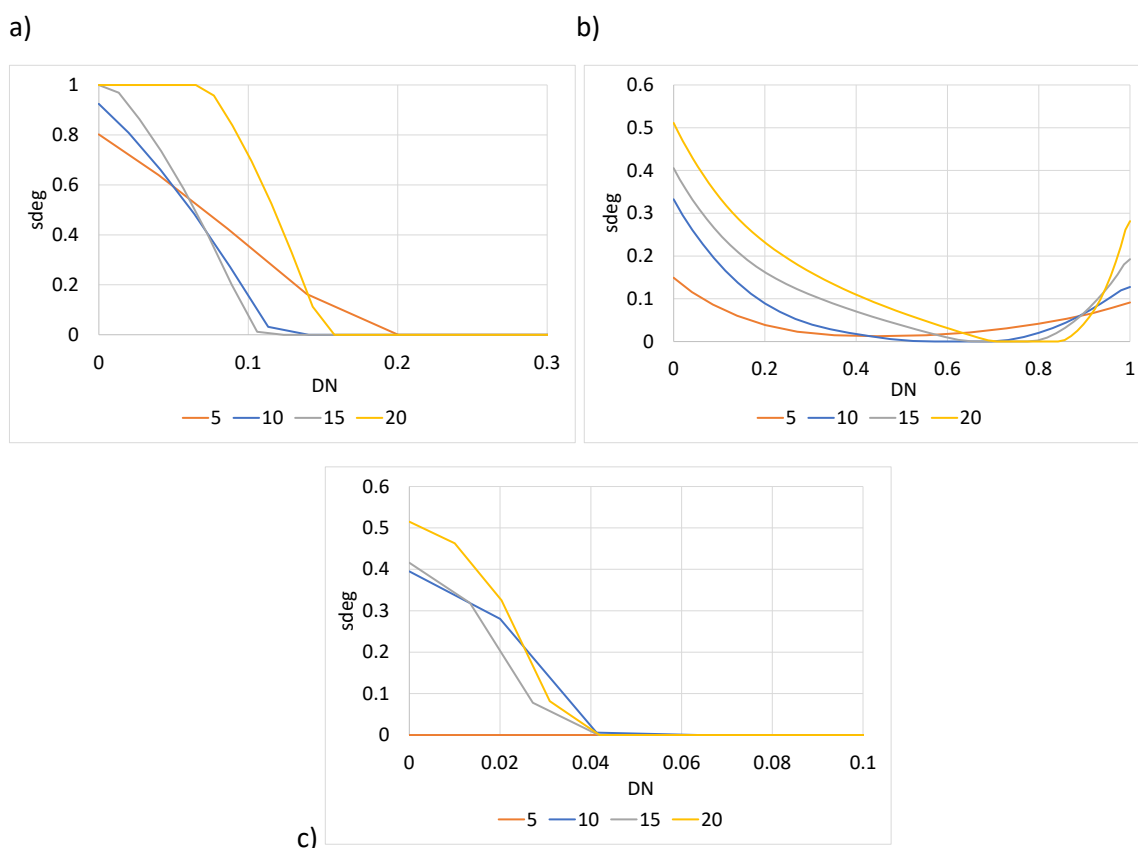


Figura 55 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $L_0$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

Para o adesivo Araldite® AV138, e de acordo com a Figura 55.a), a configuração de junta cujo  $L_0=5$  mm apresenta uma evolução do dano mais suave, quando comparada com as demais. A fragilidade do adesivo em estudo explica o facto da variação de  $sdeg$  ser mais abrupta quando comparada com o Araldite® 2015. Os valores de  $PA$  aumentam com o valor de  $L_0$ . É possível identificar uma tendência no gradiente de  $sdeg$  para as diferentes curvas, uma vez que o  $\delta_{IPA}$  é proporcional aos valores de  $L_0$  analisados. A diferença nos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registados na extremidade crítica vão ao encontro da evolução da variável do dano, já que a configuração de junta que

apresentou os valores mais elevados junto da extremidade crítica corresponde a uma geometria de junta cujo  $L_0=20$  mm. No caso do adesivo Araldite® 2015 e de acordo com a Figura 55.b), as geometrias analisadas apresentam uma evolução de *sdeg* menos abrupta, quando comparada com os restantes adesivos, desde o estado não danificado até à degradação máxima observada da camada adesiva. A evolução das curvas é menos vertical do que as anteriores e está diretamente relacionada com a maior ductilidade do adesivo em estudo e com a  $PA$ . Os valores de  $PA$  aumentam com o valor de  $L_0$ . O início do dano ocorre em ambas as extremidades da sobreposição, e o gradiente de *sdeg* é mais ténue para valores mais elevados de  $L_0$ . A maior ductilidade do adesivo em estudo explica o facto da evolução das curvas ser mais ténue quando comparada com a evolução de  $L_0$  para o adesivo mais rígido. As tensões de corte são predominantes face aos esforços de arrancamento, o que permite concluir que a rotura se inicia por intermédio destas. A evolução das curvas segue uma tendência padrão, em concordância com os valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registados para cada geometria de junta analisada. Para o Sikaforce® 7752 (Figura 55.c)), as geometrias analisadas apresentam uma evolução de *sdeg* idêntica, à exceção da geometria de junta cujo  $L_0=5$  mm. Para esta configuração de junta ocorreu a rotura de forma abrupta, e desta maneira, todos os pontos ficam com dano de 100%. O gradiente das curvas é mais vertical quando comparado com o adesivo mais rígido, perceptível também pela degradação máxima observada dos elementos coesivos da análise, para o incremento correspondente a  $P_{m\acute{a}x}$ . A  $PA$  nula para valores de  $L_0=5$  e 10 mm, o aumento ligeiro deste parâmetro para valores de  $L_0\geq 15$  mm, e ainda a concentração de picos de tensão junto das extremidades da sobreposição, explica a variação mais ténue de *sdeg* quando comparado com o adesivo mais rígido analisado. Não é possível identificar uma tendência na evolução de *sdeg* para as diferentes curvas, uma vez que o  $\delta_{IPA}$  não é proporcional aos valores de  $L_0$  analisados. É de notar que a variação da variável em estudo foi mais suave para o Araldite® 2015, sendo que foram eliminados elementos da camada adesiva em ambas as extremidades. O adesivo mais dúctil sugere que a rotura ocorra de forma abrupta, e pode estar relacionado com a diferença de rigidez entre os materiais constituintes.

### 3.4.4. Efeito da espessura dos aderentes

O presente Subcapítulo estuda o efeito da variação de  $t_{Ad}$  nas diferentes juntas adesivas analisadas, para os três adesivos em estudo. É relevante destacar que o aumento de  $t_{Ad}$  não interfere com os restantes parâmetros geométricos, e a massa de adesivo utilizada é constante. A Figura 56 ilustra as curvas  $P-\delta$  em função de  $t_{Ad}$  e do adesivo utilizado. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. O adesivo Araldite® AV138 (Figura 56.a)) registou um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 29%, de  $t_{Ad}=1$  mm para  $t_{Ad}=4$  mm. Quanto ao adesivo Araldite® 2015, registaram-se valores de  $P_{m\acute{a}x}$  muito próximos para juntas cujo  $t_{Ad}\geq 2$  mm, de acordo com a Figura 56.b). O presente adesivo registou uma diminuição percentual dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 15%, do valor de  $t_{Ad}$  mais elevado para o menor. De acordo com a Figura 56.c), para o Sikaforce® 7752, a resistência mecânica das juntas praticamente não varia para valores de  $t_{Ad}\geq 2$  mm. Para o adesivo mais dúctil, verificou-se uma diminuição dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 4%, entre os valores mais distantes de  $t_{Ad}$  analisados. Para todos os adesivos, verificou-se o aumento da resistência mecânica e a diminuição percentual da ductilidade das juntas adesivas para valores mais elevados de  $t_{Ad}$ . Registaram-se valores de  $P_{m\acute{a}x}$  proporcionais à rigidez dos adesivos utilizados, uma vez que a rigidez das juntas adesivas está diretamente relacionada

com o declive das curvas. No entanto, o  $\delta_{rotura}$  das juntas é tão mais elevado, quanto menor o valor de  $t_{Ad}$ .

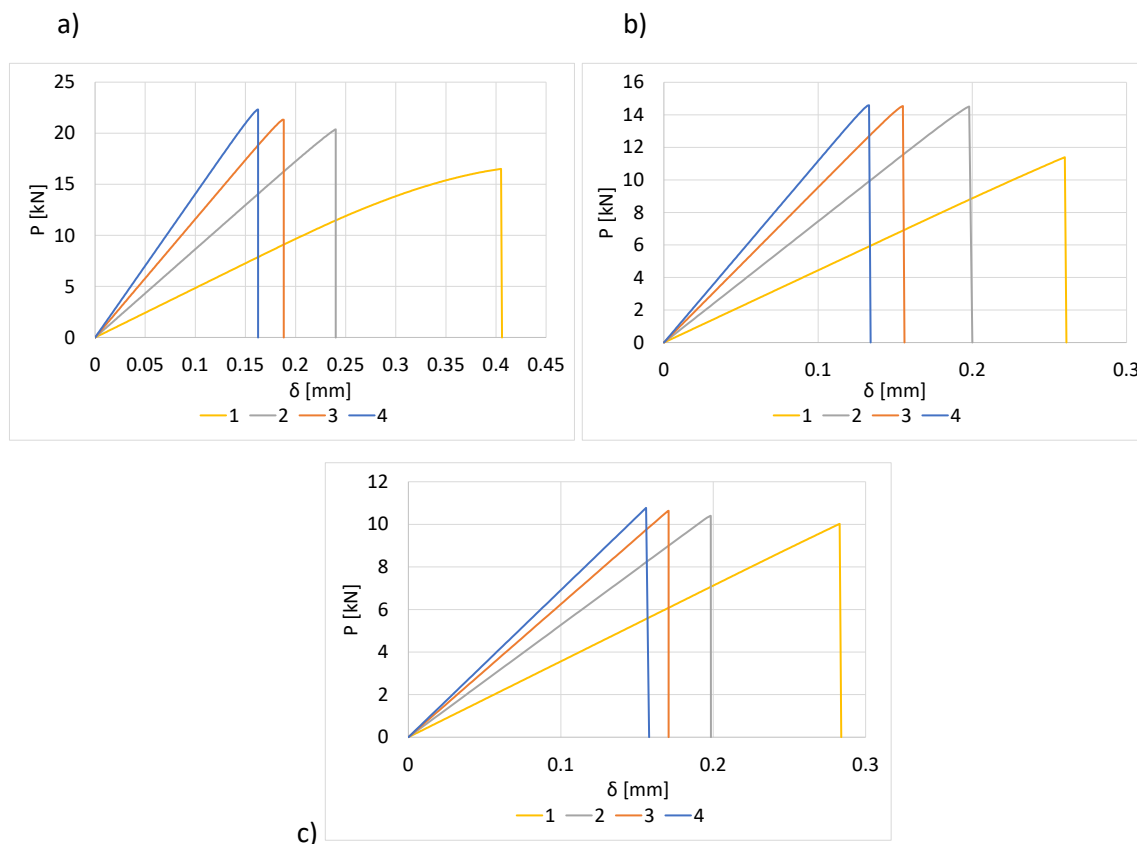


Figura 56 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas em função de  $t_{Ad}$ , para os três adesivos analisados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A Figura 57 ilustra os diferentes valores de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo. É de notar que a carga suportada pela junta é menor para valores de  $PA$  mais elevados.

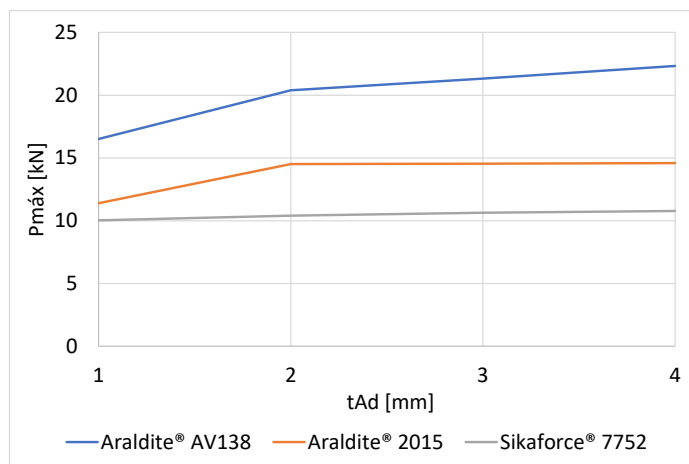


Figura 57 - Evolução de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 36 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. Ao variar  $t_{Ad}$  e o adesivo em estudo, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $t_{Ad}=4$  mm. A geometria de junta mais satisfatória registou um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 10%, relativamente à geometria de base.

Tabela 36 – Aumento/diminuição percentual de  $P_{máx}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

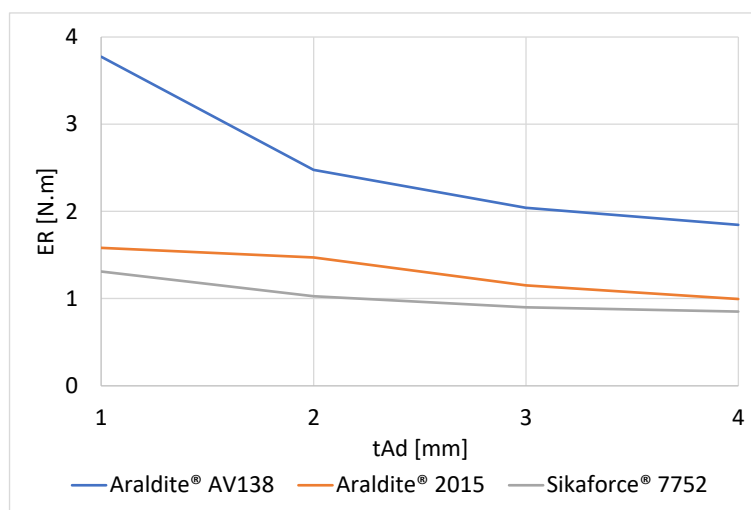
|                 | $t_{Ad}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 1             | 2     | 3     | 4     |
| Araldite® AV138 | 19,01         | -     | 4,59  | 9,51  |
| Araldite® 2015  | 43,90         | 28,84 | 28,67 | 28,43 |
| Sikaforce® 7752 | 50,83         | 48,98 | 47,81 | 47,15 |

A Tabela 37 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $t_{Ad}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. O  $\delta_{rotura}$  diminui com o aumento de  $t_{Ad}$ , para todos os adesivos, tendo-se registado um comportamento linear das juntas até à rotura. Para qualquer adesivo, a geometria com valores de  $\delta_{rotura}$  mais elevados utiliza um valor de  $t_{Ad}=1$  mm.

Tabela 37 – Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $t_{Ad}$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $t_{Ad}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 1             | 2     | 3     | 4     |
| Araldite® AV138 | 69,17         | -     | 21,67 | 32,08 |
| Araldite® 2015  | 8,75          | 16,67 | 35,00 | 44,58 |
| Sikaforce® 7752 | 18,33         | 17,50 | 28,75 | 34,17 |

Relativamente aos três adesivos utilizados, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, o  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $t_{Ad}=1$  mm. Registaram-se valores de  $\delta_{rotura}$  iguais a 0,406, 0,261 e 0,284 mm, respetivamente. Quanto aos valores mencionados, registaram-se aumentos percentuais de 69,17, 8,75 e 18,33%, relativamente à geometria de base. A ductilidade das juntas adesivas é tão mais elevada quanto mais rígido for o adesivo e quanto menor o valor de  $t_{Ad}$ , verificando-se um aumento percentual de 51% do Sikaforce® 7752 para o Araldite® AV138. A Figura 58 ilustra a evolução de  $ER$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

Figura 58 - Evolução de  $ER$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 38 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $ER$  corresponde à geometria que utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $t_{Ad}=1$  mm.

Tabela 38 – Aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $t_{Ad}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 1             | 2     | 3     | 4     |
| Araldite® AV138 | 52,47         | -     | 17,52 | 25,47 |
| Araldite® 2015  | 39,26         | 40,49 | 53,43 | 59,84 |
| Sikaforce® 7752 | 42,23         | 58,50 | 63,63 | 65,59 |

A Figura 59 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $t_{Ad}=a)$  1 mm, b) 3 mm e c) 4 mm. A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e de  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o presente adesivo e  $t_{Ad}=2$  mm, que coincide com a geometria de base.

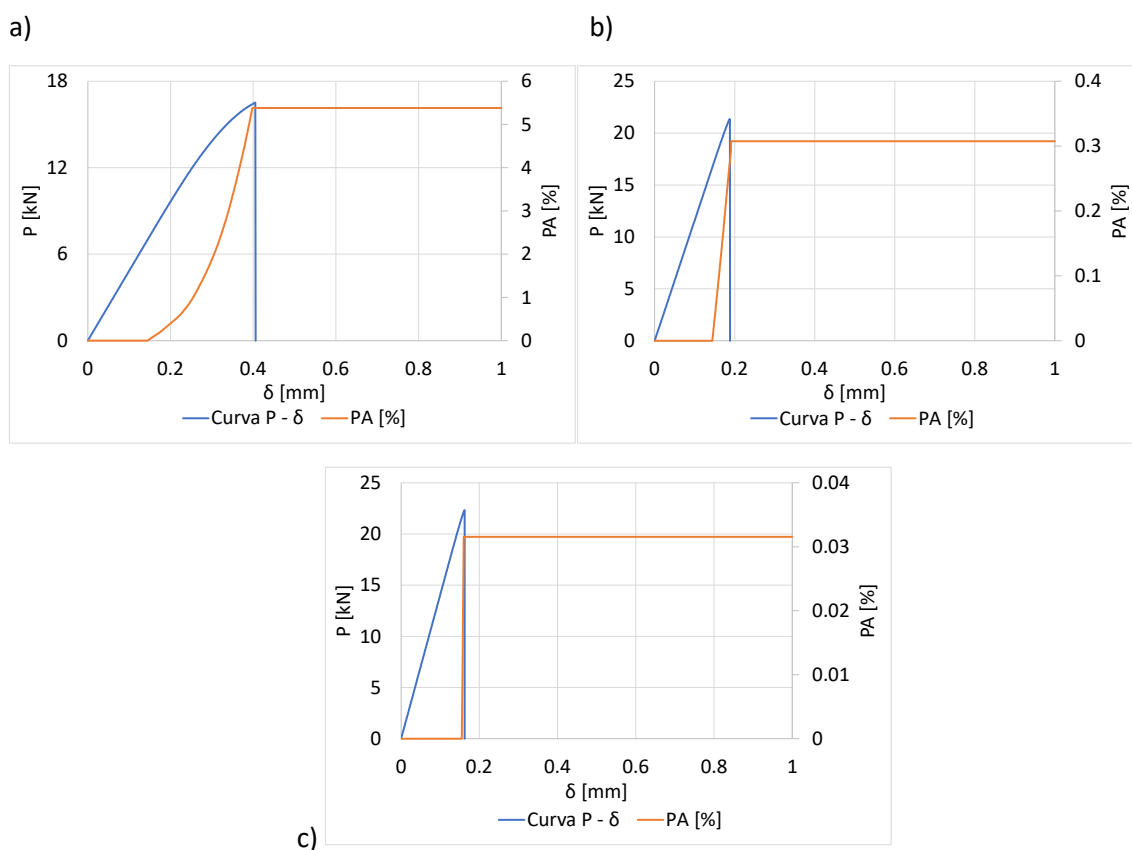


Figura 59 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o caso do adesivo Araldite® AV138. Para  $t_{Ad}=a)$  1 mm, b) 3 mm e c) 4 mm.

A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todos as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® AV138, e para valores de  $t_{Ad}$  mais baixos, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a diminuir relativamente ao  $\delta_{rotura}$ . De acordo com a Figura 59.a), para  $t_{Ad}=1$  mm,  $\delta_{IPA}=0,145$  mm e  $P_{IPA}=7024,08$  N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 35,71% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força equivalente a 42,53% de

$P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 5,38%. Para  $t_{Ad}=3$  mm,  $\delta_{IPA}=0,145$  mm e  $P_{IPA}=16814,20$  N. De acordo com a Figura 59.b), o  $\delta_{IPA}$  corresponde a 77,13% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 78,84% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 0,29%. Para  $t_{Ad}=4$  mm,  $\delta_{IPA}=0,156$  mm e  $P_{IPA}=21716,80$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 95,71% do  $\delta_{rotura}$  e a 97,25% de  $P_{m\acute{a}x}$ , respetivamente, de acordo com a Figura 59.c). Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,03%.

A Figura 60 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no não crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para  $t_{Ad}=$  a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm.

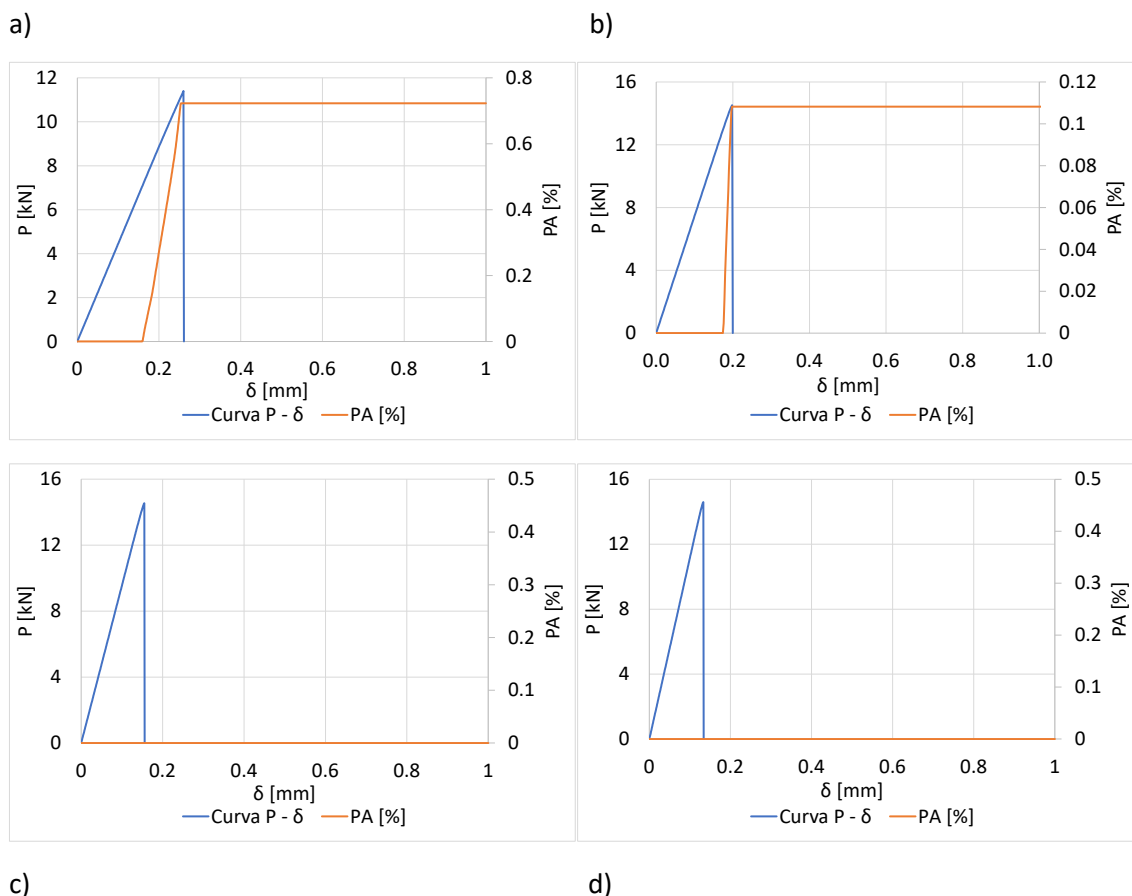


Figura 60 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no não crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para  $t_{Ad}=$  a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm.

A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® 2015, e para valores de  $t_{Ad}$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a aproximar-se de  $\delta_{rotura}$ . De acordo com a Figura 60.a), para  $t_{Ad}=1$  mm, o valor de  $\delta_{IPA}=0,160$  mm e o valor de  $P_{IPA}=7108,34$  N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 61,30% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força equivalente a 62,14% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,72%. Para  $t_{Ad}=2$  mm,  $\delta_{IPA}=0,176$  mm e  $P_{IPA}=13083,00$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 88,00% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 90,15% de  $P_{m\acute{a}x}$ , de acordo com a Figura 60.b). Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 0,11%. Para  $t_{Ad}=3$  e 4 mm, Figura 60.c) e Figura 60.d), respetivamente, não ocorreu  $PA$ .

A Figura 61 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no não crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $t_{Ad}=$  a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm.

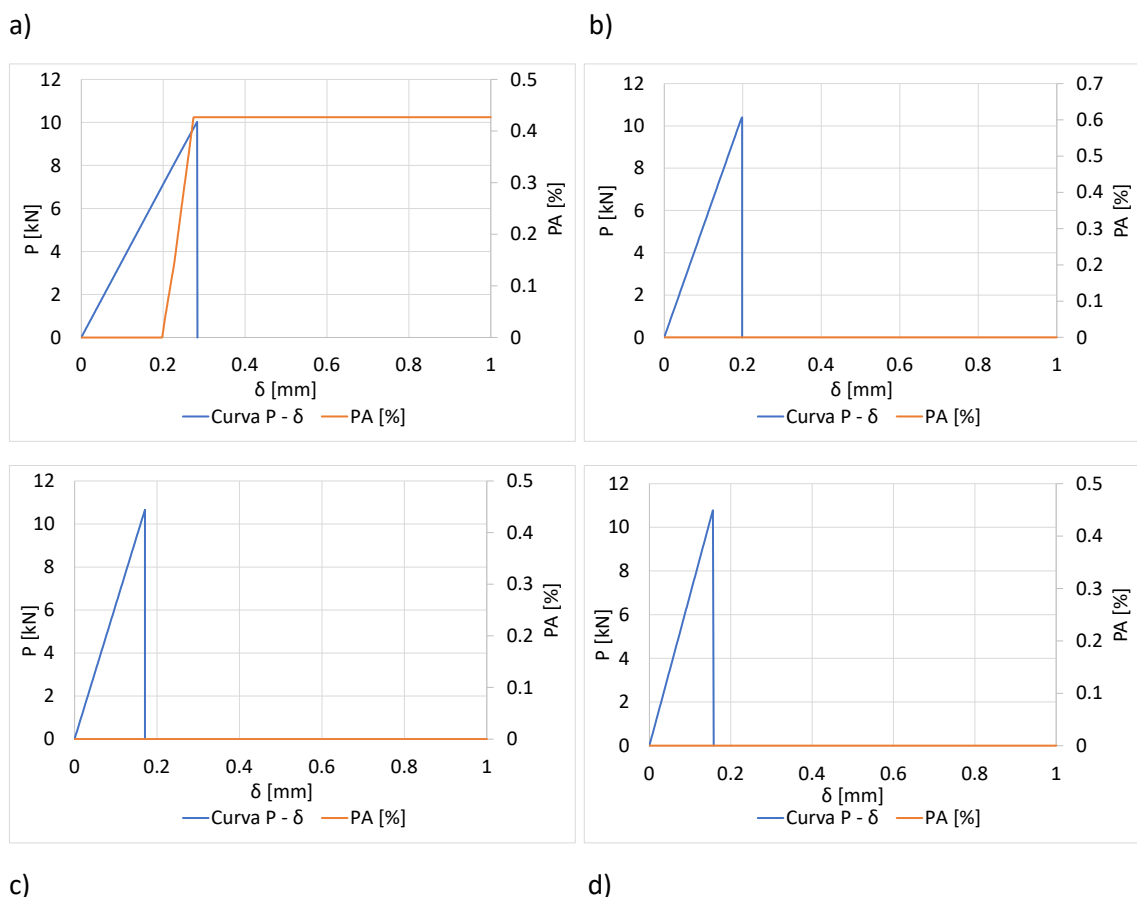


Figura 61 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $t_{Ad}$ = a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm.

De acordo com a Figura 61.a), para o adesivo Sikaforce® 7752 e  $t_{Ad}=1$  mm,  $\delta_{IPA}=0,198$  mm e  $P_{IPA}=7049,63$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 69,72% do  $\delta_{rotura}$  e a 70,30% de  $P_{máx}$ , respetivamente. A rotura da junta foi coesiva no adesivo, no entanto, ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,43%. De acordo com a Figura 61.b) - d), para  $t_{Ad}=2, 3$  e 4 mm, não ocorreu  $PA$  e a rotura da união foi coesiva no adesivo. A Tabela 39 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

Tabela 39 - Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

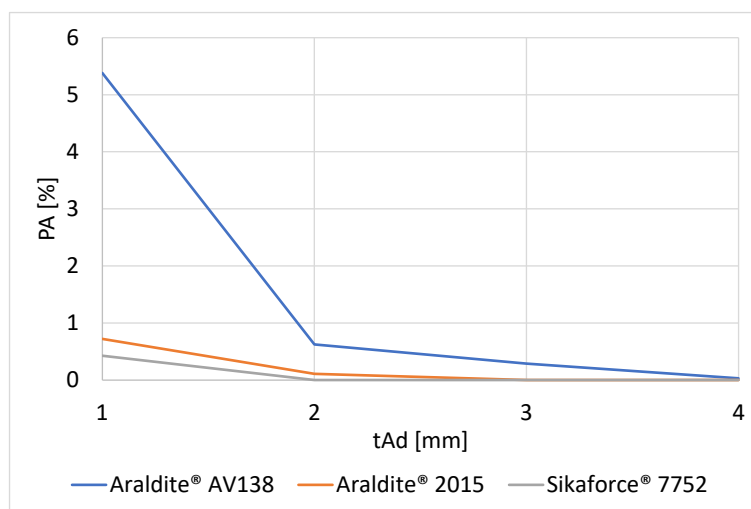
|                 | $t_{Ad}$ [mm] |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 1             | 2      | 3      | 4      |
| Araldite® AV138 | 4,61          | -      | 4,61   | 2,63   |
| Araldite® 2015  | 5,26          | 15,79  | 100,00 | 100,00 |
| Sikaforce® 7752 | 30,26         | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Tabela 40 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

Tabela 40 – Aumento/diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $t_{Ad}$ [mm] |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 1             | 2      | 3      | 4      |
| Araldite® AV138 | 46,56         | -      | 27,93  | 65,24  |
| Araldite® 2015  | 45,91         | 0,46   | 100,00 | 100,00 |
| Sikaforce® 7752 | 46,36         | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Figura 62 ilustra a evolução de  $PA$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

Figura 62 - Evolução de  $PA$  em função de  $t_{Ad}$ .

A Tabela 41 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. Na eventualidade de fazer variar  $t_{Ad}$  e o adesivo em estudo, a junta adesiva que apresenta o valor de  $PA$  mais elevado utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $t_{Ad}=1$  mm. A geometria de junta registou um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 764%, relativamente à geometria de base.

Tabela 41 – Aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $t_{Ad}$ [mm] |        |        |        |
|-----------------|---------------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 1             | 2      | 3      | 4      |
| Araldite® AV138 | 764,16        | -      | 53,85  | 94,93  |
| Araldite® 2015  | 16,04         | 82,63  | 100,00 | 100,00 |
| Sikaforce® 7752 | 31,47         | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Figura 63 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $t_{Ad}$  [mm] e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

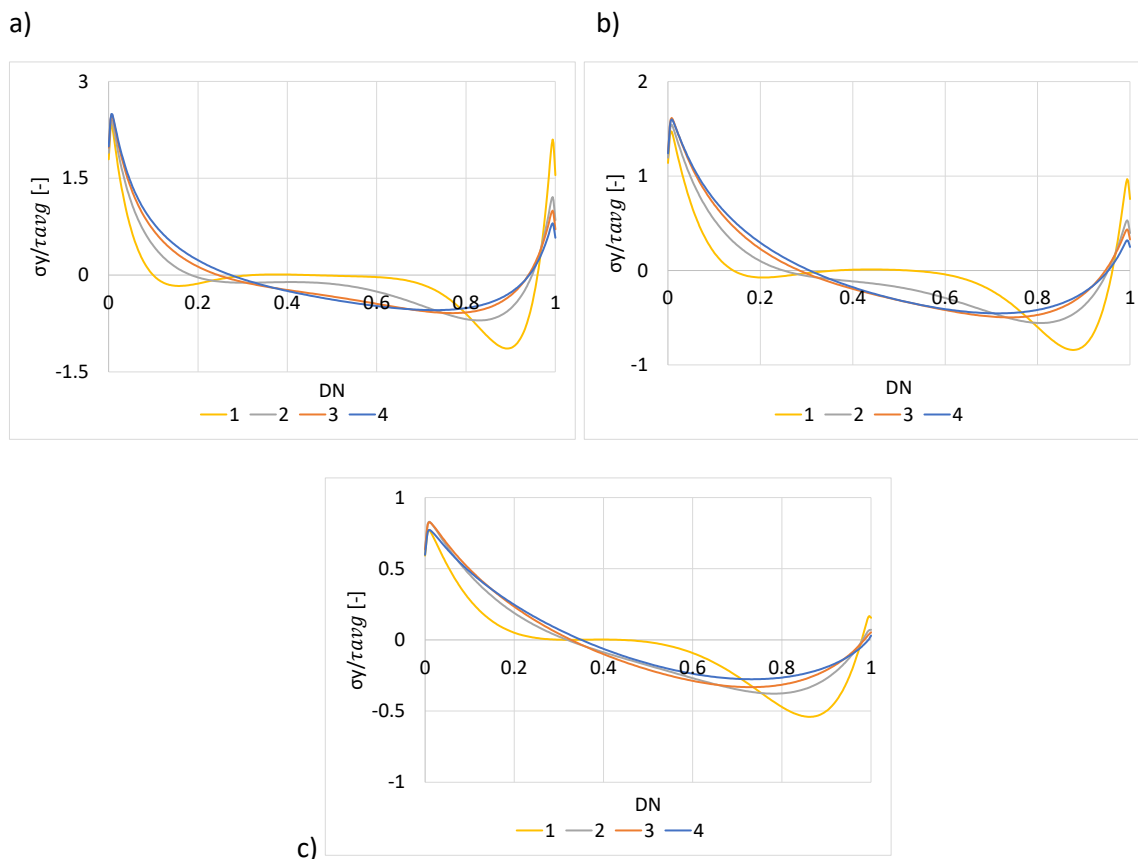


Figura 63 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $t_{Ad}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

Entre os adesivos testados, a geometria que regista os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  mais elevados varia, e não existe uma tendência nas três análises. Os picos de tensão nas extremidades são tão mais elevados quanto mais rígido for o adesivo utilizado, e a distribuição do estado de tensões é mais uniforme para os adesivos menos rígidos, cujo valor de  $\sigma_y$  se aproxima de  $\tau_{avg}$ . De um modo geral, na extremidade mais crítica, os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  encontram-se praticamente sobrepostos. Na extremidade oposta, estes valores são tão mais elevados quanto menor for o  $t_{Ad}$ . Relativamente ao adesivo mais rígido e de acordo com a Figura 63.a), registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 7% para  $t_{Ad}=1$  mm, relativamente à geometria cujo  $t_{Ad}=4$  mm. Para  $t_{Ad}=1$  e 4 mm, verificou-se uma diminuição e um aumento percentual dos valores mais críticos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 3 e 4%, respetivamente, relativamente à geometria de base. De acordo com a Figura 63.b), para o adesivo Araldite® 2015 e os valores mais distantes de  $t_{Ad}$  analisados, 1 e 4 mm, registou-se uma diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  a rondar os 5%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição percentual destes de aproximadamente 39 e 33%, respetivamente, relativamente à geometria de base. Quanto ao adesivo mais dúctil, os valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registados são idênticos para qualquer geometria de junta analisada, tendo-se verificado uma diminuição percentual média dos picos de tensão de aproximadamente 67%, relativamente à junta de referência. Independentemente da relação entre os valores de tensão registados e o parâmetro geométrico em análise, a utilização de adesivos mais rígidos resulta no aumento dos valores de tensão ao longo de  $DN$  e a variação de  $t_{Ad}$  não compromete a distribuição

do estado de tensões. A Figura 64 ilustra a evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

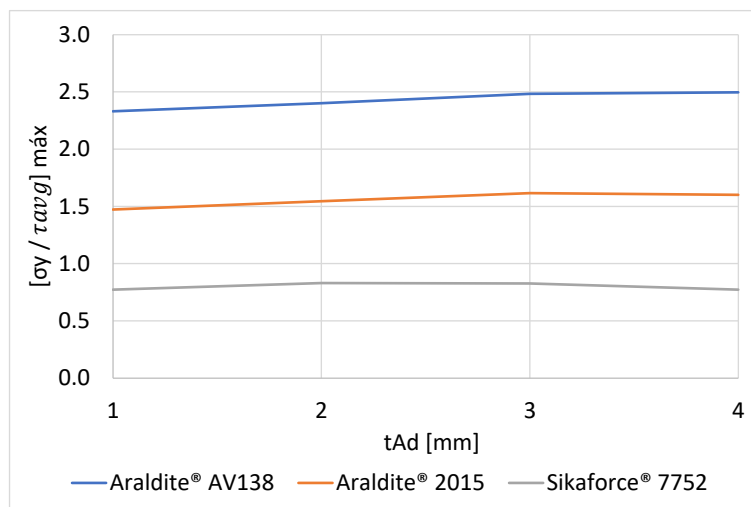


Figura 64 - Evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 42 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. As células de tom azulado e sem tom atribuído representam o aumento e a diminuição percentual  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ , respetivamente, relativamente à geometria de base.

Tabela 42 – Aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $t_{Ad}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 1             | 2     | 3     | 4     |
| Araldite® AV138 | 2,95          | -     | 3,40  | 3,93  |
| Araldite® 2015  | 38,71         | 35,67 | 32,74 | 33,33 |
| Sikaforce® 7752 | 67,81         | 65,46 | 65,55 | 67,83 |

A Figura 65 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $t_{Ad}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. A configuração de junta que apresentou os valores mais elevados junto da extremidade crítica, independentemente do adesivo utilizado, corresponde a uma geometria de junta cujo valor de  $t_{Ad}=1$  mm, e os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto menor o valor de  $t_{Ad}$ . Para o adesivo Araldite® AV138, os picos de tensão mais elevados foram registados na extremidade adjacente à curvatura. Para o adesivo Araldite® AV138 (Figura 65.a)), registou-se um aumento percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 52% para  $t_{Ad}=1$  mm, relativamente à geometria cujo  $t_{Ad}=4$  mm. Para estes valores, verificou-se um aumento e diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 36 e 16%, respetivamente, relativamente à geometria de base. De acordo com a Figura 65.b) e o adesivo Araldite® 2015, para os valores mais distantes de  $L_0$  analisados, 1 e 4 mm, registou-se um aumento percentual dos valores críticos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  a rondar os 24%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição percentual dos valores mais elevados

de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 9 e 33%, respectivamente, relativamente à geometria de base. Para o adesivo mais dúctil (Figura 65.c)), verificou-se um aumento percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  na ordem dos 9%, do valor de  $t_{Ad}$  mais elevado, 4 mm, para o mais baixo, 1 mm. Para estes valores de  $t_{Ad}$ , verificou-se diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 35 e 44%, relativamente à geometria de base. Para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, os picos de tensão em ambas as extremidades são praticamente simétricos. A distribuição do estado de tensão é mais uniforme para os adesivos mais dúcteis, uma vez que os valores de  $\tau_{xy}$  se aproximam de  $\tau_{avg}$ , quando comparado com os adesivos mais rígidos.

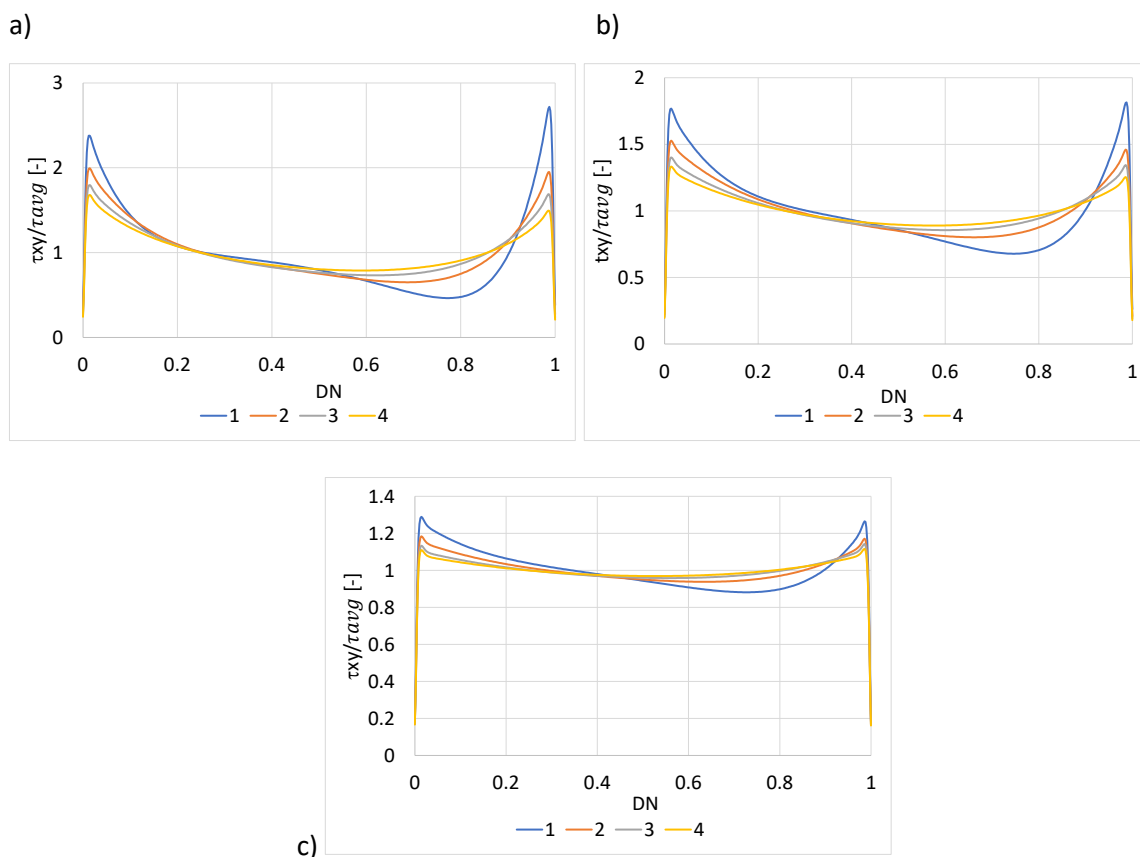


Figura 65 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $t_{Ad}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A Figura 66 ilustra a evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 43 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

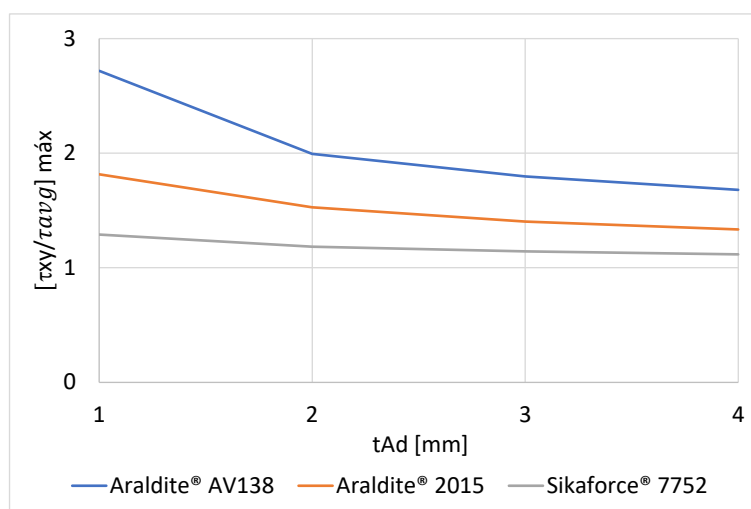


Figura 66 - Evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo.

Tabela 43 – Aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $t_{Ad}$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $t_{Ad}$ [mm] |       |       |       |
|-----------------|---------------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 1             | 2     | 3     | 4     |
| Araldite® AV138 | 36,32         | -     | 9,91  | 15,72 |
| Araldite® 2015  | 8,95          | 23,41 | 29,67 | 33,12 |
| Sikaforce® 7752 | 35,32         | 40,62 | 42,70 | 44,01 |

A Figura 67 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $t_{Ad}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. De acordo com a Figura 67.a) e para o adesivo mais rígido testado, as geometrias analisadas apresentam uma evolução da variável do dano dissimilar. Isto deve-se à fragilidade do adesivo em estudo, ao valor de  $PA$  e ainda à concentração de picos de tensão junto da extremidade mais crítica. A variação de  $sdeg$  segue uma tendência menos ténue com a diminuição dos valores de  $t_{Ad}$ . Os valores de  $PA$  diminuem com o valor de  $t_{Ad}$ . Para valores mais baixos de  $t_{Ad}$ , as tensões de corte são preponderantes no início de propagação do dano, e registaram-se valores tão mais elevados quanto menor o valor de  $t_{Ad}$ . Este fenómeno explica a variação abrupta de  $sdeg$  para a geometria de junta cujo valor de  $t_{Ad}=1$  mm. No caso do adesivo Araldite® 2015, as geometrias analisadas apresentam uma evolução da variável do dano idêntica e suave, quando comparadas com os restantes adesivos, de acordo com a Figura 67.b), exceto para  $t_{Ad}=1$  mm. A variação das curvas deve-se à maior ductilidade do adesivo em estudo, ao valor de  $PA$  nulo para  $t_{Ad}=3$  e 4 mm, e ainda à concentração de picos de tensão nas extremidades. A diferença nos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registados na extremidade crítica vão ao encontro da evolução das curvas, uma vez que a configuração de junta que apresenta os valores mais elevados junto da extremidade crítica corresponde a uma geometria de junta cujo valor de  $t_{Ad}=1$  mm. É possível identificar uma tendência na evolução da variável em estudo para as diferentes curvas, uma vez que o  $P_{IPA}$  é proporcional aos valores de  $L_0$  analisados. Para o Sikaforce® 7752 (Figura 67.C)), as geometrias analisadas apresentam uma variação de  $sdeg$  dissimilar, em particular para  $t_{Ad}=4$  mm. Para esta geometria, o valor de  $t_{Ad}$  encontra-se sobredimensionado, e o dano dos elementos coesivos ocorre de forma abrupta, uma vez que fica comprometido o

aproveitamento da resistência dos elementos da camada adesiva. Não é possível identificar uma tendência padrão face à variação do parâmetro geométrico em estudo. A variação de  $sdeg$  ocorre de forma mais abrupta desde o estado não danificado até à degradação dos elementos coesivos, relativamente aos restantes adesivos testados. A evolução das curvas está diretamente relacionada com a maior ductilidade do adesivo em estudo e com os valores  $PA$  nulos para valores de  $t_{Ad} \neq 1$  mm. Não é possível identificar uma tendência na evolução das curvas, uma vez que o  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  não aumentam com  $L_0$ . Após particularizar a evolução da variável  $sdeg$  para os adesivos utilizados, o gradiente da variável em estudo é mais suave para o adesivo Araldite® 2015, sendo que são eliminados elementos da camada adesiva de ambas as extremidades. O adesivo mais dúctil sugere que a rotura ocorre de forma abrupta, quando comparado com os demais, e pode estar relacionado com a diferença de rigidez entre os materiais que constituem os aderentes e adesivo.

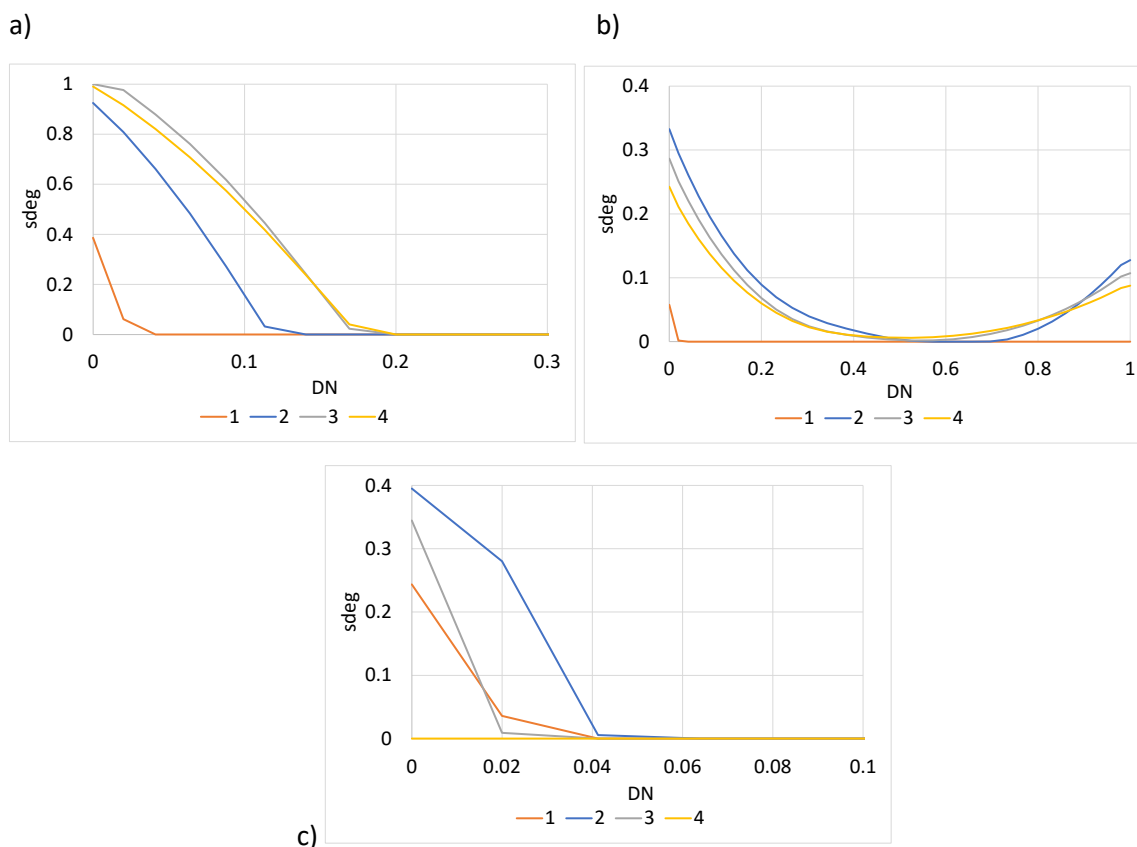


Figura 67 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $t_{Ad}$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

### 3.4.5. Efeito do ângulo do ressalto exterior dos aderentes hidroformados

O presente Subcapítulo estuda o efeito da variação de  $\theta$  nas diferentes juntas adesivas analisadas, para os três adesivos em estudo. A Figura 68 ilustra as curvas  $P-\delta$  em função de  $\theta$  [°] e do adesivo utilizado. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. De acordo com a Figura 68.a), relativa ao adesivo Araldite® AV138, verificou-se um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  das juntas adesivas de aproximadamente 5%, do valor mais elevado de  $\theta$ , 60°, para o mais baixo, 0°. Para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, e de acordo com os valores mais distantes de  $\theta$  analisados, a resistência das juntas manteve-se praticamente inalterada. De acordo com a Figura 68, o  $\delta_{rotura}$  é tanto maior quanto maior for o  $\theta$ , independentemente do adesivo utilizado.

Relativamente às propriedades mecânicas das juntas adesivas, a resistência mecânica e a ductilidade são tão mais elevadas quanto mais rígido for o adesivo utilizado, e quanto menor o  $\theta$ .

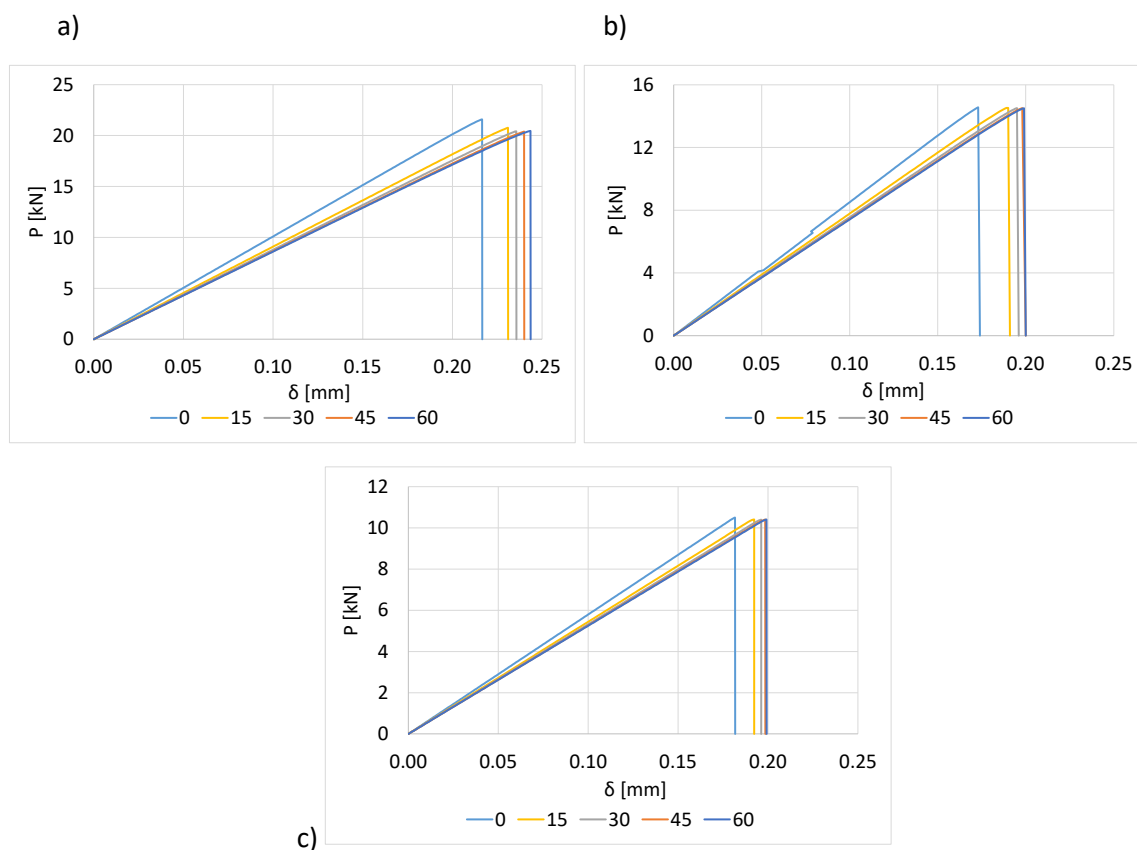


Figura 68 - Curvas  $P$ - $\delta$  em função de  $\theta$  e do adesivo utilizado. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A Figura 69 ilustra os diferentes valores de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

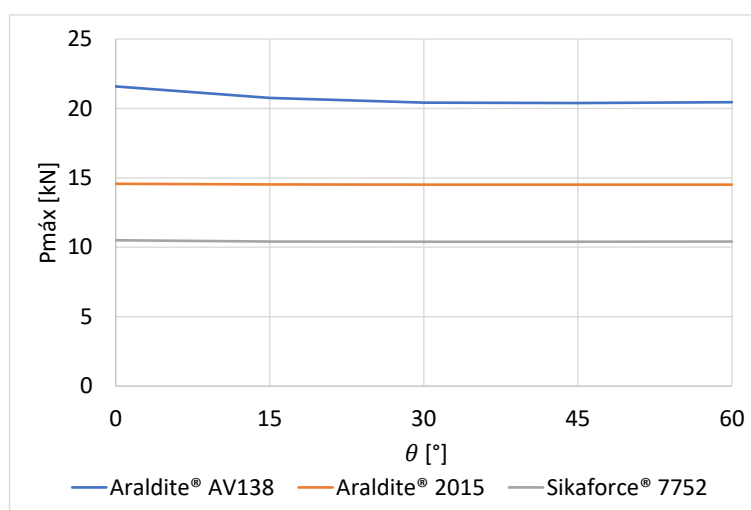


Figura 69 - Evolução de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 44 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

Tabela 44 – Aumento/diminuição percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta$ [°] |       |       |       |       |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 0            | 15    | 30    | 45    | 60    |
| Araldite® AV138 | 5,86         | 1,82  | 0,12  | -     | 0,28  |
| Araldite® 2015  | 28,57        | 28,74 | 28,82 | 28,84 | 28,85 |
| Sikaforce® 7752 | 48,52        | 48,96 | 49,02 | 48,98 | 48,97 |

Na eventualidade de fazer variar  $\theta$  e o adesivo em estudo, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $\theta=0^\circ$ . A geometria de junta mais resistente coincide com a junta de *overlap*, tendo registado um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 6%, relativamente à geometria de base.

A Tabela 45 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $\theta$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base. O  $\delta_{rotura}$  aumenta com  $\theta$ , independentemente do adesivo utilizado. Para o caso do adesivo Araldite® 2015, o  $\delta_{rotura}$  aumenta com  $\theta$ , até se fixar em 0,200 mm, para valores de  $\theta>15^\circ$ , tendo-se registado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura.

Tabela 45 – Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $\theta$  e do adesivo utilizado, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta$ [°] |       |       |       |       |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 0            | 15    | 30    | 45    | 60    |
| Araldite® AV138 | 10,00        | 3,75  | 1,67  | -     | 1,67  |
| Araldite® 2015  | 27,50        | 20,42 | 18,33 | 16,67 | 16,67 |
| Sikaforce® 7752 | 24,17        | 20,00 | 18,33 | 17,50 | 17,08 |

De acordo com a Tabela 45, para o adesivo Araldite® AV138, a geometria de junta cujo valor de  $\delta_{rotura}$  foi máximo corresponde a uma configuração cujo  $\theta=60^\circ$ , 0,244 mm, tendo-se registado um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de 1,67%, relativamente à geometria de base. Para o Araldite® 2015, o  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $\theta=60^\circ$ , 0,200 mm, tendo-se registado uma diminuição percentual de 16,67%, relativamente à geometria de base. Quanto ao adesivo mais dúctil, o  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $\theta=60^\circ$ , 0,199 mm, registando-se uma diminuição percentual de 17,08%, relativamente à geometria de base. A ductilidade das juntas adesivas é tão mais elevada quanto mais rígido for o adesivo e quanto maior for o valor de  $\theta$ , verificando-se um aumento percentual de aproximadamente 19% do Sikaforce® 7752 para o Araldite® AV138, para a geometria de junta cujo  $\theta=60^\circ$ . A Figura 70 ilustra a evolução de  $ER$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

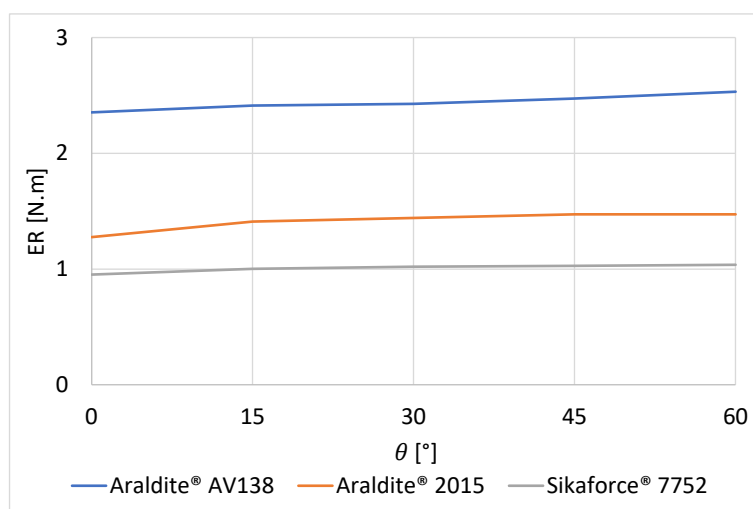


Figura 70 - Evolução de  $ER$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 46 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. A junta adesiva com  $ER$  mais elevado corresponde à geometria que utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $\theta=60^\circ$ . A geometria de junta registou um aumento percentual de  $ER$  de aproximadamente 2%, relativamente à geometria de base.

Tabela 46 – Aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta$ [°] |       |       |       |       |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 0            | 15    | 30    | 45    | 60    |
| Araldite® AV138 | 4,87         | 2,45  | 1,92  | -     | 2,34  |
| Araldite® 2015  | 48,25        | 42,98 | 41,72 | 40,49 | 40,46 |
| Sikaforce® 7752 | 61,55        | 59,54 | 58,79 | 58,50 | 58,11 |

A Figura 71 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\theta =$  a)  $0^\circ$ , b)  $15^\circ$ , c)  $30^\circ$  e d)  $60^\circ$ . A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e de  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o presente adesivo, cujo valor de  $\theta = 45^\circ$ , e coincide com a geometria de base. A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® AV138, e para valores de  $\theta$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  diminui relativamente ao  $\delta_{rotura}$  correspondente. De acordo com a Figura 71.a), para  $\theta=0^\circ$ , não ocorreu  $PA$ . Para  $\theta=15^\circ$ ,  $\delta_{IPA}=0,219$  mm e  $P_{IPA}=19830,70$  N, de acordo com a Figura 71.b). O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 94,81% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 95,50% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,06%. Para  $\theta=30^\circ$ ,  $\delta_{IPA}=0,165$  mm e  $P_{IPA}=14499,90$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 69,92% do  $\delta_{rotura}$  e a 71,02% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 0,43%, como é ilustrado na Figura 71.c). Para  $\theta=60^\circ$ ,  $\delta_{IPA}=0,148$  mm e  $P_{IPA}=12731,80$  N, de acordo com a Figura 71.d). O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 60,66% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 87,74% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,79%.

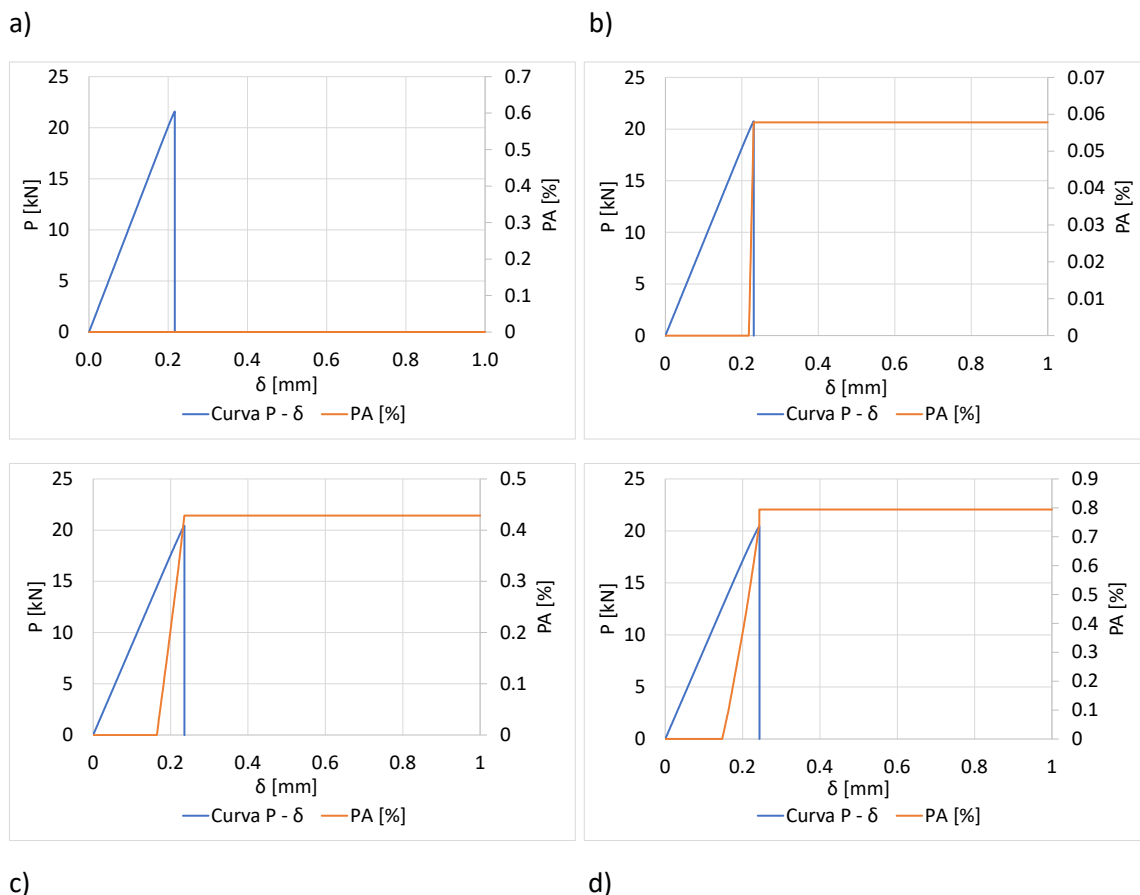


Figura 71 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $t_{Ad}$  = a) 1 mm, b) 2 mm, c) 3 mm e d) 4 mm. Para  $\theta$  = a) 0°, b) 15°, c) 30° e d) 60°.

A Figura 72 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para  $\theta$  = a) 0°, b) 15°, c) 30°, d) 45° e e) 60°. A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® 2015. Para valores de  $\theta \geq 30^\circ$ , o valor de  $\delta_{IPA}$  diminui relativamente ao  $\delta_{rotura}$  correspondente. De acordo com a Figura 72.a) e b), para  $\theta = 0$  e 15°, não ocorreu  $PA$ . Para  $\theta = 30^\circ$ ,  $\delta_{IPA} = 0,189$  mm e  $P_{IPA} = 14173,40$  N, de acordo com a Figura 72.c). O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 96,43% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 97,65% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,01%. Para  $\theta = 45^\circ$  (Figura 72.d)),  $\delta_{IPA} = 0,176$  mm e  $P_{IPA} = 13083,00$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 88,00% do  $\delta_{rotura}$  e a 90,15% de  $P_{m\acute{a}x}$ , respetivamente. Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 0,11%. Para  $\theta = 60^\circ$ ,  $\delta_{IPA} = 0,167$  mm e  $P_{IPA} = 12376,30$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 83,50% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 85,29% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registou-se um valor de  $PA$  a rondar os 0,14%.

A Figura 73 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $\theta$  = a) 0°, b) 15°, c) 30°, d) 45° e e) 60°. Para o adesivo Sikaforce® 7752, e de acordo com a Figura 73, não ocorreu  $PA$  para nenhuma das geometrias de junta analisadas e a rotura da união foi sempre coesiva no adesivo.

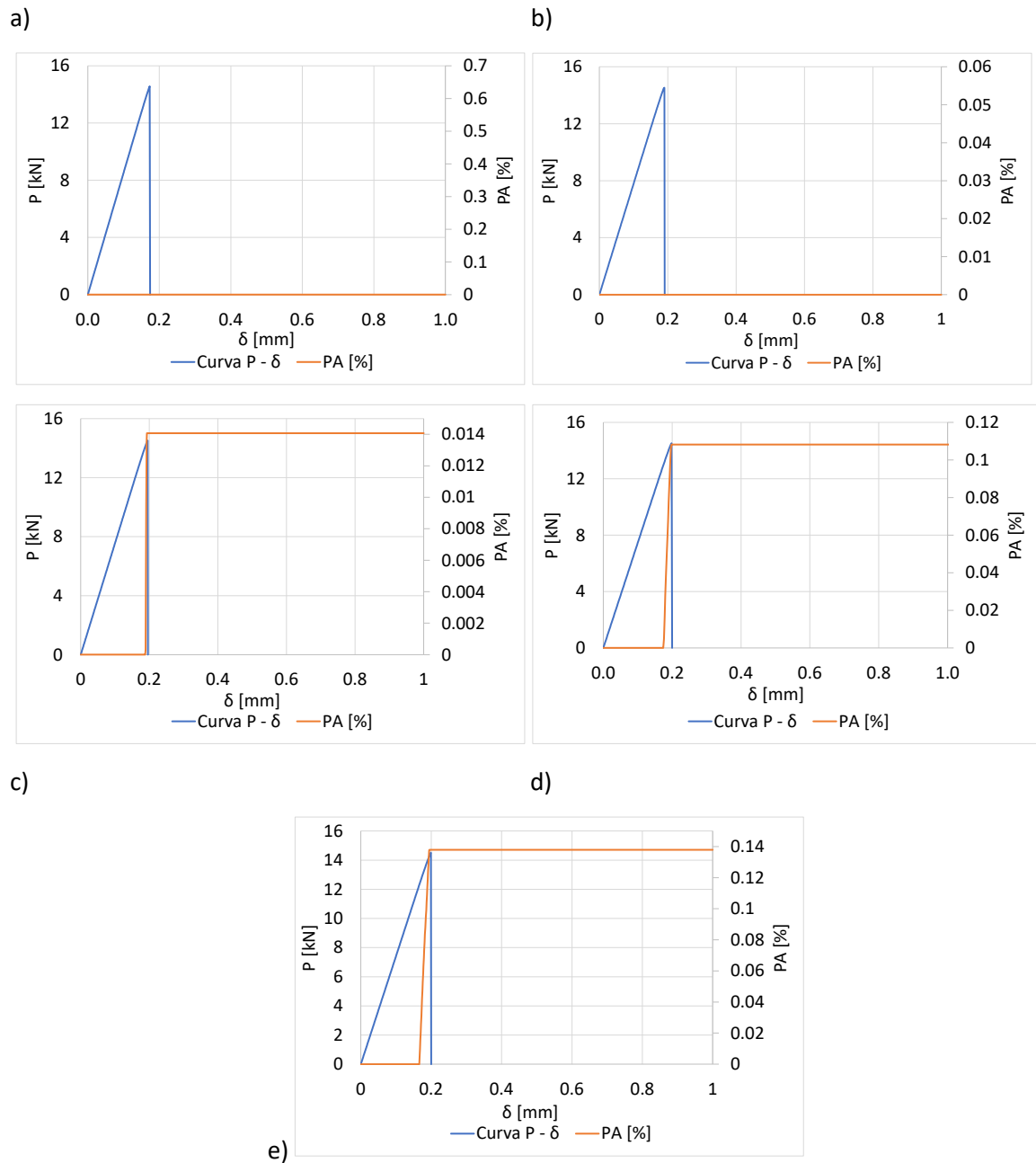
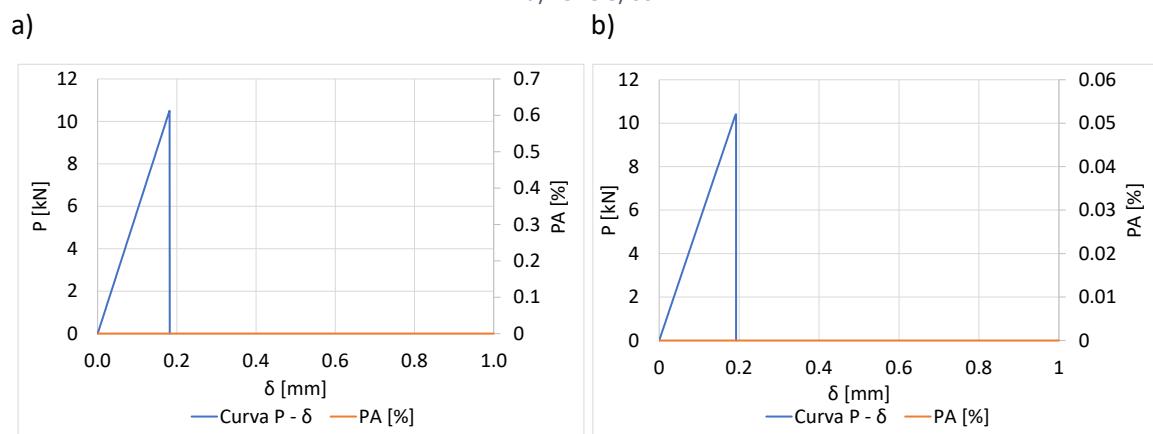


Figura 72 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® 2015. Para  $\theta =$  a)  $0^\circ$ , b)  $15^\circ$ , c)  $30^\circ$ , d)  $45^\circ$  e e)  $60^\circ$ .



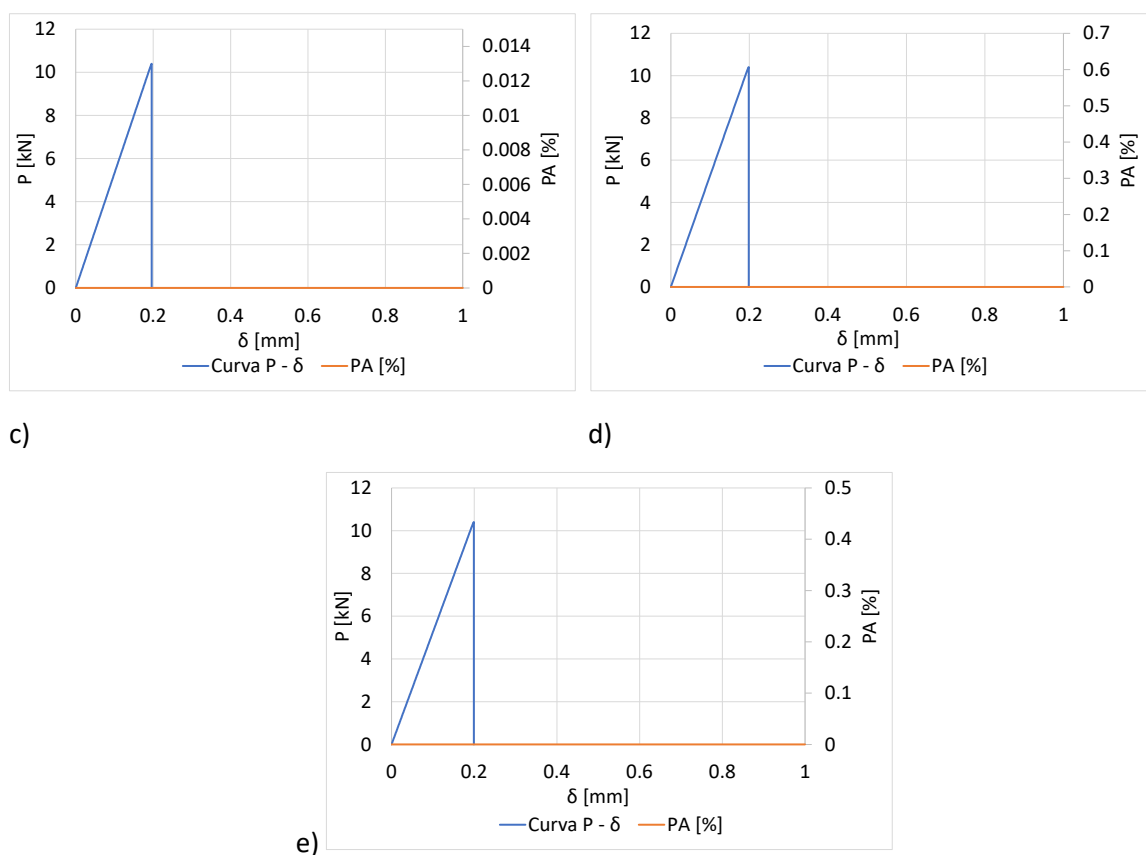


Figura 73 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Sikaforce® 7752. Para  $\theta =$  a)  $0^\circ$ , b)  $15^\circ$ , c)  $30^\circ$ , d)  $45^\circ$  e e)  $60^\circ$ .

A Tabela 47 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos.

Tabela 47 - Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta [^\circ]$ |        |        |        |        |
|-----------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 0                 | 15     | 30     | 45     | 60     |
| Araldite® AV138 | 100,00            | 44,08  | 8,55   | -      | 2,63   |
| Araldite® 2015  | 100,00            | 100,00 | 24,34  | 15,79  | 9,87   |
| Sikaforce® 7752 | 100,00            | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Tabela 48 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos.

Tabela 48 – Aumento/diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta [^\circ]$ |        |        |        |        |
|-----------------|-------------------|--------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 0                 | 15     | 30     | 45     | 60     |
| Araldite® AV138 | 100,00            | 50,89  | 10,33  | -      | 3,13   |
| Araldite® 2015  | 100,00            | 100,00 | 7,84   | 0,46   | 5,83   |
| Sikaforce® 7752 | 100,00            | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Figura 74 ilustra a evolução de  $PA$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

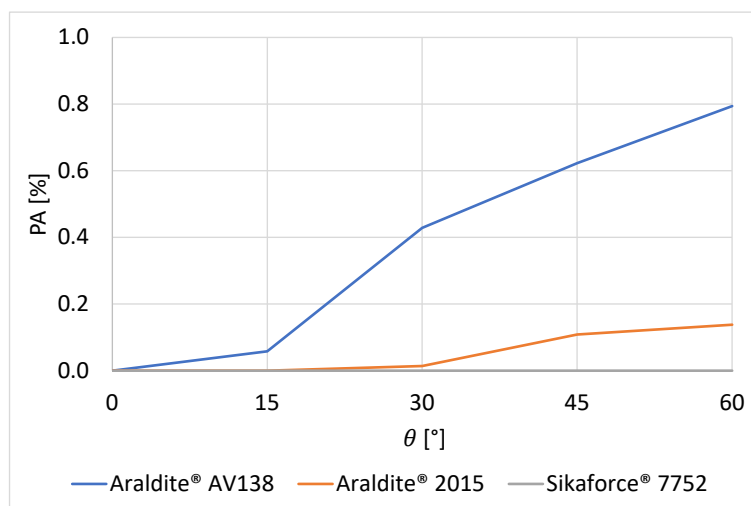


Figura 74 - Evolução de  $PA$  em função de  $\theta$ .

A Tabela 49 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. Ao variar  $\theta$  e o adesivo em estudo, a junta adesiva que apresenta o valor mais elevado de  $PA$  utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $\theta=60^\circ$ . A geometria de junta registou um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 28%, relativamente à geometria de base.

Tabela 49 – Aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta$ [°] |        |        |        |        |
|-----------------|--------------|--------|--------|--------|--------|
| Adesivo         | 0            | 15     | 30     | 45     | 60     |
| Araldite® AV138 | 100,00       | 90,72  | 31,23  | -      | 27,50  |
| Araldite® 2015  | 100,00       | 100,00 | 97,74  | 82,63  | 77,86  |
| Sikaforce® 7752 | 100,00       | 100,00 | 100,00 | 100,00 | 100,00 |

A Figura 75 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $\theta$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. De acordo com a Figura 75, os picos de tensão nas extremidades são tão maiores quanto mais rígido for o adesivo utilizado, e a distribuição do estado de tensões mais uniforme para os adesivos dúcteis, cujo valor de  $\sigma_y$  se aproxima de  $\tau_{avg}$ . Os picos de tensão registados para a extremidade crítica são idênticos para todas as geometrias analisadas, dentro de cada família de adesivos testados. Na extremidade oposta à curvatura, independentemente do adesivo aplicado, os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  mais elevados registaram-se para  $\theta=0^\circ$ , que coincide com uma JSS. Nesta extremidade, e excluindo a geometria *overlap* da comparação, os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  aumentam com  $\theta$ . Relativamente ao adesivo mais rígido e de acordo com a Figura 75.a), registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 10% para  $\theta=0^\circ$ , relativamente à geometria cujo  $\theta=60^\circ$ . Para  $\theta=0$  e  $60^\circ$ , registou-se uma diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 11 e 0,2%, respetivamente, relativamente à geometria de base. Quanto ao adesivo Araldite® 2015 (Figura 75.b)), e de acordo com os valores mais distantes de  $\theta$  analisados, 0

e  $60^\circ$ , registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  a rondar os 6%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição percentual destes de aproximadamente 42 e 36%, relativamente à geometria de base. O adesivo mais dúctil foi o que registou uma diminuição percentual mais baixa dos valores mais críticos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , do valor de  $\theta$  mais elevado para o mais baixo, na ordem dos 4%. Para  $\theta=0$  e  $60^\circ$ , registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 69 e 65%, respetivamente, relativamente à geometria de base. De acordo com o estudo realizado para os três adesivos, a variação do parâmetro em análise não tem efeito significativo na evolução do estado de tensão ao longo de  $DN$ .

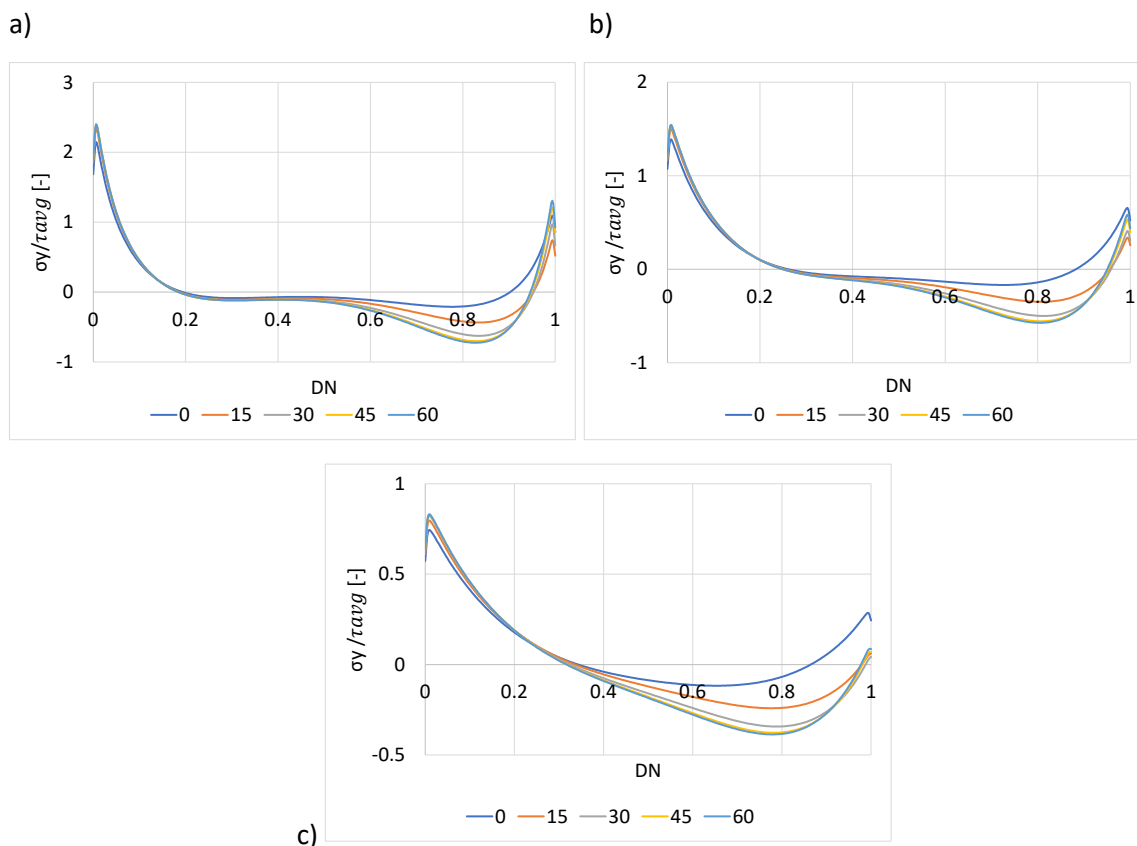


Figura 75 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $\theta$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A Figura 76 ilustra a evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 50 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. As células de tom azulado e sem tom atribuído representam o aumento e a diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ , respetivamente, relativamente à geometria de base.

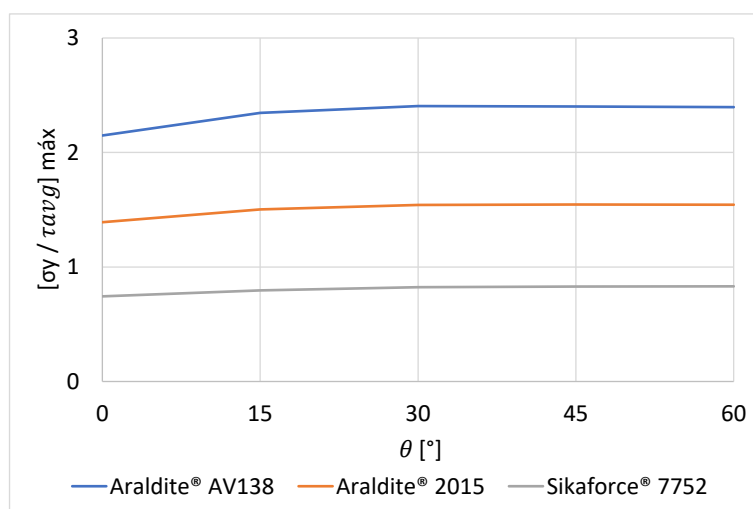


Figura 76 - Evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

Tabela 50 – Aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta$ [°] |       |       |       |       |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 0            | 15    | 30    | 45    | 60    |
| Araldite® AV138 | 10,51        | 2,31  | 0,12  | -     | 0,24  |
| Araldite® 2015  | 42,08        | 37,46 | 35,80 | 35,67 | 35,73 |
| Sikaforce® 7752 | 69,02        | 66,84 | 65,74 | 65,46 | 65,40 |

A Figura 77 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $\theta$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752. Os valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  foram registados para a geometria de junta cujo  $\theta=60^\circ$ , independentemente do adesivo utilizado. Para o adesivo Araldite® AV138 (Figura 77.a)), registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 7% para  $\theta=0^\circ$ , relativamente à geometria cujo  $\theta=60^\circ$ . Para estes valores, verificou-se um aumento e diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 6 e 1%, respetivamente, relativamente à geometria de base. De acordo com a Figura 77.b) e o adesivo Araldite® 2015, para os valores mais distantes de  $\theta$  analisados, 0 e  $60^\circ$ , registou-se uma diminuição percentual dos valores mais críticos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  a rondar os 3%, do valor mais elevado para o mais baixo. Para os valores mencionados, ocorreu uma diminuição percentual dos picos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de 27 e 24%, respetivamente, relativamente à geometria de base. Para o adesivo mais dúctil e de acordo com a Figura 77.c), verificou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de 1%, do valor mais elevado de  $\theta$ ,  $60^\circ$ , para o mais baixo,  $0^\circ$ . A distribuição do estado de tensão é mais uniforme para os adesivos mais dúcteis, uma vez que os valores de  $\tau_{xy}$  se aproximam de  $\tau_{avg}$ , quando comparado com os adesivos mais rígidos. Os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  são tão mais elevados quanto mais rígido for o adesivo. Independentemente da relação entre os valores de tensão registados e  $\theta$ , adesivos mais dúcteis reduzem os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  ao longo de  $DN$ . Contudo, a variação do parâmetro em análise não tem efeito significativo na evolução do estado de tensão ao longo de  $DN$ .

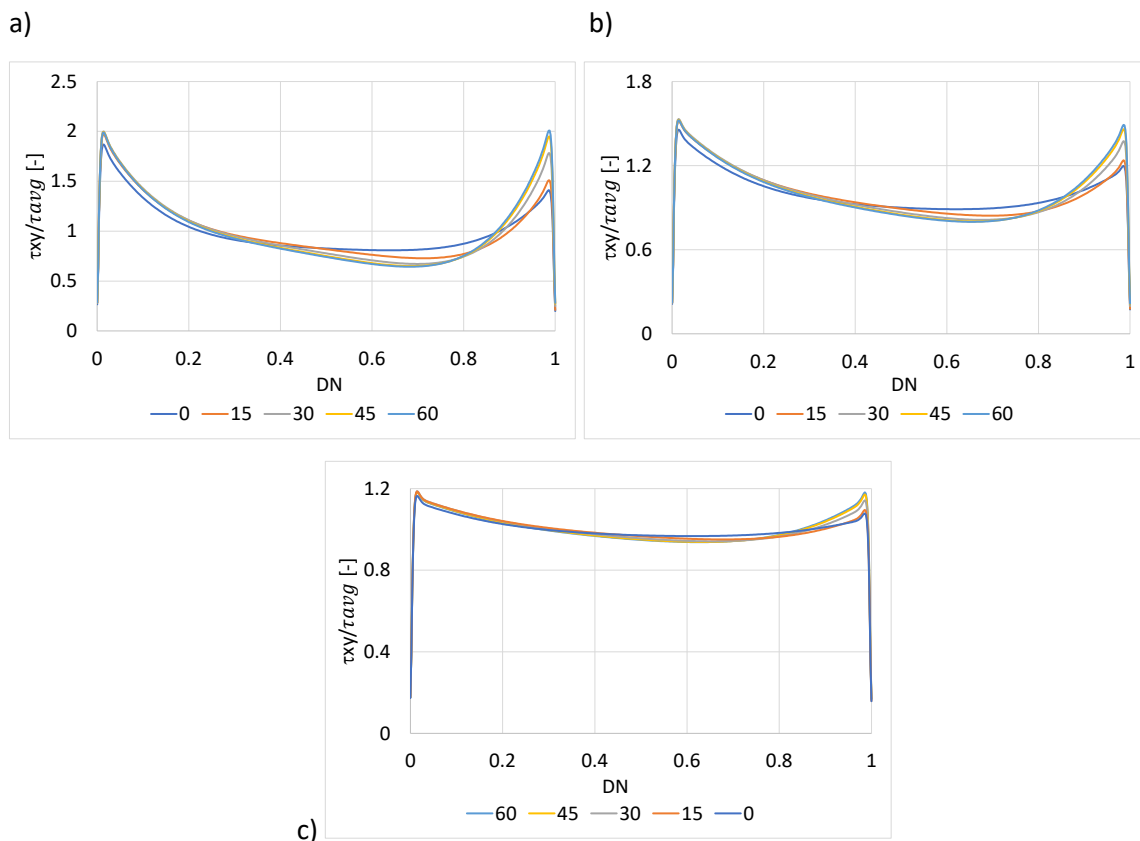


Figura 77 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $\theta$  e ao longo de DN, para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

A Figura 78 ilustra a evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

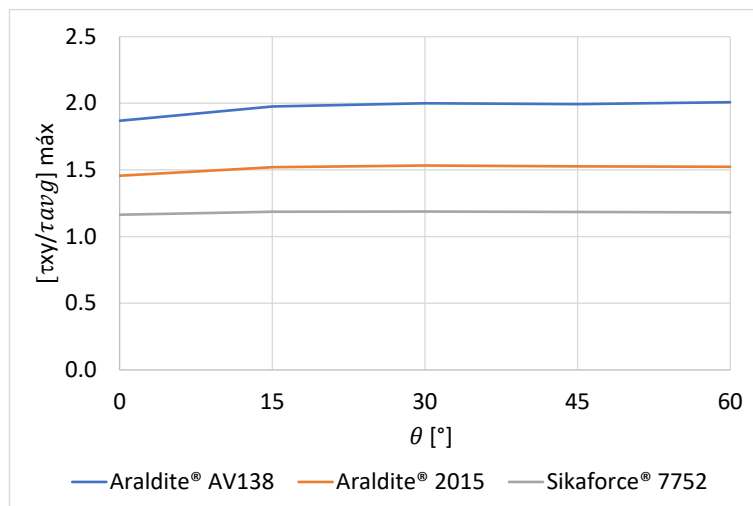


Figura 78 - Evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo.

A Tabela 51 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base. As células de tom azulado e sem tom atribuído representam o aumento e a diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$ , respetivamente, relativamente à geometria de base.

Tabela 51 – Aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $\theta$  e dos adesivos em estudo, relativamente à geometria de base.

|                 | $\theta$ [°] |       |       |       |       |
|-----------------|--------------|-------|-------|-------|-------|
| Adesivo         | 0            | 15    | 30    | 45    | 60    |
| Araldite® AV138 | 6,27         | 0,95  | 0,30  | -     | 0,67  |
| Araldite® 2015  | 26,93        | 23,73 | 23,12 | 23,41 | 23,60 |
| Sikaforce® 7752 | 41,59        | 40,50 | 40,43 | 40,62 | 40,71 |

A Figura 79 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $\theta$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

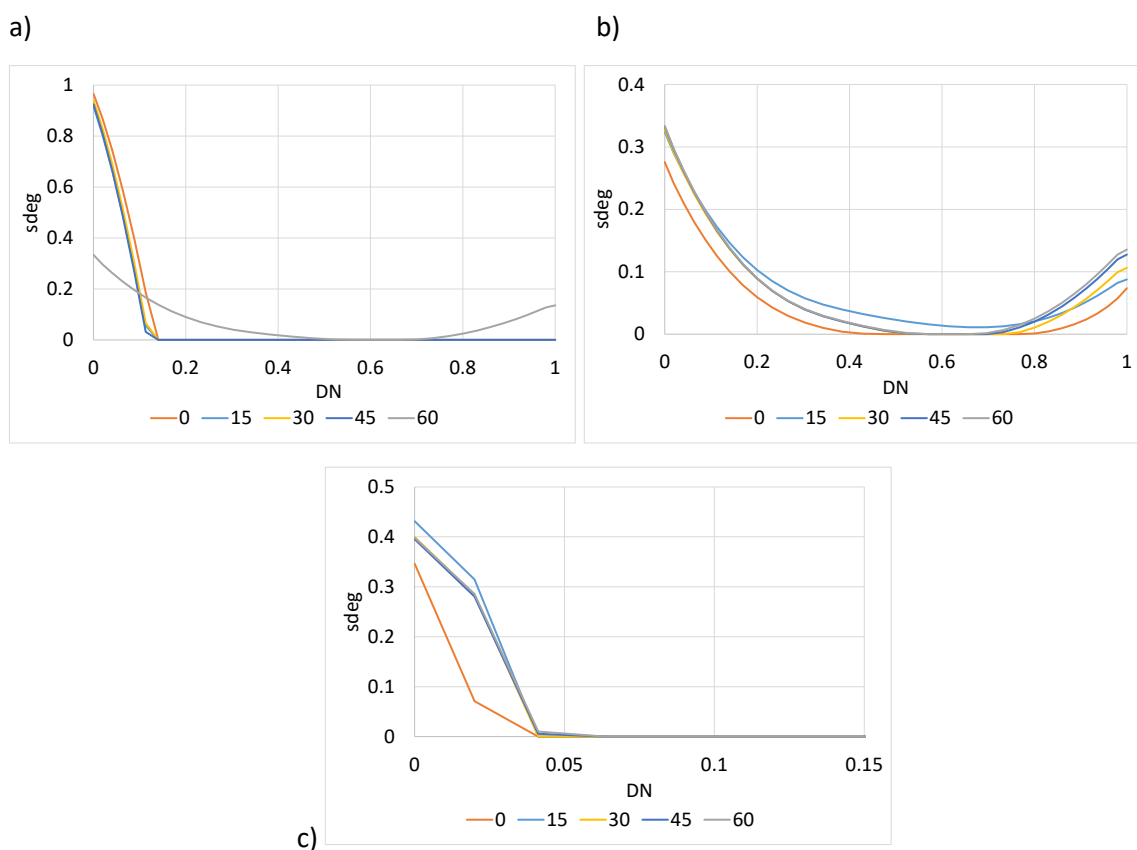


Figura 79 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $\theta$  e ao longo de  $DN$ , para os três adesivos utilizados. Para a) Araldite® AV138, b) Araldite® 2015 e c) Sikaforce® 7752.

Para o adesivo Araldite® AV138 e de acordo com a Figura 79.a), as geometrias analisadas apresentam uma evolução da variável do dano idêntica, exceto para  $\theta=60^\circ$ , que regista a eliminação de elementos da camada adesiva em ambas as extremidades, assim como um gradiente suave da variável em estudo. As tensões de corte e arrancamento têm a mesma preponderância no modo de rotura das juntas adesivas, e a proximidade dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  e  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registados, justifica a evolução de  $sdeg$  para os diferentes adesivos. No caso do adesivo com propriedades intermédias, as geometrias analisadas apresentam uma evolução da variável do dano idêntica, de acordo com a Figura 79.b). O gradiente de  $sdeg$  é mais suave desde o estado não danificado até à rotura dos elementos da camada adesiva, relativamente ao adesivo mais rígido.

Para o instante correspondente a  $P_{m\acute{a}x}$ , s\~ao eliminados elementos em ambas as extremidades. A varia\~ao das curvas mais t\~enua est\~a diretamente relacionada com a maior ductilidade do adesivo em estudo. A semelhan\~ca nos valores m\~aximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registados nas extremidades justifica o gradiente de *sdeg* ao longo de *DN*. Relativamente ao adesivo mais d\~uctil, a Figura 79.c) revela que as geometrias analisadas apresentam uma evolu\~ao da vari\~avel do dano id\~entica. A varia\~ao de *sdeg* ocorreu de forma mais abrupta desde o estado n\~ao danificado at\~e \~a degrada\~ao m\~axima observada dos elementos coesivos, relativamente aos restantes adesivos utilizados. A evolu\~ao das curvas est\~a diretamente relacionada com a maior ductilidade do adesivo em estudo e o grau de plastifica\~ao nulo dos aderentes. N\~ao foi poss\~ivel identificar uma tend\~encia na evolu\~ao de *sdeg* para as diferentes curvas, uma vez que o  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  n\~ao aumentam com  $\theta$ . No entanto, a proximidade das curvas que descrevem a vari\~avel em estudo deve-se mais uma vez \~a proximidade dos valores m\~aximos das tens\~oes registadas ao longo de *DN*. Em suma, para os diferentes adesivos, \~e de notar que a evolu\~ao de *sdeg* \~e mais suave para o Araldite® 2015, uma vez que s\~ao eliminados elementos da camada adesiva de ambas as extremidades da sobreposi\~ao. O adesivo mais d\~uctil sugere que a rotura ocorra de forma abrupta, e pode dever-se \~a diferen\~ca de rigidez entre os materiais que constituem a junta.

### 3.4.6.M\~etodo de Taguchi

O presente Subcap\~itulo foi criado com o objetivo de propor uma alternativa \~a metodologia em \~arvore apresentada no Subcap\~itulo 3.2.1. Esta t\~ecnica pode ser fundamental para auxiliar um gabinete de projeto, muito por conta das vantagens que apresenta face ao estudo num\~erico intensivo de fazer variar cada par\~ametro geom\~etrico de forma individual. Esta abordagem garante uma diminu\~iao do tempo de an\~alise computacional e consequente redu\~ao do investimento por parte da entidade patronal, por permitir combinar os diferentes par\~ametros entre si e gerar um n\~umero m\~inimo de combina\~oes de juntas adesivas a analisar. \~E de notar que a presente an\~alise \~e apresentada como uma alternativa ao m\~etodo adotado. No entanto, esta foi aplicada ap\~os uma an\~alise num\~erica exaustiva, por existir uma incompatibilidade com as dimens\~oes das matrizes ortogonais propostas pelo autor do m\~etodo.

#### 3.4.6.1. Aplica\~ao do M\~etodo de Taguchi com o Minitab®

O *software* utilizado para aplicar o MT designa-se por Minitab®, e consiste num programa com potencialidades incontorn\~aveis no \~ambito da aplica\~ao de m\~etodos estat\~isticos, e que est\~a ao alcance de qualquer utilizador n\~ao especializado. O MT permite ao utilizador prever e visualizar os dados de forma criteriosa para dar resposta aos mais variados problemas associados aos diferentes modelos de neg\~ocio que prevalecem na ind\~ustria. O Minitab® auxilia as empresas a identificar padr\~oes no mercado face \~as novas tend\~encias, e auxilia as mesmas na resolu\~ao de problemas, fornecendo um conjunto de dados abrangentes com base em an\~alises estat\~isticas e em ferramentas de melhoria dos processos [227, 228].

Uma vez que j\~a foram analisadas numericamente diferentes configura\~oes de junta e foi contabilizado o efeito da varia\~ao de cada par\~ametro geom\~etrico e material de forma individual, a abordagem pelo MT deve ser conscienciosa e devem ser definidos de forma criteriosa os diferentes n\~iveis e fatores de controlo. Com base nos Subcap\~itulos anteriores e na discuss\~ao dos resultados, a an\~alise pelo MT implicaria selecionar uma matriz n\~ao ortogonal cujos fatores de controlo estariam associados a diferentes n\~iveis de controlo. De maneira a garantir a correta aplica\~ao do MT, surgiu

a hipótese de analisar os resultados anteriores e eliminar da presente análise parâmetros impossíveis ou extremamente dispendiosos de garantir, no âmbito de uma aplicação industrial.

Desta forma, não foi contabilizado o fator de controlo  $\theta$  e respetivos níveis, pelo facto de este não provocar alterações significativas na resistência e ductilidade das juntas analisadas. Optou-se por contabilizar 3 fatores de controlo, designadamente  $d_{EANH}$ ,  $L_0$  e  $t_{Ad}$ . No que diz respeito ao  $d_{EANH}$ , não foi contabilizado o nível de controlo cujo valor de  $d_{EANH}=5$  mm, devido ao elevado investimento requerido para obter a geometria circular oca, uma vez que esta geometria de tubo não se encontra disponível no mercado. Quanto ao fator de controlo  $L_0$ , não foi considerado o nível cujo valor de  $L_0=5$  mm, pelo facto de se terem registado os piores valores ao nível da resistência mecânica e ductilidade da junta, de acordo com os resultados numéricos apresentados ao longo do Subcapítulo 3.4. Por último, não foi considerado o nível cujo valor de  $t_{Ad}=4$  mm, por este implicar um investimento supérfluo em matéria-prima, que não se traduz no aumento da resistência e ductilidade de forma expressiva, já que a rotura se manteve coesiva no adesivo, e para os adesivos mais dúcteis apresenta um valor de  $PA$  nulo ou mínimo, quando comparado com os demais.

A Tabela 52 ilustra os fatores de controlo e os níveis associados a cada um que devem ser considerados para realizar uma análise pelo MT no Minitab®. Na presente análise, e assim como aconteceu para as análises numéricas anteriores, não se considera qualquer fator de ruído.

Tabela 52 - Fatores de controlo e os níveis associados a cada um que devem ser considerados para realizar uma análise pelo MT no Minitab®.

| Adesivo         | Fatores de controlo | Níveis de controlo |           |             |
|-----------------|---------------------|--------------------|-----------|-------------|
|                 |                     | Baixo (1)          | Médio (2) | Elevado (3) |
| Araldite® AV138 | $d_{EANH}$          | 10                 | 15        | 20          |
|                 | $L_0$               | 10                 | 15        | 20          |
|                 | $t_{Ad}$            | 1                  | 2         | 3           |
| Araldite® 2015  | $d_{EANH}$          | 10                 | 15        | 20          |
|                 | $L_0$               | 10                 | 15        | 20          |
|                 | $t_{Ad}$            | 1                  | 2         | 3           |
| Sikaforce® 7752 | $d_{EANH}$          | 10                 | 15        | 20          |
|                 | $L_0$               | 10                 | 15        | 20          |
|                 | $t_{Ad}$            | 1                  | 2         | 3           |

#### 3.4.6.2. Procedimento no Minitab®

Este Subcapítulo foi criado com o objetivo de descrever o procedimento no *software* para realizar uma análise pelo MT. O utilizador deve selecionar o menu Stat e a opção DOE (*Design of Experiments*) para poder estruturar um modelo. O utilizador deverá optar pela opção correspondente aos três fatores e três níveis definidos anteriormente. Ainda neste menu, o *software* recomenda ao utilizador dois tipos de matrizes ortogonais, são elas a matriz L9 e L27. Optou-se pela matriz L9 para dar continuidade à presente análise, pela dimensão reduzida que apresenta face à alternativa. A Tabela 53 ilustra o número de combinações propostas pelo *software*, relativamente aos fatores e níveis de controlo definidos. É de notar que este método requer a

realização de apenas 27 análises numéricas, ao invés das 51 análises realizadas no Subcapítulo 3.4, sem considerar as propostas de alterações geométricas.

Tabela 53 - Número de combinações propostas pelo *software*, relativamente aos fatores e níveis de controlo definidos.

| Adesivos        | $d_{EANH}$ [mm] | $L_0$ [mm] | $t_{Ad}$ [mm] |
|-----------------|-----------------|------------|---------------|
| Araldite® AV138 | 10              | 10         | 1             |
|                 | 10              | 15         | 2             |
|                 | 10              | 20         | 3             |
| Araldite® 2015  | 15              | 10         | 2             |
|                 | 15              | 15         | 3             |
|                 | 15              | 20         | 1             |
| Sikaforce® 7752 | 20              | 10         | 3             |
|                 | 20              | 15         | 1             |
|                 | 20              | 20         | 2             |

As duas variáveis de saída que o utilizador pretende controlar são o  $\delta_{rotura}$  [mm] e  $P_{máx}$  [N]. Para obter estes valores, é recomendado seguir as etapas correspondentes ao pré-processamento dos modelos, disponível para consulta no APÊNDICE A, e a curva  $P$ - $\delta$  deve ser obtida em conformidade com as etapas enunciadas no APÊNDICE B. Para a presente análise, basta reunir estes *outputs* em forma de tabela para poder aplicar a metodologia. A Tabela 54 ilustra os valores de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{máx}$  obtidos para cada uma das geometrias propostas, para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 54 - Valores de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{máx}$  obtidos para cada uma das geometrias propostas pelo Minitab®, para o caso do adesivo Araldite® AV138.

| Parâmetros      | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ | $\delta_{rotura}$ | $P_{máx}$ |
|-----------------|------------|-------|----------|-------------------|-----------|
| Unidades        | [mm]       |       |          |                   | [N]       |
| Araldite® AV138 | 10         | 10    | 1        | 0,741             | 9358,28   |
|                 | 10         | 15    | 2        | 0,341             | 14412,20  |
|                 | 10         | 20    | 3        | 0,293             | 17139,00  |
|                 | 15         | 10    | 2        | 0,256             | 16143,40  |
|                 | 15         | 15    | 3        | 0,248             | 22475,60  |
|                 | 15         | 20    | 1        | 0,778             | 14037,10  |
|                 | 20         | 10    | 3        | 0,187             | 21321,90  |
|                 | 20         | 15    | 1        | 0,873             | 18733,50  |
|                 | 20         | 20    | 2        | 0,380             | 32210,30  |

A Tabela 55 ilustra os valores de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{máx}$  obtidos para cada uma das geometrias propostas, para o caso do adesivo Araldite® 2015.

Tabela 55 - Valores de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos para cada uma das geometrias propostas pelo Minitab®, para o adesivo Araldite® 2015.

| Parâmetros     | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
|----------------|------------|-------|----------|-------------------|-------------------|
| Unidades       | [mm]       |       |          |                   | [N]               |
| Araldite® 2015 | 10         | 10    | 1        | 0,352             | 7371,00           |
|                | 10         | 15    | 2        | 0,286             | 11027,00          |
|                | 10         | 20    | 3        | 0,279             | 14605,70          |
|                | 15         | 10    | 2        | 0,201             | 10976,40          |
|                | 15         | 15    | 3        | 0,209             | 16399,00          |
|                | 15         | 20    | 1        | 0,840             | 14043,30          |
|                | 20         | 10    | 3        | 0,155             | 14548,50          |
|                | 20         | 15    | 1        | 0,954             | 18783,60          |
|                | 20         | 20    | 2        | 0,347             | 28725,40          |

A Tabela 56 ilustra os valores de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos para cada uma das geometrias propostas, para o adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 56 - Valores de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos para cada uma das geometrias propostas pelo Minitab®, para o adesivo Sikaforce® 7752.

| Parâmetros      | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
|-----------------|------------|-------|----------|-------------------|-------------------|
| Unidades        | [mm]       |       |          |                   | [N]               |
| Sikaforce® 7752 | 10         | 10    | 1        | 0,298             | 5251,4            |
|                 | 10         | 15    | 2        | 0,255             | 7792,62           |
|                 | 10         | 20    | 3        | 0,241             | 10024,1           |
|                 | 15         | 10    | 2        | 0,202             | 7940,59           |
|                 | 15         | 15    | 3        | 0,203             | 11679,20          |
|                 | 15         | 20    | 1        | 0,568             | 13224,80          |
|                 | 20         | 10    | 3        | 0,170             | 10607,30          |
|                 | 20         | 15    | 1        | 0,377             | 14348,30          |
|                 | 20         | 20    | 2        | 0,274             | 19351,70          |

A geometria que apresenta maior ductilidade corresponde à configuração que utiliza o adesivo Araldite® 2015, com  $d_{EANH}=20$  mm,  $L_0=15$  mm e  $t_{Ad}=1$  mm. A configuração de junta que apresenta maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $d_{EANH}=L_0=20$  mm e  $t_{Ad}=2$  mm. A Tabela 57 ilustra o aumento/diminuição percentual da ductilidade e da resistência da junta em função da variação dos níveis de controlo definidos para cada fator, relativamente à geometria de base. As células de tom azulado e sem tom atribuído representam o aumento e a diminuição percentual da ductilidade e da resistência da junta, respetivamente, relativamente à geometria de base, mencionada ao longo do estudo numérico (Subcapítulo 3.4).

Tabela 57 - Aumento/diminuição percentual da ductilidade e da resistência da junta em função da variação dos níveis de controlo definidos para cada fator, relativamente à geometria de base.

| Parâmetros      | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
|-----------------|------------|-------|----------|-------------------|-------------------|
| Unidades        | [mm]       |       |          |                   | [N]               |
| Araldite® AV138 | 10         | 10    | 1        | 208,75            | 54,11             |
|                 | 10         | 15    | 2        | 42,08             | 29,33             |
|                 | 10         | 20    | 3        | 22,08             | 15,96             |
|                 | 15         | 10    | 2        | 6,67              | 20,84             |
|                 | 15         | 15    | 3        | 3,33              | 10,21             |
|                 | 15         | 20    | 1        | 224,17            | 31,17             |
|                 | 20         | 10    | 3        | 22,08             | 4,56              |
|                 | 20         | 15    | 1        | 263,75            | 8,14              |
|                 | 20         | 20    | 2        | 58,33             | 57,95             |
| Araldite® 2015  | 10         | 10    | 1        | 46,67             | 63,86             |
|                 | 10         | 15    | 2        | 19,17             | 45,93             |
|                 | 10         | 20    | 3        | 16,25             | 28,38             |
|                 | 15         | 10    | 2        | 16,25             | 46,18             |
|                 | 15         | 15    | 3        | 12,92             | 19,58             |
|                 | 15         | 20    | 1        | 250,00            | 31,14             |
|                 | 20         | 10    | 3        | 35,42             | 28,66             |
|                 | 20         | 15    | 1        | 297,50            | 7,89              |
|                 | 20         | 20    | 2        | 44,58             | 40,86             |
| Sikaforce® 7752 | 10         | 10    | 1        | 24,17             | 74,25             |
|                 | 10         | 15    | 2        | 6,25              | 61,79             |
|                 | 10         | 20    | 3        | 0,42              | 50,85             |
|                 | 15         | 10    | 2        | 15,83             | 61,06             |
|                 | 15         | 15    | 3        | 15,42             | 42,73             |
|                 | 15         | 20    | 1        | 136,67            | 35,15             |
|                 | 20         | 10    | 3        | 29,17             | 47,99             |
|                 | 20         | 15    | 1        | 57,08             | 29,64             |
|                 | 20         | 20    | 2        | 14,17             | 5,11              |

### 3.4.6.3. Discussão de resultados – ANOVA

A ANOVA foi realizada com um fator apenas (*one-way* ANOVA). Esta tem por base o teste *t*, baseado em amostras que não dependem das restantes, e permite ao utilizador do *software* comparar médias de diversas populações com distribuição normal. Ou seja, a *one-way* ANOVA permite inferir o efeito dos vários níveis de um fator nos valores de uma variável contínua.

Para levar a cabo a ANOVA, é de notar que deve ser seguida de forma criteriosa a sequência proposta pelo MT ilustrada na Tabela 53, e em conformidade com os níveis de controlo registados

na Tabela 52. Inicialmente, na interface do *software*, deve ser recuperado o ficheiro associado ao MT, ou realizadas as etapas novamente. Deve ser reservado um espaço na interface do programa para duas colunas adicionais, correspondentes aos resultados obtidos para as análises numéricas. A quarta e a quinta coluna, acrescentadas face à matriz original L9, devem resumir os valores de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos, e o procedimento deve ser realizado de forma independente para cada um dos adesivos testados. De seguida, deve ser selecionada a opção DOE e Taguchi por intermédio do menu Stat. A opção *analyze taguchi design* permite alterar as condições da análise. O duplo clique em qualquer uma das variáveis apresentadas à esquerda permite identificar qual a resposta que pretendemos estudar em primeiro lugar. Na opção *analysis*, devem ser desselecionadas as opções referentes aos sinais de ruído, de acordo com a Figura 80. Só devem ser considerados efeitos de ruído quando existam outro tipo de fatores não controláveis, e nesse caso seria sugerida a realização de várias análises para as mesmas propostas de combinações geométricas, de acordo com as matrizes ortogonais. De entre outros, destaca-se o efeito da temperatura no estudo de outras matérias, que apesar de não ser controlável na grande maioria dos casos, pode implicar a consideração dos efeitos de ruído nas respostas.

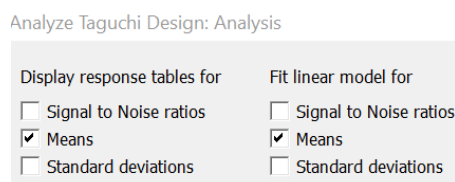


Figura 80 - Desconsideração dos efeitos de ruído na ANOVA.

Na opção *terms*, devem ser selecionados todos os fatores de controlo envolvidos. Em *graphs*, deve ser eliminada a informação correspondente aos sinais de ruído. As conclusões obtidas a partir do MT e da ANOVA são consideradas válidas do ponto de vista estatístico, o que não implica que face ao grau de significância de 5% definido, possam ser excluídas algumas das geometrias de junta que satisfaçam os requisitos de um potencial cliente. A presente análise tem em consideração uma análise de mercado e de custos de matéria-prima. A ANOVA compara as diferentes médias obtidas para cada parâmetro, e tem em consideração uma razão de variância. Esta consideração implica que a visualização das diferentes médias de valores, que podem ser muito distintas, pode não implicar que é estatisticamente significativo fazer variar um determinado fator de controlo. A estimação das interações entre os diferentes parâmetros não foi realizada, uma vez que o *software* só permite determinar a interação entre dois fatores com dois níveis de controlo cada. Uma vez que a experiência de Taguchi proposta requer apenas uma observação para cada conjunto de interações possíveis, e dada a dimensão da amostra e o número de níveis definidos para os fatores, a estimação da interação torna-se inviável. A repetição das experiências numéricas poderia ser uma solução, de modo a obter resultados diferentes daqueles que estão resumidos na Tabela 54.

Relativamente à interpretação dos resultados das análises nos Subcapítulos seguintes, as tabelas que resumem os coeficientes do modelo estimados para as médias (Tabela 58, 93, 97, 101, 105 e 107) apresentam semelhanças, independentemente do adesivo utilizado. De acordo com especificações do *software* utilizado, a classe de referência de cada fator, é aquela que assume os valores mais elevados (Tabela 52). É de notar que o número de algarismos significativos das variáveis de saída analisadas podem fazer variar a ordem de grandeza do erro dos coeficientes estimados. Uma vez que não existem dados relativos à população (valores teóricos), apenas valores de uma amostra, é do interesse do utilizador realizar um teste de hipótese para todos os

coeficientes, determinando desta maneira a influência destes no cálculo das médias. Por exemplo, na eventualidade de não se rejeitar a hipótese nula ( $H_0$ ), pode considerar-se, ao nível desejado, que a respetiva variável não tem efeito no valor de  $\delta_{rotura}$ . Nos Subcapítulos seguintes, a quarta coluna das tabelas que resumem os coeficientes do modelo estimados para as médias, são referentes ao valor da estatística de teste,  $t$ . No entanto, uma vez que não é fácil tomar decisões ou tirar conclusões através do valor  $t$ , o programa obtém o  $p_{value}$  a partir deste. O  $p_{value}$  é uma probabilidade que mede a verosimilhança de  $H_0$ . Probabilidades mais baixas fornecem evidências mais fortes contra  $H_0$ , e pode ser obtido com recurso à Equação (6). Se o valor de  $p_{value} < 0,05=5\%$ , implica que, para um grau de confiança de 5%, deve rejeitar-se a  $H_0$ . Existe a possibilidade de os coeficientes previstos não coincidirem com os resultados das análises numéricas apresentados na Tabela 57. No entanto, não deve ser esquecido o efeito do erro associado a cada coeficiente e da unicidade da amostra.

$$p_{value} = 2 \times P(T > |t|) \quad (6)$$

Sob o ponto de vista estatístico, para determinar o contributo da variação dos diferentes fatores de controlo na ductilidade e resistência das juntas, basta interpretar o valor de  $p_{value}$ . De acordo com os resultados, apenas o fator de controlo  $t_{Ad}$  tem um efeito significativo na ductilidade da junta adesiva relativamente à categoria de referência, uma vez que o valor de  $p < 0,05$  (5%). É de notar que, caso se considere um grau de confiança de 10%, a categoria 1 do fator  $L_0$  também teria um efeito significativo no valor de  $\delta_{rotura}$  relativamente à categoria de referência.

No que diz respeito às tabelas que ilustram o sumário do modelo (Tabela 59, 94, 98, 102, 106 e 110), o valor de  $Sp$  representa o desvio padrão da diferença entre os valores reais e os valores previstos pelo modelo. Esta grandeza é medida com as mesmas unidades da resposta em estudo.  $R^2$  representa a percentagem de variação na resposta, explicada pelo modelo. A soma dos quadrados do erro corresponde à variação não explicada pelo modelo, já a soma total dos quadrados corresponde à variação total dos dados.  $R^2_{adj}$  corresponde à percentagem de variação na resposta explicada pelo modelo, ajustada para o número de preditores relativamente ao número de observações.  $R^2_{adj}$  é ajustado para o número de variáveis, e funciona como uma medida de qualidade do modelo. Este parâmetro é tão mais penalizado quanto maior for o número de variáveis, o que justifica a preferência por modelos mais pequenos na área da estatística.

Relativamente às tabelas que resumem a ANOVA para as médias, os GL correspondem aos graus totais de liberdade, ou seja, à quantidade de informação para cada fator de controlo. A ANOVA utiliza esta informação para estimar os valores dos parâmetros populacionais desconhecidos. O total dos GL é determinado pelo número de observações em cada amostra, e aumentar o tamanho da amostra tem como consequência o aumento de informação sobre a população. É de notar que aumentar o número de termos do modelo diminui os GL disponíveis para estimar a variabilidade das estimativas de cada fator de controlo. A variável  $Seq\ SS$  representa as somas sequenciais de quadrados, que funcionam como medidas de variação para diferentes componentes do modelo. Para a *one-way* ANOVA, as somas sequenciais dos quadrados são sempre iguais às somas ajustadas dos quadrados, ou  $Adj\ SS$ . As  $Adj\ SS$  correspondem a medidas de variação para diferentes componentes do modelo. Os  $Adj\ MS$ , ou quadrados médios ajustados, medem a variação que um termo explica, assumindo que os outros termos estão no modelo, independentemente da ordem em que foram inseridos. Ao contrário das  $Adj\ SS$ , as  $Adj\ MS$  consideram os GL. O  $F_{value}$  consiste na estatística de teste usada para determinar se o termo está associado à resposta.

### 3.4.6.3.1. Araldite® AV138

#### Análise de Taguchi - $\delta_{rotura}$ vs $d_{EANH}$ ; $L_0$ ; $t_{Ad}$

Foi estimado um modelo de regressão linear múltiplo com vista a perceber se os fatores de controlo considerados têm um efeito estatisticamente significativo no  $\delta_{rotura}$ . A Tabela 58 resume os resultados desta análise. Os coeficientes do modelo têm as mesmas unidades da variável de saída em análise. A atribuição das categorias encontra-se ilustrada na legenda da Tabela 58.

Tabela 58 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Termo        | Coef (Coeficientes estimados do modelo) | SE Coef (Erro padrão dos coeficientes estimados) | $t = \text{Coef}/(\text{SE Coef})$ | $p_{value}$ |
|--------------|-----------------------------------------|--------------------------------------------------|------------------------------------|-------------|
| Constante    | 0,455222                                | 0,01118                                          | 40,732                             | 0,001       |
| $d_{EANH} 1$ | 0,003111                                | 0,01581                                          | 0,197                              | 0,862       |
| $d_{EANH} 2$ | -0,027889                               | 0,01581                                          | -1,765                             | 0,220       |
| $L_0 1$      | -0,060556                               | 0,01581                                          | -3,831                             | 0,062       |
| $L_0 2$      | 0,032111                                | 0,01581                                          | 2,032                              | 0,179       |
| $t_{Ad} 1$   | 0,342111                                | 0,01581                                          | 21,646                             | 0,002       |
| $t_{Ad} 2$   | -0,129556                               | 0,01581                                          | -8,197                             | 0,015       |

1: Categoria 1 (referente ao nível de controlo mais baixo - Tabela 52)

2: Categoria 2 (referente ao nível de controlo médio - Tabela 52)

De acordo com a Tabela 58, para as juntas adesivas com  $d_{EANH}=10$  mm (categoria 1), é esperado um aumento de 0,003111 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $d_{EANH}=15$  mm (categoria 2), é esperada uma diminuição de 0,027889 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

Para  $L_0=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 0,060556 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $L_0=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 0,032111 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

Para  $t_{Ad}=1$  mm (categoria 1), é esperado um aumento de 0,342111 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $t_{Ad}=2$  mm (categoria 2), é esperada uma diminuição de 0,129556 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

A Tabela 59 ilustra o sumário do modelo, para o Araldite® AV138 e variável de saída  $\delta_{rotura}$ . O valor de  $S_p$  é de aproximadamente 0,03 mm. O valor de  $R^2$  indica que as variáveis utilizadas explicam 99,60% da variabilidade do  $\delta_{rotura}$ . As variáveis consideradas conseguem explicar quase a totalidade da variabilidade do modelo.

Tabela 59 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® AV138 e variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| $S_p$ [mm] | $R^2$  | $R^2_{adj}$ |
|------------|--------|-------------|
| 0,0335     | 99,60% | 98,39%      |

A Tabela 60 ilustra a ANOVA para as médias, para o Araldite® AV138 e variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

Tabela 60 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Fonte         | GL | Seq SS   | Adj SS   | Adj MS   | F <sub>value</sub> | p <sub>value</sub> |
|---------------|----|----------|----------|----------|--------------------|--------------------|
| $d_{EANH}$    | 2  | 0,004204 | 0,004204 | 0,002102 | 1,87               | 0,348              |
| $L_0$         | 2  | 0,016522 | 0,016522 | 0,008261 | 7,35               | 0,120              |
| $t_{Ad}$      | 2  | 0,537014 | 0,537014 | 0,268507 | 238,86             | 0,004              |
| Erro residual | 2  | 0,002248 | 0,002248 | 0,001124 |                    |                    |
| Total         | 8  | 0,559988 |          |          |                    |                    |

A Tabela 58 permite interpretar os coeficientes do modelo, enquanto a presente tabela confirma o contributo dos fatores de controlo analisados anteriormente. De acordo com a Tabela 60, que é obtida a partir da Tabela 58, apenas o fator de controlo  $t_{Ad}$  tem um efeito estatisticamente significativo em  $\delta_{rotura}$ , uma vez que  $p < 0,05$  (5%).

A Tabela 61 ilustra a tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . A Tabela 61 ilustra por ordem de importância o fator de controlo mais influente em  $\delta_{rotura}$ , e ilustra a média da resposta para todos os níveis de cada fator. O *software* organiza de forma tabular as posições/*ranking* definidas com base na estatística de Delta, que compara a magnitude relativa dos efeitos, e este fator é determinado pela diferença entre a média mais elevada e a média mais baixa, para cada fator de forma individual. Desta maneira, os parâmetros mais importantes para o aumento da ductilidade da junta adesiva por ordem decrescente são:  $t_{Ad}$ ,  $L_0$  e  $d_{EANH}$ .

Tabela 61 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Nível   | $d_{EANH}$ | $L_0$  | $t_{Ad}$ |
|---------|------------|--------|----------|
| 1       | 0,4583     | 0,3947 | 0,7973   |
| 2       | 0,4273     | 0,4873 | 0,3257   |
| 3       | 0,4800     | 0,4837 | 0,2427   |
| Delta   | 0,0527     | 0,0927 | 0,5547   |
| Ranking | 3          | 2      | 1        |

#### Análise de Taguchi - $P_{m\acute{a}x}$ vs $d_{EANH}$ ; $L_0$ ; $t_{Ad}$

Foi estimado um modelo de regressão linear múltiplo com vista a perceber se os fatores de controlo considerados têm um efeito estatisticamente significativo no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ . A Tabela 62 resume os resultados desta análise. A atribuição das categorias encontra-se ilustrada na legenda da Tabela 62.

Para as juntas adesivas com  $d_{EANH}=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 4789,2 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência. Para  $d_{EANH}=15$  mm (categoria 2), é esperada uma diminuição de 873,7 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência.

Tabela 62 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Termo        | Coef    | SE Coef | t      | p <sub>value</sub> |
|--------------|---------|---------|--------|--------------------|
| Constante    | 18425,7 | 1477    | 12,475 | 0,006              |
| $d_{EANH}$ 1 | -4789,2 | 2089    | -2,293 | 0,149              |
| $d_{EANH}$ 2 | -873,7  | 2089    | -0,418 | 0,716              |
| $L_0$ 1      | -2817,8 | 2089    | -1,349 | 0,310              |
| $L_0$ 2      | 114,7   | 2089    | 0,055  | 0,961              |
| $t_{Ad}$ 1   | -4382,7 | 2089    | -2,098 | 0,171              |
| $t_{Ad}$ 2   | 2496,3  | 2089    | 1,195  | 0,355              |

1: Categoria 1 (referente ao nível de controlo mais baixo - Tabela 52)

2: Categoria 2 (referente ao nível de controlo médio - Tabela 52)

Para  $L_0=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 2817,8 N, relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência. Para  $L_0=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 114,7 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência.

Para  $t_{Ad}=1$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 4382,7 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência. Para  $t_{Ad}=2$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 2496,3 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência.

A Tabela 63 ilustra o sumário do modelo, para o Araldite® AV138 e variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . O valor de  $Sp$  é de aproximadamente 4431 N. O valor de  $R^2$  indica que as variáveis utilizadas explicam 88,43% da variabilidade de  $P_{m\acute{a}x}$ .

Tabela 63 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| $Sp$ [N]  | $R^2$  | $R^2$ adj |
|-----------|--------|-----------|
| 4431,1784 | 88,43% | 53,71%    |

A Tabela 64 ilustra a ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . A Tabela 62 permite interpretar os coeficientes do modelo, enquanto a presente tabela confirma o contributo dos fatores de controlo analisados anteriormente. De acordo com a Tabela 64, que é obtida a partir da Tabela 62, nenhum fator de controlo tem um efeito estatisticamente significativo no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , uma vez que  $p > 0,05$  (5%) para todas as variáveis.

Tabela 64 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Fonte         | GL | Seq SS    | Adj SS    | Adj MS   | $F_{value}$ | p <sub>value</sub> |
|---------------|----|-----------|-----------|----------|-------------|--------------------|
| $d_{EANH}$    | 2  | 167303558 | 167303558 | 83651779 | 4,26        | 0,190              |
| $L_0$         | 2  | 45780407  | 45780407  | 22890203 | 1,17        | 0,462              |
| $t_{Ad}$      | 2  | 86995541  | 86995541  | 43497770 | 2,22        | 0,311              |
| Erro residual | 2  | 39270684  | 39270684  | 19635342 |             |                    |
| Total         | 8  | 339350190 |           |          |             |                    |

A Tabela 65 ilustra a tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . Esta tabela ordena por ordem de importância o fator de controlo mais contributivo para o valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , e ilustra a média da resposta para todos os níveis de cada fator. Os parâmetros mais importantes para o aumento da ductilidade da junta adesiva, por ordem decrescente, são:  $d_{EANH}$ ,  $t_{Ad}$  e  $L_0$ .

Tabela 65 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® AV138 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Nível   | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ |
|---------|------------|-------|----------|
| 1       | 13636      | 15608 | 14043    |
| 2       | 17552      | 18540 | 20922    |
| 3       | 24089      | 21129 | 20312    |
| Delta   | 10452      | 5521  | 6879     |
| Ranking | 1          | 3     | 2        |

### 3.4.6.3.2. Araldite® 2015

#### Análise de Taguchi - $\delta_{rotura}$ vs $d_{EANH}$ ; $L_0$ ; $t_{Ad}$

Foi estimado um modelo de regressão linear múltiplo com vista a perceber se os fatores de controlo considerados têm um efeito estatisticamente significativo no  $\delta_{rotura}$ . A Tabela 66 resume os resultados desta análise. A atribuição das categorias encontra-se ilustrada na legenda da Tabela 66. De acordo com a Tabela 66, para as juntas adesivas com  $d_{EANH}=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 0,09689 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $d_{EANH}=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 0,01411 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

Tabela 66 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Termo        | Coef     | SE Coef | t      | pvalue |
|--------------|----------|---------|--------|--------|
| Constante    | 0,40256  | 0,05207 | 7,731  | 0,016  |
| $d_{EANH}$ 1 | -0,09689 | 0,07364 | -1,316 | 0,319  |
| $d_{EANH}$ 2 | 0,01411  | 0,07364 | 0,192  | 0,866  |
| $L_0$ 1      | -0,16656 | 0,07364 | -2,262 | 0,152  |
| $L_0$ 2      | 0,08044  | 0,07364 | 1,092  | 0,389  |
| $t_{Ad}$ 1   | 0,31278  | 0,07364 | 4,248  | 0,051  |
| $t_{Ad}$ 2   | -0,12456 | 0,07364 | -1,691 | 0,233  |

1: Categoria 1 (referente ao nível de controlo mais baixo - Tabela 52)

2: Categoria 2 (referente ao nível de controlo médio - Tabela 52)

Para  $L_0=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 0,16656 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $L_0=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 0,08044 mm, relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

Para  $t_{Ad}=1$  mm (categoria 1), é esperado um aumento de 0,342111 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $t_{Ad}=2$  mm (categoria 2), é esperada uma diminuição de 0,12456 mm, relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

A Tabela 67 ilustra o sumário do modelo, para o Araldite® 2015 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . O valor de  $S_p$  é de aproximadamente 0,16 mm. O valor de  $R^2$  indica que as variáveis utilizadas explicam 92,71% da variabilidade do  $\delta_{rotura}$ . As variáveis consideradas conseguem explicar quase a totalidade da variabilidade do modelo.

Tabela 67 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| $S_p$ [mm] | $R^2$  | $R^2 adj$ |
|------------|--------|-----------|
| 0,1562     | 92,71% | 70,83%    |

A Tabela 68 ilustra a ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . A Tabela 66 permite interpretar os coeficientes do modelo, enquanto a presente tabela confirma o contributo dos fatores de controlo analisados anteriormente. De acordo com a Tabela 68, obtida a partir da Tabela 66, nenhum fator de controlo tem um efeito estatisticamente significativo em  $\delta_{rotura}$ , uma vez que  $p > 0,05$  (5%) para todas as variáveis.

Tabela 68 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Fonte         | GL | Seq SS  | Adj SS  | Adj MS  | F <sub>value</sub> | p <sub>value</sub> |
|---------------|----|---------|---------|---------|--------------------|--------------------|
| $d_{EANH}$    | 2  | 0,04932 | 0,04932 | 0,02466 | 1,01               | 0,497              |
| $L_0$         | 2  | 0,12488 | 0,12488 | 0,06244 | 2,56               | 0,281              |
| $t_{Ad}$      | 2  | 0,44631 | 0,44631 | 0,22316 | 9,15               | 0,099              |
| Erro residual | 2  | 0,04880 | 0,04880 | 0,02440 |                    |                    |
| Total         | 8  | 0,66931 |         |         |                    |                    |

A Tabela 69 ilustra a tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . Esta tabela ordena por ordem de importância o fator de controlo mais contributivo para o valor de  $\delta_{rotura}$ , e ilustra a média da resposta para todos os níveis de cada fator. Os parâmetros mais importantes para o aumento da ductilidade das juntas adesivas, por ordem decrescente, são:  $t_{Ad}$ ,  $L_0$  e  $d_{EANH}$ .

Tabela 69 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Nível   | $d_{EANH}$ | $L_0$  | $t_{Ad}$ |
|---------|------------|--------|----------|
| 1       | 0,3057     | 0,2360 | 0,7153   |
| 2       | 0,4167     | 0,4830 | 0,2780   |
| 3       | 0,4853     | 0,4887 | 0,2143   |
| Delta   | 0,1797     | 0,2527 | 0,5010   |
| Ranking | 3          | 2      | 1        |

### Análise de Taguchi - $P_{m\acute{a}x}$ vs $d_{EANH}$ ; $L_0$ ; $t_{Ad}$

Foi estimado um modelo de regressão linear múltiplo com vista a perceber se os fatores de controlo considerados têm um efeito estatisticamente significativo no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ . A Tabela 70 resume os resultados desta análise. A atribuição das categorias encontra-se ilustrada na legenda da Tabela 70.

Tabela 70 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Termo        | Coef    | SE Coef | t      | pvalue |
|--------------|---------|---------|--------|--------|
| Constante    | 15164,4 | 1253    | 12,100 | 0,007  |
| $d_{EANH}$ 1 | -4163,2 | 1772    | -2,349 | 0,143  |
| $d_{EANH}$ 2 | -1358,2 | 1772    | -0,766 | 0,524  |
| $L_0$ 1      | -4199,1 | 1772    | -2,369 | 0,141  |
| $L_0$ 2      | 238,8   | 1772    | 0,135  | 0,905  |
| $t_{Ad}$ 1   | -1765,1 | 1772    | -0,996 | 0,424  |
| $t_{Ad}$ 2   | 1745,2  | 1772    | 0,985  | 0,429  |

1: Categoria 1 (referente ao nível de controlo mais baixo - Tabela 52)

2: Categoria 2 (referente ao nível de controlo médio - Tabela 52)

Para as juntas adesivas com  $d_{EANH}=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 4163,2 N relativamente ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência. Para  $d_{EANH}=15$  mm (categoria 2), é esperada uma diminuição de 1358,2 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência.

Para  $L_0=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 4199,1 N relativamente ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência. Para  $L_0=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 238,8 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência.

Para  $t_{Ad}=1$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 1765,1 N relativamente ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência. Para  $t_{Ad}=2$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 1745,2 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência.

A Tabela 71 ilustra o sumário do modelo, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . O valor de  $Sp$  é de aproximadamente 3760 N. O valor de  $R^2$  indica que as variáveis utilizadas explicam 90,44% da variabilidade de  $P_{m\acute{a}x}$ . As variáveis consideradas conseguem explicar quase a totalidade da variabilidade do modelo.

Tabela 71 - Sumário do modelo, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| $Sp$ [N]  | $R^2$  | $R^2$ adj |
|-----------|--------|-----------|
| 3759,6683 | 90,44% | 61,78%    |

A Tabela 72 ilustra a ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . A Tabela 70 permite interpretar os coeficientes do modelo, enquanto a presente tabela confirma o contributo dos fatores de controlo analisados anteriormente. De acordo com a Tabela 72, que é obtida a partir da Tabela 70, nenhum fator de controlo tem um efeito estatisticamente significativo no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , uma vez que  $p > 0,05$  (5%) para todas as variáveis.

Tabela 72 - ANOVA para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Fonte         | GL | Seq SS    | Adj SS    | Adj MS   | F <sub>value</sub> | p <sub>value</sub> |
|---------------|----|-----------|-----------|----------|--------------------|--------------------|
| $d_{EANH}$    | 2  | 148988398 | 148988398 | 74494199 | 5,27               | 0,159              |
| $L_0$         | 2  | 100122703 | 100122703 | 50061352 | 3,54               | 0,220              |
| $t_{Ad}$      | 2  | 18485103  | 18485103  | 9242552  | 0,65               | 0,605              |
| Erro residual | 2  | 28270212  | 28270212  | 14135106 |                    |                    |
| Total         | 8  | 295866417 |           |          |                    |                    |

A Tabela 73 ilustra a tabela de respostas para as médias, para o Araldite® 2015 e variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . A tabela ordena por ordem de importância o fator de controle mais influente em  $P_{m\acute{a}x}$ , e ilustra a média da resposta para todos os níveis de cada fator. Os parâmetros mais importantes para o aumento da ductilidade da junta adesiva, por ordem decrescente, são:  $d_{EANH}$ ,  $L_0$  e  $t_{Ad}$ .

Tabela 73 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Araldite® 2015 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Nível   | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ |
|---------|------------|-------|----------|
| 1       | 11001      | 10965 | 13399    |
| 2       | 13806      | 15403 | 16910    |
| 3       | 20686      | 19125 | 15184    |
| Delta   | 9685       | 8159  | 3510     |
| Ranking | 1          | 2     | 3        |

### 3.4.6.3.3. Sikaforce® 7752

#### Análise de Taguchi - $\delta_{rotura}$ vs $d_{EANH}$ ; $L_0$ ; $t_{Ad}$

Foi estimado um modelo de regressão linear múltiplo com vista a perceber se os fatores de controle considerados têm um efeito estatisticamente significativo no  $\delta_{rotura}$ . A Tabela 74 os resultados desta análise. A atribuição das categorias encontra-se ilustrada na legenda da Tabela 74.

Tabela 74 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Termo        | Coef     | SE Coef | t      | p <sub>value</sub> |
|--------------|----------|---------|--------|--------------------|
| Constante    | 0,40256  | 0,05207 | 7,731  | 0,016              |
| $d_{EANH}$ 1 | -0,09689 | 0,07364 | -1,316 | 0,319              |
| $d_{EANH}$ 2 | 0,01411  | 0,07364 | 0,192  | 0,866              |
| $L_0$ 1      | -0,16656 | 0,07364 | -2,262 | 0,152              |
| $L_0$ 2      | 0,08044  | 0,07364 | 1,092  | 0,389              |
| $t_{Ad}$ 1   | 0,31278  | 0,07364 | 4,248  | 0,051              |
| $t_{Ad}$ 2   | -0,12456 | 0,07364 | -1,691 | 0,233              |

De acordo com a Tabela 74, para as juntas adesivas com  $d_{EANH}=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 0,09689 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $d_{EANH}=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 0,01411 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

Para  $L_0=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 0,16656 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência. Para  $L_0=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 0,08044 mm relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência.

Para  $t_{Ad}=1$  mm (categoria 1), é esperado um aumento de 0,31278 mm, relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a junta de referência. Para  $t_{Ad}=2$  mm (categoria 2), é esperada uma diminuição de 0,12456 mm, relativamente ao  $\delta_{rotura}$  obtido para a geometria de referência.

A Tabela 75 ilustra o sumário do modelo, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . O valor de  $Sp$  é de aproximadamente 0,16 mm. O valor de  $R^2$  indica que as variáveis utilizadas explicam 92,71% da variabilidade do  $\delta_{rotura}$ . As variáveis consideradas conseguem explicar quase a totalidade da variabilidade do modelo.

Tabela 75 - Sumário do modelo, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| $Sp$ [mm] | $R^2$  | $R^2 adj$ |
|-----------|--------|-----------|
| 0,1562    | 92,71% | 70,83%    |

A Tabela 76 ilustra a ANOVA para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . A Tabela 74 permite interpretar os coeficientes do modelo, já a presente tabela confirma o contributo dos fatores de controlo analisados anteriormente. De acordo com a Tabela 76, que é obtida a partir da Tabela 74, nenhum fator de controlo tem um efeito estatisticamente significativo no valor de  $\delta_{rotura}$ , uma vez que  $p > 0,05$  (5%) para todas as variáveis.

Tabela 76 - ANOVA para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Fonte         | $GL$ | $Seq SS$ | $Adj SS$ | $Adj MS$ | $F_{value}$ | $p_{value}$ |
|---------------|------|----------|----------|----------|-------------|-------------|
| $d_{EANH}$    | 2    | 0,006208 | 0,006208 | 0,003104 | 0,70        | 0,587       |
| $L_0$         | 2    | 0,028811 | 0,028811 | 0,014405 | 3,26        | 0,235       |
| $t_{Ad}$      | 2    | 0,074608 | 0,074608 | 0,037304 | 8,45        | 0,106       |
| Erro residual | 2    | 0,008831 | 0,008831 | 0,004415 |             |             |
| Total         | 8    | 0,118458 |          |          |             |             |

A Tabela 77 ilustra a tabela de respostas para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . A tabela ordena por ordem de importância o fator de controlo mais influente no valor de  $\delta_{rotura}$ , e ilustra a média da resposta para todos os níveis de cada fator. Os parâmetros mais importantes para o aumento da ductilidade da junta adesiva, por ordem decrescente, são:  $t_{Ad}$ ,  $L_0$  e  $d_{EANH}$ .

Tabela 77 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Nível   | $d_{EANH}$ | $L_0$  | $t_{Ad}$ |
|---------|------------|--------|----------|
| 1       | 0,2647     | 0,2233 | 0,4143   |
| 2       | 0,3243     | 0,2783 | 0,2437   |
| 3       | 0,2737     | 0,3610 | 0,2047   |
| Delta   | 0,0597     | 0,1377 | 0,2097   |
| Ranking | 3          | 2      | 1        |

**Análise de Taguchi -  $P_{m\acute{a}x}$  vs  $d_{EANH}$ ;  $L_0$ ;  $t_{Ad}$** 

Foi estimado um modelo de regressão linear múltiplo com vista a perceber se os fatores de controlo considerados têm um efeito estatisticamente significativo no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ . A Tabela 78 resume os resultados desta análise. A atribuição das categorias encontra-se ilustrada na legenda da Tabela 78.

Tabela 78 - Coeficientes do modelo estimados para as médias, após aplicação do MT e realização da ANOVA, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Termo        | Coef    | SE Coef | t      | pvalue |
|--------------|---------|---------|--------|--------|
| Constante    | 11135,6 | 483,8   | 23,016 | 0,002  |
| $d_{EANH}$ 1 | -3446,2 | 684,2   | -5,037 | 0,037  |
| $d_{EANH}$ 2 | -187,4  | 684,2   | -0,274 | 0,810  |
| $L_0$ 1      | -3202,5 | 684,2   | -4,680 | 0,043  |
| $L_0$ 2      | 137,8   | 684,2   | 0,201  | 0,859  |
| $t_{Ad}$ 1   | -194,1  | 684,2   | -0,284 | 0,803  |
| $t_{Ad}$ 2   | 559,4   | 684,2   | 0,818  | 0,500  |

De acordo com a Tabela 78, para as juntas adesivas com  $d_{EANH}=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 3446,2 N relativamente ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência. Para  $d_{EANH}=15$  mm (categoria 2), é esperada uma diminuição de 187,4 N relativamente ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência.

Para  $L_0=10$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 3202,5 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência. Para  $L_0=15$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 137,8 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência.

Para  $t_{Ad}=1$  mm (categoria 1), é esperada uma diminuição de 194,1 N, relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a junta de referência. Para  $t_{Ad}=2$  mm (categoria 2), é esperado um aumento de 559,4 N relativamente ao  $P_{m\acute{a}x}$  obtido para a geometria de referência.

A Tabela 79 ilustra o sumário do modelo, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . O valor de  $Sp$  é de aproximadamente 1451 N. O valor de  $R^2$  indica que as variáveis utilizadas explicam 96,99% da variabilidade de  $P_{m\acute{a}x}$ . As variáveis consideradas conseguem explicar quase a totalidade da variabilidade do modelo.

Tabela 79 - Sumário do modelo, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| $Sp$ [N]  | $R^2$  | $R^2_{adj}$ |
|-----------|--------|-------------|
| 1451,4780 | 96,99% | 87,96%      |

A Tabela 80 ilustra a ANOVA para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ . A Tabela 78 permite interpretar os coeficientes do modelo, enquanto a presente tabela confirma o contributo dos fatores de controlo analisados anteriormente. De acordo com a Tabela 80, que é obtida a partir da Tabela 78, nenhum fator de controlo tem um efeito estatisticamente significativo no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , uma vez que  $p > 0,05$  (5 %) para todas as variáveis.

Tabela 80 - ANOVA para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $P_{m\acute{a}x}$ .

| Fonte         | $DF$ | $Seq\ SS$ | $Adj\ SS$ | $Adj\ MS$ | $F$   | $p_{value}$ |
|---------------|------|-----------|-----------|-----------|-------|-------------|
| $d_{EANH}$    | 2    | 75341761  | 75341761  | 37670881  | 17,88 | 0,053       |
| $L_0$         | 2    | 59000347  | 59000347  | 29500173  | 14,00 | 0,067       |
| $t_{Ad}$      | 2    | 1452260   | 1452260   | 726130    | 0,34  | 0,744       |
| Erro residual | 2    | 4213577   | 4213577   | 2106788   |       |             |
| Total         | 8    | 140007945 |           |           |       |             |

A Tabela 81 ilustra a tabela de respostas para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ . A tabela ordena por ordem de importância o fator de controlo mais influente no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , e ilustra a média da resposta para todos os níveis de cada fator. Os parâmetros mais importantes para o aumento da ductilidade da junta adesiva, por ordem decrescente, são:  $d_{EANH}$ ,  $L_0$  e  $t_{Ad}$ .

Tabela 81 - Tabela de respostas para as médias, para o adesivo Sikaforce® 7752 e a variável de saída  $\delta_{rotura}$ .

| Nível   | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ |
|---------|------------|-------|----------|
| 1       | 7689       | 7933  | 10942    |
| 2       | 10948      | 11273 | 11695    |
| 3       | 14769      | 14200 | 10770    |
| Delta   | 7080       | 6267  | 925      |
| Ranking | 1          | 2     | 3        |

Verifica-se a seguinte tendência para todos os adesivos. O valor de  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta preferencialmente com os valores de  $d_{EANH}$ ,  $L_0$  e  $t_{Ad}$ , e o valor do  $\delta_{rotura}$  aumenta com os valores dos fatores de controlo  $t_{Ad}$ ,  $L_0$  e  $d_{EANH}$ , por ordem decrescente de importância. Possivelmente, a inversão da ordem de importância está relacionada com o aumento da rigidez da junta, que conduz ao aumento de  $P_{m\acute{a}x}$  e a diminuição do  $\delta_{rotura}$ . O Araldite® AV138 é a única exceção à regra. Neste caso,  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta preferencialmente com  $d_{EANH}$ ,  $t_{Ad}$  e  $L_0$ .

### 3.4.7. Alterações geométricas

O presente Subcapítulo foi criado com o objetivo de concluir, face à geometria de base, se a existência de chanfros ou excesso de adesivo em forma de filete melhoram a resistência e a ductilidade das juntas adesivas, sem afetar prejudicialmente a distribuição de tensões ao longo de  $DN$ . De acordo com os resultados obtidos no Subcapítulo 3.4, as geometrias de junta que apresentam valores mais elevados de resistência mecânica e ductilidade utilizam o adesivo mais rígido dos três propostos, Araldite® AV138. Por este motivo, foi considerado apenas o efeito de variação dos parâmetros geométricos em torno deste adesivo. De seguida, foi reservado um espaço com o objetivo de concluir se a aplicação de juntas bi-adesivas garante a melhoria das propriedades mecânicas das ligações. Deste modo, considerou-se a variação do comprimento de sobreposição do adesivo dúctil relativamente ao valor de  $L_0$ ,  $L_1$  [mm], na tentativa de justificar a adequabilidade das juntas bi-adesivas, relativamente às geometrias analisadas ao longo do Subcapítulo 3.4. O presente Subcapítulo termina com o estudo do efeito de um aderente não hidroformado de PRFC em juntas tubulares bi-adesivas, tendo em consideração o efeito da variação de  $L_1$ .

Em termos práticos, a adição de adesivo em excesso pode implicar um investimento superior. No entanto, na produção de juntas adesivas é comum ocorrer um vazamento do adesivo pelas extremidades livres da sobreposição durante o processo de cura. Este fenómeno é comum no caso de aplicação de temperatura para cura, onde ocorre a diminuição da viscosidade do adesivo. Geralmente, é comum preparar a superfície dos aderentes através de ataques químicos ou físicos para além do valor de  $L_0$  definido, de maneira que o adesivo em excesso permita colmatar quaisquer defeitos e vazios. A formação dos chanfros requer a maquinagem dos aderentes, a par da hidroformagem para garantir os raios de curvatura dos aderentes exteriores. Deste modo, considerou-se o efeito da variação do ângulo dos filetes adesivos e o efeito da variação do ângulo do chanfro dos aderentes interior e exterior, na tentativa de identificar uma tendência padrão, acrescentar valor ao trabalho de investigação realizado e à literatura existente.

A Figura 81.a) ilustra o efeito da variação do ângulo do filete adesivo,  $\gamma$  [°], e a adição de uma porção de adesivo na parte adjacente aos raios de curvatura obtidos por hidroformagem. As partições identificadas com um tom acinzentado representam as secções atribuídas ao adesivo, e as restantes aos aderentes. A Figura 81.b) ilustra o efeito da variação do ângulo do chanfro dos aderentes interior e exterior,  $\beta$  [°].

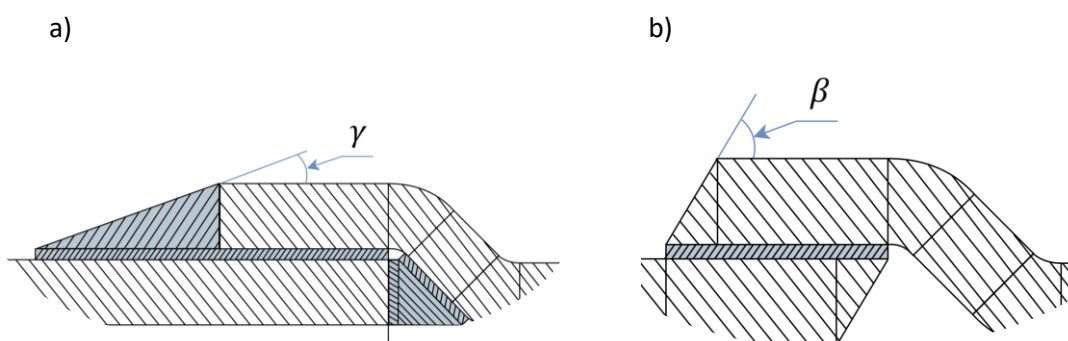


Figura 81 - Efeito da variação de: a)  $\gamma$  e b)  $\beta$ .

Relativamente ao *software* utilizado, é de notar que as restrições e constrangimentos definidos no módulo *section sketch* garantem a possibilidade de fazer variar um parâmetro geométrico sem desvirtuar a geometria tubular de referência (Subcapítulo 3.4.1), uma vez que os contornos

interiores e exteriores da junta se ajustam à redefinição de uma outra dimensão. Na eventualidade de eliminar alguma definição associada à geometria de base e que deva ser incluída na presente análise, devem ser seguidas as indicações disponíveis no APÊNDICE A.

A Tabela 82 ilustra, em função dos parâmetros geométricos mencionados, as diferentes configurações de juntas adesivas tubulares analisadas. É de notar que foi alterado apenas um parâmetro geométrico por análise, sem conciliar o efeito da variação de mais do que um fator geométrico. Os parâmetros a tom esverdeado representam os parâmetros inalterados face à geometria de base, já os parâmetros a tom amarelado representam os valores que as variáveis  $\gamma$  e  $\beta$  podem assumir. De acordo com a Figura 81, é de notar que a variação de  $\gamma$  implica a redefinição do valor de  $L_0$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 82 - Geometrias de juntas tubulares a analisar, em função da variação de  $\gamma$  e  $\beta$ .

| Parâmetros      | $d_{EANH}$ | $L_0$ | $t_{Ad}$ | $\theta$ | $\gamma$ |    |    |    |    | $\beta$ |
|-----------------|------------|-------|----------|----------|----------|----|----|----|----|---------|
| Unidades        | [mm]       |       |          |          | [°]      |    |    |    |    |         |
| Araldite® AV138 | 20         | 10    | 2        | 45       | 90       | 15 | 30 | 45 | 60 |         |

### 3.4.7.1. Efeito da variação do ângulo do filete adesivo

Os processos de obtenção de  $ER$  e a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$  encontram-se descritos no APÊNDICE B. O nó crítico pertence ao elemento dos aderentes que apresenta o valor de  $PA$  mais elevado. O APÊNDICE C foi elaborado com o propósito de auxiliar a realização e interpretação dos resultados provenientes do estudo numérico, ilustrados no Subcapítulo 3.4.7.1. O presente Subcapítulo contempla o efeito da variação do  $\gamma$ . A Figura 82 ilustra as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas em função de  $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138.

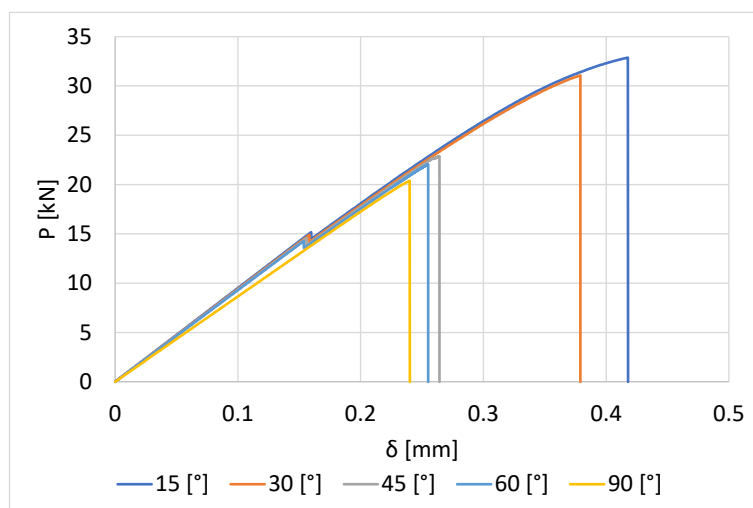


Figura 82 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas em função de  $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138.

De acordo com a Figura 82, ocorre uma diminuição da resistência da junta com o aumento de  $\gamma$ . A resistência mecânica e ductilidade das juntas adesivas é tão mais elevada quanto menor for  $\gamma$ , ainda que não se tenha registado uma variação muito acentuada para as diferentes geometrias analisadas. Registou-se um aumento percentual dos valores de  $P_{máx}$  de aproximadamente 61%, para  $\gamma=15^\circ$ , relativamente à geometria de base. É de notar que a camada de adesivo que se encontra na direção transversal é responsável pelas oscilações nos declives da curva, daí não se ter

registrado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura. A secção adesiva em questão encontra-se maioritariamente solicitada a esforços de tração. Ou seja, não deve ser interrompida a análise para o incremento correspondente à rotura dos elementos coesivos desta camada, uma vez que não ocorreu eliminação de elementos da camada adesiva na secção correspondente a  $L_0$ . A Tabela 83 ilustra o aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 83 – Aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\gamma [^\circ]$ |       |       |      |    |
|-----------------|-------------------|-------|-------|------|----|
| Adesivo         | 15                | 30    | 45    | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 61,12             | 52,24 | 12,10 | 8,10 | -  |

Ao variar  $\gamma$  e para o caso do adesivo Araldite® AV138, a junta adesiva que apresentou a resistência mecânica mais elevada utiliza um  $\gamma = 15^\circ$ . A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 61%, relativamente à geometria de base.

A Tabela 84 ilustra o aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base. O  $\delta_{rotura}$  é tanto maior quanto menor o valor de  $\gamma$ .

Tabela 84 - Aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base, para o caso do adesivo Araldite® AV138.

|                 | $\gamma [^\circ]$ |       |       |      |    |
|-----------------|-------------------|-------|-------|------|----|
| Adesivo         | 15                | 30    | 45    | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 74,17             | 58,33 | 10,00 | 5,83 | -  |

O  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $\gamma = 15^\circ$ , 0,418 mm, registando-se um aumento percentual de 74,17%, relativamente à geometria de base. A Tabela 85 ilustra o aumento percentual de  $ER$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 85 – Aumento percentual de  $ER$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

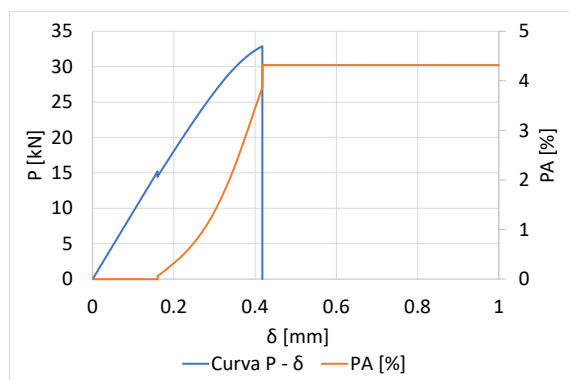
|                 | $\gamma [^\circ]$ |        |       |       |    |
|-----------------|-------------------|--------|-------|-------|----|
| Adesivo         | 15                | 30     | 45    | 60    | 90 |
| Araldite® AV138 | 208,50            | 155,47 | 26,63 | 17,09 | -  |

A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $ER$  utiliza um  $\gamma = 15^\circ$ , proporcional à resistência da junta adesiva (Figura 82). A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $ER$  de aproximadamente 209%, relativamente à geometria de base.

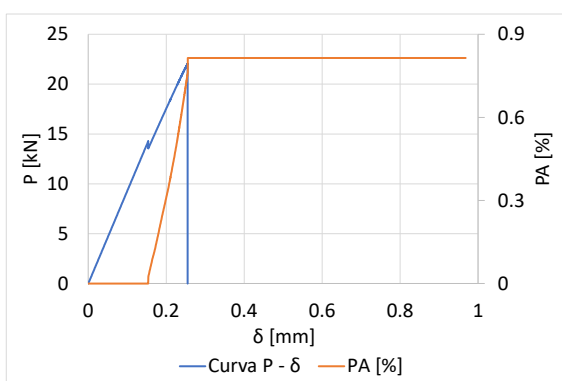
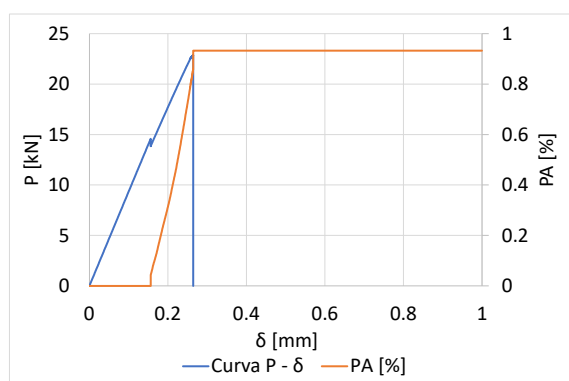
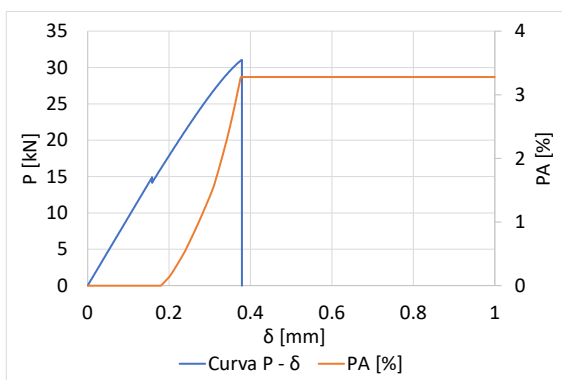
A Figura 83 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\gamma =$  a)  $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$  e d)  $60^\circ$ . A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e de  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$  para o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma = 90^\circ$ , coincidente com a geometria de base. A rotura da junta foi coesiva no adesivo para todas as geometrias analisadas numericamente, e para valores de  $\gamma = 15^\circ$  e  $60^\circ$ , o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a diminuir relativamente ao  $\delta_{rotura}$ . De acordo com a Figura 83.a), para  $\gamma = 15^\circ$ , o valor de  $\delta_{IPA} = 0,160$  mm e o valor de  $P_{IPA} = 14578,70$  N. O início

de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 60,84% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força equivalente a 44,37% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 4%. Para  $\gamma=30^\circ$ ,  $\delta_{IPA}=0,181$  mm e  $P_{IPA}=16174,60$  N [Figura 83.b)]. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 81,53% do  $\delta_{rotura}$  e a 52,10% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 3%. Para  $\gamma=45^\circ$  [Figura 83.c)],  $\delta_{IPA}=0,156$  mm e  $P_{IPA}=13888,60$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 70,91% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 60,75% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 1%. Para  $\gamma=60^\circ$ ,  $\delta_{IPA}=0,154$  mm e  $P_{IPA}=13538,80$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 55,60% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 61,41% de  $P_{m\acute{a}x}$ , de acordo com a Figura 83.d). Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 1%.

a)



b)



c)

d)

Figura 83 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\gamma=a)$   $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$  e d)  $60^\circ$ .

A Tabela 86 ilustra o aumento percentual de  $PA$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base. Na eventualidade de fazer variar  $\gamma$ , a junta adesiva que apresenta o valor mais elevado de  $PA$  utiliza um  $\gamma = 15^\circ$ . A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 593%, relativamente à geometria de base, maximizando desta maneira o aproveitamento da resistência dos elementos da camada adesiva.

Tabela 86 – Aumento percentual de  $PA$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\gamma [^\circ]$ |        |       |       |    |
|-----------------|-------------------|--------|-------|-------|----|
| Adesivo         | 15                | 30     | 45    | 60    | 90 |
| Araldite® AV138 | 593,32            | 426,49 | 49,63 | 30,83 | -  |

A Tabela 87 ilustra o aumento percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base. Por outro lado, a Tabela 88 ilustra o aumento percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 87 - Aumento percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\gamma [^\circ]$ |       |      |      |    |
|-----------------|-------------------|-------|------|------|----|
| Adesivo         | 15                | 30    | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 5,26              | 19,08 | 2,63 | 1,32 | -  |

Tabela 88 – Aumento percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\gamma [^\circ]$ |       |      |      |    |
|-----------------|-------------------|-------|------|------|----|
| Adesivo         | 15                | 30    | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 10,93             | 23,07 | 5,67 | 3,01 | -  |

A Figura 84 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  ao longo de  $x'/L_0$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\gamma$ =a) 15°, b) 30°, c) 45° e d) 60°. A Figura 30.a) ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  ao longo de  $DN$  para  $\gamma$ =90°, coincidente com a geometria de base. O *path 1* coincide com  $L_0$  e com a direção longitudinal da junta. O *path 2* coincide com a projeção dos contornos exteriores das partições hidroformadas. O *path 3* é coincidente com a direção transversal da junta a extremidade do aderente não hidroformado. Os *paths* são definidos detalhadamente no APÊNDICE C.

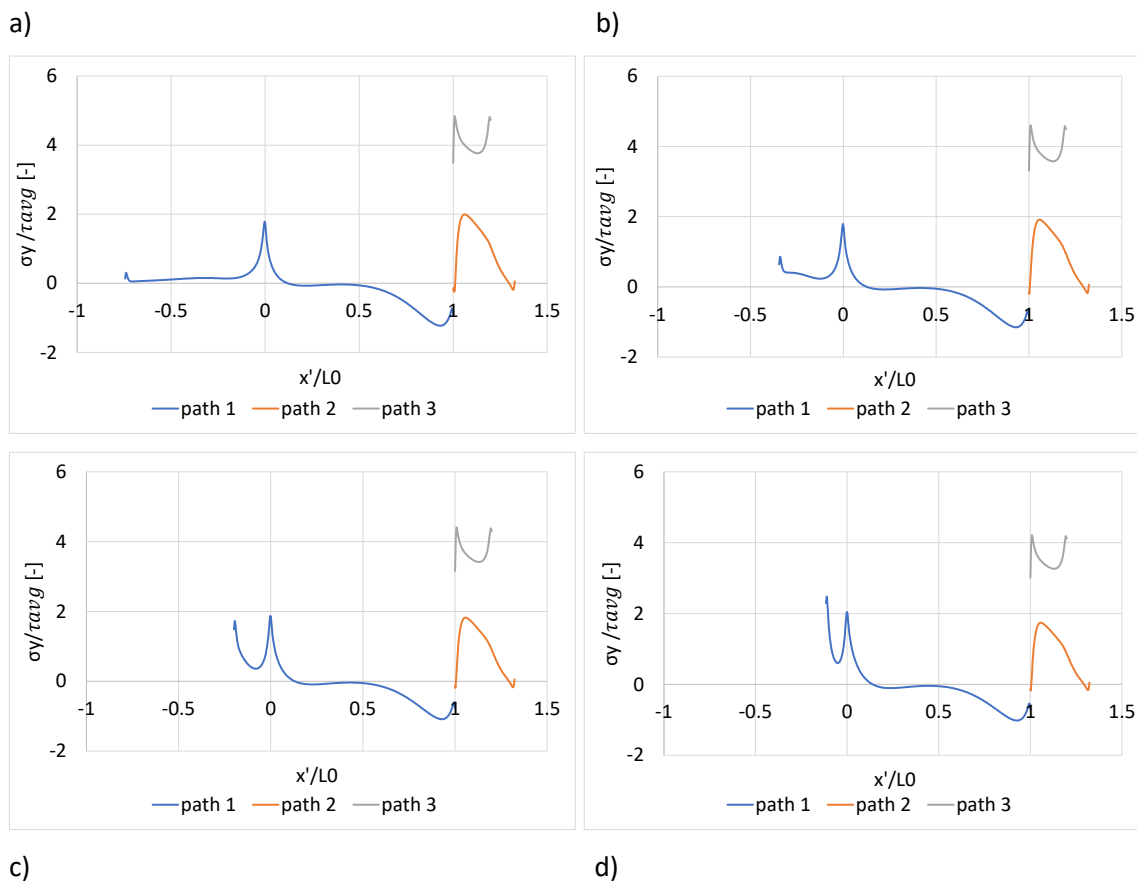


Figura 84 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  ao longo de  $x'/L_0$ , para o Araldite® AV138. Para  $\gamma$ =a) 15°, b) 30°, c) 45° e d) 60°.

De acordo com a Figura 84, relativamente ao *path* 1, correspondente à sobreposição adesiva, a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  apresenta picos de tensão na extremidade da sobreposição adesiva de base, ou seja, na transição entre o valor de  $L_0$  original e o excesso de adesivo. Relativamente a este caminho, a única geometria que apresenta valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  mais elevados do que na transição mencionada anteriormente, utiliza um  $\gamma=60^\circ$ . A distribuição de tensões ao longo deste *path* é tão mais uniforme quanto menor o valor de  $\gamma$ , já que o aumento deste parâmetro aproxima os picos registados na extremidade daqueles que se verificam no início da sobreposição original. Quanto ao *path* mencionado, para  $\gamma=15$  e  $60^\circ$ , registou-se uma diminuição e um aumento percentual de aproximadamente 26 e 3%, respetivamente. A rotura inicia-se pelo *path* 3, correspondente à secção do filete adesivo maioritariamente solicitada a esforços de tração e coincidente com a direção transversal da união. Apesar de as análises numéricas não terem sido interrompidas para o instante em que são eliminados os elementos da camada adesiva coincidentes com o *path* 3, o caminho preferencial de rotura é estipulado pelo rácio  $\sigma_y/\tau_{avg}$  para este, que apresenta picos de tensão elevados, quando comparados com os demais. Se for ignorado o contributo desta camada adesiva, o *path* 2, traçado relativamente à curvatura induzida pelo processo de hidroformagem, tem um efeito preponderante na rotura da junta adesiva por apresentar os valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , para valores de  $\gamma=15$  e  $30^\circ$ . Conclui-se que o filete de adesivo tem um efeito contributivo na uniformização das tensões de arrancamento para valores de  $\gamma$  inferiores, apesar de implicar o maior consumo de matéria-prima. A Figura 85 ilustra a evolução de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de cada *path* definido e de  $\gamma$ .

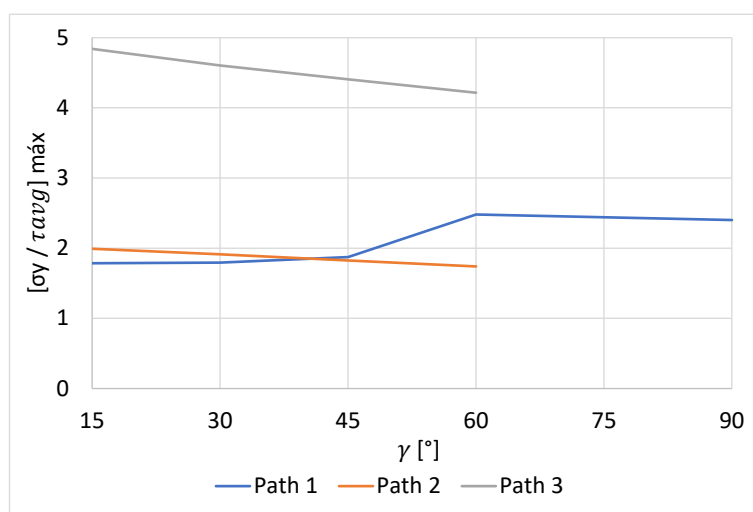


Figura 85 - Evolução de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de cada *path* definido e de  $\gamma$ .

A Tabela 89 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função do *path* 1 e de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 89 – Aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função do *path* 1 e de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\gamma [^\circ]$ |       |       |      |    |
|-----------------|-------------------|-------|-------|------|----|
| Adesivo         | 15                | 30    | 45    | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 25,63             | 25,30 | 22,07 | 3,22 | -  |

Ao variar  $\gamma$ , a junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  utiliza um  $\gamma = 60^\circ$ . A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 3%, relativamente à geometria de base.

A Figura 86 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  ao longo de  $x'/L_0$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\gamma$ =a)  $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$  e d)  $60^\circ$ . A Figura 30.b) ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  ao longo de  $DN$  para  $\gamma=90^\circ$ , coincidente com a geometria de base.

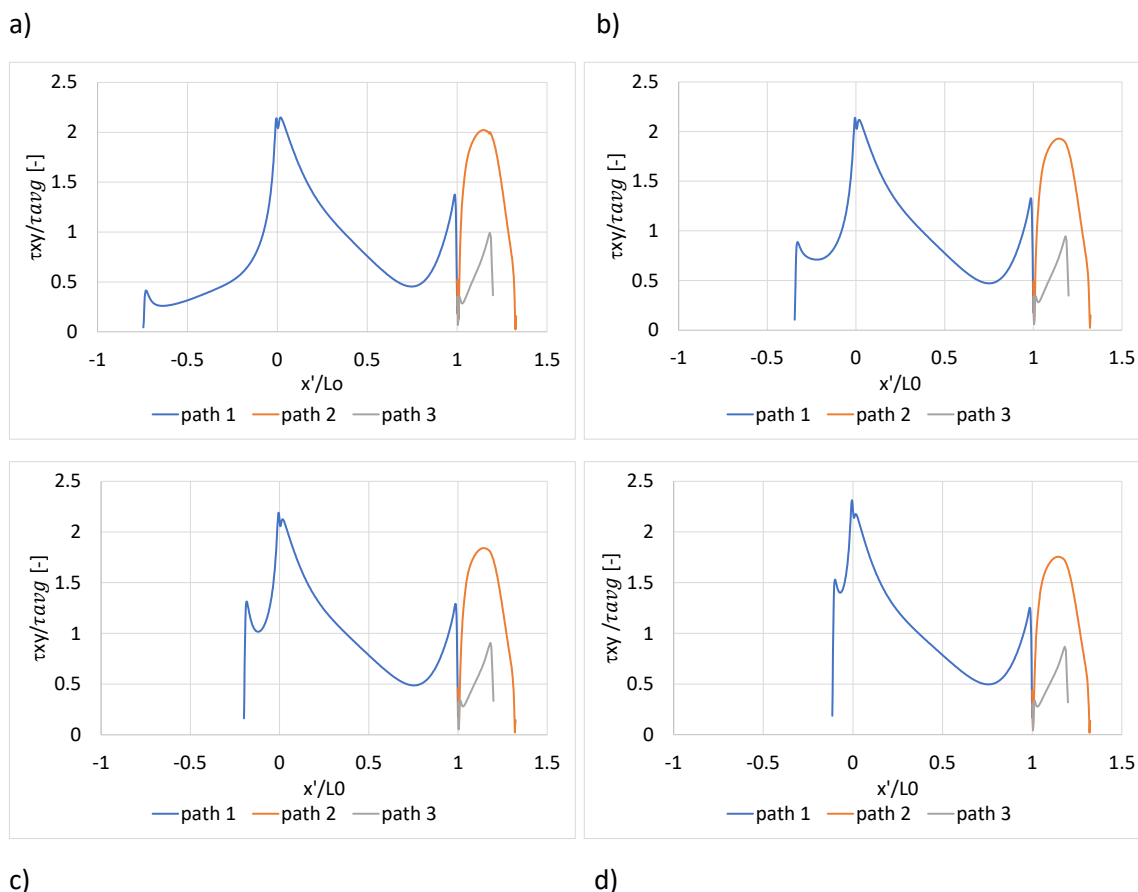


Figura 86 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  ao longo de  $x'/L_0$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\gamma$ =a)  $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$  e d)  $60^\circ$ .

De acordo com a Figura 86, relativamente ao *path 1*, a evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  apresenta valores inferiores na região intermédia da sobreposição correspondente ao valor de  $L_0$  original, e os picos de tensão foram registados na transição entre o filete adesivo e o início da sobreposição original. Na extremidade oposta à curvatura, os valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  praticamente se sobrepõem para os diferentes valores de  $\gamma$  analisados. É de notar os picos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registados ao longo do *path 2*. No entanto, a rotura tem tendência a iniciar-se pelo efeito das tensões de arrancamento. Relativamente ao *path 3*, correspondente à secção do filete adesivo que está maioritariamente solicitada a esforços trativos, era espectável o registo de tensões de corte desprezáveis, quando comparado com os restantes caminhos de propagação do dano. Registou-se um aumento percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 8% para  $\gamma=15^\circ$ , relativamente à geometria de base. A Figura 87 ilustra a evolução de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{\max}$  em função de cada *path* definido e de  $\gamma$ .

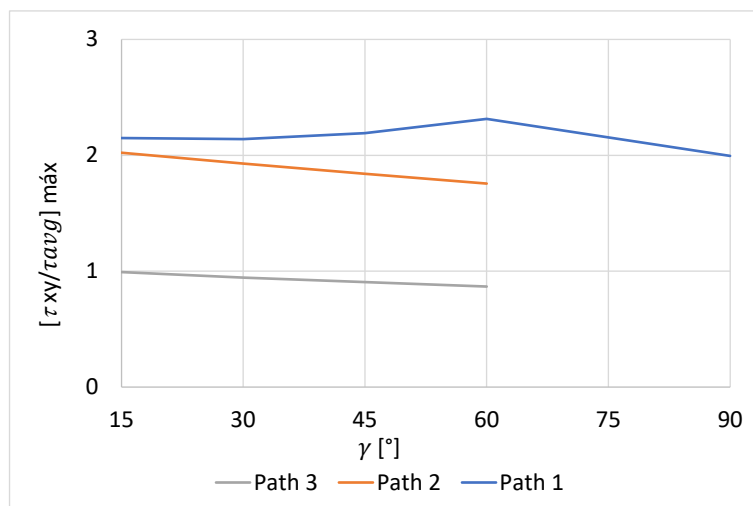


Figura 87 - Evolução de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{\max}$  em função de cada *path* definido e de  $\gamma$ .

A Tabela 90 ilustra o aumento percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{\max}$  em função do *path* 1 e de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base. A comparação dos resultados foi realizada apenas para o *path* 1, uma vez que os restantes não podem ser comparados com o caminho definido para a geometria de referência.

Tabela 90 – Aumento percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{\max}$  em função do *path* 1 e de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\gamma [^\circ]$ |      |      |       |    |
|-----------------|-------------------|------|------|-------|----|
| Adesivo         | 15                | 30   | 45   | 60    | 90 |
| Araldite® AV138 | 7,74              | 7,25 | 9,88 | 16,01 | -  |

Na eventualidade de fazer variar  $\gamma$ , a junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  utiliza um  $\gamma=60^\circ$ . A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 16%, relativamente à geometria de base.

A Figura 88 ilustra a evolução de *sdeg* em função de  $\gamma$  e ao longo de  $x'/L_0$ , para o adesivo Araldite® AV138 e para os *paths* 1 e 2.

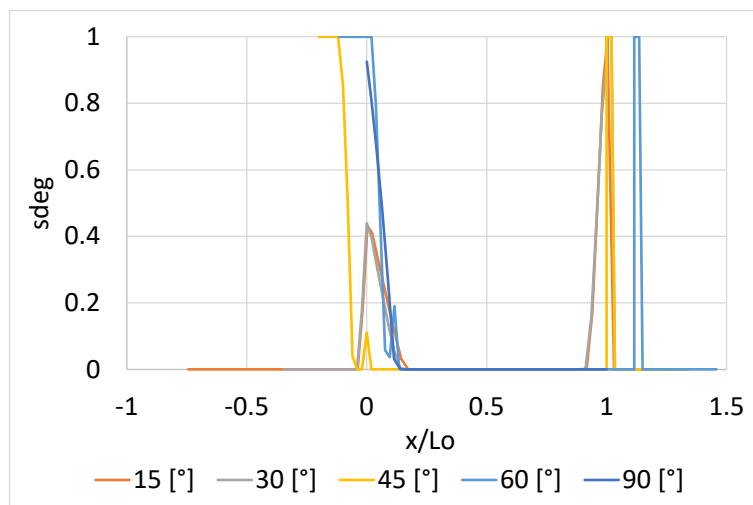


Figura 88 - Evolução de *sdeg* em função de  $\gamma$  e ao longo de *DN*, para o adesivo Araldite® AV138.

As geometrias analisadas apresentam uma evolução da variável do dano idêntica, exceto as geometrias de junta cujo valor de  $\gamma=15$  e  $30^\circ$ . Para estas, ocorre uma variação menos abrupta de  $sdeg$ , o que resulta numa melhor distribuição de tensões e no aumento da resistência mecânica da junta adesiva. Para as restantes geometrias analisadas, o gradiente de  $sdeg$  ocorreu de forma abrupta desde o estado não danificado até à rotura completa. A variação acentuada das curvas está relacionada com a fragilidade do adesivo, com a diminuição de  $PA$  com  $\gamma$ , e ainda com os picos de tensão na extremidade crítica e na zona de transição entre o filete adesivo e a camada adesiva (correspondente ao  $L_0$  original). Numa fase inicial, foram realizadas várias análises numéricas com o propósito de concluir se o *path* gerado deveria incluir a interface entre a camada de adesivo na direção transversal da junta e o aderente não hidroformado. Optou-se por incluir a interface adjacente à curvatura, já que a camada de adesivo solicitada à tração entrava em rotura prematuramente, por estar solicitada maioritariamente a esforços de tração.

### 3.4.7.2. Efeito da variação do ângulo do chanfro dos aderentes

Os processos de obtenção de  $ER$ , a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , a distribuição do estado de tensão ao longo de  $DN$ , e a obtenção de  $sdeg$  no instante correspondente a  $P_{m\acute{a}x}$  podem ser consultados no APÊNDICE B. A Figura 89 ilustra as curvas  $P$ - $\delta$  em função de  $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138.

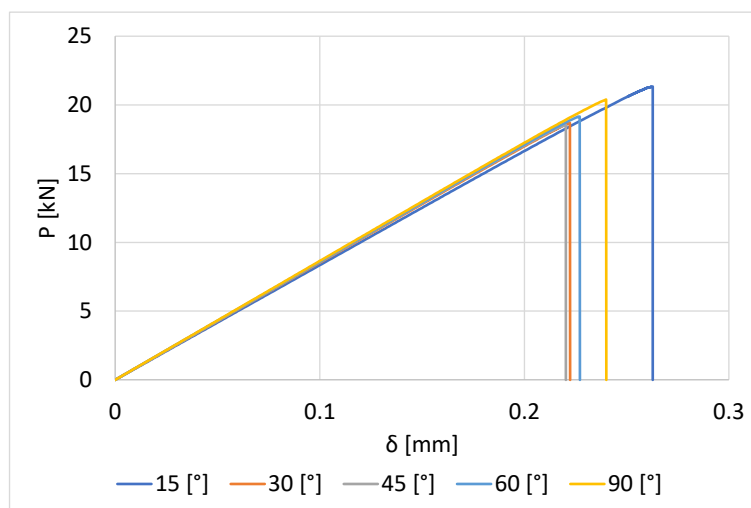


Figura 89 - Curvas  $P$ - $\delta$  em função de  $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138.

De acordo com a Figura 89, não é possível identificar uma tendência padrão face à variação do parâmetro geométrico em estudo. A geometria de junta mais resistente e dúctil apresenta um valor de  $\beta=15^\circ$ . Não se registou uma variação muito acentuada na rigidez das juntas analisadas, ou seja, conclui-se que a variação de  $\beta$  não tem um efeito contributivo na resistência final da ligação. No entanto, registou-se um aumento percentual dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 5% para  $\beta=15^\circ$ , relativamente à geometria de base.

A Tabela 91 ilustra o aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de  $\beta$  e de  $P_{m\acute{a}x}$ , relativamente à geometria de base. Na eventualidade de fazer variar  $\beta$ , a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza um  $\beta=5^\circ$ . A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 5%, relativamente à geometria de base.

Tabela 91 – Aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de  $\beta$  e de  $P_{m\acute{a}x}$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\beta [^\circ]$ |      |      |      |    |
|-----------------|------------------|------|------|------|----|
| Adesivo         | 15               | 30   | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 4,67             | 8,36 | 9,21 | 6,09 | -  |

A Tabela 92 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base. O  $\delta_{rotura}$  diminui para valores de  $\beta$  mais elevados. O  $\delta_{rotura}$  é máximo para a geometria de junta cujo valor de  $\beta=15^\circ$ .

Tabela 92 - Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\beta [^\circ]$ |      |      |      |    |
|-----------------|------------------|------|------|------|----|
| Adesivo         | 15               | 30   | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 9,58             | 7,50 | 8,33 | 5,42 | -  |

O  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $\beta=15^\circ$ , 0,263 mm, tendo-se registado um aumento percentual de 9,58%, relativamente à geometria de base. A Tabela 93 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $ER$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 93 – Aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\beta [^\circ]$ |       |       |       |    |
|-----------------|------------------|-------|-------|-------|----|
| Adesivo         | 15               | 30    | 45    | 60    | 90 |
| Araldite® AV138 | 15,47            | 15,36 | 16,54 | 11,03 | -  |

A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $ER$  utiliza um  $\gamma=15^\circ$ , em concordância com as curvas  $P-\delta$  ilustradas na Figura 89. A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $ER$  de aproximadamente 15%, relativamente à geometria de base.

A Figura 90 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\beta=$  a)  $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$  e d)  $60^\circ$ . A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$  para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $\beta=90^\circ$ , coincidente com a geometria de base. A rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todos as geometrias que utilizam o adesivo Araldite® AV138. Para valores de  $\beta$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a aumentar relativamente ao  $\delta_{rotura}$  correspondente. De acordo com a Figura 90.a), para  $\beta=15^\circ$ ,  $\delta_{IPA}=0,141$  mm e  $P_{IPA}=11768,10$  N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 53,61% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força equivalente a 55,13% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 1%. Para  $\beta=30^\circ$ ,  $\delta_{IPA}=0,147$  mm e  $P_{IPA}=12533,30$  N (Figura 90.b)). O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 66,22% do  $\delta_{rotura}$  e a 67,07% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 0,50%. Para  $\beta=45^\circ$  e de acordo com a Figura 90.c),  $\delta_{IPA}=0,149$  mm e  $P_{IPA}=12764,30$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 67,73% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 68,94% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,45%. Para  $\beta=60^\circ$ , o valor de  $\delta_{IPA}=0,150$  mm e  $P_{IPA}=12887,50$  N. O  $\delta_{IPA}$  corresponde a 66,08% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  corresponde a 67,29% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,50%.

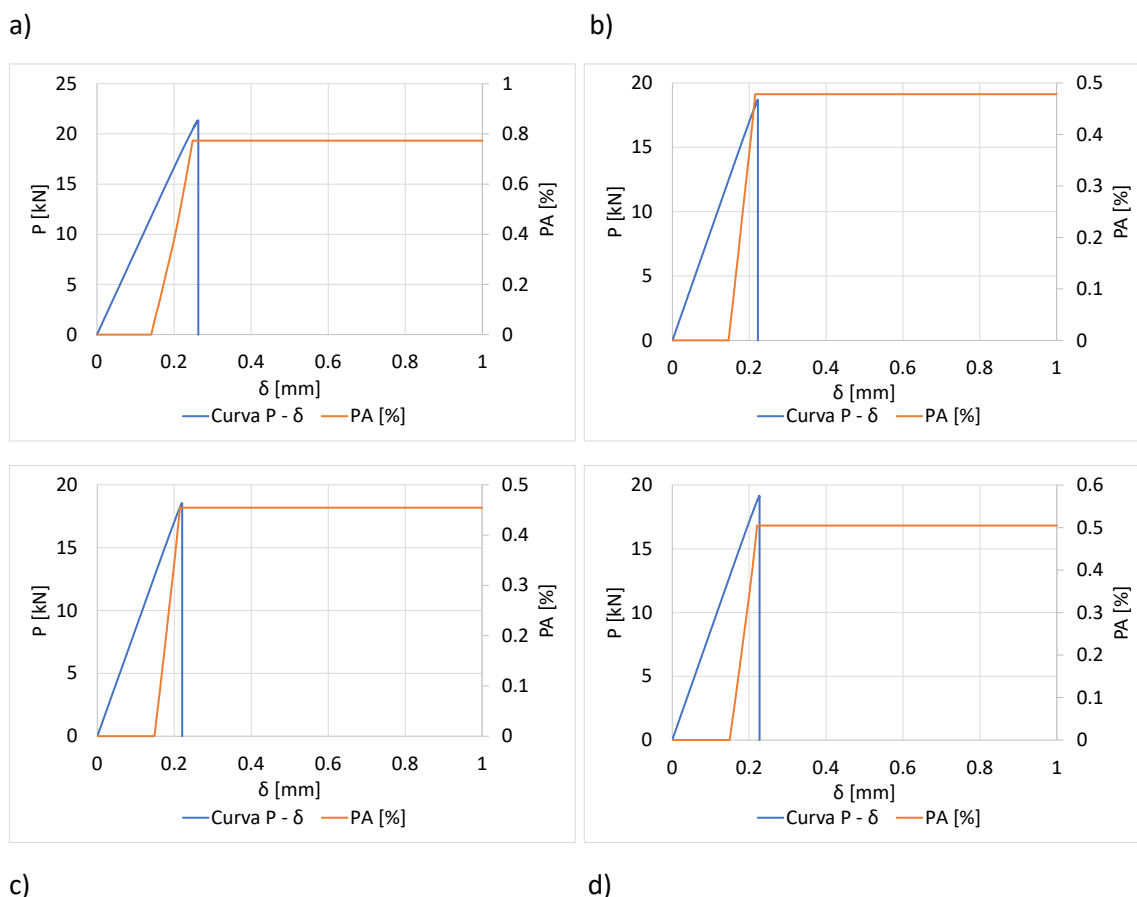


Figura 90 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para o adesivo Araldite® AV138. Para  $\beta =$  a)  $15^\circ$ , b)  $30^\circ$ , c)  $45^\circ$  e d)  $60^\circ$ .

A Tabela 94 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base. Ao variar  $\beta$ , a junta adesiva que apresenta o valor de  $PA$  mais elevado utiliza um  $\beta = 15^\circ$ . A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 24%, relativamente à geometria de base, maximizando desta maneira o aproveitamento da resistência dos elementos da camada adesiva.

Tabela 94 – Aumento/diminuição percentual de  $PA$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\beta [^\circ]$ |       |       |       |    |
|-----------------|------------------|-------|-------|-------|----|
| Adesivo         | 15               | 30    | 45    | 60    | 90 |
| Araldite® AV138 | 24,12            | 23,23 | 27,06 | 18,90 | -  |

A Tabela 95 ilustra a diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base. A Tabela 96 ilustra a diminuição percentual de  $P_{IPA}$ , relativamente à mesma geometria.

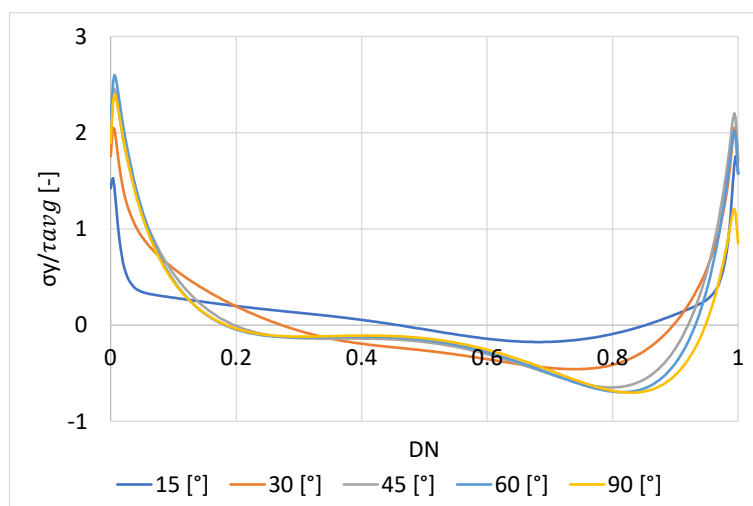
Tabela 95 - Diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\beta [^\circ]$ |      |      |      |    |
|-----------------|------------------|------|------|------|----|
| Adesivo         | 15               | 30   | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 7,24             | 3,29 | 1,97 | 1,32 | -  |

Tabela 96 – Diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\beta [^\circ]$ |      |      |      |    |
|-----------------|------------------|------|------|------|----|
| Adesivo         | 15               | 30   | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 10,46            | 4,64 | 2,88 | 1,94 | -  |

A Figura 91 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $\beta$  e ao longo de  $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138.

Figura 91 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $\beta$  e ao longo de  $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138.

De acordo com a Figura 91, os picos de tensão registados para a extremidade crítica são tão mais elevados quanto maior for  $\beta$ . No entanto, para a extremidade oposta, os valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  não seguem uma tendência padrão. Nesta extremidade, os valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registaram-se para  $\beta=45^\circ$ , já os valores mínimos obtidos correspondem à geometria de base. Registou-se uma diminuição percentual dos picos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 27% para  $\beta=15^\circ$ , relativamente à geometria de referência. A maquinagem dos chanfros tem um efeito tão mais significativo na distribuição das tensões de arrancamento quanto menor for o valor de  $\beta$ , ainda que a obtenção destes parâmetros geométricos implique o investimento em operações de maquinagem morosas, quando comparadas com as geometrias contempladas pela proposta de valor inicial.

A Tabela 97 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base. Ao variar  $\beta$ , a junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  utiliza um  $\beta=60^\circ$ . Para esta geometria de junta, registou-se um aumento percentual de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 8%, relativamente à geometria de base.

Tabela 97 – Aumento/diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

|                 | $\beta [^\circ]$ |       |      |      |    |
|-----------------|------------------|-------|------|------|----|
| Adesivo         | 15               | 30    | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 26,87            | 14,56 | 2,34 | 8,32 | -  |

A Figura 92 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $\beta$  e ao longo de  $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138.

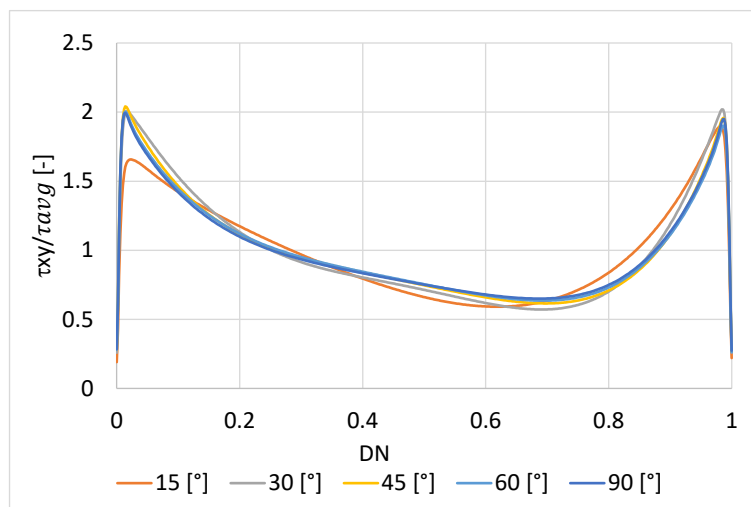


Figura 92 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $\beta$  e ao longo de  $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138.

A evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  apresenta valores inferiores na região intermédia da sobreposição, e os picos de tensão registados são praticamente simétricos para ambas as extremidades, exceto para  $\beta=15^\circ$ . A configuração de junta que apresentou os valores mais baixos na extremidade oposta ao início da curvatura corresponde a uma geometria de junta cujo  $\beta=15^\circ$ . As restantes juntas adesivas apresentam valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  superiores a esta última, e idênticos entre si. Na extremidade oposta, os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  críticos registaram-se para  $\beta=30^\circ$ , ainda que as outras geometrias de junta não registem valores muito dissimilares. Registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 5% para  $\beta=15^\circ$ , relativamente à geometria de base. Contudo, a variação do parâmetro em análise não tem efeito significativo na evolução do estado de tensão ao longo de  $DN$ .

A Tabela 98 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 98 – Aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $\beta [^\circ]$ |      |      |      |    |
|-----------------|------------------|------|------|------|----|
|                 | 15               | 30   | 45   | 60   | 90 |
| Araldite® AV138 | 4,85             | 1,25 | 2,34 | 0,48 | -  |

Na eventualidade de variar  $\beta$ , a junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  utiliza um  $\beta=45^\circ$ . A geometria de junta mencionada registou um aumento percentual de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 2,34%, relativamente à geometria de referência.

A Figura 93 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $\beta$  e ao longo de  $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138.

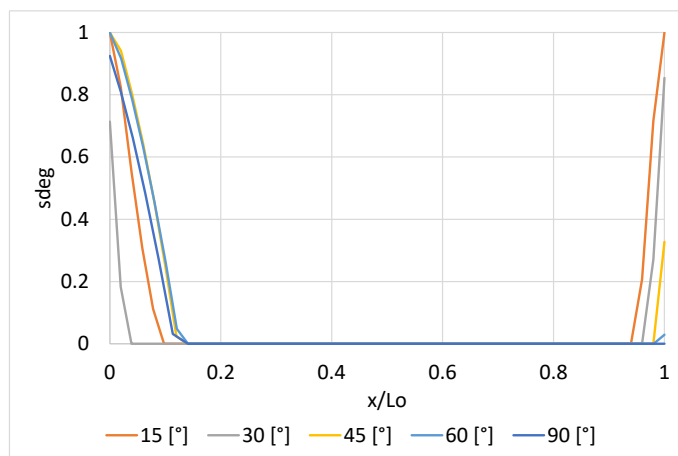


Figura 93 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $\beta$  e ao longo de  $DN$ , para o adesivo Araldite® AV138.

As geometrias analisadas apresentam uma evolução da variável do dano idêntica, ainda que mais tênue para valores de  $\beta$  mais elevados. A variação de  $sdeg$  ocorreu de forma abrupta desde o estado não danificado até à eliminação de elementos da camada adesiva. Apesar da elevada rigidez do adesivo utilizado, registou-se a degradação dos elementos coesivos em ambas as extremidades da sobreposição, exceto para a geometria de referência (3.4.1). A geometria de junta que apresentou uma variação do dano mais abrupta utiliza um valor de  $\beta = 30^\circ$ . O gradiente das curvas muito acentuado está diretamente relacionado com a fragilidade do adesivo em estudo, o valor de  $PA$  e ainda a concentração de picos de tensão na extremidade crítica. A evolução de  $PA$  não é linear relativamente aos valores que  $\beta$  pode assumir, e isso dificulta a identificação de uma tendência na variação de  $sdeg$ .

### 3.4.7.3. Juntas tubulares bi-adesivas

O presente Subcapítulo foi criado com o objetivo de concluir se a aplicação de juntas bi-adesivas garante a melhoria das propriedades mecânicas das ligações. A opção por esta configuração de juntas está relacionada com a obtenção de um estado de tensões mais uniforme, permitindo que o adesivo mais dúctil seja responsável por atenuar as consequências dos esforços de arrancamento. Deste modo, considerou-se o efeito da variação de  $L_1$ , na tentativa de justificar a adequabilidade das juntas bi-adesivas, relativamente às geometrias analisadas numericamente ao longo do Subcapítulo 3.4, concordantes com a proposta de valor inicial (Subcapítulo 3.2.1).

#### Geometria a analisar

A Figura 94 ilustra a inclusão do parâmetro geométrico  $L_1$ , relativamente à geometria de base proposta. As partições identificadas com um tom acinzentado representam as secções atribuídas ao adesivo, sendo que a interior é constituída pelo adesivo rígido (Araldite® AV138) e as extremidades da sobreposição são preenchidas por um adesivo dúctil (Araldite® 2015 ou Sikaforce® 7752). As juntas bi-adesivas foram inicialmente desenvolvidas com o propósito de solucionar os problemas relacionados com a resistência mecânica das juntas sujeitas a temperaturas elevadas e muito baixas. O adesivo dúctil deverá preencher as extremidades sobrepostas, onde se registam concentrações de tensão mais críticas sob condições de carga quase estática [155]. A implementação de um adesivo dúctil nas extremidades traduz-se na uniformização do campo de tensões ao longo de  $L_0$ , e para algumas geometrias de junta pode resultar no aumento da resistência mecânica da ligação. As restantes secções correspondem aos aderentes em alumínio.

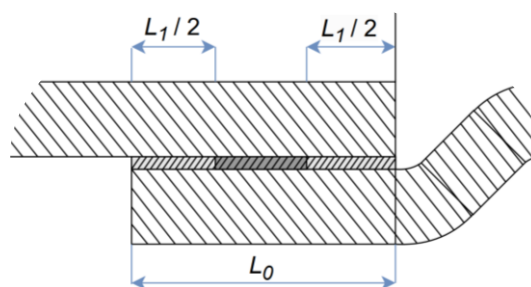


Figura 94 - Inclusão do parâmetro geométrico  $L_1$ , relativamente à geometria de base.

A Tabela 99 ilustra, em função de  $L_1$ , as diferentes configurações de juntas tubulares bi-adesivas analisadas no presente Subcapítulo. Os parâmetros de tom esverdeado representam os parâmetros inalterados face à geometria de base, já os restantes ilustram os valores que  $L_1$  pode assumir. A variação de  $L_1$  não implica o reajuste dos restantes parâmetros geométricos, mantendo-se inalterados face à configuração de referência (Subcapítulo 3.4.1).

Tabela 99 - Geometrias de juntas tubulares bi-adesivas a analisar, em função de  $L_1$ .

| Adesivos          |                       | Parâmetros geométricos |       |          |                   |          |
|-------------------|-----------------------|------------------------|-------|----------|-------------------|----------|
| Rígido (interior) | Dúctil (extremidades) | $d_{EANH}$             | $L_0$ | $t_{Ad}$ | $L_1$             | $\theta$ |
|                   |                       | [mm]                   |       |          |                   | [°]      |
| Araldite® AV138   | Araldite® 2015        | 20                     | 10    | 2        | 0                 | 45       |
|                   |                       |                        |       |          | $0,25 \times L_0$ |          |
|                   |                       |                        |       |          | $0,50 \times L_0$ |          |
|                   |                       |                        |       |          | $0,75 \times L_0$ |          |
|                   | Sikaforce® 7752       | 20                     | 10    | 2        | 0                 | 45       |
|                   |                       |                        |       |          | $0,25 \times L_0$ |          |
|                   |                       |                        |       |          | $0,50 \times L_0$ |          |
|                   |                       |                        |       |          | $0,75 \times L_0$ |          |

### 3.4.7.3.1. Condições da análise numérica e tratamento de dados

O pré-processamento das análises numéricas para o estudo de juntas tubulares bi-adesivas encontra-se disponível para consulta no APÊNDICE A. A modelação das juntas adesivas bi-adesivas é inspirada na geometria de base, e requer somente a edição do menu *partition sketch* e respetiva regeneração do modelo. Devem ser definidos os limites de uma nova secção para que possam ser definidos materiais dissimilares ao longo de  $L_0$ , de acordo com Figura 95.

Devem ser verificadas as propriedades das secções definidas no modelo de base, assim como dos parâmetros e controlos de malha definidos, com o objetivo de não desvirtuar o modelo original. Os processos de obtenção de  $ER$ , a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , a distribuição do estado de tensão ao longo de  $DN$  e a evolução de  $sdeg$  no instante correspondente a  $P_{m\acute{a}x}$  encontram-se descritos no APÊNDICE B.

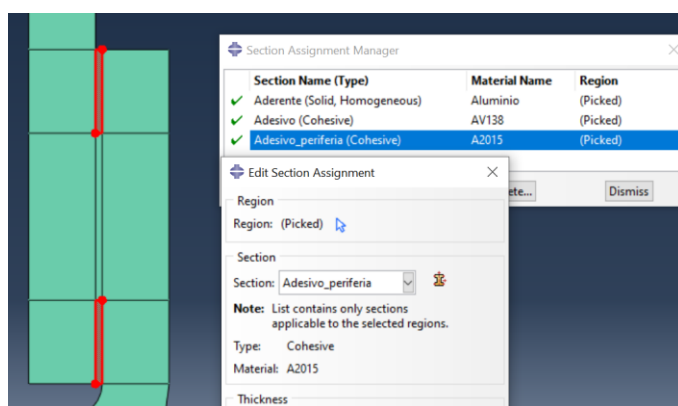


Figura 95 – Definição de uma nova secção que possibilita a atribuição de diferentes propriedades à camada adesiva.

### 3.4.7.3.2. Araldite® AV138/Araldite® 2015

A Figura 96 ilustra as curvas  $P$ - $\delta$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

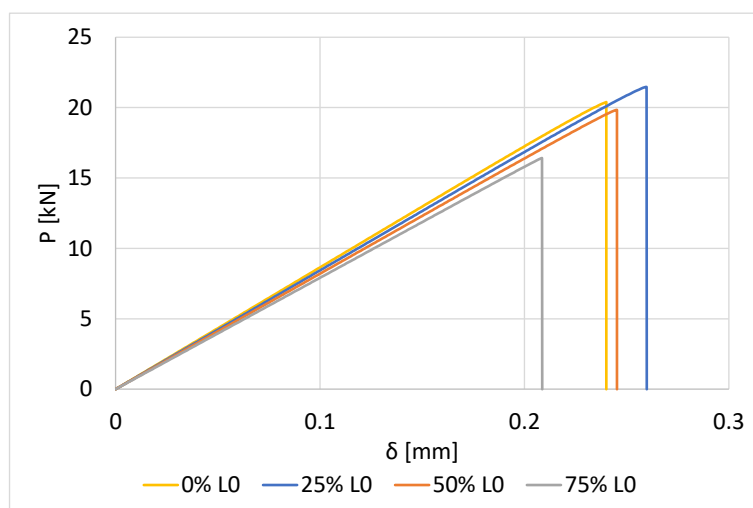


Figura 96 - Curvas  $P$ - $\delta$  em função de  $L_1$ , para o as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

De acordo com a Figura 96, para as juntas tubulares bi-adesivas de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, ocorre uma diminuição da resistência para valores de  $L_1 > 25\% L_0$ . A geometria de junta que apresenta maior resistência mecânica apresenta valores de  $L_1 = 25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 5%, relativamente à geometria de base.

A Tabela 100 ilustra o aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de  $L_1$  e de  $P_{m\acute{a}x}$ , relativamente à geometria de base. Ao variar o parâmetro geométrico  $L_1$ , a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica corresponde a uma geometria cujo valor de  $L_1 = 25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de 5,28%, relativamente à geometria de base.

Tabela 100 – Aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de  $L_1$  e de  $P_{m\acute{a}x}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

|                                | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Adesivo                        | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 5,28      | 2,72      | 19,52     |

A Tabela 101 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. Neste caso,  $\delta_{rotura}$  aumenta para  $L_1=25\% L_0$ , e diminui para valores de  $L_1>25\% L_0$ , tendo-se registado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura.

Tabela 101 – Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 8,33      | 2,08      | 12,92     |

A Tabela 102 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $ER$ , relativamente à geometria de referência. O  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $L_1=25\% L_0$ , 0,436 mm, tendo-se registado um aumento percentual de 8,33 %, relativamente à geometria de base.

Tabela 102 – Aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de referência.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 14,34     | 0,82      | 30,77     |

A junta que registou o valor mais elevado de  $ER$  utiliza  $L_1=25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $ER$  de aproximadamente 14%, relativamente à geometria de base. Estes valores estão diretamente relacionados com a obtenção das curvas  $P-\delta$  (Figura 96).

A Figura 97 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Para  $L_1=$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ . A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$  para  $L_1=0\% L_0$ , coincidente com a geometria de base. Para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, a rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias de junta analisadas. Para valores de  $L_1$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a aumentar relativamente ao  $\delta_{rotura}$  correspondente. De acordo com a Figura 97.a), para  $L_1=25\% L_0$ ,  $\delta_{IPA}=0,160$  mm e  $P_{IPA}=13497,00$  N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 61,54% do  $\delta_{rotura}$  e uma força equivalente a 62,87% de  $P_{máx}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,70%. Para  $L_1=50\% L_0$ ,  $\delta_{IPA}=0,164$  mm e  $P_{IPA}=13452,50$  N, de acordo com a Figura 97.b). O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 66,94% do  $\delta_{rotura}$  e a 67,81% de  $P_{máx}$ , respetivamente. Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 0,50%. Para  $L_1=75\% L_0$  (Figura 97.c)),  $\delta_{IPA}=0,169$  mm e  $P_{IPA}=13368,80$  N. O  $\delta_{IPA}$  equivale a 80,86% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  a 81,46% de  $P_{máx}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,20%.

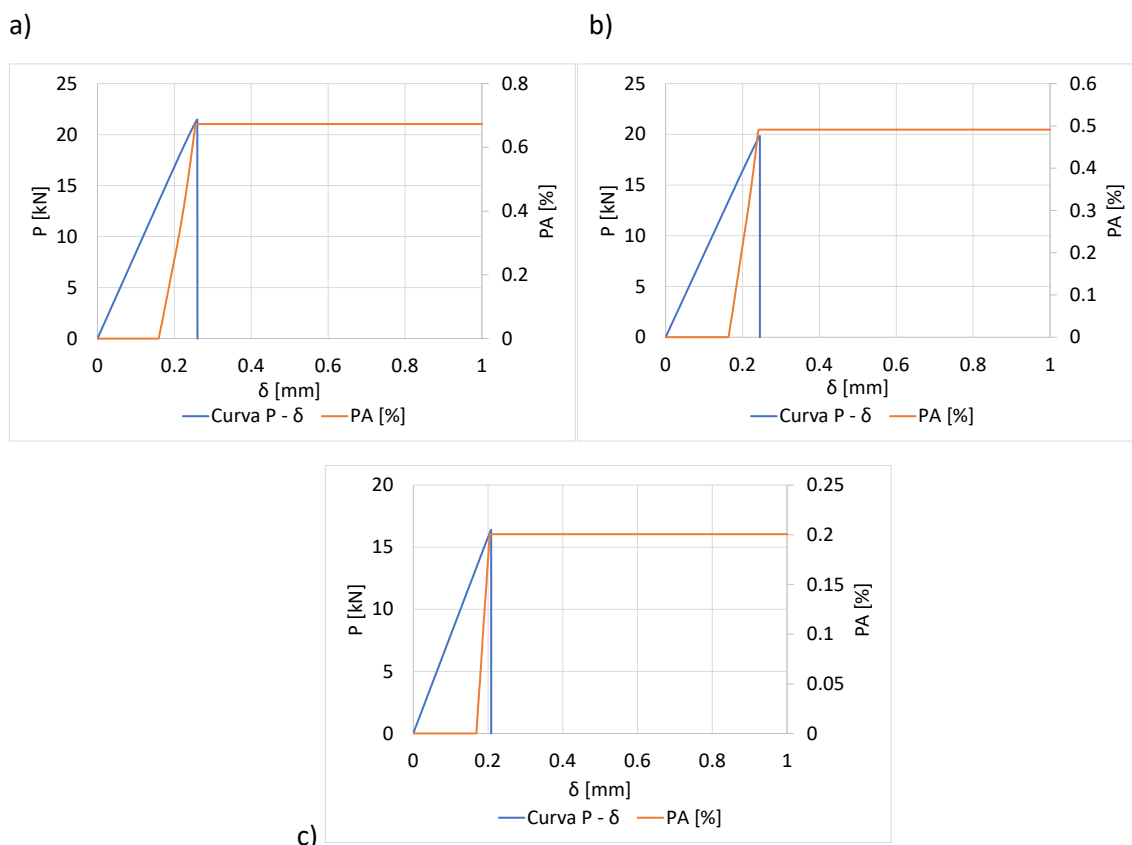


Figura 97 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

A Tabela 103 ilustra a diminuição percentual de  $PA$ , relativamente à geometria de base. Ao variar  $L_1$ , a junta adesiva que apresenta o valor mais elevado de  $PA$  utiliza  $L_1 = 25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 8%, relativamente à geometria de base.

Tabela 103 – Diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 8,08      | 21,15     | 67,77     |

A Tabela 104 ilustra o aumento percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , enquanto a Tabela 105 ilustra o aumento percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , ambas relativamente à geometria de base.

Tabela 104 - Aumento percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 5,26      | 7,89      | 11,18     |

Tabela 105 – Aumento percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 2,70      | 2,36      | 1,72      |

A Figura 98 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

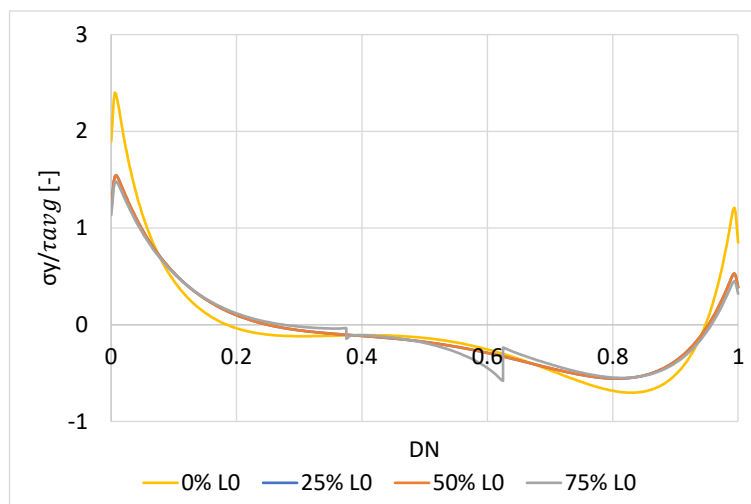


Figura 98 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

A geometria de base é a que apresenta os valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em ambas as extremidades. Os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  registados para as restantes geometrias de junta analisadas, incluindo os valores críticos, são idênticos, salvo na zona de transição entre adesivos, para a geometria de junta cujo  $L_1=75\% L_0$ . É de notar que as curvas relativas à distribuição do estado de tensão para  $L_1=25$  e  $50\% L_0$  encontram-se praticamente sobrepostas. Registou-se uma diminuição percentual dos valores críticos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 35 e 38% para  $L_1=25$  e  $75\% L_0$ , respetivamente, relativamente à geometria de base. A implementação de um adesivo dúctil nas extremidades traduz-se na uniformização do campo de tensões ao longo de  $L_0$ , sem registo de uma variação significativa para os diferentes valores de  $L_1$ .

A Tabela 106 ilustra a diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{\max}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. Na eventualidade de variar  $L_1$ , a junta que registou o valor mais elevado de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  corresponde à geometria de base.

Tabela 106 – Diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{\max}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 35,61     | 35,62     | 38,30     |

A Figura 99 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

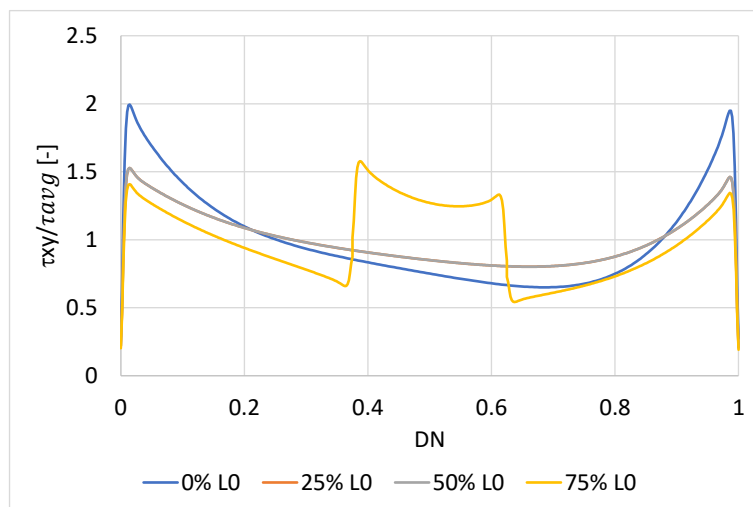


Figura 99 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

A evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  apresenta valores inferiores na região intermédia da sobreposição, exceto para  $L_1=75\% L_0$ , caso em que é notória a transição entre os diferentes adesivos pelo aparecimento de picos de tensão nas interfaces. Para as restantes configurações de junta analisadas, os valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  registaram-se nas extremidades da sobreposição adesiva. A geometria de base foi a configuração de junta que apresentou os valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em ambas as extremidades da ligação. É de notar que as curvas de tensão relativas às juntas cujo  $L_1=25$  e  $50\% L_0$  se encontram praticamente sobrepostas. Registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 21% para  $L_1=75\% L_0$ , relativamente à geometria de base.

A Tabela 107 ilustra a diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  corresponde à mesma geometria.

Tabela 107 – Diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |            |            |            |
|--------------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                                | $0\% L_0$  | $25\% L_0$ | $50\% L_0$ | $75\% L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -          | 23,36      | 23,36      | 20,85      |

A Figura 100 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015. A evolução de  $sdeg$  ocorreu de forma abrupta desde o estado não danificado até à eliminação de elementos da camada adesiva na região correspondente ao adesivo mais rígido (interior) e de forma mais ténue para as regiões destinadas ao adesivo mais dúctil (extremidades). A Figura 100 sugere que as juntas entram em rotura pelo adesivo mais frágil. A variação das curvas está diretamente relacionada com a diferença de rigidez dos adesivos utilizados e com o valor de  $PA$ , máximo para  $L_1=25\% L_0$ . A evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ ,

apesar de mais uniforme do que  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , ao longo de  $DN$ , apresenta valores mais elevados na zona intermédia, reservada ao adesivo mais rígido. As curvas que descrevem o gradiente de  $sdeg$ , ao contrário do que acontece para a geometria de base, estão associadas a valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  muito idênticos entre si, o que se traduz num declive similar das curvas que descrevem a evolução da variável em estudo. Para  $L_1=75\% L_0$ , o adesivo dúctil é dominante, e foram eliminados elementos da camada adesiva na extremidade crítica da sobreposição e nas zonas de transição entre adesivos. Para  $L_1=25$  e  $50\% L_0$ , a Figura 100 sugere que a rotura se tenha iniciado na interface entre adesivos mais próxima da extremidade crítica (ao nível das tensões), independentemente da ocorrência do dano nos elementos da camada adesiva na extremidade oposta da sobreposição. Conclui-se que para valores mais elevados de  $L_1$ , ocorre a diminuição dos gradientes da variável  $sdeg$ .

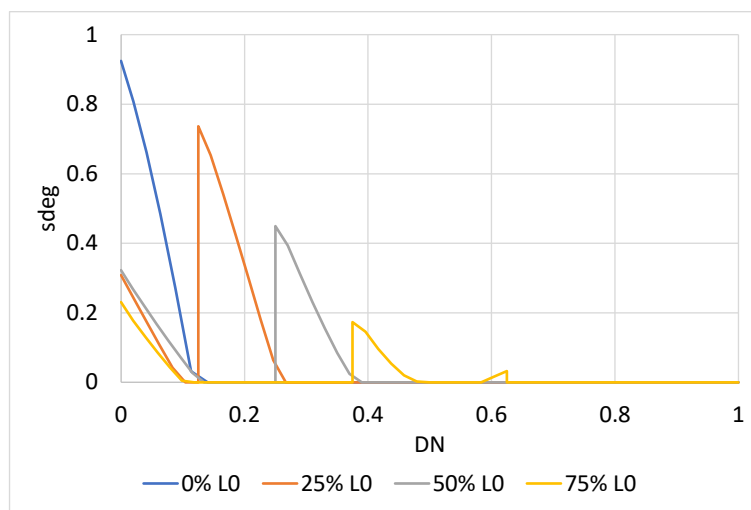


Figura 100 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

#### 3.4.7.3.3. Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752

A Figura 101 ilustra as curvas  $P-\delta$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

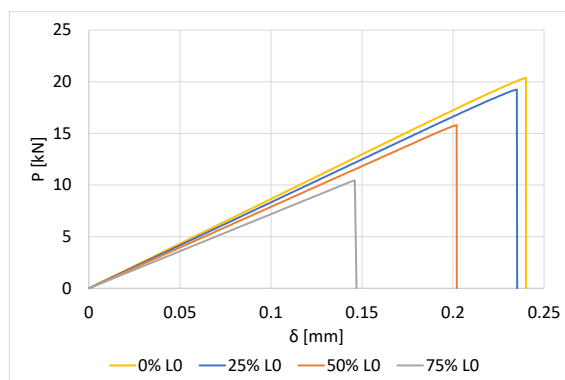


Figura 101 - Curvas  $P-\delta$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

De acordo com a Figura 101, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, ocorre uma diminuição da resistência da junta e da ductilidade com o aumento de  $L_1$ . Comparando as propriedades mecânicas dos adesivos utilizados, o Sikaforce® 7752 apresenta

uma resistência mecânica muito inferior aos demais, o que pode justificar a diminuição da resistência em juntas bi-adesivas. A geometria de junta que apresenta valores mais elevados de  $P_{máx}$  é a geometria de base. Relativamente aos valores de  $L_1$  analisados, registou-se uma diminuição percentual de  $P_{máx}$  de aproximadamente 49% para  $L_1=75\% L_0$ , relativamente à geometria de referência.

A Tabela 108 ilustra a diminuição percentual da resistência das juntas em função de  $L_1$  e de  $P_{máx}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base. Ao variar  $L_1$ , a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica coincide com a geometria de base.

Tabela 108 – Diminuição percentual da resistência da junta em função de  $L_1$  e de  $P_{máx}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |            |            |            |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                                  | $0\% L_0$  | $25\% L_0$ | $50\% L_0$ | $75\% L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 5,63       | 22,58      | 48,75      |

A Tabela 109 ilustra a diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. Relativamente à geometria de base,  $\delta_{rotura}$  diminui para valores de  $L_1$  mais elevados, tendo-se registado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura. O  $\delta_{rotura}$  foi máximo para a junta correspondente à geometria de base, 0,240 mm.

Tabela 109 - Diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |            |            |            |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                                  | $0\% L_0$  | $25\% L_0$ | $50\% L_0$ | $75\% L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 2,08       | 15,83      | 38,75      |

A Tabela 110 ilustra a diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A junta que registou o valor mais elevado de  $ER$  coincide com a geometria de base.

Tabela 110 – Diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |            |            |            |
|----------------------------------|------------|------------|------------|------------|
|                                  | $0\% L_0$  | $25\% L_0$ | $50\% L_0$ | $75\% L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 7,48       | 35,28      | 68,88      |

A Figura 102 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. Para  $L_1 =$  a)  $25\% L_0$ , b)  $50\% L_0$  e c)  $75\% L_0$ . A Figura 29 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$  para  $L_1 = 0\% L_0$ , coincidente com a geometria de base. Para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, a rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias de junta testadas. Para valores de  $L_1$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a aumentar relativamente ao  $\delta_{rotura}$  correspondente, exceto para a geometria de junta cujo  $L_1=75\% L_0$ . De acordo com a Figura

102.a), para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo  $L_1 = 25\% L_0$ ,  $\delta_{IPA} = 0,164$  mm e  $P_{IPA} = 13648,80$  N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 69,79% do  $\delta_{rotura}$  e uma força equivalente a 70,92% de  $P_{máx}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,42%. Para  $L_1 = 50\% L_0$  (Figura 102.b)),  $\delta_{IPA} = 0,173$  mm e  $P_{IPA} = 13642,40$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 85,64% do  $\delta_{rotura}$  e a 86,41% de  $P_{máx}$ , respetivamente. Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 0,14%. Para  $L_1 = 75\% L_0$ , a junta entra em rotura sem ocorrer  $PA$ , como é ilustrado na Figura 102.c).

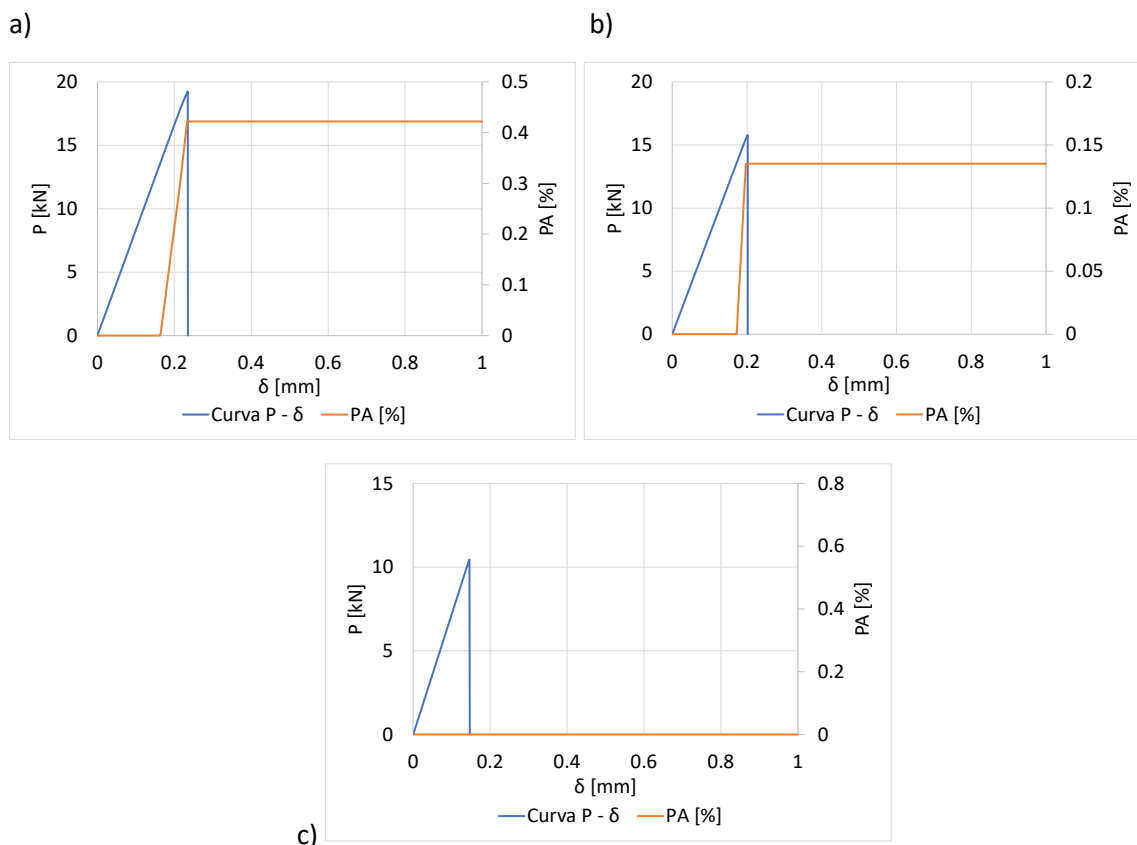


Figura 102 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

A Tabela 111 ilustra a diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A junta adesiva que apresenta o valor mais elevado de  $PA$  coincide novamente com a geometria de referência.

Tabela 111 – Diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base.

|                                  | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
| Adesivo                          | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 32,23     | 78,29     | 100,00    |

A Tabela 112 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , enquanto a Tabela 113 ilustra a variação percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , em ambos os casos relativamente à geometria de referência.

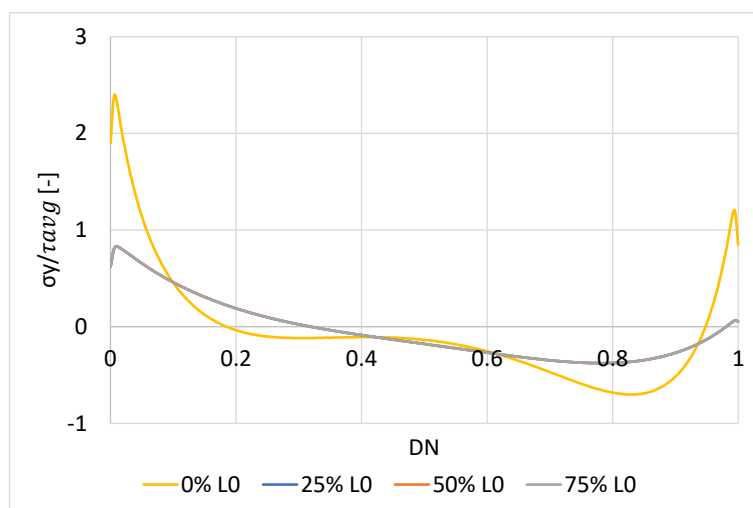
Tabela 112 – Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                  | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 7,89      | 13,82     | 100,00    |

Tabela 113 – Aumento/diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                  | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 3,85      | 3,80      | 100,00    |

A Figura 103 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

Figura 103 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

A geometria de base é a que apresenta valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em ambas as extremidades. Para as juntas bi-adesivas, uma vez que o adesivo dúctil preenche as extremidades sobrepostas da ligação, onde se registam concentrações de tensão sob condições de carga quase estática, a evolução do estado de tensão é mais uniforme quando comparada com juntas que utilizam apenas um adesivo rígido. Os valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  ao longo de  $DN$  praticamente se sobrepõem, para as restantes geometrias analisadas. Para nenhuma configuração de junta analisada foi possível identificar a transição entre os diferentes adesivos utilizados, apesar da diferença de rigidez entre os adesivos utilizados. Registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 65% para todos os valores de  $L_1$ , relativamente à geometria de base.

A Tabela 114 ilustra a diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. Na eventualidade de variar  $L_1$ , a junta que registou o valor mais elevado de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  corresponde à geometria de referência.

Tabela 114 – Diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                  | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 65,42     | 65,42     | 65,42     |

A Figura 104 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

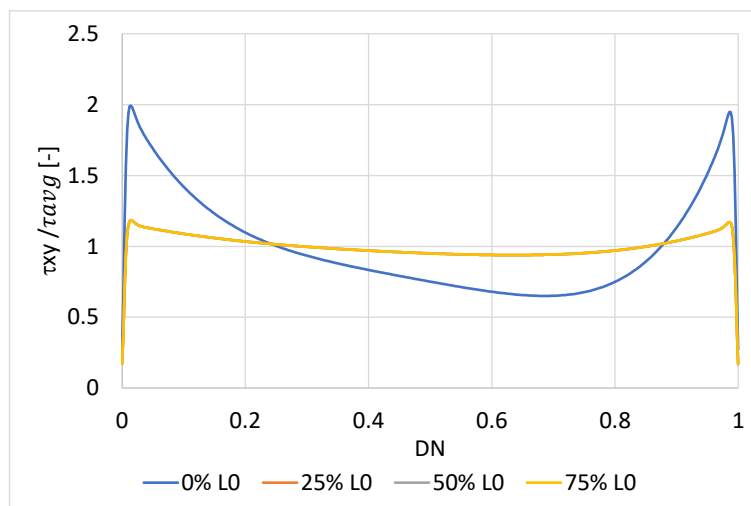


Figura 104 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

Para as diferentes juntas analisadas, e no que diz respeito à distribuição das tensões de corte, a evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  apresenta valores uniformes de tensão na região intermédia da sobreposição e variações reduzidas nas extremidades da ligação, exceto a geometria de base. Na presente análise, apesar de a diferença de rigidez dos adesivos ser tão díspar, a transição entre os diferentes adesivos não fica marcada pelo aparecimento de picos de tensão. Registou-se uma diminuição percentual dos valores críticos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 41% para todos os valores de  $L_1$ , relativamente à geometria de base, o que sugere que o desempenho das juntas deve ser independente deste parâmetro.

A Tabela 115 ilustra a diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  corresponde à geometria de referência.

Tabela 115 – Diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |           |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|-----------|
|                                  | 0% $L_0$   | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -          | 40,58     | 40,58     | 40,58     |

A Figura 105 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

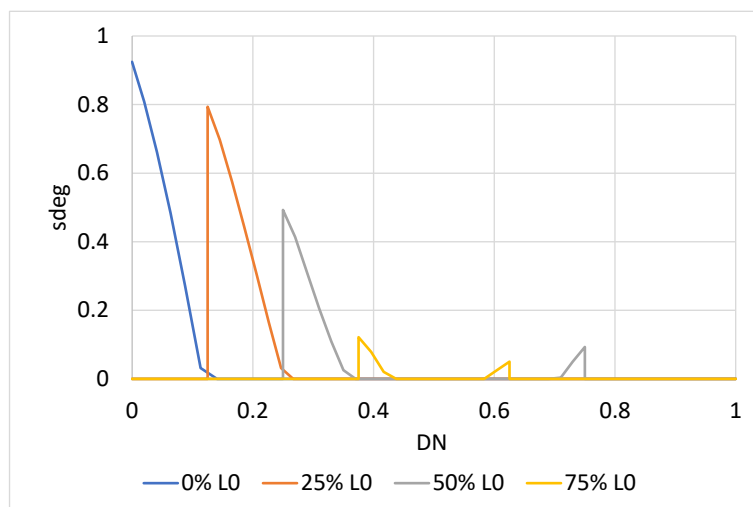


Figura 105 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $DN$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

A variação de  $sdeg$  ocorre de forma abrupta desde o estado inicial até à danificação dos elementos coesivos na região correspondente ao adesivo rígido, e não ocorre dano nas regiões reservadas ao Sikaforce® 7752. A Figura 105 sugere que todas as juntas analisadas sofrem rotura pelo adesivo mais rígido, independentemente do valor de  $L_1$  utilizado. A evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  ao longo de  $DN$  é praticamente uniforme para todas as juntas bi-adesivas analisadas numericamente, e os valores de  $\tau_{xy}$  praticamente coincidem com a  $\tau_{avg}$ . O modo de rotura é coesivo no adesivo para todas as geometrias. É de notar que as tensões de corte têm um efeito preponderante no início do dano, quando comparadas com as tensões de arrancamento, sendo que estas últimas apresentam valores muito inferiores na zona intermédia da sobreposição. As diferentes geometrias de junta analisadas apresentam valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  muito idênticos, o que se traduz num declive similar das curvas que descrevem a evolução de  $sdeg$ . Para  $L_1=50$  e  $75\% L_0$ , foram eliminados elementos coesivos da análise nas zonas de ligação entre adesivos, ao contrário da geometria cujo adesivo rígido é dominante. O valor máximo de  $sdeg$  diminui com o aumento do valor de  $L_1$ .

#### 3.4.7.4. Juntas tubulares bi-adesivas – Aderente de PRFC

O presente Subcapítulo é reservado ao estudo do efeito de um aderente não hidroformado de PRFC, no caso de se utilizarem juntas tubulares bi-adesivas. Inicialmente, foram atribuídas as propriedades elásticas e coesivas interlaminares do PRFC utilizado com base em trabalhos de investigação anteriores [5]. De seguida, mencionam-se as diferentes geometrias de junta analisadas. A definição das condições das análises numéricas e respetivo tratamento de dados encontram-se disponíveis para consulta no APÊNDICE D. Estão disponíveis, sob a forma de gráficos e tabelas, os resultados das análises numéricas para todas as geometrias de junta analisadas ao longo do presente Subcapítulo. É reservado um espaço à discussão e comparação dos valores obtidos para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138, e Araldite® 2015 ou Sikaforce® 7752, o que permite tirar conclusões muito precisas acerca da adequabilidade das mesmas às diversas solicitações a que podem estar sujeitas. O PRFC escolhido é obtido a partir do pré-impregnado SEAL® Texipreg HS 160 RM, que é considerado um material de excelência em

aplicações de elevado desempenho na indústria aeronáutica. O pré-impregnado escolhido é constituído por fibras de carbono reforçadas com resina epóxida, cuja modelação considera uma disposição unidirecional com as fibras orientadas longitudinalmente no sentido do carregamento, e o PRFC apresenta elevada resistência mecânica e rigidez específica.

A Tabela 116 ilustra as propriedades elásticas do PRFC, de acordo Campilho et al. [5].

Tabela 116 - Propriedades elásticas do PRFC. Adaptado de Campilho et al. [5].

| SEAL® Texipreg HS 160 RM |        |          |
|--------------------------|--------|----------|
| Propriedade              | Valor  | Unidades |
| $E_1$                    | 109000 | [MPa]    |
| $E_2$                    | 8819   |          |
| $E_3$                    | 8819   |          |
| $\nu_{12}$               | 0,342  | -        |
| $\nu_{13}$               | 0,342  |          |
| $\nu_{23}$               | 0,380  |          |
| $G_{12}$                 | 4315   | [MPa]    |
| $G_{13}$                 | 4315   |          |
| $G_{23}$                 | 3200   |          |

As propriedades coesivas interlaminares do PRFC encontram-se ilustradas na Tabela 117, adaptada de Araújo et al. [229]. É de notar que vão ser consideradas as propriedades da camada interlaminar para atribuição das propriedades no *software*.

Tabela 117 - Propriedades coesivas interlaminares do PRFC. Adaptado de Araújo et al. [229].

| $E$    | $G$  | $t_n^0$ | $t_s^0$ | $G_{IC}$ | $G_{IIC}$ | $\rho$               |
|--------|------|---------|---------|----------|-----------|----------------------|
| [MPa]  |      |         |         | [N/mm]   |           | [g/cm <sup>3</sup> ] |
| 108000 | 4315 | 40      | 35      | 0,39     | 0,82      | 1,227                |

Esta consideração implicaria a homogeneização da resina no interior das fibras. Uma vez que nos materiais compósitos as propriedades das fibras de reforço contribuem para cerca de 90% da resistência final do laminado, somente vão ser consideradas as propriedades das fibras. De acordo com este pressuposto, foi introduzida uma camada intralaminar e outra interlaminar no aderente não hidroformado. Os parâmetros geométricos das camadas interlaminar, a vermelho, e intralaminar, a verde, encontram-se ilustradas na Figura 106.

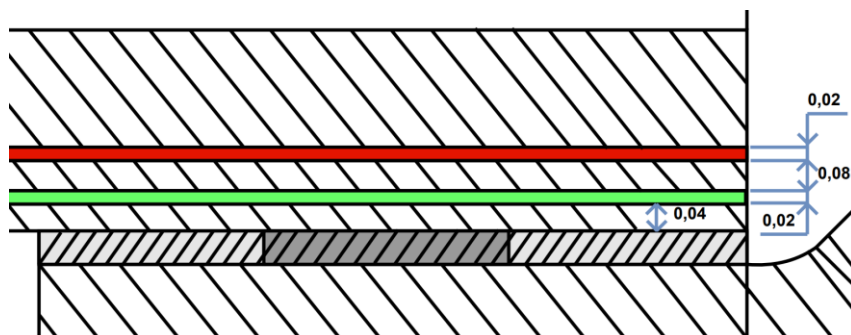


Figura 106 - Parâmetros geométricos associados às camadas interlaminares, a vermelho, e intralaminares, a verde.

### Geometrias a analisar

A Tabela 118 ilustra, em função de  $L_1$ , as diferentes configurações de juntas tubulares bi-adesivas analisadas, para o caso em que o aderente não hidroformado é de PRFC. As células de tom esverdeado representam os parâmetros inalterados face à geometria de base, já os restantes ilustram os valores que o parâmetro  $L_1$  assume ao longo do presente Subcapítulo.

Tabela 118 - Geometrias de juntas tubulares bi-adesivas a analisar em função de  $L_1$ , para o caso em que o aderente não hidroformado é de PRFC.

| Adesivos             |                          | Parâmetros geométricos |       |          |                   |          |
|----------------------|--------------------------|------------------------|-------|----------|-------------------|----------|
| Rígido<br>(interior) | Dúctil<br>(extremidades) | $d_{EANH}$             | $L_0$ | $t_{Ad}$ | $L_1$             | $\theta$ |
|                      |                          | [mm]                   |       |          |                   | [°]      |
| Araldite® AV138      | Araldite® 2015           | 20                     | 10    | 2        | 0                 | 45       |
|                      |                          |                        |       |          | $0,25 \times L_0$ |          |
|                      |                          |                        |       |          | $0,50 \times L_0$ |          |
|                      |                          |                        |       |          | $0,75 \times L_0$ |          |
|                      | Sikaforce® 7752          | 20                     | 10    | 2        | 0                 | 45       |
|                      |                          |                        |       |          | $0,25 \times L_0$ |          |
|                      |                          |                        |       |          | $0,50 \times L_0$ |          |
|                      |                          |                        |       |          | $0,75 \times L_0$ |          |

#### 3.4.7.4.1. Araldite® AV138/Araldite® 2015

A Figura 107 ilustra as curvas  $P-\delta$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. De acordo com a Figura 107, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, ocorre uma diminuição da resistência mecânica e ductilidade da junta para valores de  $L_1 > 25\% L_0$ . A geometria de junta que apresenta maior resistência mecânica apresenta um valor de  $L_1 = 25\% L_0$ . Relativamente aos valores de  $L_1$  analisados, registou-se uma diminuição percentual de  $P_{máx}$  de aproximadamente 17% para  $L_1 = 75\% L_0$ , relativamente à geometria de referência.

A Tabela 119 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $P_{máx}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. Ao variar  $L_1$ , a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza um  $L_1 = 25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $P_{máx}$  igual a 5%, relativamente à geometria de base.

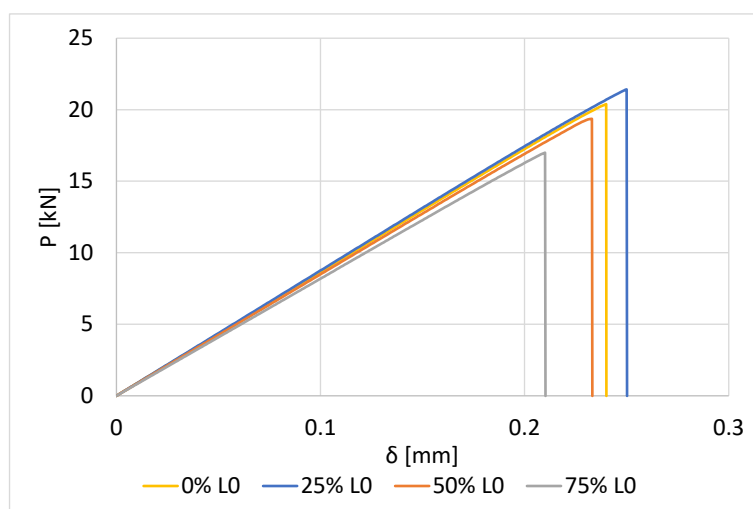


Figura 107 - Curvas  $P$ - $\delta$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 119 – Aumento/diminuição percentual da resistência da junta em função de  $L_1$  e de  $P_{m\acute{a}x}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 5,00       | 5,03      | 16,69     |

A Tabela 120 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$ , relativamente à geometria de base. Relativamente à geometria de base,  $\delta_{rotura}$  é máximo para  $L_1=25\% L_0$ , e diminui para valores de  $L_1>25\% L_0$ , tendo-se registado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura. O  $\delta_{rotura}$  foi máximo para  $L_1=25\% L_0$ , 0,250 mm, tendo-se registado um aumento percentual de 4,17%, relativamente à geometria de base.

Tabela 120 – Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 4,17       | 2,92      | 12,50     |

A Tabela 121 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $ER$  utiliza um  $L_1=25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 10%, relativamente à geometria de base.

Tabela 121 – Aumento/diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 9,80       | 7,31      | 27,33     |

A Figura 108 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

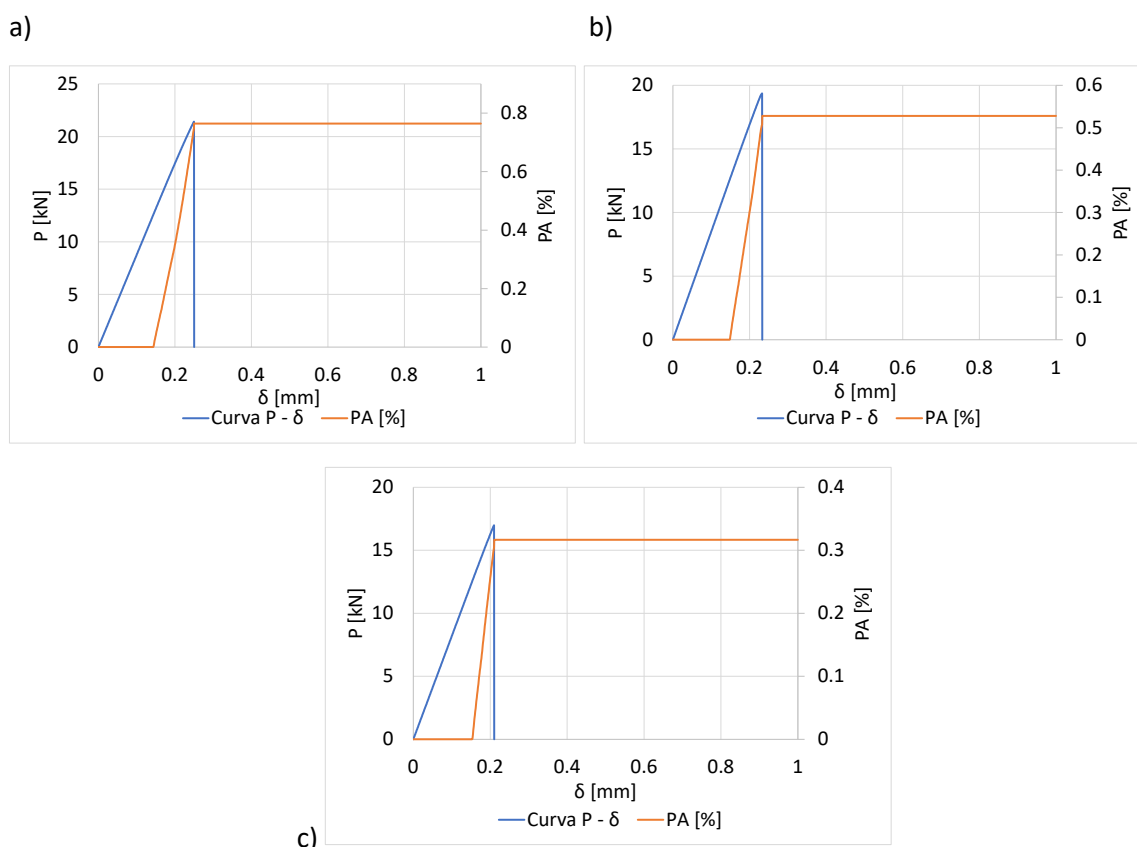


Figura 108 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

Para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, a rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias de junta analisadas. Para valores de  $L_1$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a aumentar relativamente ao  $\delta_{rotura}$  correspondente. De acordo com a Figura 108.a), para  $L_1 = 25\% L_0$ ,  $\delta_{IPA} = 0,144$  mm e  $P_{IPA} = 12611,20$  N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 57,60% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força equivalente a 58,90% de  $P_{máx}$ . Ocorreu  $PA$ , de aproximadamente 1%. Para  $L_1 = 50\% L_0$  (Figura 108.b)),  $\delta_{IPA} = 0,149$  mm e  $P_{IPA} = 12653,50$  N. O  $\delta_{IPA}$  equivale a 63,95% do  $\delta_{rotura}$  e  $P_{IPA}$  a 65,33% de  $P_{máx}$ . Registou-se um valor de  $PA$  a rondar os 0,50%. Para  $L_1 = 75\% L_0$ ,  $\delta_{IPA} = 0,154$  mm e  $P_{IPA} = 12608,00$  N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 73,33% do  $\delta_{rotura}$  e a 74,21% de  $P_{máx}$ . Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,30%, como é ilustrado na Figura 108.c).

A Tabela 122 ilustra o aumento e a diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. Na eventualidade de variar  $L_1$ , a junta adesiva que apresenta o valor mais elevado de  $PA$  utiliza um  $L_1=25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $PA$  de aproximadamente 23%, relativamente à geometria de referência.

Tabela 122 – Diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 22,70      | 16,38     | 49,17     |

A Tabela 123 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , e a Tabela 124 ilustra a diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , ambas relativamente à geometria de base.

Tabela 123 - Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 5,26       | 1,97      | 1,32      |

Tabela 124 – Diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 4,04       | 3,72      | 4,07      |

A Figura 109 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1=$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ . Os valores de  $x/L_0 \in [-3,5; -0,5]$  foram excluídos do gráfico por apresentarem tensões nulas e não acrescentarem valor à análise. A evolução dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  foi comentada com base no *path* correspondente à sobreposição adesiva, uma vez que os demais caminhos de propagação do dano não podem ser diretamente comparados com a geometria de referência (Subcapítulo 3.4.1). De acordo com a Figura 109, a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  apresenta picos de tensão nas extremidades da camada adesiva e também nas interfaces entre os adesivos utilizados. Relativamente à totalidade das geometrias analisadas, para o *path* correspondente à sobreposição adesiva, registaram-se as tensões mais elevadas na extremidade adjacente à curvatura, ao contrário do que acontece para os restantes caminhos de propagação de dano. De facto, para  $x/L_0=1$ , os valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  sugerem que a rotura tenha sido coesiva no adesivo. Todavia, para  $x/L_0=0$ , e dependendo das propriedades dos adesivos e do aderente interior, a rotura pode iniciar-se na camada intralaminar. Como existe uma maior proximidade com pontos de singularidade de tensão, isto

resulta num aumento do rácio  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , sendo que a rotura ocorre pelo material menos resistente. A análise dos diferentes valores de  $L_1$  mostra que, de acordo com a Figura 109.c), para  $L_1=75\% L_0$ , existe uma maior uniformidade de tensões na zona intermédia da sobreposição comparativamente às restantes geometrias, devido à dominância do adesivo dúctil face ao adesivo mais rígido. Registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 12% para  $L_1=75\% L_0$ , relativamente à geometria de referência.

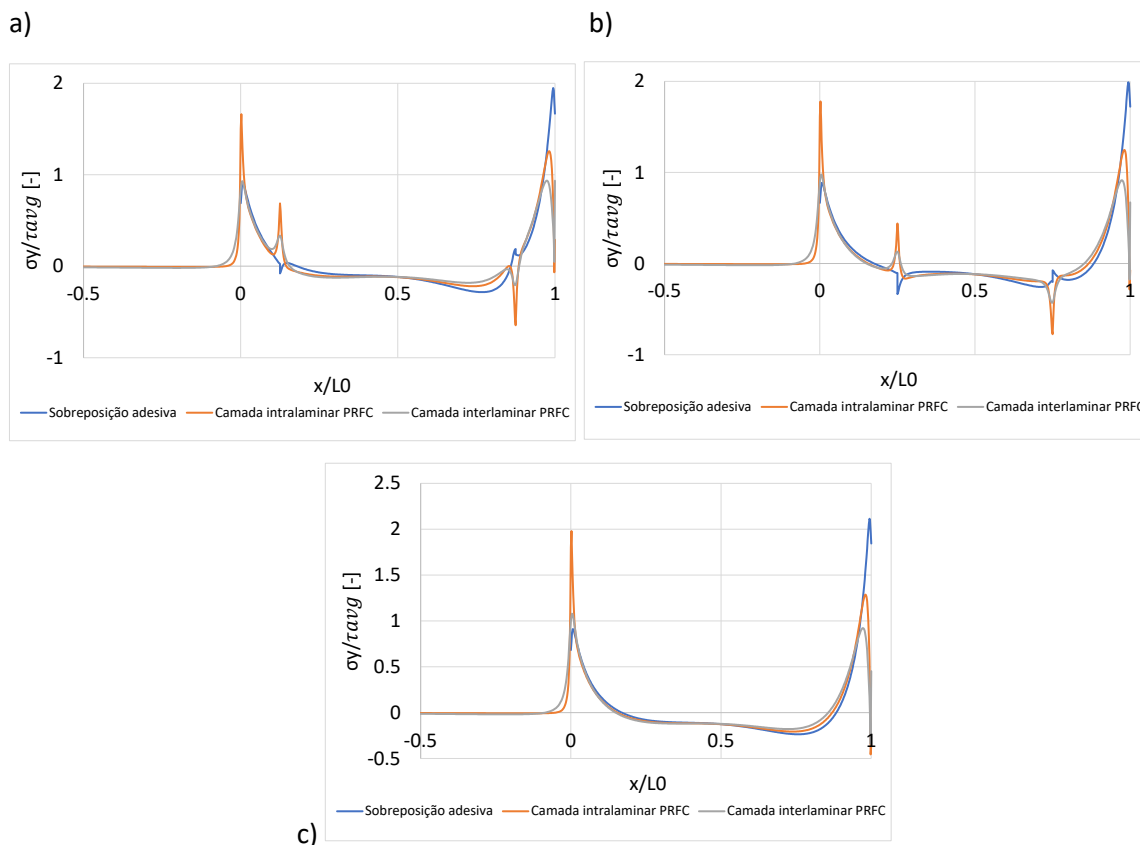


Figura 109 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

A Figura 110 ilustra a evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

A Figura 109 ilustra a diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva, relativamente à geometria de base. A Tabela 126 resume os valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

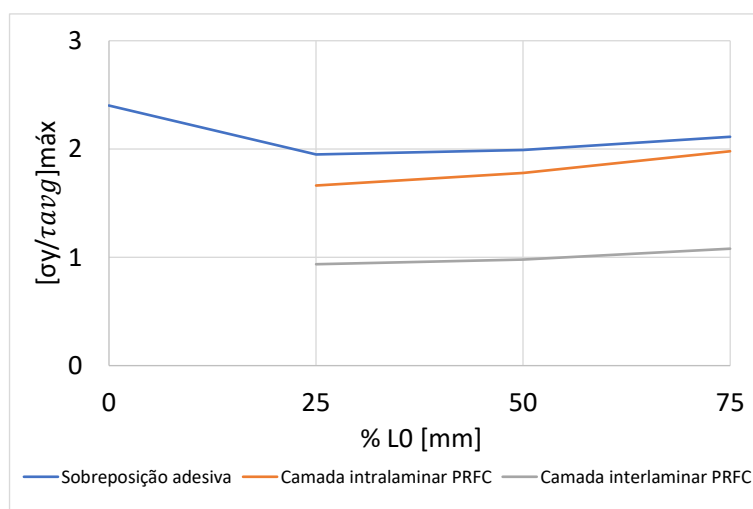


Figura 110 - Evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 125 – Diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 18,82      | 17,10     | 12,03     |

Tabela 126 - Valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|
|                                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | 1,66281    | 1,78033   | 1,97927   |

A Tabela 127 resume os valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  coincide com a geometria de base.

Tabela 127 - Valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|
|                                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | 0,93644    | 0,97931   | 1,07995   |

A Figura 111 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ . Os valores de  $x/L_0 \in [-3,5; -1,5]$  foram excluídos do gráfico por apresentarem tensões nulas e não acrescentarem valor à análise.

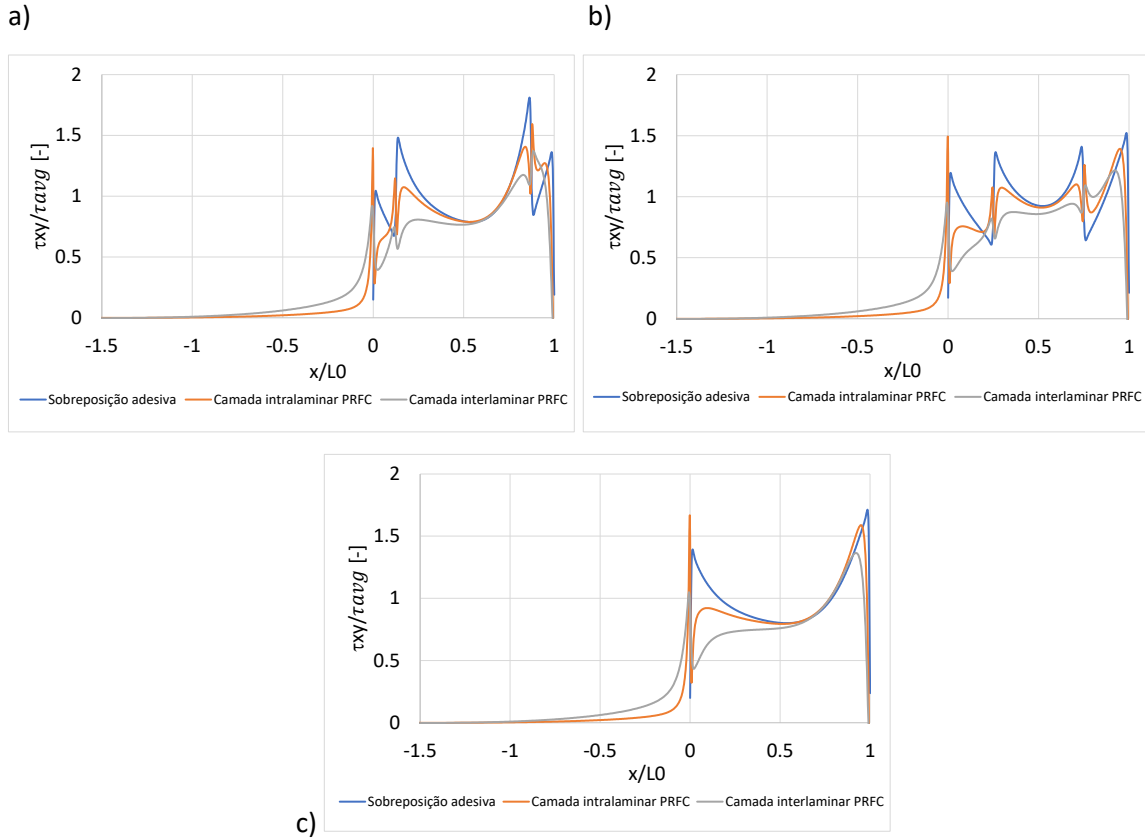


Figura 111 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

Para  $L_1 = 25\% L_0$  (Figura 111.a)), o *path* correspondente à sobreposição adesiva foi o que apresentou valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ , principalmente na transição entre os dois adesivos. O rácio das tensões é sempre superior no adesivo, e a camada intralaminar apresenta valores mais elevados do que a camada interlaminar do PRFC. De acordo com a Figura 111.b), para  $L_1 = 50\% L_0$ , registaram-se valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  muito elevados para  $x/L_0 = 0$  na camada intralaminar, o que pode indicar que esta região corresponde ao início de propagação do dano. De acordo com o caso anteriormente descrito e ilustrado na Figura 111, para  $x/L_0 = 1$ , o rácio  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  é elevado e o comportamento pode assemelhar-se ao anteriormente descrito. Para  $L_1 = 75\% L_0$ , registaram-se valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  muito elevados para  $x/L_0 = 0$  na camada intralaminar, o que pode sugerir que a rotura inicia nessa região. De acordo com a Figura 111.c), para  $x/L_0 = 1$ , o rácio  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  é elevado e o comportamento pode assemelhar-se ao descrito anteriormente. Registou-se uma diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 14% para  $L_1 = 75\% L_0$ , relativamente à geometria de base. A Figura 112 ilustra a evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

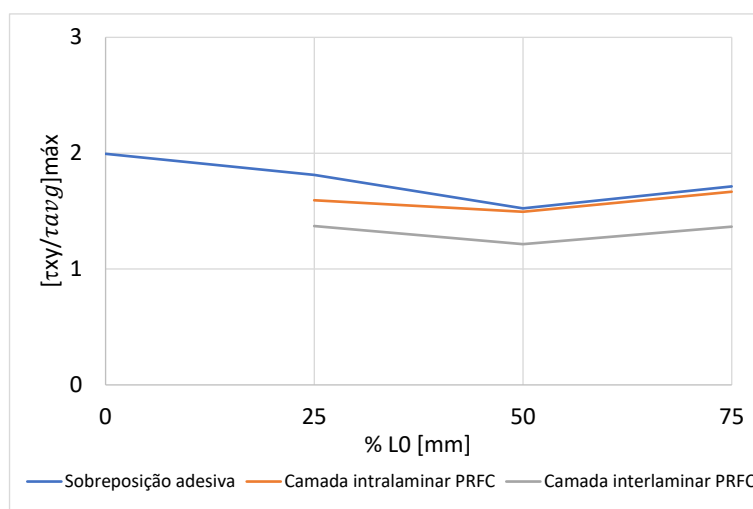


Figura 112 - Evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respectivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

A Tabela 128 ilustra a diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva, relativamente à geometria de base. A Tabela 129 resume os valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 128 – Diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 9,14       | 23,63     | 14,13     |

Tabela 129 - Valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

| Adesivo                        | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|
|                                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | 1,59417    | 1,49393   | 1,66766   |

A Tabela 130 resume os valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  coincide com a geometria de referência.

Tabela 130 - Valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

|                                | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|------------|-----------|-----------|
| Adesivo                        | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | 1,37136    | 1,21507   | 1,36480   |

A Figura 113 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

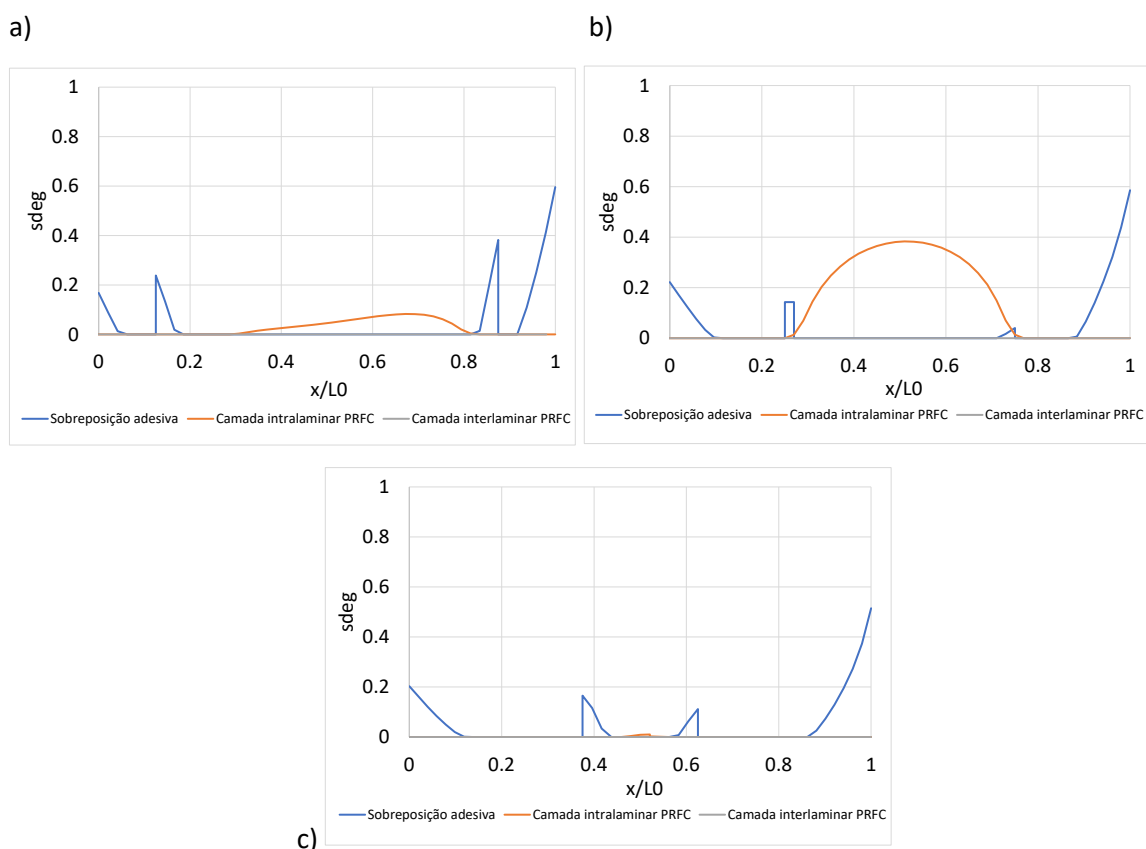


Figura 113 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

A variação de  $sdeg$  é mais acentuada na região correspondente ao adesivo mais rígido (interior) e mais ténue para as extremidades da sobreposição (Araldite® 2015). É de notar que o efeito das tensões de arrancamento é preponderante no início do dano, sendo que estas apresentam valores superiores às tensões de corte ao longo de  $DN$ . Para todas as geometrias analisadas, o gradiente de  $sdeg$  é mais abrupto na zona de transição entre adesivos. De acordo com a Figura 113.a), para  $L_1 = 25\% L_0$ , a variação das curvas está diretamente relacionada com a fragilidade do adesivo central em estudo, que é dominante relativamente ao adesivo mais dúctil, e com o facto de  $PA$  ser 23% superior ao da geometria de base. Apesar de não ser um fator preponderante no modo de rotura da junta, pode ocorrer dano de alguns elementos coesivos da camada intralaminar. Para  $L_1 = 50\% L_0$  (Figura 113.b)), ocorre uma evolução do dano mais abrupta na transição entre adesivos.

Apesar de a rotura ser maioritariamente coesiva no adesivo para a extremidade adjacente à curvatura, a análise de *sdeg* prevê uma rotura mista, pela eliminação de elementos da camada intralaminar de PRFC, coincidentes com o espaço reservado ao adesivo mais rígido. Para  $L_1=75\% L_0$  (Figura 113.c)), a variação de *sdeg* foi mais ténue, apesar de ser notório o gradiente da variável de dano na zona de transição entre os adesivos utilizados. Registou-se uma evolução do dano desprezável na camada intralaminar, e pode assumir-se que o modo de rotura foi coesivo no adesivo. As geometrias de junta apresentam valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  muito idênticos, o que se traduz num declive semelhante das curvas que descrevem a evolução da variável do dano. A evolução dos valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  sugere que a rotura tenha iniciado na extremidade adjacente à curvatura para todas as geometrias de junta analisadas, ou seja, pelo adesivo mais dúctil, ainda que tenham sido danificados elementos coesivos nas zonas de transição entre adesivos e em ambas as extremidades da sobreposição.

#### 3.4.7.4.2. Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752

A Figura 114 ilustra as curvas  $P-\delta$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

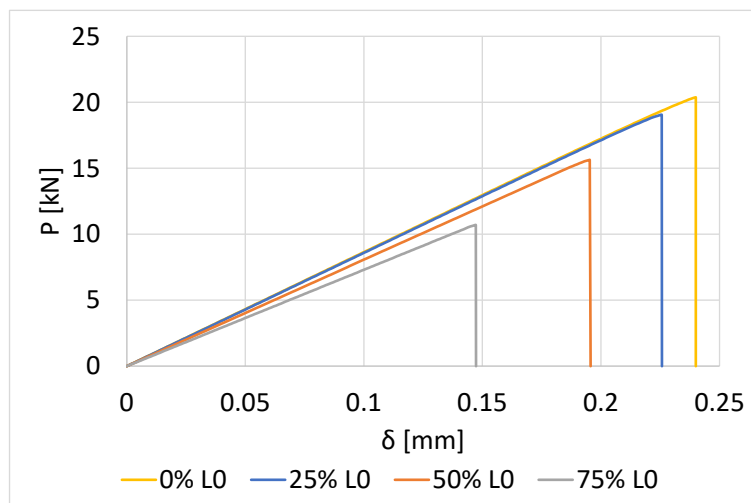


Figura 114 - Curvas  $P-\delta$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

De acordo com a Figura 114, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, ocorre uma diminuição da resistência da junta com o aumento de  $L_1$ . O Sikaforce® 7752 apresenta uma resistência mecânica muito inferior aos demais, o que pode justificar a diminuição da resistência destas juntas adesivas. A junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica é geometria de referência. A rigidez das juntas adesivas está diretamente relacionada com o declive das curvas, e a união mais rígida quanto menor for o valor de  $L_1$ .

A Tabela 131 ilustra a diminuição percentual da resistência da junta em função de  $L_1$  e de  $P_{máx}$  para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base. A junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica é a geometria de referência.

Tabela 131 – Diminuição percentual da resistência da junta em função de  $L_1$  e de  $P_{m\acute{a}x}$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                  |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -              | 6,51       | 23,32     | 47,48     |

A Tabela 132 ilustra a diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. Relativamente à geometria de base,  $\delta_{rotura}$  diminui para valores de  $L_1$  mais elevados, tendo-se registado um comportamento linear das juntas até atingirem a rotura. O  $\delta_{rotura}$  foi máximo para a junta correspondente à geometria de base, 0,240 mm.

Tabela 132 – Diminuição percentual de  $\delta_{rotura}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                        | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|--------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/Araldite® 2015 | -              | 5,83       | 18,75     | 38,75     |

A Tabela 133 ilustra a diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $ER$  corresponde à geometria de referência, em concordância com as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas.

Tabela 133 – Diminuição percentual de  $ER$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                  |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -              | 12,10      | 37,91     | 68,17     |

A Figura 115 ilustra a evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1$ = a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ . Para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, a rotura da junta foi coesiva no adesivo, para todas as geometrias de junta analisadas. Para valores de  $L_1$  mais elevados, o valor de  $\delta_{IPA}$  tende a aumentar relativamente ao  $\delta_{rotura}$  correspondente, exceto para a geometria de junta cujo valor de  $L_1$ =75%  $L_0$ . De acordo com a Figura 115.a), para  $L_1$ =25%  $L_0$ ,  $\delta_{IPA}$ =0,151 mm e  $P_{IPA}$ =12976,70 N. O início de  $PA$  ocorre para um  $\delta$  correspondente a 66,81% do  $\delta_{rotura}$  e para uma força igual a 68,06% de  $P_{m\acute{a}x}$ . Registou-se um valor de  $PA$  de aproximadamente 0,46%. Para  $L_1$ =50%  $L_0$  (Figura 115.b)),  $\delta_{IPA}$ =0,162 mm e  $P_{IPA}$ =13080,7 N. O  $\delta_{IPA}$  e  $P_{IPA}$  correspondem a 83,08% do  $\delta_{rotura}$  e a 83,65% de  $P_{m\acute{a}x}$ , respetivamente. Ocorreu  $PA$ , na ordem dos 0,19%. Para  $L_1$ =75%  $L_0$  (Figura 115.c)) não ocorreu  $PA$ .

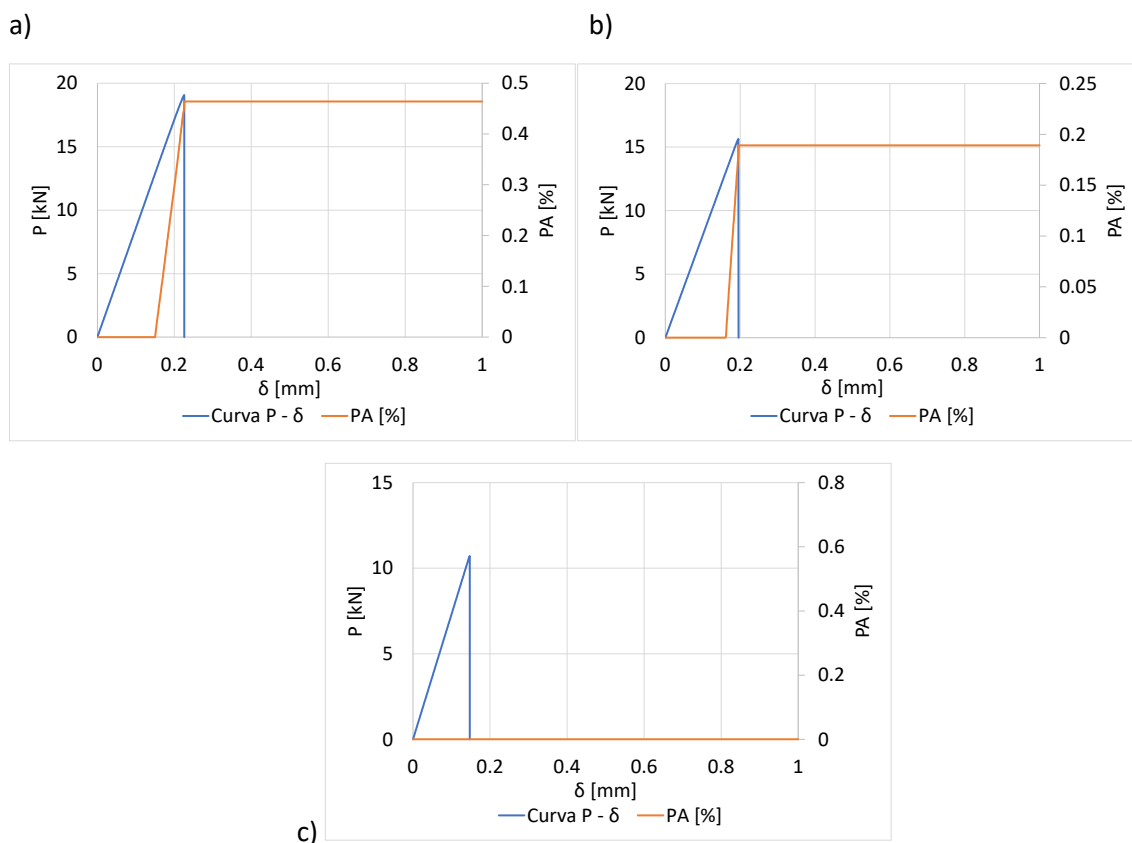


Figura 115 - Evolução de  $P$  e  $PA$  no nó crítico em função de  $\delta$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

A Tabela 134 ilustra a diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A junta adesiva que apresenta o valor mais elevado de  $PA$  é a geometria de referência.

Tabela 134 - Diminuição percentual de  $PA$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                  |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -              | 25,48      | 69,62     | 100,00    |

A Tabela 135 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , e a Tabela 136 a diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , ambas relativamente à geometria de base.

Tabela 135 - Aumento/diminuição percentual de  $\delta_{IPA}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                  |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -              | 0,66       | 6,58      | 100,00    |

Tabela 136 – Diminuição percentual de  $P_{IPA}$  em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                  |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -              | 1,26       | 0,47      | 100,00    |

A Figura 116 ilustra a distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ . Os valores de  $x/L_0 \in [-3,5; -0.5]$  foram excluídos do gráfico por apresentarem tensões nulas e não acrescentarem valor à análise. A evolução dos valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  foi comentada com base no *path* correspondente à sobreposição adesiva, uma vez que os demais caminhos de propagação do dano não podem ser diretamente comparados com a geometria de referência proposta no Subcapítulo 3.4.1.

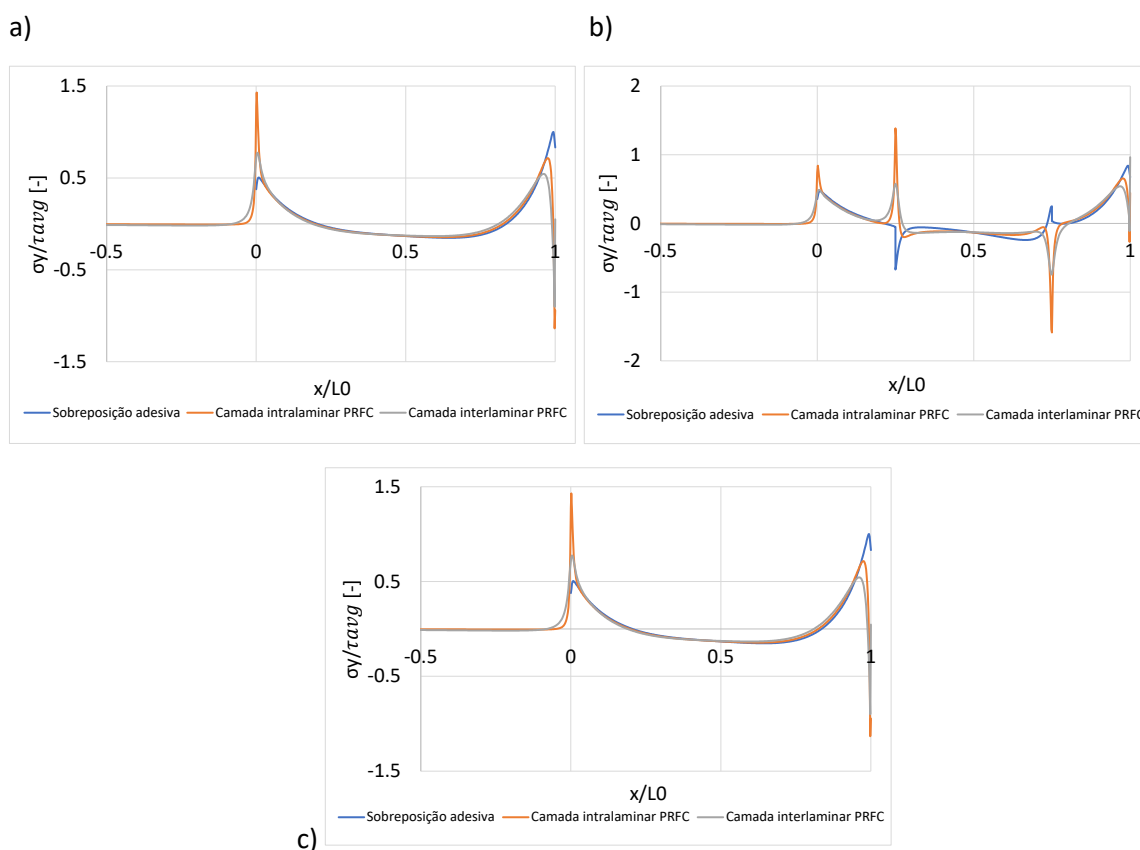


Figura 116 - Distribuição de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

Relativamente aos três adesivos analisados, para o *path* correspondente à camada adesiva, registaram-se as tensões mais elevadas na extremidade adjacente à curvatura, ao contrário dos restantes caminhos de propagação do dano. De acordo com a Figura 116, para  $x/L_0 = 0$ , e dependendo das propriedades dos adesivos e do aderente interior, a rotura pode iniciar-se na camada intralaminar, e como existe uma maior proximidade com pontos de singularidade de tensão, isto resulta num aumento do rácio  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , sendo que a rotura ocorre pelo material menos

resistente. De acordo com a Figura 116.a), para  $L_1=25\% L_0$  e  $x/L_0=1$ , os valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  sugerem que a rotura ocorre pela camada de adesivo. Para  $L_1=25\% L_0$ , existe uma maior uniformidade de tensões na zona intermédia da sobreposição, verificando-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 58%, relativamente à geometria de base. Para  $L_1=50\% L_0$  e  $x/L_0=1$ , de acordo com a Figura 116.b), os valores críticos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  sugerem que a rotura ocorre no adesivo. Neste caso, ocorreu uma diminuição percentual dos picos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 65%, relativamente à geometria de base. Para a geometria cujo  $L_1=75\% L_0$  (Figura 116.c)), na zona intermédia da sobreposição existe uma maior uniformidade de tensões, devido à dominância do adesivo dúctil face ao adesivo mais frágil na área de sobreposição. Registou-se uma diminuição percentual dos valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  de aproximadamente 58% para  $L_1=75\% L_0$ , relativamente à geometria de base. Face aos diferentes valores de  $L_1$  analisados, não existe uma tendência de variação evidente das tensões de arrancamento. A Figura 117 ilustra a evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

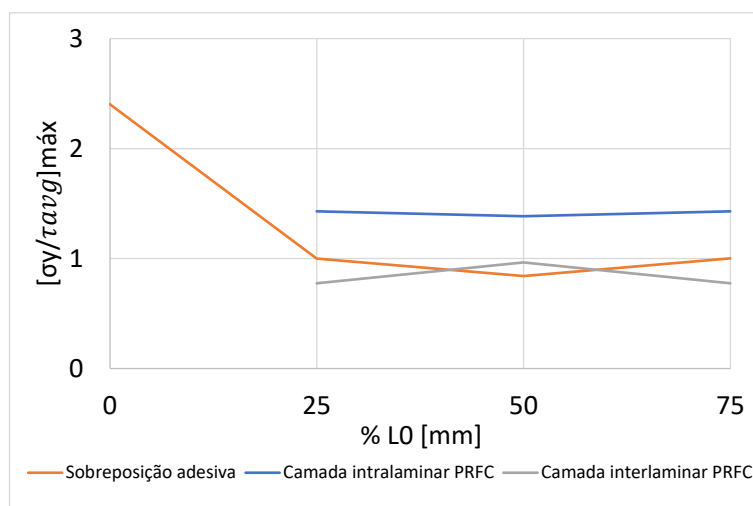


Figura 117 - Evolução dos valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

A Tabela 137 ilustra a diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva, relativamente à geometria de base. A Tabela 138 resume os valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 137 – Diminuição percentual de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | Geometria base | $L_1$ [mm] |            |            |
|----------------------------------|----------------|------------|------------|------------|
|                                  |                | $25\% L_0$ | $50\% L_0$ | $75\% L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -              | 58,33      | 64,98      | 58,32      |

Tabela 138 - Valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{\max}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

|                                  | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|
| Adesivo                          | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | 1,42956    | 1,38408   | 1,42937   |

A Tabela 139 resume os valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{\max}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Ao variar  $L_1$ , a junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  coincide com a geometria de referência.

Tabela 139 - Valores de  $[\sigma_y/\tau_{avg}]_{\max}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

|                                  | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|
| Adesivo                          | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | 0,77494    | 0,96453   | 0,77499   |

A Figura 118 ilustra a distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ . Os valores de  $x/L_0 \in [-3,5; -1,5]$  foram excluídos do gráfico por apresentarem tensões nulas e não acrescentarem valor à análise. A evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  apresenta valores inferiores na região intermédia da sobreposição, embora não seja notória a transição entre adesivos para  $L_1 = 25$  e 75%  $L_0$ . De acordo com a Figura 118, não é possível tirar conclusões clarividentes acerca do modo de rotura das juntas adesivas. O *path* correspondente à sobreposição adesiva foi o que apresentou valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  mais elevados na extremidade adjacente à curvatura. De acordo com a Figura 118.a), registaram-se valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  muito elevados para  $x/L_0 = 0$  na camada intralaminar, o que sugere que a rotura pode iniciar nessa região. Para  $x/L_0 = 1$ , o rácio  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  é elevado para a camada intralaminar, o que indica que a rotura poderá ocorrer no PRFC, na eventualidade de se verificar uma menor tenacidade face à camada adesiva. Para  $L_1 = 50\%$   $L_0$ , o gradiente de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  apresenta valores inferiores na região intermédia da sobreposição e é notória a transição entre os diferentes adesivos pelo aparecimento de picos de tensão nas interfaces. O *path* correspondente à sobreposição adesiva foi o que apresentou valores mais críticos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ , principalmente na transição entre os adesivos utilizados. A Figura 118.b) sugere que a rotura poderá ser coesiva no adesivo na transição entre os diferentes adesivos, e é de notar que o rácio  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  é predominante face ao efeito das tensões de arrancamento. Para  $L_1 = 50\%$   $L_0$ , registaram-se os valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ , em comparação com as restantes geometrias analisadas, tendo-se registado um aumento percentual de aproximadamente 16%, quando comparado com a geometria de base. De acordo com a Figura 118.c), para  $L_1 = 75\%$   $L_0$ , o *path* correspondente à sobreposição adesiva foi o que apresentou valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  mais elevados na extremidade adjacente à curvatura. Registaram-se valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  muito elevados para  $x/L_0 = 0$  para o caso

da camada intralaminar, o que sugere que a rotura inicia nessa região. Para  $x/L_0=1$ , o rácio  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  é elevado para a camada intralaminar, o que indica que a rotura poderá ocorrer pelo compósito, na eventualidade de se verificar uma menor tenacidade relativamente à camada adesiva. Registou-se uma diminuição percentual dos valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  de aproximadamente 37% para  $L_1=75\% L_0$ , relativamente à geometria de base.

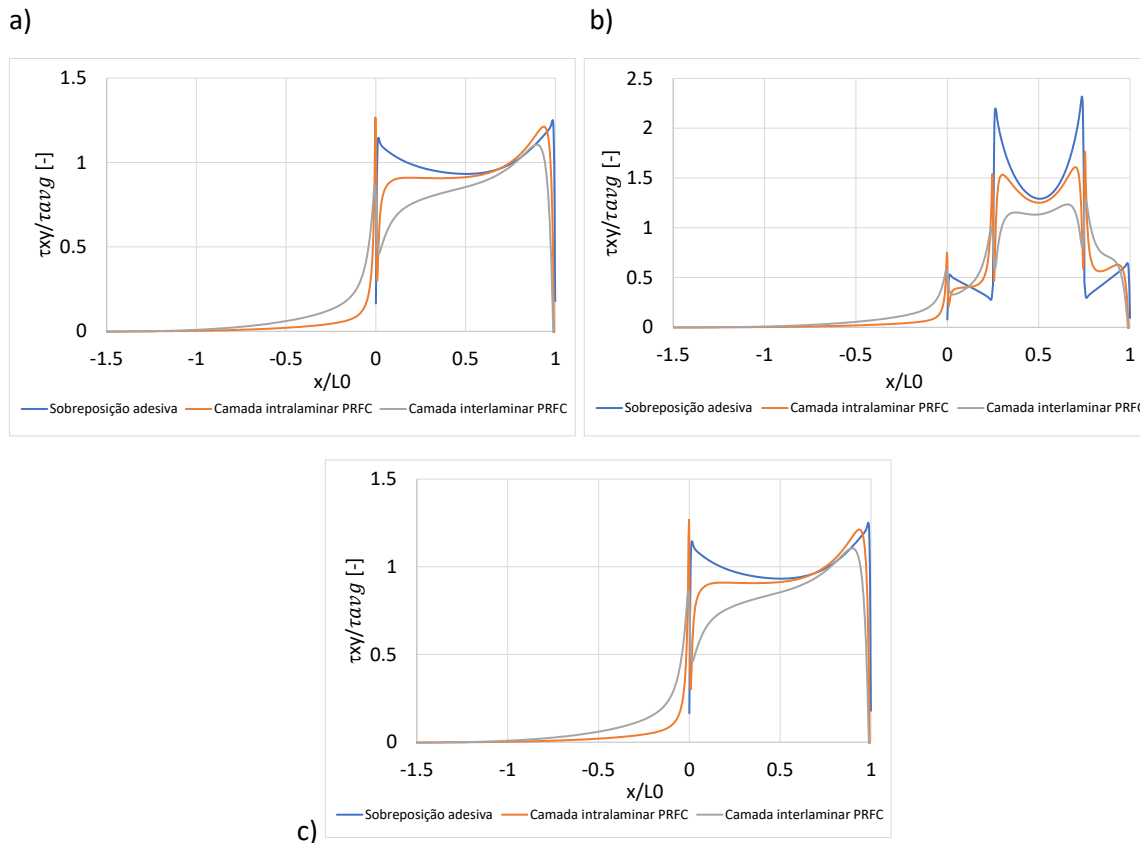


Figura 118 - Distribuição de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1$ = a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

A Figura 119 ilustra a evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

A Figura 140 ilustra o aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva, relativamente à geometria de base. A Tabela 141 resume os valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

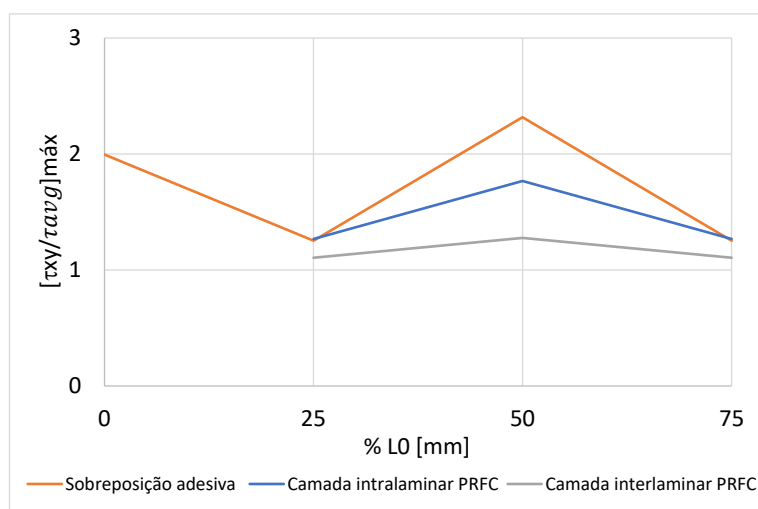


Figura 119 - Evolução dos valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e dos *paths* correspondentes à sobreposição adesiva, camada intralaminar de PRFC e camada interlaminar de PRFC, respetivamente, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 140 – Aumento/diminuição percentual de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à sobreposição adesiva para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| Adesivo                          | Geometria base | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|----------------|------------|-----------|-----------|
|                                  |                | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | -              | 37,21      | 16,20     | 37,21     |

Tabela 141 - Valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada intralaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|
|                                  | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | 1,26721    | 1,76590   | 1,26730   |

A Tabela 142 resume os valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. A junta adesiva que registou o valor mais elevado de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  corresponde à geometria cujo  $L_1=50\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de aproximadamente 16%, relativamente à geometria de base.

Tabela 142 - Valores de  $[\tau_{xy}/\tau_{avg}]_{máx}$  obtidos em função de  $L_1$  e do *path* correspondente à camada interlaminar de PRFC, para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

| Adesivo                          | $L_1$ [mm] |           |           |
|----------------------------------|------------|-----------|-----------|
|                                  | 25% $L_0$  | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Araldite® AV138/ Sikaforce® 7752 | 1,10570    | 1,27668   | 1,10568   |

A Figura 120 ilustra a evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

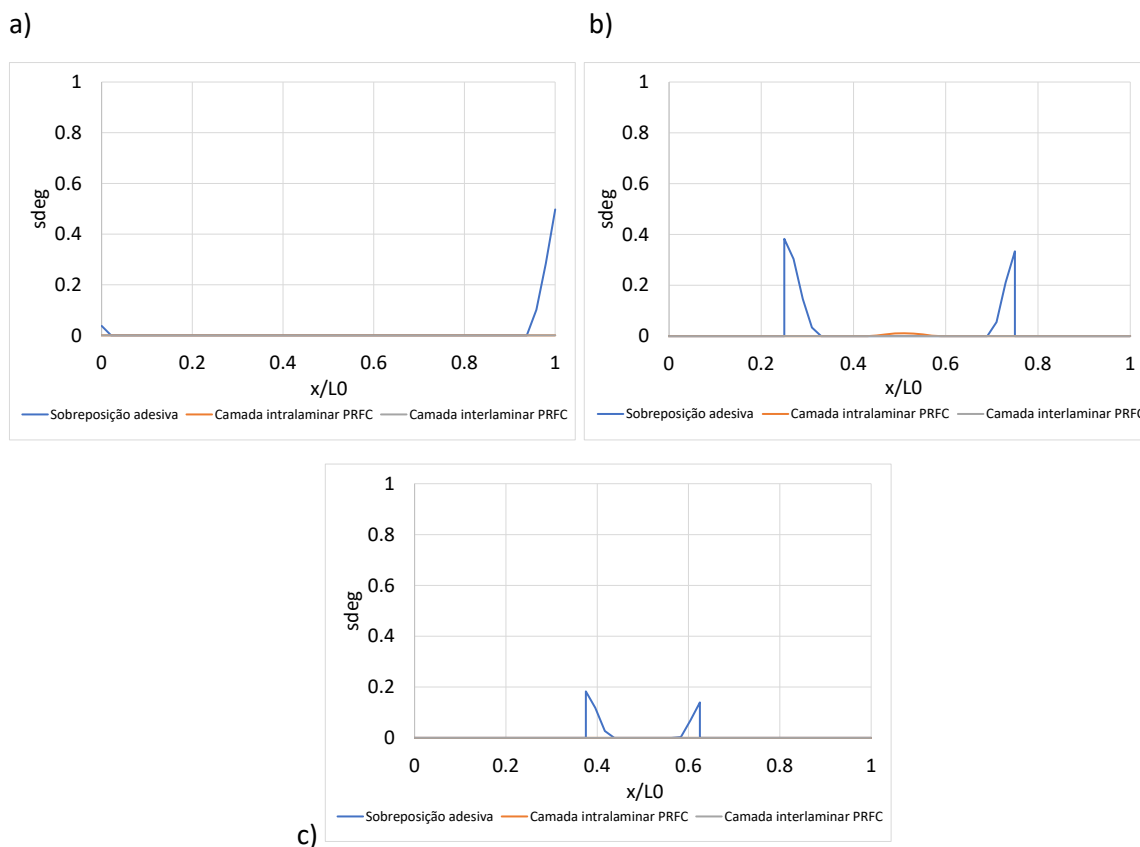


Figura 120 - Evolução de  $sdeg$  em função de  $L_1$  e ao longo de  $x/L_0$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC. Para  $L_1 =$  a) 25%  $L_0$ , b) 50%  $L_0$  e c) 75%  $L_0$ .

A variação de  $sdeg$  ao longo de  $DN$  é dissimilar para as diferentes geometrias de junta analisadas. É de notar que as tensões de arrancamento e de corte apresentam valores críticos nas extremidades da sobreposição. De acordo com a Figura 120.a), para  $L_1 = 25\% L_0$ , o gráfico sugere que a rotura ocorre na extremidade adjacente à curvatura e no adesivo mais dúctil, independentemente da eliminação de elementos coesivos na extremidade oposta. Para  $L_1 = 50\% L_0$  (Figura 120.b)), as tensões de corte ao longo da camada adesiva são o principal fator a considerar para justificar o modo de rotura. Apesar de a rotura ser coesiva no adesivo, verifica-se uma pequena região danificada na camada interlaminar, coincidente com a região intermédia da sobreposição adesiva. A evolução de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  ao longo de  $DN$  é significativa, quando comparada com as restantes geometrias, o que se traduz na variação mais abrupta da variável em estudo. Para  $L_1 = 75\% L_0$  (Figura 120.c)), o modo de rotura volta a ser coesivo nas zonas de transição entre adesivos, e a dominância do adesivo mais dúctil (Sikaforce® 7752) não altera o comportamento de rotura. Para esta combinação de adesivos, observa-se uma expectável alteração do local de iniciação do dano, que não se verificou no Subcapítulo anterior.

### 3.5. Análise de mercado

O Subcapítulo 3.5 foi criado com o objetivo de realizar uma análise de mercado que acrescenta valor ao trabalho de investigação e à literatura existente, e por fim validar se as propostas de valor são passíveis de serem implementadas, do ponto de vista económico e industrial. Para tal efeito, foi projetado um molde que permite obter os aderentes hidroformados, seguindo-se de uma análise dos custos de maquinagem, das matérias-primas, ferramentas e processos de fabrico. Até então, o presente estudo abrange um conjunto de análises numéricas que permitem determinar os parâmetros estruturais das juntas adesivas propostas, o que permite avaliar o contributivo de uma variável nas propriedades mecânicas da ligação. No entanto, é de notar que as empresas procuram minimizar os custos de fabrico e obter uma configuração de geometria ótima. A melhoria das propriedades mecânicas de algumas das juntas analisadas relativamente à geometria de referência, pode ser insuficiente para justificar o investimento do ponto de vista económico e industrial. Na eventualidade de os ganhos percentuais de resistência mecânica e ductilidade serem desproporcionais face às alterações geométricas propostas, pode ser benéfico optar por uma configuração que não implique o fabrico de moldes, trabalho de maquinagem suplementar, excessos de adesivo em forma de filete, entre outros.

É de notar que a presente análise de mercado não considera as geometrias de junta analisadas no Subcapítulo 3.4.6, independentemente dos ganhos percentuais de resistência e ductilidade para as geometrias propostas pelo MT. A inclusão destas geometrias desvirtuaria o estudo do efeito da variação dos parâmetros geométricos de forma individual, uma vez que as geometrias analisadas pelo modelo estatístico resultam da variação dos três fatores de controlo mais influentes nas propriedades mecânicas das juntas de ligação adesiva. A análise de mercado considera os custos de operação das máquinas, a mão-de-obra qualificada, trabalho de maquinagem suplementar e uma série de produção de 5000 juntas adesivas, ou seja, um volume de aderentes que justifica o investimento num molde para hidroformar os aderentes exteriores. A revisão bibliográfica do processo de hidroformagem pode ser consultada no Subcapítulo 2.4, e os desenhos técnicos para fabrico do molde proposto encontram-se disponíveis para consulta no APÊNDICE E. Se forem consideradas 8 horas de trabalho diárias e em média 22 dias úteis por mês, a cadência de produção do molde para hidroformagem ronda as 14 unidades/hora. O molde para hidroformagem foi projetado de modo a hidroformar dois aderentes de alumínio em simultâneo, ou seja, obter um total de 28 aderentes/hora.

A Figura 121 ilustra o molde de hidroformagem em vista explodida, o que permite auxiliar a visualização dos diferentes componentes projetados. Os componentes numerados correspondem à parte inferior do molde (1), parte superior do molde (2), perfil tubular de alumínio (3), pistão/êmbolo (4), parafusos de cabeça oca hexagonal (5) e pinos cilíndricos (6).

De acordo com as fichas técnicas dos adesivos utilizados, passíveis de consulta nos ANEXOS, obtiveram-se os valores correspondentes à densidade de cada um. De acordo com o revendedor oficial de adesivos estruturais SILMID [230], o preço dos adesivos por *kg* encontra-se ilustrado na Tabela 143. O fornecedor foi contactado em maio de 2023, e o preço estipulado considera a mistura dos dois componentes de cada adesivo estrutural, misturados na proporção adequada. Uma vez que os adesivos não são comercializados em quantidades equivalentes, foi necessário interpolar de forma linear a tabela de preços estipulados para cada adesivo, de maneira a facilitar os cálculos.

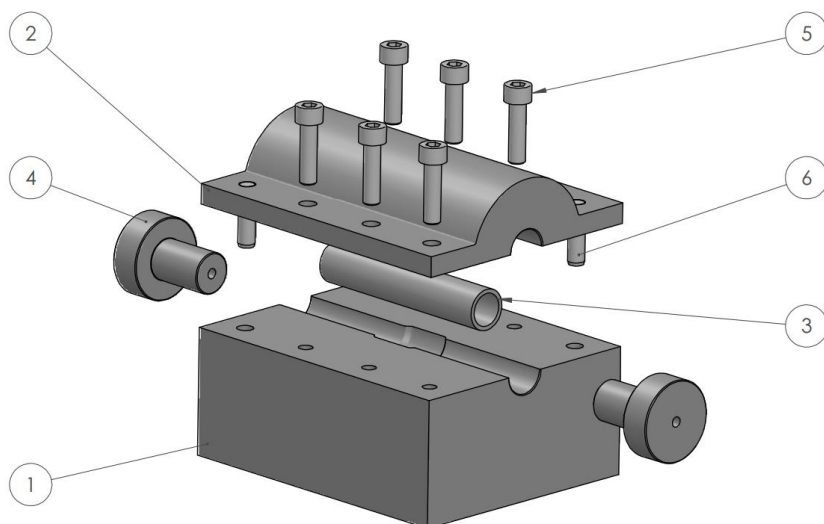


Figura 121 - Molde de hidroformagem em vista explodida.

Tabela 143 - Preço dos adesivos por kg, de acordo com o revendedor oficial de adesivos estruturais SILMID [230].

| Adesivo         | [€/kg] |
|-----------------|--------|
| Araldite® AV138 | 140,04 |
| Araldite® 2015  | 106,59 |
| Sikaforce® 7752 | 118,05 |

De acordo com o fabricante Alumeco Group [231], o preço dos perfis tubulares em alumínio com a referência “Round Tube - EN AW - 6082 - Material id: 1015773” apresenta um valor médio, calculado em função da geometria de referência, de aproximadamente 48,88 €/kg. Este material apresenta  $\rho=2,700 \text{ g/cm}^3$  [232].

#### Aderentes não hidroformados de PRFC

Relativamente às propostas de alterações geométricas que incluem aderentes não hidroformados de PRFC, foi necessário obter o custo por aderente. De acordo com Araújo et al. [229], o valor de  $\rho_{PRFC}=1,227 \text{ g/cm}^3$ . Desta forma, e uma vez que as fibras de carbono pré-impregnadas em epóxico (SEAL® Texipreg HS 160RM) apresentam uma espessura de 0,15 mm, foi necessário calcular o número de camadas por aderente, que se estabelece em 14 camadas, por excesso. Para efetuar este cálculo, considerou-se o perímetro do aderente não hidroformado utilizado na geometria de base, segundo o valor do raio médio do aderente, e o comprimento deste para calcular a área de uma camada de PRFC, igual a  $2491,7 \text{ mm}^2$ . O preço de cada aderente de PRFC foi determinado através do produto da área de uma camada de PRFC por 14 (camadas necessárias para definir a espessura estipulada) e pelo preço definido pelo fabricante [233], igual a 89,54 €/m<sup>2</sup>. O preço final de cada aderente estabelece-se em aproximadamente 2,95€.

De acordo com a Figura 122, e com exceção do volume da secção correspondente à curvatura obtida pelo processo de hidroformagem, o volume das restantes secções foi determinado diretamente a partir do *software*. É de notar que as juntas adesivas tubulares são obtidas em torno de um eixo de revolução. O volume das partições não concordantes com as direções ortogonais no plano deve ser determinado pelo produto da área das faces seleccionadas e o comprimento da

circunferência descrita pelo seu baricentro [234]. O baricentro pode ser determinado pelos princípios da geometria descritiva, e o *software* permite traçar linhas auxiliares sem desvirtuar os modelos originais e determinar a distância do baricentro ao eixo de revolução (Figura 123).

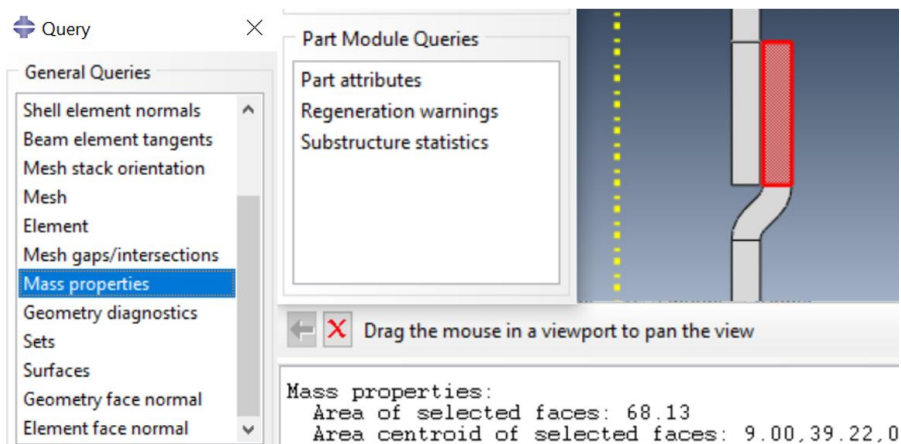


Figura 122 – Determinação do volume das partições concordantes com as direções ortogonais no plano.

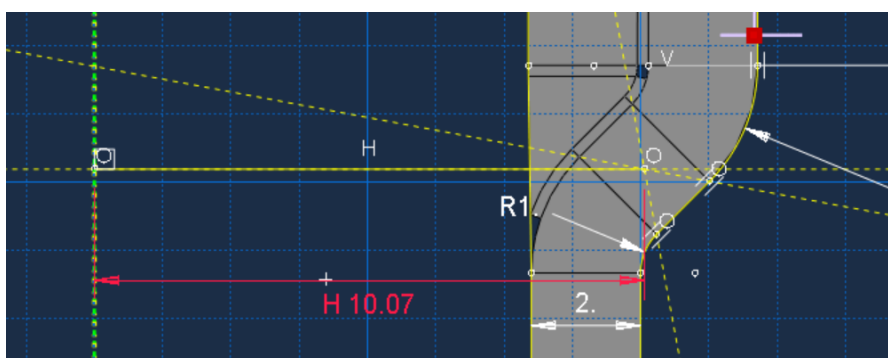


Figura 123 - Determinação da distância do baricentro ao eixo de revolução para as partições não concordantes com as direções ortogonais no plano.

### 3.5.1. Orçamento do molde de hidroformagem

Os desenhos de conjunto, as vistas explodidas e os desenhos de fabrico do molde de hidroformagem encontram-se disponíveis para consulta no APÊNDICE E. Todos os desenhos foram elaborados de acordo com os princípios básicos de desenho técnico, de maneira a permitir referenciar as cotas dependentes nos desenhos de fabrico. É necessário retificar todos os blocos, para garantir as condições de batimento, posicionamento e paralelismo. O orçamento do molde foi determinado com o auxílio dos desenhos, e folhas de configuração de máquinas e ferramentas. O preço do molde foi incluído na análise de mercado para todas as geometrias que justifiquem a sua utilização (exceto a JSS), e a dividir pelo número de peças da série proposta. Para efeitos de projeto, uma vez que não foram considerados os diferentes sistemas de alimentação e bombagem disponíveis no mercado, a carga axial aplicada aos êmbolos, e a necessidade de manutenção preventiva, o custo final de cada ordem fabrico deve ser majorado. Optou-se por não atribuir um valor injustificado a estas considerações, uma vez que não têm efeito significativo nas conclusões obtidas através da presente análise. O preço final de cada série considera o volume dos aderentes e adesivos utilizados em função da geometria de junta proposta, a densidade e o preço/kg dos materiais envolvidos.

Para qualquer componente projetado, considera-se um tempo de preparação da máquina de duas horas e de programação de uma hora. Através da consulta de especialistas na área, consideram-se como valores médios os custos de fresagem, 50 euros/hora, e de torneamento de dois eixos, 28 euros/hora. O *software* utilizado, designado por Fusion 360 CAM 2.0.16490, calcula o tempo estimado de todas as operações, embora este valor não se encontra devidamente majorado. É um bom princípio considerar 120% do tempo de ciclo original estimado pelo programa para todas as operações, uma vez que o *software* não considera aspetos relacionados com o tipo e rendimento da máquina, experiência do operador, capacidade dos motores, entre outros.

O APÊNDICE F foi criado com o objetivo de ilustrar as folhas de configuração para a programação das máquinas, fresadora e torno de dois eixos, e ainda as folhas técnicas e de configuração das ferramentas, de acordo com as etapas requeridas para a obtenção do produto final. Após a análise cuidada e definição dos parâmetros de funcionamento, foi possível estimar com precisão o custo de produção de todas as partes que integram o molde, de acordo com a Tabela 144. O custo total do molde para hidroformagem, considerando o tempo estimado dos ciclos majorado e de preparação das máquinas, é igual a 429,32 euros.

Tabela 144 – Custo de produção das partes que integram o molde, considerando o tempo estimado dos ciclos majorado e de preparação das máquinas.

| Componentes             | Preço [€] |
|-------------------------|-----------|
| Parte Inferior do Molde | 167,35    |
| Parte Superior do Molde | 167,50    |
| Pistão/Êmbolo           | 94,47     |

### 3.5.2. Comparação de resultados

O presente Subcapítulo foi criado com o propósito de recuperar informações relativas à ductilidade e resistência mecânica das juntas adesivas contempladas no Subcapítulo 3.5, e analisar em simultâneo o acréscimo percentual das propriedades mecânicas e do custo da série de fabrico, relativamente à geometria de referência (Subcapítulo 3.4.1). O principal objetivo do Subcapítulo 3.5.2 consiste em interligar os diferentes temas na dissertação, e obter conclusões significativas a partir dos resultados numéricos, da escolha dos fatores e níveis de controlo mais significativos do ponto de vista estatístico e de acordo com o MT, sem esquecer a influência dos custos de fabrico.

A obtenção dos custos de fabrico de todas as geometrias consideradas relevantes e analisadas numericamente, e o aumento/diminuição percentual do custo de produção da ordem de fabrico em função da variação dos parâmetros geométricos considerados, relativamente à geometria de base, encontram-se disponíveis para consulta no APÊNDICE G.

Ao longo do presente Subcapítulo, as células de tom esverdeado correspondem aos resultados obtidos para a geometria de referência (Subcapítulo 3.4.1). Relativamente às tabelas que resumem os resultados numéricos, as células de tom azulado e sem tom atribuído correspondem ao aumento e diminuição percentual da variável em estudo para as diferentes configurações de junta, respetivamente, relativamente à geometria de base. A Tabela 145 compara o aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas, em função do adesivo utilizado e de  $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 145 – Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas, em função do adesivo utilizado e de  $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $d_{EANH}$<br>[mm] | Aumento/Diminuição percentual relativamente à geometria de base |                   |                   |
|-----------------|--------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                 |                    | Preço/5000 unidades                                             | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
| Araldite® AV138 | 10                 | 50,63                                                           | 17,08             | 44,50             |
|                 | 15                 | 25,28                                                           | 6,67              | 20,78             |
|                 | 20                 | -                                                               | -                 | -                 |
| Araldite® 2015  | 10                 | 51,03                                                           | 12,50             | 63,71             |
|                 | 15                 | 25,88                                                           | 15,83             | 46,17             |
|                 | 20                 | 0,73                                                            | 16,67             | 28,84             |
| Sikaforce® 7752 | 10                 | 50,90                                                           | 10,83             | 73,35             |
|                 | 15                 | 25,68                                                           | 15,00             | 61,07             |
|                 | 20                 | 0,46                                                            | 17,50             | 48,98             |

A geometria de junta que apresenta a diminuição percentual mais significativa do custo de produção da série, relativamente à geometria de base, utiliza o adesivo Araldite® 2015 e  $d_{EANH}=10$  mm. Quanto à ductilidade das juntas adesivas analisadas, para o Araldite® AV138 e  $d_{EANH}=10$  mm, registou-se um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de aproximadamente 17%, quando comparada com a geometria de referência. No caso de a resistência mecânica ser o requisito prioritário para aplicação industrial, a geometria de referência foi a que registou os valores mais elevados de  $P_{m\acute{a}x}$ .

A Tabela 146 compara a variação percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas, em função do adesivo e de  $L_0$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 146 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função do adesivo utilizado e de  $L_0$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $L_0$<br>[mm] | Aumento/Diminuição percentual relativamente à geometria de base |                   |                   |
|-----------------|---------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                 |               | Preço/5000 unidades                                             | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
| Araldite® AV138 | 10            | -                                                               | -                 | -                 |
|                 | 15            | 7,13                                                            | 30,83             | 35,73             |
|                 | 20            | 14,26                                                           | 58,33             | 57,95             |
| Araldite® 2015  | 10            | 0,73                                                            | 16,67             | 28,84             |
|                 | 15            | 6,07                                                            | 12,08             | 6,50              |
|                 | 20            | 12,81                                                           | 44,58             | 40,86             |
| Sikaforce® 7752 | 10            | 0,46                                                            | 17,50             | 48,98             |
|                 | 15            | 6,40                                                            | 0,42              | 25,82             |
|                 | 20            | 13,33                                                           | 14,17             | 5,11              |

A geometria de junta que apresenta a diminuição percentual mais significativa do custo de produção da série de fabrico, relativamente à geometria de base, utiliza o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=10$  mm. Quanto à ductilidade e resistência mecânica das juntas adesivas analisadas, para o Araldite® AV138 e  $L_0=20$  mm, registou-se um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  e de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 58%, relativamente à geometria de referência. Para esta configuração de junta, conclui-se que a melhoria das propriedades mecânicas justifica o investimento, quando comparada com as restantes geometrias de junta analisadas numericamente.

A Tabela 147 compara o aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função do adesivo utilizado e de  $t_{Ad}$ , relativamente à geometria de base. A junta que apresenta a diminuição percentual do custo de produção da ordem de fabrico mais significativa, relativamente à geometria de referência, utiliza o adesivo Araldite® 2015 e  $t_{Ad}=1$  mm. A Tabela 147 permite identificar uma tendência padrão, na medida em que o investimento aumenta com  $t_{Ad}$ . No entanto, valores mais elevados de  $t_{Ad}$  não se traduzem na melhoria das propriedades mecânicas. Quanto à ductilidade das juntas adesivas analisadas, para o adesivo Araldite® AV138 e  $t_{Ad}=1$  mm, registou-se um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de aproximadamente 69%, relativamente à geometria de base.

Tabela 147 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função do adesivo utilizado e de  $t_{Ad}$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $t_{Ad}$<br>[mm] | Aumento/Diminuição percentual relativamente à geometria de base |                   |                   |
|-----------------|------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                 |                  | Preço/5000 unidades                                             | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
| Araldite® AV138 | 1                | 44,62                                                           | 69,17             | 19,01             |
|                 | 2                | -                                                               | -                 | -                 |
|                 | 3                | 41,85                                                           | 21,67             | 4,59              |
| Araldite® 2015  | 1                | 45,35                                                           | 8,75              | 43,90             |
|                 | 2                | 0,73                                                            | 16,67             | 28,84             |
|                 | 3                | 41,13                                                           | 35,00             | 28,67             |
| Sikaforce® 7752 | 1                | 45,09                                                           | 18,33             | 50,83             |
|                 | 2                | 0,46                                                            | 17,50             | 48,98             |
|                 | 3                | 41,39                                                           | 28,75             | 47,81             |

A Tabela 148 resume o aumento percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de referência. A geometria de junta que apresenta o menor custo de produção da série coincide com a geometria de base. Quanto à ductilidade das juntas adesivas analisadas, para o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ , registou-se um aumento percentual de  $\delta_{rotura}$  de aproximadamente 74%, relativamente à geometria de base. O valor de  $P_{m\acute{a}x}$  é máximo para  $\gamma=15^\circ$ , tendo-se registado um aumento percentual considerável da resistência mecânica, de aproximadamente 61%, quando comparado com a geometria de referência. A melhoria evidente das propriedades mecânicas justifica o investimento para a junta adesiva mencionada. Conclui-se que, face às propostas de valor inicial e

de alterações geométricas ilustradas no Subcapítulo 3.2.1, a geometria de junta com o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$  é a geometria ótima, do ponto de vista industrial e económico.

Tabela 148 - Comparação do aumento percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função de  $\gamma$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $\gamma$<br>[°] | Aumento/Diminuição percentual relativamente à geometria de base |                   |                   |
|-----------------|-----------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                 |                 | Preço/5000 unidades                                             | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
| Araldite® AV138 | 15              | 9,31                                                            | 74,17             | 61,12             |
|                 | 30              | 8,58                                                            | 58,33             | 52,24             |
|                 | 45              | 8,32                                                            | 10,00             | 12,10             |
|                 | 60              | 8,19                                                            | 5,83              | 8,10              |
|                 | 90              | -                                                               | -                 | -                 |

A Tabela 149 compara o aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 149 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas em função de  $\beta$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $\beta$<br>[°] | Aumento/Diminuição percentual relativamente à geometria de base |                   |                   |
|-----------------|----------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                 |                | Preço/5000 unidades                                             | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
| Araldite® AV138 | 15             | 8,25                                                            | 9,58              | 4,67              |
|                 | 30             | 3,83                                                            | 7,50              | 8,36              |
|                 | 45             | 2,18                                                            | 8,33              | 9,21              |
|                 | 60             | 1,25                                                            | 5,42              | 6,09              |
|                 | 90             | -                                                               | -                 | -                 |

A geometria de junta que apresenta a diminuição percentual dos custos de produção mais significativa, relativamente à geometria de referência, apresenta  $\beta=15^\circ$ . Para esta geometria, apesar da melhoria das propriedades mecânicas e da redução do investimento necessário para produzir as 5000 unidades, a ductilidade e a resistência mecânica registaram um acréscimo percentual de apenas 10 e 5%, respetivamente, relativamente à geometria de referência. Em suma, não se justifica o tempo de maquinagem para a realização dos chanfros.

A Tabela 150 compara o aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas tubulares bi-adesivas analisadas, em função dos adesivos utilizados e de  $L_1$ , relativamente à geometria de base. A geometria de junta que apresenta a diminuição percentual do custo de produção da série mais significativa, relativamente à geometria de base, utiliza os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, para  $L_1=75\% L_0$ . Apesar da melhoria das propriedades mecânicas não implicar um investimento elevado, para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 e  $L_1=25\% L_0$ , a ductilidade e a resistência mecânica registaram um acréscimo percentual de apenas 8 e 5%, respetivamente, relativamente à geometria de

referência. É de notar que as dificuldades inerentes ao fabrico de juntas bi-adesivas, a par dos resultados pouco satisfatórios ilustrados na Tabela 150, permite concluir que as juntas tubulares bi-adesivas não devem ser aplicadas em contexto industrial.

Tabela 150 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas tubulares bi-adesivas analisadas, em função dos adesivos utilizados e de  $L_1$ , relativamente à geometria de base.

| Juntas tubulares bi-adesivas      |           |                                                                 |                   |                   |
|-----------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                                   | $L_1$     | Aumento/Diminuição percentual relativamente à geometria de base |                   |                   |
| Adesivos                          | [mm]      | Preço/5000 unidades                                             | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
| Araldite® AV138                   | 0% $L_0$  | -                                                               | -                 | -                 |
| Araldite® AV138 e Araldite® 2015  | 25% $L_0$ | 0,13                                                            | 8,33              | 5,28              |
|                                   | 50% $L_0$ | 0,33                                                            | 2,08              | 2,72              |
|                                   | 75% $L_0$ | 0,53                                                            | 12,92             | 19,52             |
| Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 | 25% $L_0$ | 0,07                                                            | 2,08              | 5,63              |
|                                   | 50% $L_0$ | 0,20                                                            | 15,83             | 22,58             |
|                                   | 75% $L_0$ | 0,33                                                            | 38,75             | 48,75             |

A Tabela 151 compara o aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas tubulares bi-adesivas analisadas cujo aderente não hidroformado é de PRFC, em função do adesivo e de  $L_1$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 151 - Comparação do aumento/diminuição percentual dos custos da série de produção, ductilidade e resistência mecânica das juntas tubulares bi-adesivas analisadas cujo aderente não hidroformado é de PRFC, em função dos adesivos utilizados e de  $L_1$ , relativamente à geometria de base.

| juntas tubulares bi-adesivas (aderente não hidroformado de PRFC) |           |                                                                 |                   |                   |
|------------------------------------------------------------------|-----------|-----------------------------------------------------------------|-------------------|-------------------|
|                                                                  | $L_1$     | Aumento/Diminuição percentual relativamente à geometria de base |                   |                   |
| Adesivos                                                         | [mm]      | Preço/5000 unidades                                             | $\delta_{rotura}$ | $P_{m\acute{a}x}$ |
| Araldite® AV138                                                  | 0% $L_0$  | -                                                               | -                 | -                 |
| Araldite® AV138 e Araldite® 2015                                 | 25% $L_0$ | 151,10                                                          | 4,17              | 5,00              |
|                                                                  | 50% $L_0$ | 150,90                                                          | 2,92              | 5,03              |
|                                                                  | 75% $L_0$ | 150,71                                                          | 12,50             | 16,69             |
| Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752                                | 25% $L_0$ | 151,17                                                          | 5,83              | 6,51              |
|                                                                  | 50% $L_0$ | 151,04                                                          | 18,75             | 23,32             |
|                                                                  | 75% $L_0$ | 150,90                                                          | 38,75             | 47,48             |

As geometrias de junta analisadas numericamente implicam um investimento supérfluo, quando comparadas com a geometria de base, sem garantia da melhoria significativa das propriedades mecânicas da ligação. Para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 e  $L_1=25\% L_0$ , apesar da

melhoria das propriedades mecânicas, a ductilidade e a resistência mecânica registraram um acréscimo percentual de apenas 4 e 5%, respectivamente, relativamente à geometria de referência. É de notar as dificuldades inerentes ao fabrico de juntas bi-adesivas e obtenção de aderentes em PRFC por moldação manual. A par dos resultados pouco satisfatórios ao nível de resistência e ductilidade mecânica registados, e do investimento supérfluo requerido, conclui-se que estas juntas não devem ser aplicadas em contexto industrial.

Em suma, a geometria ideal para aplicação industrial, salvo restrições do projeto que possam importunar a sua implementação, utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $\gamma=15^\circ$ ,  $L_0=10$  mm,  $d_{EANH}=20$  mm,  $\theta=45^\circ$  e  $t_{Ad}=2$  mm. Relativamente às restantes geometrias analisadas ao longo do Subcapítulo 3.5, foi para esta junta que se registaram os valores mais elevados de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{máx}$ , sem um acréscimo significativo do investimento necessário para garantir a série de fabrico, como é ilustrado na Tabela 150.

## 4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

### 4.1. Conclusões

#### Proposta de valor inicial

De acordo com a proposta de valor inicial, ilustrada sob a forma de um diagrama de árvore pela Figura 15, foi possível avaliar as propriedades mecânicas das juntas adesivas e o seu comportamento quando submetidas a esforços de tração. Ao variar o parâmetro geométrico  $d_{EANH}$  e os três adesivos propostos, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica é a geometria de base. A geometria que registou os valores mais elevados de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  utiliza um  $d_{EANH}=20$  mm e a configuração de junta que apresentou os valores mais elevados de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  junto da extremidade crítica, corresponde a uma geometria de junta cujo valor de  $d_{EANH}=5$  mm, para todos os adesivos testados. A variação de  $sdeg$  é mais suave para o adesivo Araldite® 2015, sendo que são eliminados elementos da camada adesiva em ambas as extremidades da sobreposição. A utilização do adesivo Sikaforce® 7752 sugere que a rotura ocorre de forma abrupta, o que pode estar relacionado com a diferença de rigidez entre os materiais que constituem os aderentes e adesivo.

Na eventualidade de variar  $L_0$ , a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $L_0=20$  mm. Registou-se um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 58%, relativamente à geometria de base. A variação de  $t_{Ad}$  permite concluir que a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $t_{Ad}=4$  mm, verificando-se um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 10%, relativamente à geometria de referência. O estudo numérico da variação de  $\theta$  permite concluir que a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $\theta=0^\circ$ , coincidente com a junta de *overlap* ou sobreposição simples. Registou-se um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 6%, relativamente à geometria de base.

A rotura das juntas adesivas foi coesiva no adesivo para todas as configurações analisadas. No entanto, não se verificaram valores de  $PA$  que sugiram uma rotura mista ou coesiva do aderente. Contudo, nas juntas que registaram os valores de  $PA$  mais elevados, deverá ser feito um estudo mais detalhado sobre a influência deste parâmetro no modo de rotura das juntas adesivas, uma vez que este pode conduzir à redistribuição de tensões na junta e a variações significativas das propriedades mecânicas das juntas.

#### Método de Taguchi

O MT foi abordado com o objetivo de propor uma alternativa à metodologia em árvore que contempla a proposta de valor inicial. Optou-se por contabilizar 3 fatores de controlo, designadamente  $d_{EANH}$ ,  $L_0$  e  $t_{Ad}$ . Não foram considerados os níveis de controlo  $d_{EANH}=5$  mm,  $L_0=5$  mm e  $t_{Ad}=4$  mm, por apresentarem resultados ao nível da resistência mecânica e ductilidade pouco satisfatórios ou porque os parâmetros geométricos implicam um investimento supérfluo. Após análise, a configuração de junta que apresenta a maior resistência mecânica utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $d_{EANH}=L_0=20$  mm e  $t_{Ad}=2$  mm. Verificou-se um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 58%, relativamente à geometria de referência. A geometria que apresenta maior ductilidade corresponde à configuração que utiliza o adesivo Araldite® 2015, com  $d_{EANH}=20$  mm,  $L_0=15$  mm e  $t_{Ad}=1$  mm, tendo-se registado um aumento percentual de cerca de 298%,

relativamente à geometria de base. A análise da variância para as médias permite concluir que, do ponto de vista estatístico e para o adesivo Araldite® AV138, apenas o fator de controlo  $t_{Ad}$  tem um efeito significativo em  $\delta_{rotura}$ , uma vez que o valor de  $p < 0,05$  (grau de significância). Para os restantes adesivos analisados, nenhum fator de controlo tem um efeito estatisticamente significativo na resistência das juntas adesivas analisadas.

### Proposta de alterações geométricas

De acordo com os resultados numéricos obtidos para a proposta de valor inicial, as juntas que utilizam o Araldite® AV138 registam os valores mais elevados de resistência mecânica e ductilidade, e por este motivo, foi considerado apenas o efeito de variação dos parâmetros geométricos sem variar o adesivo utilizado. Ao variar  $\gamma$ , a junta adesiva com maior resistência mecânica utiliza um  $\gamma=15^\circ$ . Para esta geometria, registou-se um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 61%, relativamente à geometria de base. Relativamente ao parâmetro geométrico  $\beta$ , a junta adesiva com maior resistência mecânica utiliza um  $\beta=15^\circ$ , tendo-se verificado um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de aproximadamente 5%, relativamente à geometria de base.

No que diz respeito às juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica corresponde a uma geometria cujo valor de  $L_1=25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de 5,28% relativamente à geometria de base. Para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica coincide com a geometria de referência. Para o caso das juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica utiliza um  $L_1=25\% L_0$ , tendo-se registado um aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  de 5%, relativamente à geometria de base. Para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 cujo aderente não hidroformado é de PRFC, a junta adesiva que apresenta maior resistência mecânica é a geometria de base. É de notar que as dificuldades inerentes ao fabrico de juntas bi-adesivas e obtenção de aderentes em PRFC por moldação manual. A par dos resultados pouco satisfatórios ao nível de resistência e ductilidade mecânica registados, conclui-se que estas juntas não apresentam vantagens quando comparadas com as restantes e não devem ser aplicadas em contexto industrial.

### Análise de mercado

Foi realizada uma análise de mercado com o objetivo de perceber se as propostas de valor são passíveis de serem implementadas, do ponto de vista económico e industrial. Para tal, foi projetado um molde que permite obter os aderentes hidroformados, seguido de uma análise dos custos de maquinaria, matérias-primas, ferramentas e processos de fabrico. O valor de  $P_{m\acute{a}x}$  é máximo para  $\gamma=15^\circ$ , tendo-se registado um aumento percentual considerável da resistência mecânica, de aproximadamente 61%, relativamente à geometria de referência. Quanto à ductilidade das juntas adesivas analisadas, para o Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ , registou-se um aumento percentual do  $\delta_{rotura}$  de aproximadamente 74%, quando comparada com a geometria de base. Em suma, a geometria ideal para aplicação industrial, salvo restrições do projeto que possam limitar a sua implementação, utiliza o adesivo Araldite® AV138, com  $\gamma=15^\circ$ ,  $L_0=10$  mm,  $d_{E\text{ANH}}=20$  mm,  $\theta=45^\circ$  e  $t_{Ad}=2$  mm. Para esta geometria, registaram-se os valores mais elevados de  $\delta_{rotura}$  e  $P_{m\acute{a}x}$ , tendo-se registado um acréscimo percentual do custo da série de fabrico de apenas 9%, relativamente à geometria de referência, o que justifica o investimento.

## 4.2. Trabalhos futuros

Com base nos temas tratados, os seguintes temas surgem como propostas de trabalhos futuros:

- Análise experimental e numérica de juntas bi-adesivas constituídas à base de adesivos que curam a temperaturas distintas;
- Análise experimental de juntas bi-adesivas constituídas à base de um aderente exterior hidroformado de PRFC;
- Realização de análises numéricas e tratamento de dados de acordo com a presente dissertação, mas apenas para propostas de geometria fornecidas pelas matrizes ortogonais do Método de Taguchi;
- Variação de dois fatores de controlo geométricos em simultâneo, em redor do fator mais contributivo para a resistência das juntas adesivas. Estudo numérico e obtenção dos gráficos 3D a partir do Matlab®, nos quais duas variáveis podem ser estudadas após definir e fixar o fator mais contributivo para a resistência das juntas adesivas.



## 5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pocius, A.V. e D. Dillard (2002). *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. Elsevier: Amsterdão, Países Baixos.
2. Petrie, E.M. (2002). *Handbook of adhesives and sealants*, 2nd ed. New York McGraw Hill: Nova Iorque, EUA.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura (2007). Juntas adesivas estruturais. Publindústria: Porto, Portugal.
4. Wang, J., Y.L. Kang, Q.H. Qin, D.H. Fu, e X.Q. Li (2008). *Identification of time-dependent interfacial mechanical properties of adhesive by hybrid/inverse method*, *Computational Materials Science*, 43(4): p. 1160-1164.
5. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues (2005). *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*, *Composites Science And Technology*, 65(13): p. 1948-1958.
6. Barbosa, D.R., R. Campilho, R.J.B. Rocha, e L.R.F. Ferreira (2019). *Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints*. *Proceedings Of The Institution Of Mechanical Engineers Part L-Journal Of Materials-Design And Applications*, 233(3): p. 452-464.
7. Ferreira, L.R.F., R. Campilho, R.J.B. Rocha, e D.R. Barbosa (2019). *Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling*, *Journal of Adhesion*. 95(5-7): p. 425-449.
8. Boeda, E., J. Connan, D. Dessort, S. Muhesen, N. Mercier, H. Valladas, e N. Tisnerat (1996). *Bitumen as a hafting material on Middle Palaeolithic artefacts*, *Nature*, 380(6572): p. 336-338.
9. Koller, J., U. Baumer, e D. Mania (2001). *High-tech in the Middle Palaeolithic: Neandertal-manufactured pitch identified*, *European Journal of Archaeology*, 4(3): p. 385-397.
10. Bowen, R., E. Cobb, e J. Rapson (1982). *Adhesive bonding of various materials to hard tooth tissues: improvement in bond strength to dentin*. *Journal of Dental Research*, 61(9): p. 1070-1076.
11. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, e R.D. Adams (2011). *Handbook of adhesion technology*, Vol. 1. Springer: Berlim, Alemanha.
12. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock (2014). *Adhesives technology handbook*. Elsevier: Londres, Inglaterra.
13. Dillard, D.A. (2010). *Advances in structural adhesive bonding*. Elsevier: Washington, DC, EUA.
14. Thrall, E.W. e R.W. Shannon (2017). *Adhesive bonding of aluminum alloys*. Marcel Dekker: Nova Iorque, EUA.
15. Pocius, A.V. e D. Dillard (2002). *The mechanics of adhesions. Adhesion science and engineering - I*. Elsevier: Nova Iorque, EUA.
16. *International Organization for Standardization* (2012). *ISO 527-1: Plastics — Determination of tensile properties — Part 1: General principles*. Pequim, China: *Standardization Administration of China*.
17. *American Society for Testing and Materials* (2010). *ASTM D695: Standard test method for compressive properties of rigid plastics*. West Conchohocken, EUA.
18. *American Society for Testing and Materials* (1995). *ASTM D1002: Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*, Volume 15.06, p. 44-47.
19. *International Organization for Standardization* (2003). *ISO 4587: Adhesives - Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*. Tóquio, Japão: *Japan Plastics Industry Federation*.

20. American Society for Testing and Materials (1996). ASTM D 5379: *Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*, Volume 15.03, ASTM Standards, p. 235-247.
21. Conant, N.R. e E.M. Odom (1995). *An improved Iosipescu shear test fixture*, *Journal of Composites, Technology and Research*. 17(1): p. 50-55.
22. Gning, P.B., D. Delsart, J. Mortier, e D. Coutellier (2010). *Through-thickness strength measurements using Arcan's method*. *Composites Part B: Engineering*. 41(4): p. 308-316.
23. Jouan, A. e A. Constantinescu (2018). *A critical comparison of shear tests for adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 84: p. 63-79.
24. da Silva, L.F., R. Da Silva, J. Chousala, e A. Pinto (2008). *Alternative methods to measure the adhesive shear displacement in the thick adherend shear test*. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 22(1): p. 15-29.
25. International Organization for Standardization (2019). ISO 11003-2: *Adhesives - Determination of shear behaviour of structural adhesives - Part 2: Tensile test method using thick adherends*. Tóquio, Japão: Japan Plastics Industry Federation.
26. American Society for Testing and Materials (1997). ASTM D 3983-93: *Measuring strength and shear modulus of nonrigid adhesives by the thick adherend tensile lap specimen*. Em (Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints). Teddington, Inglaterra.
27. American Society for Testing and Materials (2017). ASTM D 903-98: *Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds*. Volume 15.06. Developed by Subcommittee: D14.80.
28. American Society for Testing and Materials (2017). ASTM D 3167-10: *Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives*. Volume 15.06. Developed by Subcommittee: D14.80.
29. de Freitas, S.T. e J. Sinke (2015). *Test method to assess interface adhesion in composite bonding*. *Applied Adhesion Science*. 3(1): p. 1-13.
30. American Society for Testing and Materials (2021). ASTM D 1781-98: *Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives*. Volume 15.06. Developed by Subcommittee: D14.80.
31. American Society for Testing and Materials (1997). ASTM D 950-94: *Impact strength of adhesive bonds*. Em (Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints). Teddington, Inglaterra.
32. International Organization for Standardization (2019). ISO 11343: *Adhesives - Determination of dynamic resistance to cleavage of high-strength adhesive bonds under impact conditions - wedge impact method*. Tóquio, Japão: Japan Plastics Industry Federation.
33. American Society for Testing and Materials (1997). ASTM D 3433-93: *Fracture strength in cleavage of adhesive in bonded joints [fracture toughness GIC]*. Em (Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints). Teddington, Inglaterra.
34. American Society for Testing and Materials (2020). ASTM D 3166-99: *Standard Test Method for Fatigue Properties in Shear by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. Volume 15.06. Developed by Subcommittee: D14.80.
35. American Society for Testing and Materials (2023). ASTM D907-15: *Standard Terminology of Adhesives*. Volume 15.06. Developed by Subcommittee: D14.80.
36. American Society for Testing and Materials (1997). ASTM D 1780-94: *Conducting creep tests of metal-to-metal adhesives (tensile shear loading)*. Em (Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints). Teddington, Inglaterra.
37. American Society for Testing and Materials (1997). ASTM D 2293-92: *Creep properties of adhesives in shear by compression loading (metal-to-metal)*. Em (Review of Durability Test

- Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints*). Teddington, Inglaterra.
38. American Society for Testing and Materials (2002). ASTM D 2294-96: *Creep properties of adhesives in shear by tension loading (metal-to-metal)*. ASTM International, West Conshohocken, EUA.
  39. American Society for Testing and Materials (2023). ASTM D 4680-98: *Creep and time to failure of adhesives in static shear by compression loading (wood-to-wood)*. ASTM International, West Conshohocken, EUA.
  40. American Society for Testing and Materials (1997). ASTM D 2919-90: *Determining durability of adhesive joints stressed in shear by tension loading (single lap)*. Em *(Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints)*. Teddington, Inglaterra.
  41. American Society for Testing and Materials (2010). ASTM D 3762-03: *Standard Test Method for Adhesive-Bonded Surface Durability of Aluminium (Wedge Test)*. Volume 15.06. *Developed by Subcommittee: D14.80*.
  42. Cognard, P. (2003). *Building & Construction Adhesives - Part I. General Information Rules, Adhesives and Sealants*.
  43. Adams, R.D. (2021). *Adhesive bonding: science, technology and applications*. Elsevier: Cambridge, EUA.
  44. Stratakis, D. (2017). *Performance of Aerospace Composites in the Presence of Process - Induced Defects*. Cranfield University: Cranfield, Inglaterra.
  45. Waugh, R.C. (2016). *Development of Infrared Techniques for Practical Defect Identification in Bonded Joints*. Springer: Berlim, Alemanha.
  46. Katsiropoulos, C.V., A. Chamos, K. Tserpes, e S.G. Pantelakis (2012). *Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive*. *Composites Part B: Engineering*. 43(2): p. 240-248. Elsevier: Londres, Inglaterra.
  47. Volkersen, O. (1938), *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. *Luftfahrtforschung*. 15: p. 41-47. Elsevier: Londres, Inglaterra.
  48. Adams, R. e N. Peppiatt (1974). *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *Journal of Strain Analysis*. 9(3): p. 185-196.
  49. Harris, J. e R. Adams (1984). *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion And Adhesives*. 4(2): p. 65-78.
  50. Sosa, J.C. e N. Karapurath (2012), *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*. 72(7): p. 788-791.
  51. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho (2012). *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. Springer: Berlim, Alemanha.
  52. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W. Wake (1997). *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. Springer: Berlim, Alemanha.
  53. Griffith, A.A. (1921). *The phenomena of rupture and flow in solids*. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character*. 221(582-593): p. 163-198.
  54. Campilho, R.D. (2017). *Strength Prediction of Adhesively-Bonded Joints*. CRC Press: Boca Raton, EUA.
  55. Williams, M. (1959). *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. *Bulletin of the Seismological Society of America*. 49(2): p. 199-204.
  56. Hutchinson, J.W. (1968). *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. *Journal of the Mechanics and Physics Of solids*. 16(5): p. 337-339.
  57. Rice, J. (1968). *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. *Journal of Applied Mechanics*. 35(2): p. 379-386.
  58. Fernlund, G. e J. Spelt (1991). *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 11(4): p. 213-220.

59. Fernlund, G. e J. Spelt (1991). *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 2: Experimental study. International Journal of Adhesion and Adhesives*. 11(4): p. 221-227.
60. Barenblatt, G.I. (1959). *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. Journal of Applied Mathematics and Mechanics*. 23(3): p. 622-636.
61. Dugdale, D.S. (1960). *Yielding of steel sheets containing slits. Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 8(2): p. 100-104.
62. Feraren, P. e H.M. Jensen (2004). *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints. Engineering Fracture Mechanics*. 71(15): p. 2125-2142.
63. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang (2010). *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. International Journal of Solids and Structures*. 47(18-19): p. 2445-2458.
64. Xie, D. e A.M. Waas (2006). *Discrete cohesive zone model for mixed-mode fracture using finite element analysis. Engineering Fracture Mechanics*. 73(13): p. 1783-1796.
65. Zhao, X., R. Adams, e L. Da Silva (2011). *Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction. Journal of Adhesion Science and Technology*. 25(8): p. 837-856.
66. Yang, Q. e M.D. Thouless (2001). *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints. International Journal of Fracture*. 110(2): p. 175-187.
67. Banea, M., L.d. Silva, e R. Campilho (2012). *Effect of temperature on tensile strength and mode I fracture toughness of a high temperature epoxy adhesive. Journal of Adhesion Science and Technology*. 26(7): p. 939-953.
68. Carlberger, T. e U. Stigh (2010). *Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive—an experimental study. The Journal of Adhesion*. 86(8): p. 816-835.
69. Lee, M.J., T.M. Cho, W.S. Kim, B.C. Lee, e J.J. Lee (2010). *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model. International Journal of Adhesion and Adhesives*. 30(5): p. 322-328.
70. Pandya, K. e J. Williams (2000). *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene. Polymer Engineering & Science*. 40(8): p. 1765-1776.
71. Chai, H. (1992). *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds. Experimental Mechanics*. 32: p. 296-303.
72. Campilho, R., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F. da Silva (2014). *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method. International Journal of Adhesion and Adhesives*. 53: p. 15-22.
73. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson (2010). *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers. International Journal of Fracture*. 165(2): p. 149-162.
74. American Society for Testing and Materials (2012). *ASTM D 3433-99: Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. ASTM International: West Conshohocken, EUA.
75. Constante, C., R. Campilho, e D. Moura (2015). *Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques. Engineering Fracture Mechanics*. 136: p. 292-304.
76. Gustafson, P.A. e A.M. Waas (2009). *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints. International Journal of Solids and Structures*. 46(10): p. 2201-2215.
77. Yoshihara, H. (2004). *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test. Engineering Fracture Mechanics*. 71(13-14): p. 2065-2077.
78. Leal, A. e R. Campilho (2018). *Numerical evaluation of the ENF and 4ENF tests for the shear toughness estimation of adhesive joints. Composite Structures*. 202: p. 333-343.
79. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft (2010). *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. International Journal of Fatigue*. 32(7): p. 1146-1158.

80. Daudeville, L. e P. Ladeveze (1993). *A damage mechanics tool for laminate delamination. Composite Structures*. 25(1-4): p. 547-555.
81. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai (2004). *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. Journal of Adhesion Science and Technology*. 18(1): p. 39-53.
82. Voyiadjis, G.Z. e P.I. Kattan (2005). *Damage mechanics*. CRC Press: Boca Raton, EUA.
83. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis (2012). *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. Springer: Berlim, Alemanha.
84. Wahab, M.A., I. Ashcroft, A. Crocombe, e S. Shaw (2001). *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics. Journal of Adhesion Science and Technology*. 15(7): p. 763-781.
85. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto (2003). *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive. Journal of Adhesion Science and Technology*. 17(7): p. 981-994.
86. Lemaitre, J. e R. Desmorat (2006). *Engineering damage mechanics: ductile, creep, fatigue and brittle failures*. Springer: Berlim, Alemanha.
87. Hua, Y., A. Crocombe, M. Wahab, e I. Ashcroft (2008). *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive. International Journal of Adhesion and Adhesives*. 28(6): p. 302-313.
88. Chen, Z., R. Adams, e L.F. Da Silva (2011). *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion. Engineering Fracture Mechanics*. 78(6): p. 990-1007.
89. Mohammadi, S. (2008). *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. Blackwell Publishing: Nova Jérĩa, EUA.
90. Belytschko, T. e T. Black (1999). *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. International Journal for Numerical Methods In Engineering*. 45(5): p. 601-620.
91. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko (1999). *A finite element method for crack growth without remeshing. International Journal for Numerical Methods In Engineering*. 46(1): p. 131-150.
92. Sukumar, N., N. Moës, B. Moran, e T. Belytschko (2000). *Extended finite element method for three-dimensional crack modelling. International Journal for Numerical Methods In Engineering*. 48(11): p. 1549-1570.
93. Daux, C., N. Moës, J. Dolbow, N. Sukumar, e T. Belytschko (2000). *Arbitrary branched and intersecting cracks with the extended finite element method. International Journal for Numerical Methods In Engineering*. 48(12): p. 1741-1760.
94. Moës, N. e T. Belytschko (2002). *Extended finite element method for cohesive crack growth. Engineering Fracture Mechanics*. 69(7): p. 813-833.
95. Elguedj, T., A. Gravouil, e A. Combescure (2006). *Appropriate extended functions for X-FEM simulation of plastic fracture mechanics. Computer methods in applied mechanics and engineering*. 195(7-8): p. 501-515.
96. Dolbow, J., N. Moës, e T. Belytschko (2001). *An extended finite element method for modeling crack growth with frictional contact. Computer Methods In Applied Mechanics and Engineering*. 190(51-52): p. 6825-6846.
97. Khoei, A. e M. Nikbakht (2006). *Contact friction modeling with the extended finite element method (X-FEM). Journal of Materials Processing Technology*. 177(1-3): p. 58-62.
98. Fagerström, M. e R. Larsson (2006). *Theory and numerics for finite deformation fracture modelling using strong discontinuities. International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 66(6): p. 911-948.
99. de Sousa, C., R. Campilho, E. Marques, M. Costa, e L.F. da Silva (2017). *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L. Journal of Materials: Design and Applications*. 231(1-2): p. 210-223.

100. Hart-Smith, L.J. (1973). *Adhesive-bonded single-lap joints*. Contractor Report (CR). NASA. Long Beach, EUA.
101. Razavi, S.M.J., M.R. Ayatollahi, H.R. Majidi, e F. Berto (2018). *A strain-based criterion for failure load prediction of steel/CFRP double strap joints*. *Composite Structures*. 206: p. 116-123.
102. Dionísio, J., L. Ramalho, I. Sánchez-Arce, R. Campilho, e J. Belinha (2021). *Fracture mechanics approach to stress singularities in composite adhesive joints*. *Composite Structures*. 276: p. 114-507.
103. Barroso, A., V. Mantič, e F. París (2003). *Singularity analysis of anisotropic multimaterial corners*. *International Journal of Fracture*. 119(1): p. 1-23.
104. Mantič, V., A. Barroso, e F. París (2014). *Singular elastic solutions in anisotropic multimaterial corners: applications to composites*, in *Mathematical methods and models in composites*. World Scientific. p. 425-495.
105. Zhang, Q., X. Cheng, Y. Cheng, W. Li, e R. Hu (2019). *Investigation of tensile behavior and influence factors of composite-to-metal 2D-scarf bonded joint*. *Engineering Structures*. 180: p. 284-294.
106. Hashin, Z. (1980). *Failure criteria for unidirectional fiber composites*. Department of Solid Mechanics, Materials, and Structures. Tel Aviv University: Tel Aviv, Israel.
107. Yun-yan, X., C. Xiao-quan, Z. Ji-kui, e L. Zheng-neng (2015). *Study on composite honeycomb sandwich structure formed T-joints under tensile load*. 32(7): p. 243-248.
108. Börgesson, L. (1996). *Abaqus*, in *Developments in geotechnical engineering*. Elsevier: Berlim, Alemanha.
109. Tan, S.C. (1991). *A progressive failure model for composite laminates containing openings*. *Journal of Composite Materials*. 25(5): p. 556-577.
110. Lopes, V.H.P., Raul D.S.G. Campilho, Paulo J.R.O. Nóvoa, R.J.B. Rocha, e I.J. Sánchez-Arce (2022). *Experimental and cohesive zone modelling study on composite joining by co-curing and adhesive bonding for sheet moulding compound or carbon-fibre prepreg laminates*. *Journal of Adhesion Science and Technology*.
111. Shirinbayan, M., H.B. Rizi, N. Abbasnezhad, A. Tcharkhtchi, e J. Fitoussi (2021). *Tension, compression, and shear behavior of advanced sheet molding compound (A-SMC): Multi-scale damage analysis and strain rate effect*. *Composites Part B: Engineering*. 225: p. 109-287.
112. Macedo, A., R. Campilho, F. Silva, e M. Bellali (2022). *Numerical analysis of the mixed-mode fracture of bonded joints depending on the adhesive thickness*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: *Journal of Process Mechanical Engineering*.
113. Santos, T.F. e R.D.S.G. Campilho (2017). *Numerical modelling of adhesively-bonded double-lap joints by the eXtended Finite Element Method*. *Finite Elements in Analysis and Design*. 133: p. 1-9.
114. Xará, J.T.S. e R.D.S.G. Campilho (2018). *Strength estimation of hybrid single-L bonded joints by the eXtended Finite Element Method*. *Composite Structures*. 183: p. 397-406.
115. Oliveira, T.J.S., R.D.S.G. Campilho, M.G. Cardoso, e I.J. Sánchez-Arce (2022). *Cohesive zone analysis of torsional tubular joints with an epoxy adhesive*. *Procedia Structural Integrity*. 41: p. 72-81.
116. Pascoe, J.A., R.C. Alderliesten, e R. Benedictus (2013). *Methods for the prediction of fatigue delamination growth in composites and adhesive bonds—a critical review*. *Engineering Fracture Mechanics*. p. 72-96.
117. Esmaeel, R.A. e F. Taheri (2011). *Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion*. *Composite Structures*. 93(7): p. 1765-1774.
118. Rosas, M.F.M.O., R.D.S.G. Campilho, e R.D.F. Moreira (2021). *Numerical analysis of geometrical modification combinations of the tensile strength of tubular adhesive joints*. *Procedia Structural Integrity*. 33: p. 115-125.

119. Labbé, S. e J.-M. Drouet (2012). *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. *International Journal of Adhesion And Adhesives*. 33: p. 26-35.
120. Kwon, J.W. e D.G. Lee (2000). *The effects of surface roughness and bond thickness on the fatigue life of adhesively bonded tubular single lap joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 14(8): p. 1085-1102.
121. Albiez, M., T. Vallée, H. Fricke, e T. Ummenhofer (2019). *Adhesively bonded steel tubes - Part I: Experimental investigations*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 90: p. 199-210.
122. Nguyen, V. e K.T. Kedward (2001). *Non-linear modeling of tubular adhesive scarf joints loaded in tension*. *The Journal of Adhesion*. 76(3): p. 265-292.
123. Lavalette, N.P., O.K. Bergsma, D. Zarouchas, e R. Benedictus (2020). *Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints*. *Composite Structures*.
124. Lubkin, J. e E. Reissner (1956). *Stress distribution and design data for adhesive lap joints between circular tubes*. *Transactions of the American Society of Mechanical Engineers*. 78(6): p. 1213-1221.
125. Hosseinzadeh, R., K. Shahin, e F. Taheri (2007). *A simple approach for characterizing the performance of metallic tubular adhesively-bonded joints under torsion loading*. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 21(16): p. 1613-1631.
126. Oh, J.H. (2007). *Strength prediction of tubular composite adhesive joints under torsion*. *Composites science and technology*. 67(7-8): p. 1340-1347.
127. Choi, J.K. e D.G. Lee (1995). *Torque transmission capabilities of bonded polygonal lap joints for carbon fiber epoxy composites*. *The Journal of Adhesion*. 48(1-4): p. 235-250.
128. Kim, K.S., W.T. Kim, e E.J. Jun (1992). *Optimal tubular adhesive-bonded lap joint of the carbon fiber epoxy composite shaft*. *Composite structures*. 21(3): p. 163-176.
129. Xu, W. e G. Li (2010). *Finite difference three-dimensional solution of stresses in adhesively bonded composite tubular joint subjected to torsion*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 30(4): p. 191-199.
130. Dragoni, E. e L. Goglio (2013). *Adhesive stresses in axially-loaded tubular bonded joints—Part I: Critical review and finite element assessment of published models*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 47: p. 35-45.
131. Terekhova, L. e I. Skoryi (1972). *Stresses in bonded joints of thin cylindrical shells*. *Strength of Materials*. 4(10): p. 1271-1274.
132. Kukovyakin, V. e I. Skoryi (1972). *Estimating the strength of bonded cylindrical joints*. *Russian Engineering Journal - USSR*.
133. Mertiny, P. e F. Ellyin (2006). *Joining of fiber-reinforced polymer tubes for high-pressure applications*. *Polymer composites*. 27(1): p. 99-109.
134. Kim, J.K. e D.G. Lee (2004). *Effects of applied pressure and temperature during curing operation on the strength of tubular single-lap adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 18(1): p. 87-107.
135. Gao, F., B. Hu, e H.-p. Zhu (2014). *Local joint flexibility of completely overlapped tubular joints under in-plane bending*. *Journal of Constructional Steel Research*.
136. Página da Internet: ECOM (2023). Acedido em julho de 2023. Disponível em: <https://www.intertronics.co.uk/product/led-uv-light-curing-adhesives/>
137. Silva, J., R. Campilho, I. Sánchez-Arce, e R. Moreira (2022). *Numerical evaluation of tensile-loaded tubular scarf adhesive joints*. *Procedia Structural Integrity*. 41: p. 36-47.
138. Breckner M. (1999). *Hydraulic systems for hydroforming*. *Proceedings of the International Conference on Hydroforming*. Estugarda, Alemanha.
139. Simo, J.C. e M. Rifai (1990). *A class of mixed assumed strain methods and the method of incompatible modes*. *International Journal for Numerical Methods In Engineering*. 29(8): p. 1595-1638.

140. Hughes, T.J. (1987). *The Finite Element Method: Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*. Prentice Hall: Nova Jérσία, EUA.
141. Jorge, R.M.N. (1998). Modelação de problemas incompressíveis pelo método das deformações acrescentadas baseado em modos compatíveis. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
142. Gray, J.E., A.P. Devereaux, e W.M. Parker (1940). *Apparatus for making wrought metal T's*. U.S. Patent No. 2203868. Washington, DC: U.S. Patent and Trademark Office.
143. Andelfinger, U. e E. Ramm (1993). *EAS-elements for two-dimensional, three-dimensional, plate and shell structures and their equivalence to HR-elements*. *International Journal for Numerical Methods In Engineering*. 36(8): p. 1311-1337.
144. Zienkiewicz, O., R. Taylor, e J. Too (1971). *Reduced integration technique in general analysis of plates and shells*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 3(2): p. 275-290.
145. Pastor, M., M. Quecedo, e O.C. Zienkiewicz (1997). *A mixed displacement - pressure formulation for numerical analysis of plastic failure*. *Computers & structures*. 62(1): p. 13-23.
146. Basar, Y. e D. Weichert (2000). *Nonlinear continuum mechanics of solids: fundamental mathematical and physical concepts*: Springer: Berlim, Alemanha.
147. Klinkel, S. e W. Wagner (1997). *A geometrical non-linear brick element based on the EAS-method*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*. 40(24): p. 4529-4545.
148. Montgomery Douglas, C. (1991). *Design and analysis of experiments*. John Willy & Sons: Nova Jérσία, EUA.
149. Karna, S.K. e R. Sahai (2012). *An overview on Taguchi method*. *International Journal Of Engineering And Mathematical Sciences*. 1(1): p. 1-7.
150. da Silva, L.F.M. e R.D. Adams (2007). *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 27(3): p. 216-226.
151. Da Silva, L.F. e M.J.C. Lopes (2009). *Joint strength optimization by the mixed-adhesive technique*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 29(5): p. 509-514.
152. Semerdjiev, S. (1970). *Metal-to-Metal Adhesive Bonding*. Business Books Limited: Londres, Inglaterra.
153. Pires, I., L. Quintino, J. Durodola, e A. Beevers (2003). *Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 23(3): p. 215-223.
154. Fitton, M.D. e J. Broughton (2005). *Variable modulus adhesives: an approach to optimised joint performance*. *International journal of adhesion and adhesives*. 25(4): p. 329-336.
155. Özer, H. e Ö. Öz (2012). *Three-dimensional finite element analysis of bi-adhesively bonded double lap joint*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 37: p. 50-55.
156. Akhavan-Safar, A., F. Ramezani, F. Delzendehrooy, M. Ayatollahi, e L. Da Silva (2022). *A review on bi-adhesive joints: Benefits and challenges*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*.
157. Leguillon, D. (2002). *Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch*. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 21(1): p. 61-72.
158. Weißgraeber, P. e W. Becker (2013). *Finite Fracture Mechanics model for mixed mode fracture in adhesive joints*. *International Journal of Solids and Structures*. 50(14): p. 2383-2394.
159. Özer, H. e Ö. Öz (2014). *A comparative evaluation of numerical and analytical solutions to the biadhesive single-lap joint*. *Mathematical Problems in Engineering*.
160. Öz, Ö. e H. Özer (2014). *On the von Mises elastic stress evaluations in the bi-adhesive single-lap joint: a numerical and analytical study*. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 28(21): p. 2133-2153.

161. Zhao, B. (2008). *Theoretical stress model of mixed-modulus single-lap adhesive bonded joints considering the bending effect*. *Chinese Journal of Mechanical Engineering*. 44(10): p. 129-137.
162. Silva, M., E. Marques, e L. Silva (2016). *Behaviour under impact of mixed adhesive joints for the automotive industry*. *Latin American Journal of Solids and Structures*. 13: p. 835-853.
163. Machado, J.J.M., E.A.S. Marques, M.R.G. Silva, e L.F.M. da Silva (2018). *Numerical study of impact behaviour of mixed adhesive single lap joints for the automotive industry*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 84: p. 92-100.
164. Machado, J.J.M., P.M.R. Gamarra, E.A.S. Marques, e L.F.M. da Silva (2018). *Numerical study of the behaviour of composite mixed adhesive joints under impact strength for the automotive industry*. *Composite Structures*. 185: p. 373-380.
165. da Silva, L.F., P.J. das Neves, R. Adams, e J. Spelt (2009). *Analytical models of adhesively bonded joints - Part I: Literature survey*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 29(3): p. 319-330.
166. da Silva, L.F., P.J. das Neves, R. Adams, A. Wang, e J. Spelt (2009). *Analytical models of adhesively bonded joints - Part II: Comparative study*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 29(3): p. 331-341.
167. Durodola, J.F. (2017). *Functionally graded adhesive joints – A review and prospects*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 76: p. 83-89.
168. Yousefsani, S.A. e M. Tahani (2017). *Relief of edge effects in bi-adhesive composite joints*. *Composites Part B: Engineering*. 108: p. 153-163.
169. Chiminelli, A., R. Breto, S. Izquierdo, L. Bergamasco, E. Duvivier, e M. Lizaranzu (2017). *Analysis of mixed adhesive joints considering the compaction process*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 76: p. 3-10.
170. Kumar, S (2009). *Analysis of tubular adhesive joints with a functionally modulus graded bondline subjected to axial loads*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 29(8): p. 785-795.
171. Da Silva, L.F. e R. Adams (2007). *Joint strength predictions for adhesive joints to be used over a wide temperature range*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 27(5): p. 362-379.
172. Da Silva, L.F. e R. Adams (2007). *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 27(3): p. 216-226.
173. Adams, R. (1986). *The mechanics of bonded joints*. *Structural Adhesives in Engineering*. p. 17-24.
174. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. da Silva (2013). *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 44: p. 48-56.
175. Zhang, S. (1999). *Developments in hydroforming*. *Journal of Materials Processing Technology*. 91(1-3): p. 236-244.
176. Ahmetoglu, M. e T. Altan (2000). *Tube hydroforming: state-of-the-art and future trends*. *Journal of Materials Processing Technology*. 98(1): p. 25-33.
177. Hwang, Y., T. Lin, e W. Chang (2007). *Experiments on T-shape hydroforming with counter punch*. *Journal of Materials Processing Technology*. 192: p. 243-248.
178. Waters, T.F. (2017). *Fundamentals of manufacturing for engineers*. Crc Press: Boca Raton, EUA.
179. da Silva, J.P.M. (2012). *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido*. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
180. Campilho, R.D., M.D. Banea, A.M. Pinto, L.F. da Silva, e A. De Jesus (2011). *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 31(5): p. 363-372.

181. Koç, M. e T. Altan (2001). *An overall review of the tube hydroforming (THF) technology. Journal of Materials Processing Technology.* 108(3): p. 384-393.
182. Alaswad, A., K. Benyounis, e A.G. Olabi (2012). *Tube hydroforming process: A reference guide. Materials & Design.* 33: p. 328-339.
183. Nunes, S.L.S. (2015). Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
184. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, e L.F. da Silva (2013). *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. International Journal of Adhesion and Adhesives.* 44: p. 48-56.
185. Neto, J., R.D. Campilho, e L. Da Silva (2012). *Parametric study of adhesive joints with composites. International Journal of Adhesion and Adhesives.* 37: p. 96-101.
186. Campilho, R.D.S.G., K. Madani, e C. Prakash (2022). *Advanced Characterization of Adhesive Joints and Adhesives. Materials.* 15(20): p. 7347.
187. Ramalho, L.D., R.D. Campilho, J. Belinha, e L.F. da Silva (2020). *Static strength prediction of adhesive joints: A review. International Journal of Adhesion and Adhesives.* 96: p. 102-451.
188. Weißgraeber, P., N. Stein, e W. Becker (2014). *A general sandwich-type model for adhesive joints with composite adherends. International Journal of Adhesion and Adhesives.* 55: p. 56-63.
189. Spaggiari, A., D. Castagnetti, e E. Dragoni (2012). *Experimental tests on tubular bonded butt specimens: Effect of relief grooves on tensile strength of the adhesive. The Journal of Adhesion.* 88(4-6): p. 499-512.
190. Gültekin, K., S. Akpınar, A. Özel, e G.A. Öner (2017). *Effects of unbalance on the adhesively bonded composites-aluminium joints. The Journal of Adhesion.* 93(9): p. 674-687.
191. Liu, Y., S. Lemanski, e X. Zhang (2018). *Parametric study of size, curvature and free edge effects on the predicted strength of bonded composite joints. Composite Structures.* 202: p. 364-373.
192. Ayatollahi, M. e A. Akhavan-Safar (2015). *Failure load prediction of single lap adhesive joints based on a new linear elastic criterion. Theoretical and Applied Fracture Mechanics.* 80: p. 210-217.
193. Da Silva, L.F.M., R.D. Campilho, L.F. da Silva, e R.D. Campilho (2012). *Advances in numerical modelling of adhesive joints.* Springer: Berlim, Alemanha.
194. Cameselle-Molares, A., R. Sarfaraz, M. Shahverdi, T. Keller, e A.P. Vassilopoulos (2017). *Fracture mechanics-based progressive damage modelling of adhesively bonded fibre-reinforced polymer joints. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures.* 40(12): p. 2183-2193.
195. Le Pavic, J., G. Stamoulis, T. Bonnemains, D. Da Silva, e D. Thévenet (2019). *Fast failure prediction of adhesively bonded structures using a coupled stress-energetic failure criterion. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures.* 42(3): p. 627-639.
196. Stapleton, S.E., E.J. Pineda, T. Gries, e A.M. Waas (2014). *Adaptive shape functions and internal mesh adaptation for modeling progressive failure in adhesively bonded joints. International Journal of Solids and Structures.* 51(18): p. 3252-3264.
197. Sugiman, S. e H. Ahmad (2017). *Comparison of cohesive zone and continuum damage approach in predicting the static failure of adhesively bonded single lap joints. Journal of adhesion science and Technology.* 31(5): p. 552-570.
198. Ferreira, C., R. Campilho, e R. Moreira (2020). *Experimental and numerical analysis of dual-adhesive stepped-lap aluminum joints. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part E: Journal of Process Mechanical Engineering.* 234(5): p. 454-464.
199. Rocha, R. e R. Campilho (2018). *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints. The Journal of Adhesion.* 94(7): p. 562-582.
200. Geleta, T.N., K. Woo, D.S. Cairns, e D. Samborsky (2018). *Failure behavior of inclined thick adhesive joints with manufacturing defect. Journal of Mechanical Science and Technology.* 32: p. 2173-2182.

201. Mubashar, A., I. Ashcroft, e A. Crocombe (2014). *Modelling damage and failure in adhesive joints using a combined XFEM-cohesive element methodology*. *The Journal of Adhesion*. 90(8): p. 682-697.
202. Machado, R., R. Campilho, e R. Rocha (2019). *Extended finite element modelling of aluminium stepped-adhesive joints*. *The Journal of Adhesion*. 95(5-7): p. 450-473.
203. Tsai, C., Y. Guan, D. Ohanehi, J. Dillard, D. Dillard, e R. Batra (2014). *Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 51: p. 67-80.
204. Allix, O. e A. Corigliano (1996). *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. *International journal of Fracture*. 77(2): p. 111-140.
205. Alfano, G. e M. Crisfield (2001). *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. *International Journal for Numerical Methods In Engineering*. 50(7): p. 1701-1736.
206. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem (2002). *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. *International Journal of Solids and Structures*. 39(10): p. 2827-2855.
207. Chen, J. (2002). *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*. 15(5): p. 429-442.
208. Kafkalidis, M. e M. Thouless (2002). *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. *International Journal of Solids and Structures*. 39(17): p. 4367-4383.
209. Liljedahl, C., A. Crocombe, M. Wahab, e I. Ashcroft (2006). *Damage modelling of adhesively bonded joints*. *International Journal of Fracture*. 141: p. 147-161.
210. Fernandes, R. e R. Campilho (2017). *Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension*. *The Journal of Adhesion*. 93(1-2): p. 57-76.
211. Fernandes, R. e R. Campilho (2019). *Accuracy of cohesive laws with different shape for the shear behaviour prediction of bonded joints*. *The Journal of Adhesion*. 95(4): p. 325-347.
212. Pocius, A.V. (2012). *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. Hanser Publishers: Munique, Alemanha.
213. Andersson, T. e U. Stigh (2004). *The stress - elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. *International Journal of Solids and Structures*. 41(2): p. 413-434.
214. Leffler, K., K.S. Alfredsson, e U. Stigh (2007). *Shear behaviour of adhesive layers*. *International Journal of Solids and Structures*. 44(2): p. 530-545.
215. Högberg, J.L. e U. Stigh (2006). *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. *Engineering Fracture Mechanics*. 73(16): p. 2541-2556.
216. Campilho, R., A. Pinto, M.D. Banea, R. Silva, e L.F. da Silva (2011). *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 25(18): p. 2351-2368.
217. Marques, E. e L.F. da Silva (2008). *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. *The Journal of Adhesion*. 84(11): p. 915-934.
218. Azevedo, J.C.S. (2014). *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*.
219. Faneco, T., R. Campilho, F. Silva, e R. Lopes (2017). *Strength and fracture characterization of a novel polyurethane adhesive for the automotive industry*. *Journal of Testing and Evaluation*. 45(2): p. 398-407.
220. Fernandes, T.A.B. (2004). *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
221. Carvalho, U.T.F. (2016). *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.

222. Davis, M. e D. Bond (1999). *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 19(2-3): p. 91-105.
223. Yang, Q. e B. Cox (2005). *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*.
224. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues (2005). *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. *Composites Science and Technology*. 65(13): p. 1948-1958.
225. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, e J. Domingues (2009). *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 29(2): p. 195-205.
226. Grant, L., R.D. Adams, e L.F. da Silva (2009). *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 29(4): p. 405-413.
227. Krishankant, J.T., M. Bector, e R. Kumar (2012). *Application of Taguchi method for optimizing turning process by the effects of machining parameters*. *International Journal of Engineering and Advanced Technology*. 2(1): p. 263-274.
228. Minitab (2023). *Minitab Industry Solutions*. Acedido em Maio de 2023. Disponível em: <https://www.minitab.com/en-us/industry/>.
229. Araújo, H., J. Machado, E. Marques, e L. Da Silva (2017). *Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry*. *Composite Structures*. 171: p. 549-561.
230. Página da Internet: Silmid (2023). Silmid a GracoRoberts company. Acedido em Junho de 2023. Disponível em: <https://www.silmid.com/>.
231. Página da Internet: Alumeco (2023). Alumeco Group. Acedido em Maio de 2023. Disponível em: <https://www.alumeco.com/>.
232. Ravnkar, D., N.B. Dahotre, e J. Grum (2013). *Laser coating of aluminum alloy EN AW 6082-T651 with TiB<sub>2</sub> and TiC: Microstructure and mechanical properties*. *Applied Surface Science*. 282: p. 914-922.
233. Página da Internet: Castro Composites (2023). Acedido em Maio de 2023. Disponível em: <https://www.castrocompositesshop.com/>.
234. Marchisotto, E.A. (2002). *The theorem of Pappus: A bridge between algebra and geometry*. *The American Mathematical Monthly*. 109(6): p. 497-516.
235. Lesani, M., M. Bahaari, e M. Shokrieh (2013). *Detail investigation on un-stiffened T/Y tubular joints behavior under axial compressive loads*. *Journal of Constructional Steel Research*. 80: p. 91-99.
236. Cheng, C., S. Yongbo, e Y. Jie (2013). *Experimental and numerical study on fire resistance of circular tubular T-joints*. *Journal of Constructional Steel Research*. 85: p. 24-39.
237. Domański, T., A. Sapietová, e M. Sága (2017). *Application of Abaqus software for the modeling of surface progressive hardening*. *Procedia Engineering*. 177: p. 64-69.
238. Goncalves, J., M. De Moura, e P. De Castro (2002). *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 22(5): p. 357-365.
239. Abaqus, G. (2011). *Abaqus 6.11 Theory Manual*. Dassault Systemes Simulia Corporation: Providence, EUA.
240. Giner, E., N. Sukumar, J. Tarancón, e F. Fuenmayor (2009). *An Abaqus implementation of the extended finite element method*. *Engineering fracture mechanics*. 76(3): p. 347-368.
241. Moraes, J.M.d.S. (2017). *Desenho Técnico Básico 3 - 26 ed.* Porto Editora: Porto, Portugal.
242. Página da Internet: SECO (2023). Acedido em Julho de 2023. Disponível em: [https://www.secotools.com/article/p\\_02422232?language=en](https://www.secotools.com/article/p_02422232?language=en).
243. Página da Internet: PECOL (2023). Acedido em Julho de 2023. Disponível em: [https://cdn.pecol.pt/files/007\\_Corte/Brocas\\_HSS\\_DIN\\_338.pdf](https://cdn.pecol.pt/files/007_Corte/Brocas_HSS_DIN_338.pdf).
244. Página da Internet: TECNOLANEMA (2023). Acedido em Julho de 2023. Disponível em: [https://www.tecnolanema.pt/?gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCeLSF2qTczeK98jlwCa8tAu4g3n1MTAceiHz0j5Y6iEr0qI5QXUG7BoCk4YQAvD\\_BwE](https://www.tecnolanema.pt/?gclid=CjwKCAjw2K6lBhBXEiwA5RjtCeLSF2qTczeK98jlwCa8tAu4g3n1MTAceiHz0j5Y6iEr0qI5QXUG7BoCk4YQAvD_BwE).

245. Página da Internet: CUMSA (2023). Acedido em Julho de 2023. Disponível em: <https://cumsa.com/>.
246. Página da Internet: ECOM (2023). Acedido em julho de 2023. Disponível em: [https://ecom.meusburger.com/p/index.asp?px=p2&rnd=&emos\\_sid=AYIAo8RE8M013T5L2sJwEVFiGPqPxiSm&emos\\_vid=AYIAo8RE8M013T5L2sJwEVFiGPqPxiSm](https://ecom.meusburger.com/p/index.asp?px=p2&rnd=&emos_sid=AYIAo8RE8M013T5L2sJwEVFiGPqPxiSm&emos_vid=AYIAo8RE8M013T5L2sJwEVFiGPqPxiSm)



## 6. ANEXOS

Os anexos associados à presente dissertação por agregação de ficheiros são da autoria de terceiros e encontram-se devidamente referenciados no presente relatório.

Os anexos seguintes correspondem às fichas técnicas disponibilizadas pelos fabricantes de cada um dos adesivos utilizados na presente dissertação, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

página propositadamente em branco

## Advanced Materials

# Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998

### Structural Adhesives

## Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998

### Two component epoxy adhesive

#### Key properties

- Low out gassing / volatile loss
- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 120°C
- Thixotropic, gap filling paste

#### Description

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required. The low out gassing makes this product suitable for specialist electronic telecommunication and aerospace applications.

#### Typical product data

| Property                  | Araldite® AV 138M-1 | Hardener HV 998 | Mix         |
|---------------------------|---------------------|-----------------|-------------|
| Colour (visual)           | beige               | grey            | grey        |
| Specific gravity          | ca. 1.7             | ca. 1.7         | ca. 1.7     |
| Viscosity (Pas)           | thixotropic         | thixotropic     | thixotropic |
| Pot Life (100 gm at 25°C) | -                   | -               | 35 mins     |

#### Processing

##### Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

| Mix ratio           | Parts by weight | Parts by volume |
|---------------------|-----------------|-----------------|
| Araldite® AV 138M-1 | 100             | 100             |
| Hardener HV 998     | 40              | 40              |

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

##### Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces. A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even con-

tact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

### Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

### Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

### Curing times

| Temperature | °C                | 10 | 15 | 23 | 40 | 60 | 80 | 100 |
|-------------|-------------------|----|----|----|----|----|----|-----|
| Cure time   | hours             | 48 | 36 | 24 | 16 | 1  | -  | -   |
|             | minutes           | -  | -  | -  | -  | -  | 15 | 10  |
| LSS at 23°C | N/mm <sup>2</sup> | 10 | 11 | 13 | 14 | 15 | 16 | 18  |

LSS = Lap shear strength.

## Typical cured properties

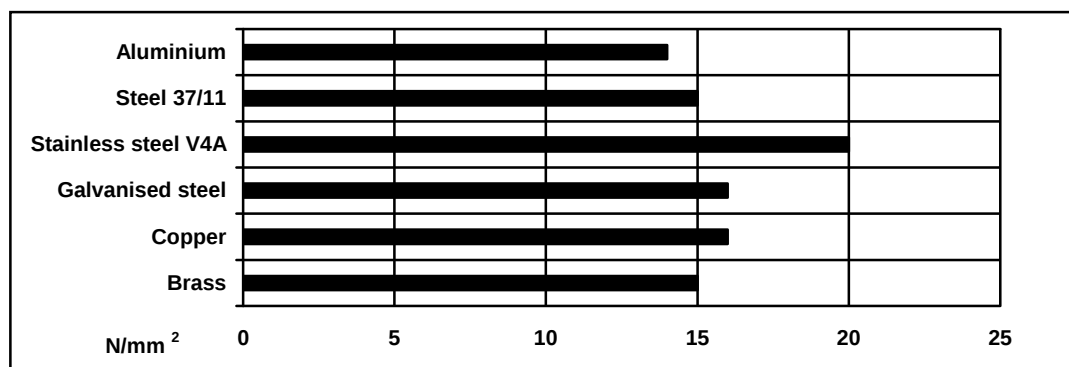
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

### Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



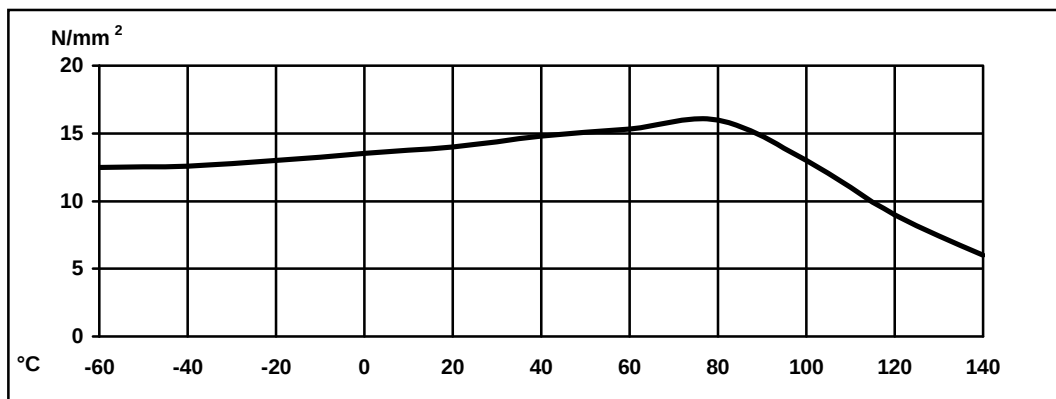
### Shear modulus (DMA ISO 6721)

Cure: 16 hours at 40°C

|       |          |
|-------|----------|
| -25°C | 2175 MPa |
| 0°C   | 2030 MPa |
| 20°C  | 1890 MPa |
| 60°C  | 780 MPa  |
| 100°C | 34 Mpa   |
| 120°C | 27 MPa   |

**Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)**

Cure: 16 hours at 40°C



**Roller peel test (ISO 4578)**

Cure: 16 hours at 40°C

1.8 N/mm

**Shore hardness**

D84-86

**Tensile strength**

Cure: 16 hours at 40°C

43 MPa

**Tensile modulus**

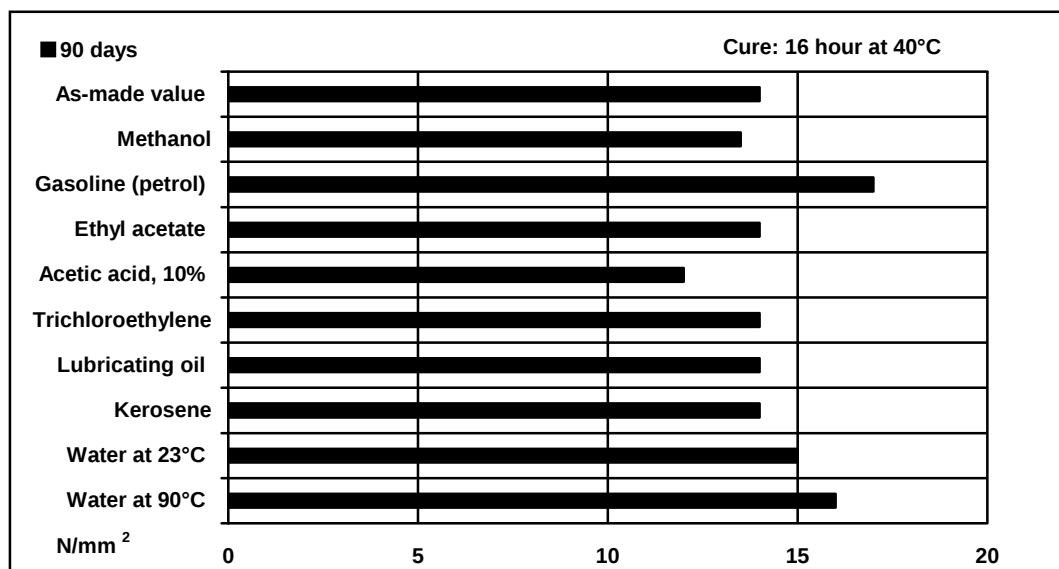
4.7 GPa

**Elongation at break**

1.2%

**Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)**

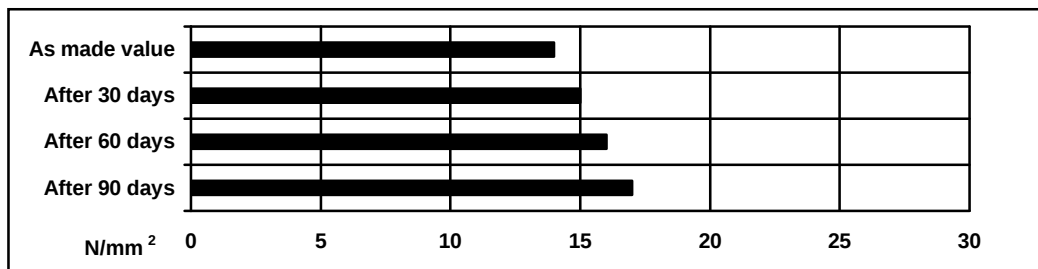
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



### Lap shear strength versus tropical weathering

(40/92, DIN 50015; typical average values)

Test at 23°C



### Storage

Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998 may be stored for up to 6 years and 3 years respectively at room temperature provided that the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

### Handling Precautions

#### Caution

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with food-stuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.

IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Araldite is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2008 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

### Huntsman Advanced Materials

(Switzerland) GmbH  
Klybeckstrasse 200  
4057 Basel  
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11

Fax: +41 (0)61 299 11 12

[www.huntsman.com/advanced\\_materials](http://www.huntsman.com/advanced_materials)

Email: [advanced\\_materials@huntsman.com](mailto:advanced_materials@huntsman.com)

## Advanced Materials

# Araldite® 2015-1

### Structural Adhesives

#### TECHNICAL DATASHEET

## Araldite® 2015-1

### Two component epoxy paste adhesive

#### Key properties

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Gap filling, non-sagging up to 10mm thickness
- Good resistance to weathering

#### Description

Araldite® 2015-1 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non sagging up to 10mm thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

#### Product data

| Property                            | Araldite® 2015-1<br>Resin | Araldite® 2015-1<br>Hardener | Mixed Adhesive  |
|-------------------------------------|---------------------------|------------------------------|-----------------|
| Colour - visual (A112)*             | grey soft paste           | beige soft paste             | grey paste      |
| Specific gravity                    | 1.4                       | 1.4                          | 1.4             |
| Viscosity at 25 °C (Pas)            | thixotropic               | thixotropic                  | thixotropic     |
| Lap shear strength at 25 °C (A501)* | -                         | -                            | > 15 MPa        |
| Pot Life (100 gm at 25°C)           | -                         | -                            | 45 - 55 minutes |

*Specified data are on a regular basis analysed. Data which is described in this document as 'typical' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.*

#### Processing

##### Pretreatment

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt.

Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

| Mix ratio                 | Parts by weight | Parts by volume |
|---------------------------|-----------------|-----------------|
| Araldite® 2015-1 Resin    | 100             | 100             |
| Araldite® 2015-1 Hardener | 100             | 100             |

**Application of adhesive**

The resin/hardener mix may be applied manually or robotically to the pretreated and dry joint surfaces. Huntsman's technical support group can assist the user in the selection of a suitable application method as well as suggest a variety of reputable companies that manufacture and service adhesive dispensing equipment.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. Huntsman stresses that proper adhesive joint design is also critical for a durable bond. The joint components should be assembled and secured in a fixed position as soon as the adhesive has been applied.

For more detailed explanations regarding surface preparation and pretreatment, adhesive joint design, and the dual syringe dispensing system, visit [www.aralditeadhesives.com](http://www.aralditeadhesives.com).

**Equipment maintenance**

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

**Typical times to minimum shear strength**

| Temperature        | °C      | 10 | 15 | 23 | 40 | 60 | 100 |
|--------------------|---------|----|----|----|----|----|-----|
| Cure time to reach | hours   | 10 | 6  | 4  | 1  | -  | -   |
| LSS > 1MPa         | minutes | -  | -  | -  | -  | 20 | 3   |
| Cure time to reach | hours   | 20 | 15 | 8  | 3  | -  | -   |
| LSS > 10MPa        | minutes | -  | -  | -  | -  | 40 | 5   |

LSS = Lap shear strength.

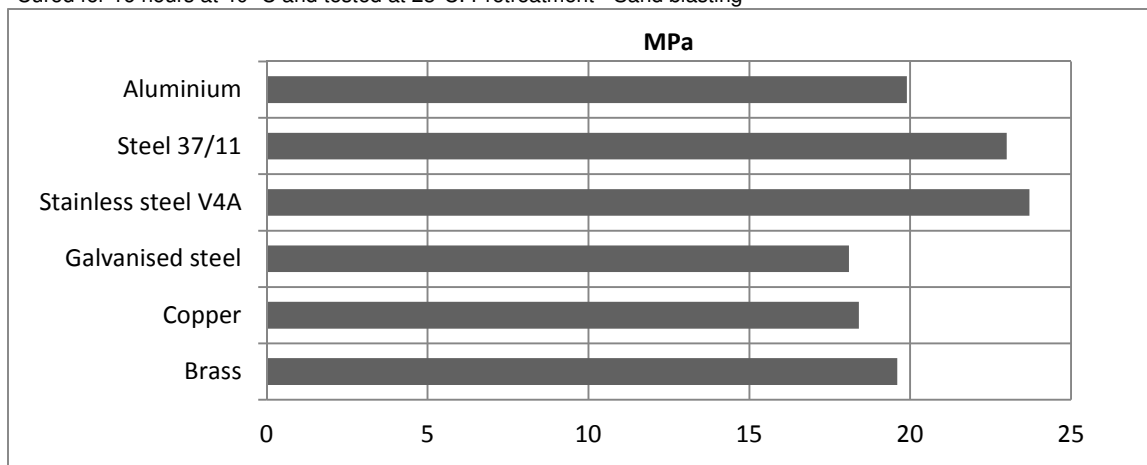
**Typical cured properties**

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

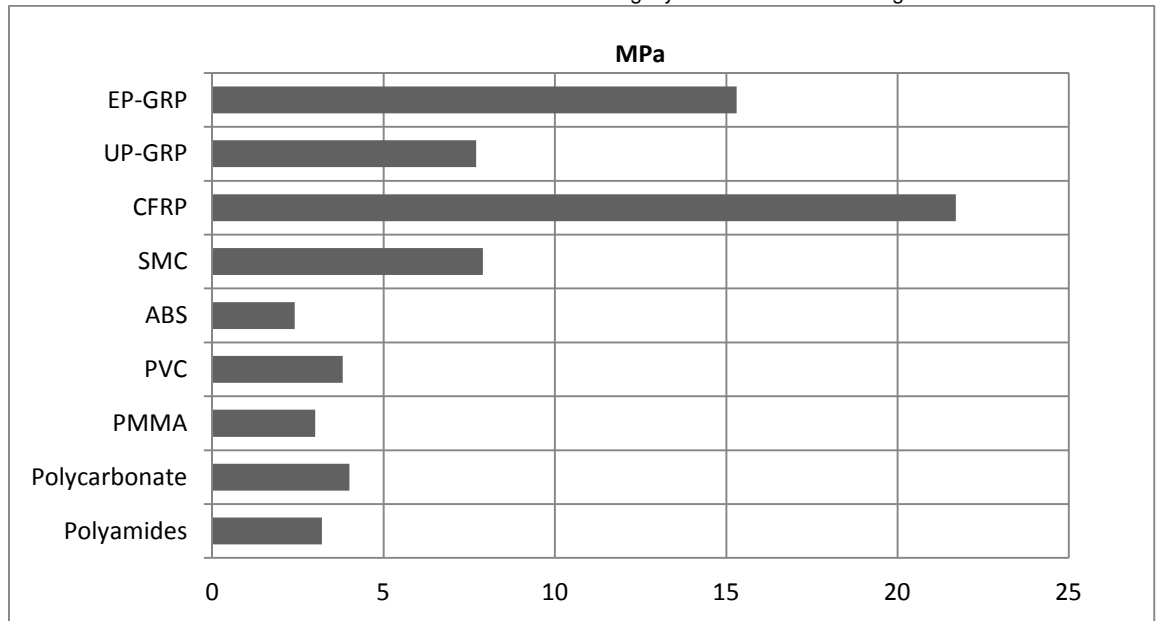
**Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587) (typical average values)**

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



## Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587) (typical average values)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment – Lightly abrade and alcohol degrease

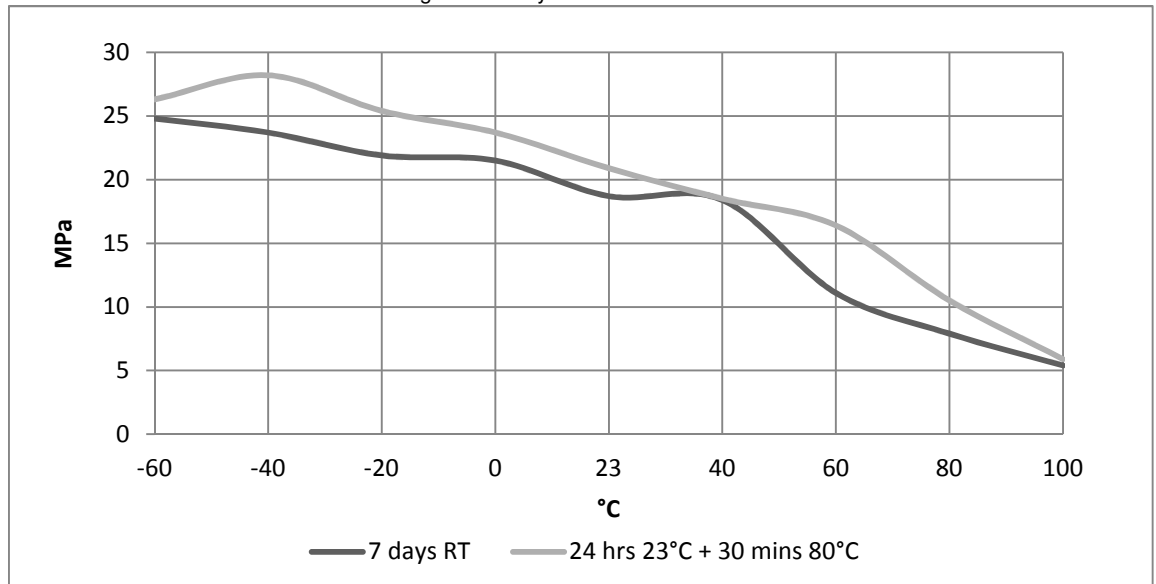


## Tensile properties (ISO 527). Cure 16hrs at 40°C (typical average values)- tested at 23°C

|                     |         |
|---------------------|---------|
| Tensile strength    | 31 MPa  |
| Tensile modulus     | 1.6 GPa |
| Elongation at break | 4.2 %   |

## Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

On aluminium. Pretreatment - Sand blasting. Cure 7 days at RT or 24 hours at 23°C + 30 mins at 80°C



## Glass transition temperature (typical average values)

Cure: 1 hour at 80°C

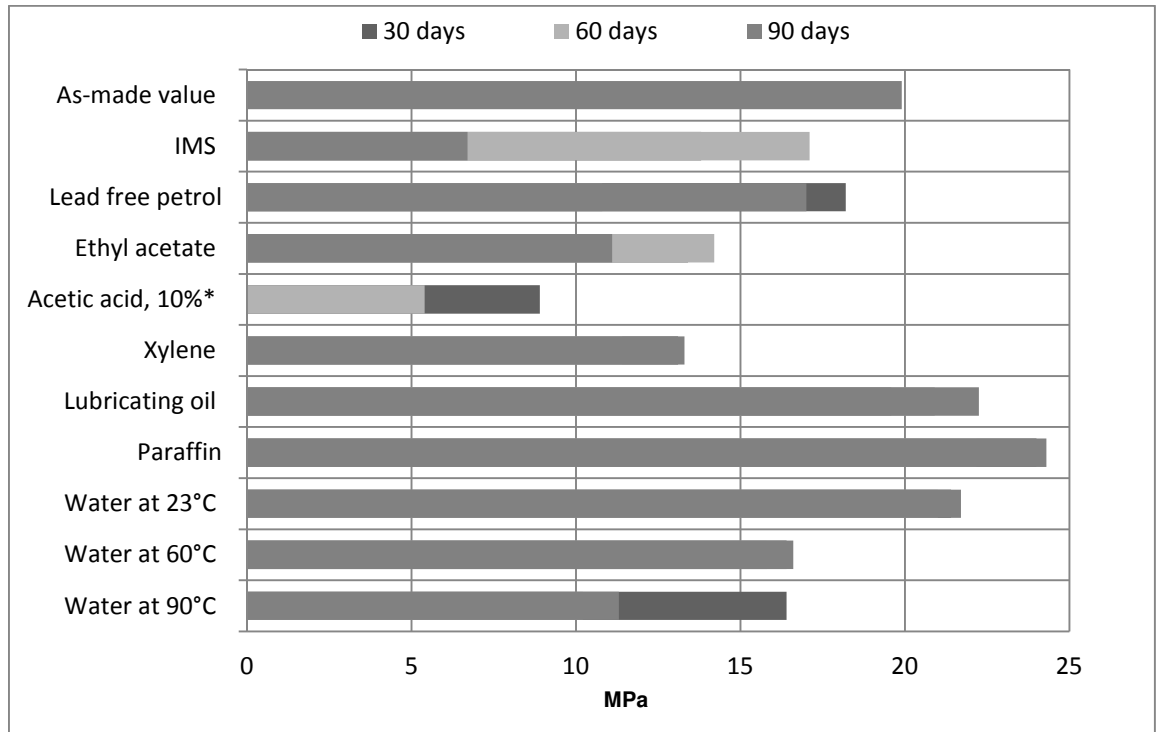
78°C by DMA

## Lap shear strength versus immersion in various media (ISO 4587) (typical average values)

On aluminium, cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting

Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 30, 60 and 90 days at 23°C

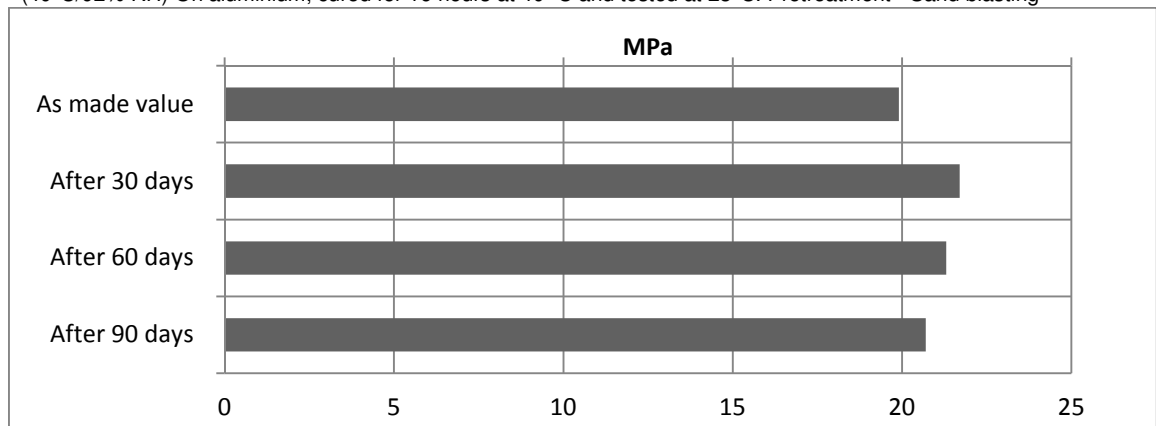
Cure 16 hours 40°C



\*: degraded in acetic acid after 90 day

## Lap shear strength versus tropical weathering (ISO 4587) (typical average values)

(40°C/92% RH) On aluminium, cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



**DMA Shear modulus G' (ISO 6721) (typical average values).**

Cure: 1 hour at 80 °C

| Temperature | G'      |
|-------------|---------|
| -50 °C      | 1.8 GPa |
| 0 °C        | 1 GPa   |
| 20 °C       | 900 MPa |
| 50 °C       | 540 MPa |
| 75 °C       | 61 MPa  |
| 100 °C      | 12 MPa  |

**Flexural Properties (ISO 178) (typical average values).**

Cure 16 hours at 40°C , tested at 23°C

|                   |          |
|-------------------|----------|
| Flexural Strength | 43 MPa   |
| Flexural Modulus  | 1800 MPa |

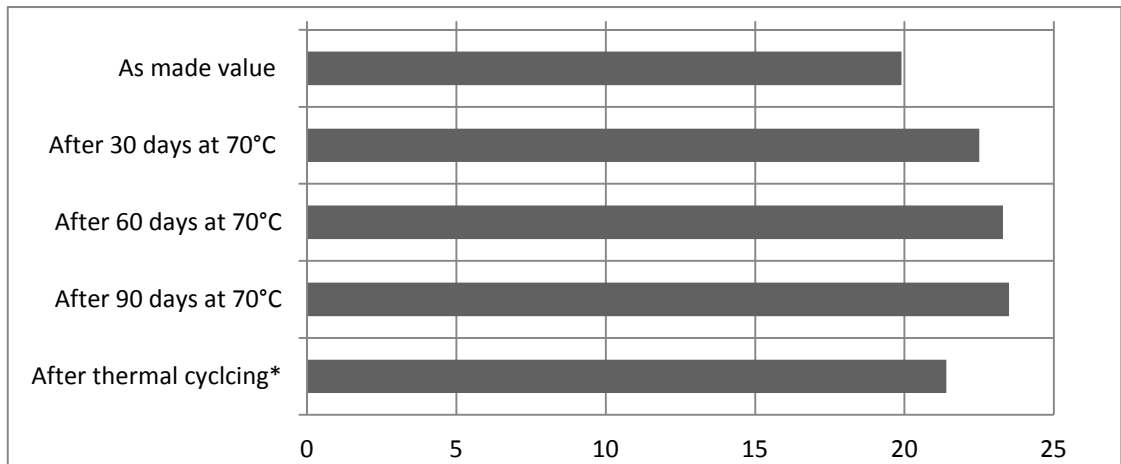
**Tensile Properties (ISO 178) (typical average values).**

Cure 16 hours at 40°C , tested at 23°C

|                     |          |
|---------------------|----------|
| Tensile Strength    | 31 MPa   |
| Tensile Modulus     | 1600 MPa |
| Elongation at break | 4.2%     |

**Lap shear strength versus heat aging (ISO 4587) (typical average values)**

On aluminium, cured for 16 hours at 40 °C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



\* Thermal cycling: 25 cycles of 6 hours duration from -30°C to 70°C

---

**Storage**

Araldite® 2015-1 must be stored at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

---

**Handling  
precautions****Caution**

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.



**Huntsman Advanced Materials  
(Switzerland) GmbH**  
Klybeckstrasse 200  
CH - 4057 Basel  
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11  
Fax: +41 (0)61 299 11 12

[www.aralditeadhesives.com](http://www.aralditeadhesives.com)

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the user. Specified data are analysed on a regular basis. Data which is described in this document as 'typical' or 'guideline' is not analysed on a regular basis and is given for information purposes only. Data values are not guaranteed or warranted unless if specifically mentioned.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of Huntsman Advanced Material's knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, **nothing herein is to be construed as a warranty, whether express or implied, including but without limitation, as to merchantability or fitness for a particular purpose. In all cases, it is the responsibility of the user to determine the applicability of such information and recommendations and the suitability of any product for its own particular purpose.**

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., Huntsman Advanced Materials (UAE) FZE, Huntsman Advanced Materials (Guangdong) Company Limited, and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

All trademarks mentioned are either property of or licensed to Huntsman Corporation or an affiliate thereof in one or more, but not all, countries.

Copyright © 2017 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved

# SikaForce®-7752 FRW L60

Der schwerentflammbare standfeste strukturelle Klebstoff

## Technische Eigenschaften

|                                                  | Komponente A (Harz)<br>SikaForce®-7752 FRW L60 | Komponente B (Härter)<br>SikaForce®-7752 B |
|--------------------------------------------------|------------------------------------------------|--------------------------------------------|
| Chemische Basis                                  | Polyole, gefüllt                               | Isocyanatderivate, ungefüllt               |
| Farbe                                            | Weiss                                          | Braun, transparent                         |
| Mischfarbe                                       | Beige                                          |                                            |
| Härtungsmechanismus                              | Polyaddition                                   |                                            |
| Dichte (25 °C)                                   | ca. 1,6 kg / l                                 | ca. 1,2 kg / l                             |
| Festkörpergehalt                                 | 100%                                           | 100%                                       |
| Mischungsverhältnis                              | Volumen<br>Gewicht                             | 100<br>100                                 |
| Viskosität (20 °C), P/P 30 mm, 0,2 mm Spalt      | ca. 200.000 mPas<br>(standfest)                | ca. 200 mPas                               |
| Mischviskosität (20 °C), P/P 30 mm, 0,2 mm Spalt | ca. 70.000 mPas (standfest)                    |                                            |
| Verarbeitungstemperatur                          | 15 – 30 °C                                     |                                            |
| Topfzeit 20 °C <sup>1)</sup>                     | ca. 60 min                                     |                                            |
| Shore-D-Härte <sup>2)</sup> (DIN 53505)          | ca. 60                                         |                                            |
| Zugfestigkeit <sup>2/4)</sup> (ISO 527)          | ca. 10 MPa                                     |                                            |
| Bruchdehnung <sup>2/4)</sup> (ISO 527)           | ca. 25 %                                       |                                            |
| Zugscherfestigkeit <sup>2/3)</sup> (DIN EN 1465) | ca. 10 MPa (abhängig vom Untergrund)           |                                            |
| Anfangsfestigkeit (0,5 MPa)                      | ca. 5h 23 °C / 110 min 40 °C / 35 min 60 °C    |                                            |
| Winkelschälfestigkeit <sup>2)</sup> (DIN 53282)  | ca. 120 N/3 cm                                 |                                            |
| Haltbarkeit in ungeöffnetem Gebinde              | 6 Monate                                       | 12 Monate                                  |

<sup>1)</sup> Viskositätsanstieg bis 150.000 mPas im Rheolab MC 10

<sup>2)</sup> Prüftemperatur: 23 °C, 50 % relative Luftfeuchtigkeit; Aushärtung: 48 Std. RT + 3 Std. 105 °C + 24 Std. RT

<sup>3)</sup> Substrat: AlCuMg<sub>2</sub> platinert; Klebstoffschichtdicke: 1,5 mm <sup>4)</sup> Schichtdicke der Zugprüfkörper: 4 mm

## Beschreibung

SikaForce®-7752 FRW L60 ist ein nach IMO FTPC Teil 5 schwerentflammbares 2K-Klebstoff-System, welches aus einem gefüllten polyolbasierenden Harz und einem isocyanatbasierenden Härter besteht. Die zwei Komponenten werden mit geeigneten Pumpanlagen dosiert, gemischt und aufgetragen.

SikaForce®-7752 FRW L60 wird nach dem Qualitätssicherungssystem ISO 9001 / 14001 und dem Responsible Care Programm hergestellt.

## Produktvorteile

- Schwerentflammbar
- Raumtemperaturhärtend
- Alterungsbeständig
- Standfest
- PVC- und lösungsmittelfrei
- Gute Schlagzähigkeit
- Hervorragende Kälteflexibilität

## Anwendungsbereich

SikaForce®-7752 FRW L60 ist ein standfester zweikomponentiger Polyurethanklebstoff mit breitem Haftspektrum für strukturelle Verklebungen.

Dieses Produkt ist nur für erfahrene Anwender geeignet. Um Haftung und Materialverträglichkeit gewährleisten zu können, müssen Vorversuche mit Originalmaterialien unter den jeweiligen Bedingungen durchgeführt werden.



## Härtungsmechanismus

Die Aushärtung von SikaForce®-7752 FRW L60 erfolgt durch Reaktion der beiden Komponenten. Hohe Temperaturen beschleunigen, niedrige Temperaturen verlangsamen die Aushärtung.

## Chemische Beständigkeit

SikaForce®-7752 FRW L60 ist hydrolysebeständig. Die Beständigkeit gegen Chemikalien ist immer von der Beschaffenheit des Untergrundes, Konzentration, Temperatur und Einwirkungsdauer abhängig. Das gleiche gilt auch bezüglich Temperaturen. Ohne Chemikalieneinwirkung ist der Klebstoff dauerhaft beständig bis 120 °C, kurzfristig kann der Klebstoff auch höheren Temperaturen ausgesetzt werden.

Bei vorhersehbarer chemischer oder thermischer Belastung ist eine objektbezogene Prüfung notwendig.

## Verarbeitungshinweise

### Untergrundvorbereitung

Die Untergründe müssen sauber, trocken und frei von Verunreinigungen (Fette, Öle, staubförmige Ablagerungen) sein. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Untergründe und der mechanischen Anforderungen an den Klebstoff werden Vorversuche und eine objektbezogene Beratung empfohlen.

### Verarbeitung

Die Dosierung des Klebstoffes erfolgt mittels geeigneter Dosiermaschinen mit dynamischen oder statischen Mischköpfen im Rauen- oder Sprühauftrag. Die Verarbeitungstemperatur sollte oberhalb 15 °C liegen. Für weitere Informationen zur Auswahl geeigneter Verarbeitungsgeräte setzen Sie sich bitte mit der Abteilung System Engineering der Sika Industry in Verbindung.

## Reinigung

Nicht ausgehärtetes SikaForce®-7752 FRW L60 kann von Geräten und Werkzeugen mit Sika® Remover-208 entfernt werden. Ausgehärtetes Material kann nur noch mechanisch entfernt werden.

Hände/Haut sollten sofort mit Sika® Handclean oder einer geeigneten Handwaschpaste und Wasser gereinigt werden. Keine Lösemittel verwenden!

## Lagerung

Trocken und zwischen 10 °C und 30 °C. Vor direktem Sonnenlicht und Frost schützen. Nach Produktentnahme müssen die Gebinde umgehend wieder luftdicht verschlossen werden, um das Material vor Luftfeuchtigkeit zu schützen.

Zu Transportzwecken dürfen die Komponenten kurzfristig Temperaturen bis -10 °C während maximal 3 Tagen ausgesetzt werden.

Kristallisierte oder nicht homogene Komponenten dürfen nicht verwendet werden.

## Weitere Informationen

Folgende Dokumente sind auf Anfrage erhältlich:

- Sicherheitsdatenblatt

## Gebinde

### SikaForce®-7752 FRW L60

|              |       |        |
|--------------|-------|--------|
| Komponente A | Eimer | 7,5 kg |
|--------------|-------|--------|

### SikaForce®-7752 B

|              |          |        |
|--------------|----------|--------|
| Komponente B | Dose     | 1,5 kg |
|              | Kanister | 2 kg   |
|              | Hobbock  | 25 kg  |
|              | Fass     | 250 kg |

## Hinweis Messwerte

Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.

## Arbeitsschutzbestimmungen

Für den Umgang mit unseren Produkten sind die wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen und ökologischen Daten den stoffspezifischen Sicherheitsdatenblättern zu entnehmen. Die einschlägigen Vorschriften, wie z.B. die Gefahrstoffverordnung, sind zu beachten. Auf Wunsch stellen wir Ihnen unser System-Merkblatt TM 7510 "Allgemeine Hinweise zum Arbeitsschutz" beim Umgang mit Produkten der Sika Deutschland GmbH zur Verfügung.

## Hinweis

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen unterschiedlichen Materialien und Untergründen sowie abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemäßen und erfolgversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt wurden. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im Übrigen gelten unsere jeweiligen aktuellen Verkaufs-, Liefer- und Zahlungsbedingungen. Es gilt das jeweils neueste lokale Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte oder im Internet unter [www.sika.de](http://www.sika.de) heruntergeladen werden kann.

Weitere Informationen:  
[www.sika.de](http://www.sika.de), E-Mail: [industry@de.sika.com](mailto:industry@de.sika.com)  
[www.sika.com](http://www.sika.com)

Sika Deutschland GmbH  
Stuttgarter Str. 139  
72574 Bad Urach  
Deutschland  
Tel. +49 7125 940 761  
Fax +49 7125 940 763



## 7. APÊNDICES

### 7.1. APÊNDICE A

O APÊNDICE A foi criado com o objetivo de aliviar o suporte teórico do Subcapítulo 3.2.5.3, relativo ao pré-processamento dos modelos e condições das análises numéricas.

#### Módulo *Part*

No módulo *part*, foi criada a geometria de cada uma das juntas adesivas. Em ambos os casos, no menu *create part*, foi definido que se iria gerar uma geometria de junta axissimétrica, deformável e do tipo sólido. Em seguida, o *software* gera um *sketch* que auxilia o utilizador no desenho do contorno exterior da junta. Através do comando de linhas, é intuitivo gerar o contorno exterior das juntas adesivas. Em semelhança com outros *softwares*, o Abaqus® permite atribuir e editar as dimensões atribuídas, gerar geometrias complexas e atribuir restrições geométricas que garantem as condições de posicionamento requeridas pela análise.

A JST e a JRE são modeladas como geometrias de revolução constituídas por elementos axisimétricos, a partir de um eixo vertical de revolução coincidente com a direção axial da ligação adesiva. No caso das geometrias planas, é necessário introduzir dados referentes à espessura dos aderentes e adesivo. No entanto, nas juntas tubulares basta atribuir as dimensões no plano dos contornos exteriores de forma coerente (*fully defined*), e o *software* permite analisar no plano uma geometria de revolução. A Figura 124 ilustra os diferentes parâmetros e pormenores geométricos, restrições e aspetos construtivos da JST e da JRE, e ainda o eixo de revolução. A simbologia utilizada para definir as diferentes geometrias engloba a possibilidade de fazer variar o diâmetro exterior dos aderentes, e a cota é definida entre os contornos exteriores de um dos aderentes e o eixo de revolução, representada na Figura 124.b). No caso da geometria de ressalto exterior, foram respeitados os raios de curvatura análogos ao processo de hidroformagem. Os raios de curvatura representados são concêntricos e respeitam os requisitos do processo de hidroformagem, estando diretamente relacionados com  $t_{Ad}$  [235].

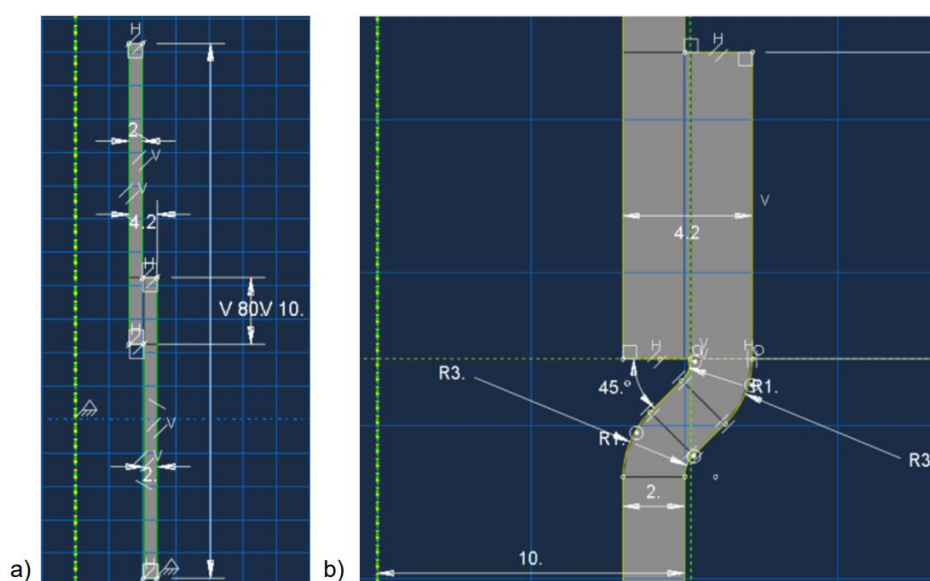


Figura 124 – Eixo de revolução, parâmetros e pormenores geométricos, restrições e aspetos construtivos da JST, a), e da JRE, b).

No menu *partition face sketch*, e através do comando de linhas, foram atribuídas as partições correspondentes ao adesivo e aderentes, garantindo a atribuição dos diferentes materiais e propriedades às partições correspondentes. O programa computacional permite definir as diferentes partições de forma intuitiva, respeitando as condições de paralelismo e perpendicularidade, sem necessidade de atribuir quaisquer constrangimentos. De maneira a facilitar a geração da malha, foram adicionadas duas outras partições nos aderentes, coincidentes com as extremidades da sobreposição. A Figura 125 ilustra o pormenor construtivo do *partition sketch* da JTRE, que se encontra dividida em seis partições no total, que incluem os arcos de coroa circular e o espaço restante entre os mesmos. O acréscimo destas partições permite gerar uma malha livre nos arcos de coroa circular e uma malha estruturada formada por quadriláteros no espaço reservado entre estes. É necessário verificar este campo sempre que é alterado algum pormenor construtivo, garantindo que as partições acompanham as cotas atualizadas ou os ângulos de ressalto, de acordo com a geometria a analisar [236].

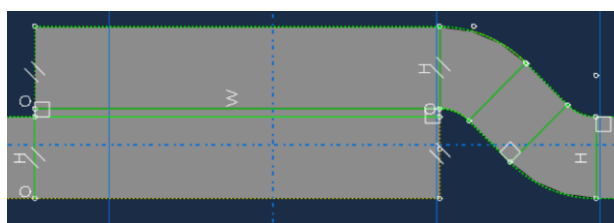


Figura 125 - Pormenor construtivo do *partition sketch* da JTRE.

### Módulo *Property*

Após modelar a geometria e definir as partições correspondentes ao adesivo e aos aderentes, é no módulo *property* que vão ser criados os materiais a incluir na análise, definidas e atribuídas as secções à partição respetiva. À direita dos comandos, o *software* disponibiliza um controlador (*manager*), que permite atualizar os campos relativos às propriedades materiais e redefinir as secções associadas às partições. No menu *create material*, é possível criar cada material de forma isolada. Uma vez que foram analisadas várias configurações de juntas adesivas tubulares, e três adesivos distintos, foi criada uma livreria material (*material library*) que permite abrir o diretório de modelos numéricos homólogos e associar um ou mais destes materiais definidos anteriormente, evitando o desperdício de tempo em análises de modelos similares.

O primeiro material a ser criado foi o alumínio, correspondente à secção dos aderentes. Assumiu-se um comportamento dos aderentes elasto-plástico, o que torna possível identificar o modo de rotura da junta e o valor de  $PA$ . No que diz respeito ao comportamento elástico dos aderentes de alumínio, assumiu-se que este era um material isotrópico, com  $E=70\,000$  [MPa] e  $\nu=0,3$ .

O *software* não tem em consideração as unidades atribuídas às propriedades nem às condições fronteiras, daí requerer um compromisso na análise dimensional das grandezas. De seguida, foi caracterizado o comportamento plástico do material. Nesta fase, optou-se por criar uma tabela que relaciona a deformação plástica com a tensão plástica. De acordo com a Figura 126, a partir de uma tensão plástica de 355 [MPa], o *software* assume que o alumínio tem um comportamento completamente plástico [237].

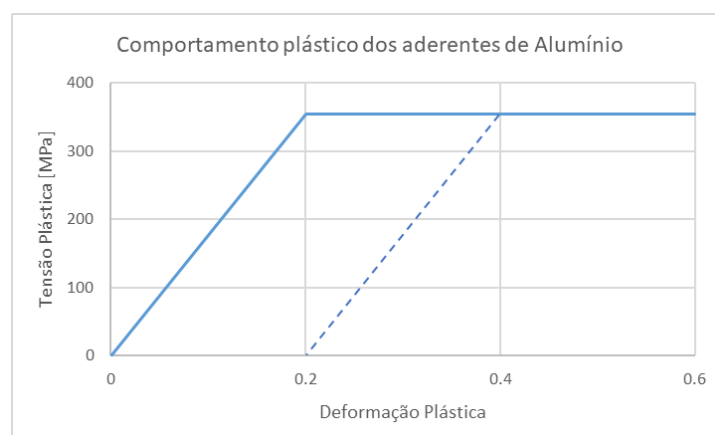


Figura 126 - Comportamento plástico dos aderentes de alumínio.

De seguida foram definidos os materiais responsáveis pela união dos aderentes. Os adesivos designam-se por Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Os presentes materiais foram modelados por aproximação contínua como elementos coesivos, pela aplicação da lei de tração-separação triangular. Foram criadas as leis coesivas do adesivo para cada caso em particular. A cada adesivo foram atribuídos os critérios de rotura. Entre eles destacam-se o critério de iniciação do dano (QUADS *Damage*), que requer a tensão limite em tração e ao corte. É de notar que foi atribuída a tenacidade de cada adesivo à tração e ao corte (*Damage Evolution*), que é do tipo *energy* e o comportamento em modo misto é do tipo *power law*. Foi atribuído um parâmetro de estabilização ou uma variável de dano viscosa ( $5,0 \times 10^{-5}$  [-]) a todos os adesivos, que auxilia a convergência do modelo. Os parâmetros coesivos em tração e corte para os adesivos utilizados encontram-se representados na Tabela 152.

Tabela 152 - Parâmetros coesivos em tração e corte para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce®.

| Adesivo               | $E$   | $G$  | $t_n^0$ | $t_s^0$ | $G_{IC}$ | $G_{IIC}$ |
|-----------------------|-------|------|---------|---------|----------|-----------|
| Unidades              | [MPa] |      |         |         | [N/mm]   |           |
| Araldite® AV138 [180] | 4890  | 1560 | 39,45   | 30,20   | 0,20     | 0,38      |
| Araldite® 2015 [216]  | 1850  | 560  | 21,63   | 17,90   | 0,43     | 4,70      |
| SikaForce® 7752 [219] | 490   | 190  | 11,49   | 10,17   | 2,36     | 5,41      |

De seguida são criadas as secções correspondentes ao aderente e ao adesivo. O aderente é modelado como sólido homogéneo, não sendo necessário especificar a largura de secção do mesmo, que está explícita na *section sketch*. O adesivo foi modelado como uma secção coesiva, e a resposta no caso dos elementos coesivos é de tração-separação. A Figura 127 ilustra o menu *section manager*, que especifica os materiais e o tipo de secções atribuídas aos aderentes e adesivos.

|          |                    |          |
|----------|--------------------|----------|
| Aderente | Solid, Homogeneous | Alumínio |
| Adesivo  | Cohesive           | AV138    |

Figura 127 - Menu *section manager*, que especifica os materiais e o tipo de secções atribuídas aos aderentes e adesivos.

De seguida, são atribuídas as secções às diferentes partições criadas anteriormente. O comando *shift* permite seleccionar mais do que uma entidade, e o comando *ctrl* desselecciona. As partições passam a verde sempre que têm uma secção atribuída, conforme ilustrado na Figura 128. Se os aderentes da junta adesiva de compósito forem constituídos por materiais ortotrópicos, é necessário definir as direcções principais dos elementos, no menu *Assign Material Orientation*.

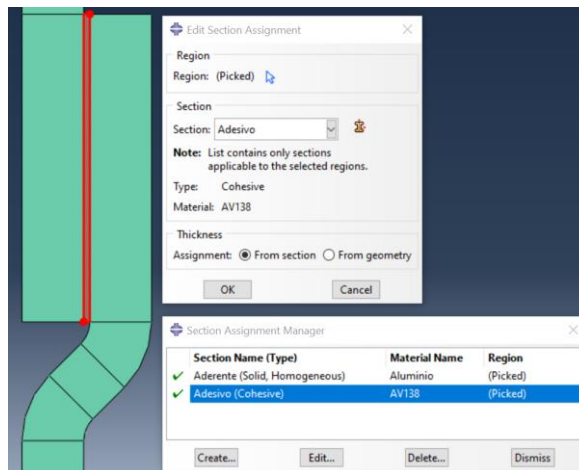


Figura 128 - Atribuição das secções criadas às partições delimitadas por traços contínuos de cor escura.

### Módulo *Assembly*

O módulo *assembly* é responsável pela união das diferentes partes do modelo. No entanto, as juntas adesivas modeladas são constituídas por apenas um componente, ainda que subdividido em várias partições, referentes aos aderentes e adesivo. Na eventualidade de modelar as diferentes uniões adesivas por partes seria necessário recuperá-las e introduzi-las no espaço de trabalho do módulo *assembly*, garantir as condições de posicionamento e especificar as restrições necessárias. Nesta etapa, não é necessário efetuar nenhuma operação, embora seja aconselhado introduzir o componente projetado no espaço de trabalho (*work space*) [229].

### Módulo *Step*

No módulo *step* são definidos os parâmetros de computação da análise numérica. Inicialmente, foi criado um *step* estático, que pode ser editado de acordo com o menu *manager*. No menu *creat step*, deve ser ativada a opção de não linearidade geométrica. Esta configuração controla a inclusão de efeitos não lineares de grandes deslocamentos, afetando diretamente os incrementos seguintes. Na programação dos parâmetros de incrementação, optou-se por definir o número máximo de incrementos que o *software* não pode exceder (10000), um tamanho dos incrementos mínimo de  $1,0 \cdot 10^{-20}$  e um tamanho do incremento inicial e final correspondente a 1% do  $\delta$  imposto nas condições fronteira e abordado em seguida. Numa fase inicial do procedimento experimental, foram testadas algumas geometrias de juntas adesivas de diferentes geometrias e afinados alguns parâmetros de computação no módulo *step*. Tornou-se necessário reduzir o tamanho inicial e máximo dos incrementos em dez vezes, de 0,01 para 0,001, e o tamanho mínimo dos incrementos, de  $1,0 \cdot 10^{-20}$  para  $1,0 \cdot 10^{-45}$ , evitando a ocorrência de problemas de convergência na fase inicial de propagação do dano e garantindo um número de incrementos superior a 50 entre o início da análise e a obtenção de  $P_{m\acute{a}x}$ .

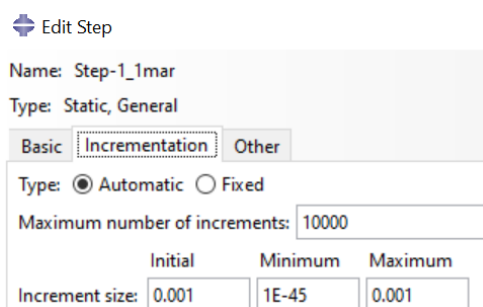


Figura 129 - Parâmetros de computação da análise numérica, no módulo *step*.

No menu *field output requests manager*, não é necessário criar um *field output*, basta editar o predefinido pelo *software*, de maneira a incluir as variáveis que o programa vai apresentar no modo de visualização em termos gráficos. Foi necessário adicionar as variáveis de saída *sdeg* e *status*, que permitem controlar e analisar a degradação dos elementos coesivos, e eliminar os elementos coesivos da análise quando estes atingem a rotura, respetivamente. O utilizador deve editar o *manager* do *history output* para gerar a curva  $P-\delta$ , sendo necessário criar dois *sets*. Nos comandos disponíveis no cabeçalho, através da opção *tools*, é possível criar os *sets*. Os *sets* criados designam-se por “deslocamentos” e “reações”, respetivamente. De acordo com a legenda da Figura 130, o ponto representado a vermelho pertence ao *set* “deslocamentos”, e a linha a vermelho pertence ao *set* “reações”. O *set* “deslocamentos” está representado por apenas um ponto, mas poderia perfeitamente ser representado pela linha, uma vez que todos os pontos desta extremidade têm o mesmo  $\delta$ . A extremidade direita é encastrada numa fase posterior do pré-processamento (módulo *Load*), e todos os pontos pertencentes a esta vão contribuir para a reação total da junta adesiva [238].



Figura 130 - Set deslocamentos e reações.

No menu *create history output*, ao contrário do que acontece no *field output* (forma gráfica), o *software* disponibiliza os dados em termos tabulares, o que permite gerar a curva  $P-\delta$ . No menu *edit history output request*, e no caso do *set* “deslocamentos”, a variável de saída corresponde a  $U_2$  ( $\delta$  na direção do eixo Z). No *set* “reações” a variável de saída corresponde a  $RF_2$  (reação ao longo da direção axial da junta).

Ainda no módulo *step*, em *General Solution Controls*, foram alteradas algumas condições com o objetivo de melhorar a convergência da solução em cada incremento. Os controlos gerais para obtenção da solução podem ser personalizados. No entanto, na maioria das análises não lineares, é desnecessário personalizar determinado tipo de parâmetros. Todavia, na ocorrência de problemas de convergência impeditivos de prosseguir a análise, torna-se necessário personalizar estes comandos para obter uma solução. O manual do utilizador disponibilizado pelo *software* ilustra uma série de problemas mais comuns e apresenta em anexo a solução para resolver os mesmos. A alteração destes parâmetros deve ser realizada por analistas dotados de alguma experiência na área em estudo, que devem ser personalizados com particular cuidado [51].

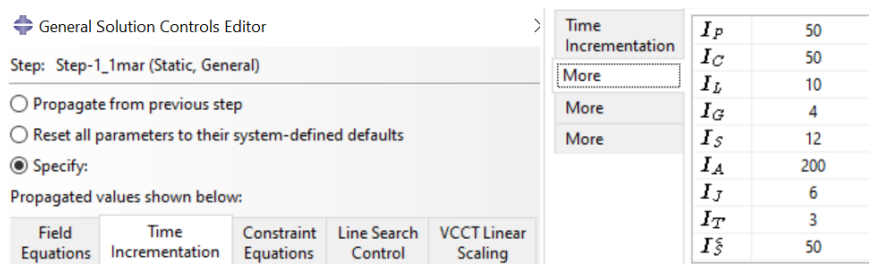


Figura 131 – Alterações no módulo *step* para melhorar a convergência da solução em cada incremento.

### Módulo *Interaction*

O módulo *Interaction* não é aplicável para este caso de estudo, uma vez que só deve ser utilizado na eventualidade de o sistema ser constituído por mais do que um componente, caso em que se torna necessário estabelecer o contacto entre os diferentes elementos. Na eventualidade de o caso de estudo se tratar de um provete ENF, seria necessário estabelecer o contacto entre o punção e o provete, evitando a interpenetração material [218].

### Módulo *Load*

No módulo *Load*, foram definidas duas condições fronteira que simulam o carregamento à tração das juntas de ligação. Foi imposto um  $\delta$  longitudinal a uma das extremidades da união e uma condição de encastramento na extremidade oposta, o que é equivalente à aplicação de uma força. É de notar que não foi adicionada nenhuma restrição radial ao conjunto, de maneira a simular o efeito de Poisson e aproximar o caso de estudo de uma situação prática (Figura 132).

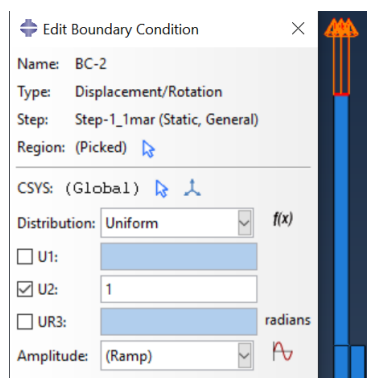


Figura 132 - Simulação do efeito de Poisson, e aplicação do  $\delta$  imposto numa das extremidades da junta adesiva.

No menu *create boundary conditions*, deve ser especificado o tipo de condição fronteira a aplicar. Para simular o encastramento de uma das extremidades, foi utilizado uma restrição da categoria mecânica e do tipo simetria/antisimetria/encastramento, e foi seleccionada a única opção que restringe o movimento de uma extremidade nas três direções principais.

Para simular o  $\delta$  longitudinal na extremidade oposta, foi utilizada uma restrição da categoria mecânica e do tipo deslocamento/rotação. O  $\delta$  na direção longitudinal foi ajustado para cada geometria analisada, mas nunca ultrapassa os 2 mm. Esta necessidade advém da disparidade nas propriedades do adesivo de ligação, da variação dos parâmetros geométricos em relação à geometria de base e ainda da capacidade dos aderentes de alumínio se deformarem plasticamente. A Figura 133 ilustra a simbologia respetiva do encastramento e do  $\delta$  impostos.



Figura 133 - Simbologia respectiva do encastramento (à direita) e do  $\delta$  (à esquerda) impostos.

### Módulo *Mesh*

O módulo *mesh* antecede o módulo *job* e é nesta etapa que a junta de ligação adesiva é discretizada num determinado número de EF, possibilitando a geração da malha. De acordo com as predefinições do *software*, é necessário atribuir os parâmetros que definem a malha de cada partição de forma individual. Apesar do número de partições definido, não é necessário abordar estes critérios de parametrização de forma individual, e pode tratar-se a junta de ligação como uma parte única.

Inicialmente foram definidos os controlos de malha, através do menu *assign mesh controls*. Devem ser seleccionadas todas as faces correspondentes aos aderentes em alumínio, que não coincidam com os arcos de coroa circular gerados pelo processo de hidroformagem, e de seguida atribuída uma malha estruturada, formada por quadriláteros coincidentes com as direções ortogonais, representada pela cor verde. Relativamente aos arcos de coroa circular, a curvatura adjacente ao ressalto exterior implica a criação de uma malha livre (*free*) que é representada pela cor rosa, ao invés de uma malha dominada por quadriláteros ortogonais. A malha associada à camada de adesivo é representada pela cor amarela, dominada por quadriláteros e do tipo *sweep*, de maneira a modelar a propagação do dano. Através do comando *redefine sweep path*, deve ser garantido que cada elemento coesivo vai ligar um nó das interfaces interior e exterior entre adesivo e aderente, evitando a união de elementos da mesma interface (na direção longitudinal). A Figura 134 ilustra a atribuição dos diferentes controlos de malha, de acordo com o código de cores enunciado.



Figura 134 - Atribuição dos diferentes controlos de malha, de acordo com o código de cores.

Após associar os controlos de malha e através do comando *assign elemento type*, definiu-se o tipo de elementos correspondente a cada partição. As partições análogas aos aderentes devem ser seleccionadas em simultâneo, independentemente dos parâmetros de controlo de malha definidos anteriormente. Os aderentes vão conter elementos do tipo *axisymmetric stress* (CAX4: *A 4-node bilinear axisymmetric quadrilateral*), por se tratar de uma geometria de revolução. O adesivo vai conter elementos do tipo coesivo (COHAX4: *A 4-node axisymmetric cohesive element*).

Em todos os constituintes da união existe a hipótese de utilizar integração reduzida, o que permite reduzir o número de pontos de Gauss associados a cada elemento. De maneira a obter uma aproximação mais fidedigna no que diz respeito ao estado de tensão e deformação ao longo de  $L_0$ , não se aplicou a integração reduzida a este caso de estudo. O único parâmetro a alterar após seleccionar o tipo de elemento é a variável de dano viscosa, tendo sido atribuído um valor de  $1,0e^{-5}$  [-] a todos os constituintes. Este parâmetro facilita a convergência do modelo quando submetido para análise e torna o processo de propagação do dano mais suave, sem alterar o comportamento da junta.

Antes de gerar a malha, é necessário atribuir as sementes às arestas que correspondem aos contornos exteriores dos constituintes da junta adesiva e às partições definidas na fase inicial da

análise. As sementes correspondem a marcadores sobrepostos aos contornos das diferentes partições do modelo, que especificam a densidade da malha nessa região específica. As sementes permitem caracterizar a densidade da malha no interior das regiões delimitadas pelos marcadores, assim como ao longo dos contornos. O *software* disponibiliza duas opções para atribuir as sementes, ou de forma global, através do comando *seed part*, ou de forma localizada, através do comando *seed edges*. Optou-se por definir este parâmetro aresta a aresta, de forma localizada [184].

Nos segmentos de reta que se encontram entre as partições definidas na direção radial pretende-se obter um maior refinamento da malha nas extremidades. Desta maneira, é necessário definir a dimensão das sementes, ou por tamanho aproximado (mm) ou por número de elementos. Nesta secção intermédia, utilizou-se um *bias* duplo com tamanho máximo de 0,5 mm e mínimo de 0,2 mm, obtendo maior refinamento nas extremidades dos segmentos. Nas regiões não ligadas dos aderentes ao elemento coesivo foi aplicado um *bias* simples, garantindo maior refinamento nas proximidades do adesivo, com tamanho máximo de 1 mm e mínimo de 0,2 mm. Nos topos dos aderentes atribuiu-se um *bias* simples, com tamanho dos elementos compreendido entre 0,2 e 0,6 mm. O sentido atribuído deve maximizar o número de elementos na região mais próxima do adesivo estrutural. Os tamanhos dos elementos nas três partições definidas em concordância com o processo de fabrico responsável pelo ressalto exterior vão ser definidas em função do tamanho aproximado de cada elemento, de 0,2 mm no caso. No que diz respeito aos aderentes, resta definir as sementes ao longo das partições definidas anteriormente e coincidentes com a direção radial. Ao longo destas partições, foi aplicado um *bias* simples com tamanho compreendido entre 0,2 e 0,6 mm.

Ao longo de  $t_a$ , ou seja, de acordo com a direção radial, vão ser definidas as sementes em função do número de elementos coesivos. Considerou-se apenas um elemento coesivo nos segmentos correspondentes a  $t_a$ . A Figura 135 ilustra as sementes atribuídas às arestas correspondentes aos contornos exteriores dos constituintes da junta adesiva e às partições definidas. Após associar os controlos de malha, definir os elementos, otimizar os parâmetros e atribuir as respectivas sementes, resta gerar a malha. A Figura 136 ilustra a malha obtida para a geometria de base, constituída por 1212 elementos. É de notar o refinamento atribuído às regiões mais críticas, correspondentes ao início da propagação do dano.



Figura 135 - Sementes atribuídas às arestas correspondentes aos contornos exteriores dos constituintes da junta adesiva e às partições definidas.



Figura 136 - Malha obtida para a geometria de base.

### Módulo *Job*

Após gerar a malha, resta criar e submeter o *job*. O *job* deve ser criado através do menu *create jobs*. O *job* foi designado com o mesmo nome do modelo. Quando o modelo for submetido para análise, o programa vai gerar cerca de quinze a vinte ficheiros em anexo ao ficheiro CAE e, de modo a identificar os ficheiros análogos a cada configuração de junta em particular, a designação da análise deve corresponder à do modelo. É requerido especificar a memória que o computador vai utilizar

para realizar a análise e o número de processadores. No menu *job manager* é possível editar o *job* criado à priori, submeter o modelo para análise (*submit*) e ainda monitorizar o estado da análise através do comando *monitor*. De acordo com o tamanho inicial, máximo e mínimo dos incrementos definido no módulo *Step*, é possível identificar a dimensão de cada incremento através da coluna “*Time/LPF Inc*” e o cumulativo na coluna “*Step Time/LPF*”. Quando o valor cumulativo dos incrementos atingir o  $\delta$  imposto no módulo *Load*, a análise numérica está concluída. A coluna “*Time/LPF Inc*” permite identificar problemas de convergência, e verificar a partir de que incremento se inicia a propagação da fenda, visto que nesta fase da simulação o *software* é forçado a reduzir o tamanho dos incrementos.

A Figura 137 ilustra a monitorização da análise numérica, no caso da geometria de base, ilustrando as particularidades mencionadas anteriormente [239].

Job: TJ\_RE\_A2015\_20\_10\_2\_45 Status: Running

| Step | Increment | Att | Severe Discon Iter | Equil Iter | Total Iter | Total Time/Freq | Step Time/LPF | Time/LPF Inc |
|------|-----------|-----|--------------------|------------|------------|-----------------|---------------|--------------|
| 1    | 000       | 1   | 0                  | 1          | 1          | 0.588771        | 0.588771      | 0.001        |
| 1    | 609       | 1   | 0                  | 1          | 1          | 0.588771        | 0.588771      | 0.001        |
| 1    | 610       | 1   | 0                  | 1          | 1          | 0.589771        | 0.589771      | 0.001        |
| 1    | 611       | 1   | 0                  | 1          | 1          | 0.590771        | 0.590771      | 0.001        |
| 1    | 612       | 1   | 0                  | 1          | 1          | 0.591771        | 0.591771      | 0.001        |
| 1    | 613       | 1   | 0                  | 1          | 1          | 0.592771        | 0.592771      | 0.001        |
| 1    | 614       | 1U  | 0                  | 3          | 3          | 0.592771        | 0.592771      | 0.001        |
| 1    | 614       | 2U  | 0                  | 3          | 3          | 0.592771        | 0.592771      | 0.00025      |
| 1    | 614       | 3   | 0                  | 6          | 6          | 0.592834        | 0.592834      | 6.25e-05     |
| 1    | 615       | 1U  | 0                  | 2          | 2          | 0.592834        | 0.592834      | 6.25e-05     |
| 1    | 615       | 2U  | 0                  | 3          | 3          | 0.592834        | 0.592834      | 1.5625e-05   |
| 1    | 615       | 3   | 0                  | 6          | 6          | 0.592838        | 0.592838      | 3.90625e-06  |

Figura 137 - Monitorização da análise numérica, no caso da geometria de base.

### Módulo *Visualization*

No modo *visualization* é possível consultar os resultados da análise numérica (forma gráfica). Por defeito, o *software* disponibiliza os resultados em concordância com o último incremento. Todavia, através das setas ou do *frame selector*, o programa permite analisar os resultados para cada incremento em particular. Os resultados são apresentados em função da Tensão de Von Mises (*S*). É de notar que no módulo *step* foram introduzidas duas variáveis, *sdeg* e *status*. A variável *sdeg* representa a degradação dos elementos coesivos, como é ilustrado na Figura 138. Os elementos coesivos rompem quando esta variável atinge o valor de  $1,0e^0$  ou 100%.

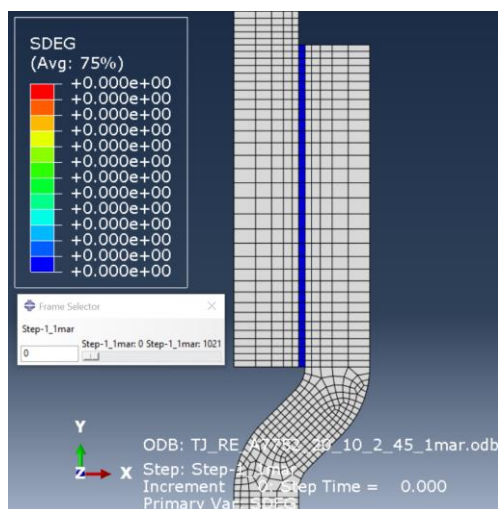


Figura 138 - Representação da degradação dos elementos coesivos (variável *sdeg*).

A variável *status* representa os elementos que ainda não romperam, em função do incremento selecionado. A partir do momento em que determinado elemento coesivo entra em rotura, este é excluído do modo *visualization*, conforme ilustrado na Figura 139.

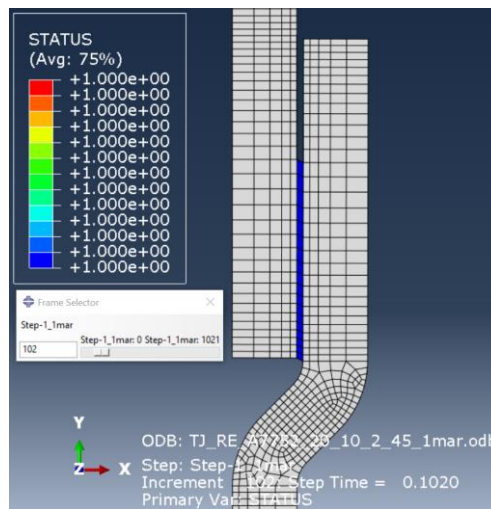


Figura 139 - Representação dos elementos coesivos que ainda não romperam (variável *status*).

## 7.2. APÊNDICE B

O APÊNDICE B funciona como suporte para realização e interpretação dos resultados provenientes do estudo numérico, ilustrados no Subcapítulo 3.4, salvaguardando a orientação de trabalhos futuros no âmbito do tema da presente dissertação, sem contemplar o efeito das alterações geométricas propostas.

### Obtenção das curvas $P$ - $\delta$

No modo *visualization*, é possível obter os dados para criar a curva  $P$ - $\delta$ . Para isso, é necessário combinar os dados referentes ao  $U_2$  e  $RF_2$ , em função do número de incrementos gerados pela análise. Na opção *create XY data*, deve ser escolhida a opção “OBD history output”. Em primeiro lugar, deve ser guardada a soma das reações em todos os nós coincidentes com a extremidade encastrada da junta adesiva, de acordo com a Figura 140.

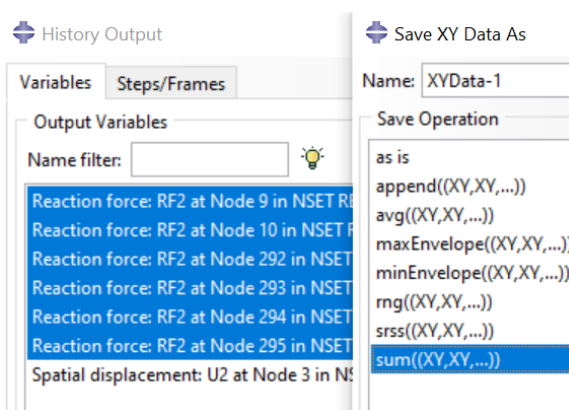


Figura 140 – Criação de uma base de dados correspondente à reação global na extremidade da junta.

Os dados referentes ao  $\delta$  não precisam de ser manipulados, uma vez que o  $\delta$  da extremidade não encastrada da junta é igual em todos os nós da mesma. A Figura 141 ilustra a criação de uma base de dados correspondente ao  $\delta$  nos elementos coincidentes com a extremidade da junta adesiva [239].

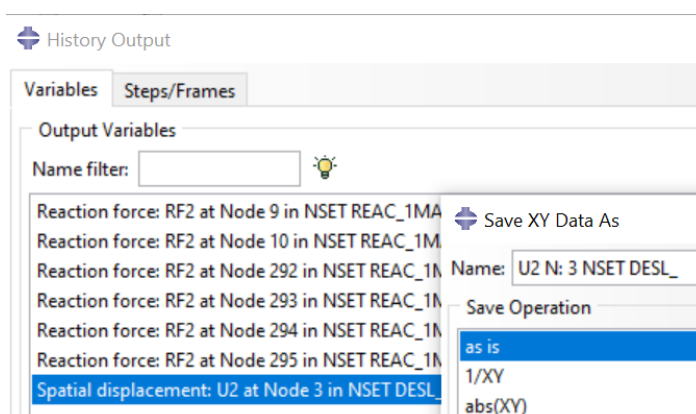


Figura 141 - Criação de uma base de dados correspondente ao  $\delta$  nos elementos coincidentes com a extremidade da junta adesiva.

De seguida, na opção *create XY data*, deve ser escolhida a opção “operate on XY data”, e combinados os dados guardados anteriormente através da seguinte expressão: “combine (“U2 N: 3 NSET DESLOCAMENTO”, - “XYData-1”)”. O manual de utilizador recomenda visualizar a expressão combinada sob a forma gráfica, de maneira a perceber se a curva  $P$ - $\delta$  obtida é coerente com a

geometria modelada e as condições fronteira impostas, comparativamente a trabalhos de investigação anteriores. Por último, resta extrair os valores da curva para uma folha de cálculo do Excel. Para tal, basta seleccionar a opção *XY Data Manager*, e copiar os valores referentes à curva diretamente para a folha de cálculo. Os dados referentes à curva devem ser agrupados em duas colunas e representados através de um gráfico de dispersão com linhas retas. Os valores registados na primeira linha da folha de cálculo devem ser ignorados, pois coincidem com a origem do gráfico de dispersão e não correspondem a nenhum incremento em particular. A curva  $P$ - $\delta$  obtida para a geometria de base está ilustrada na Figura 142.

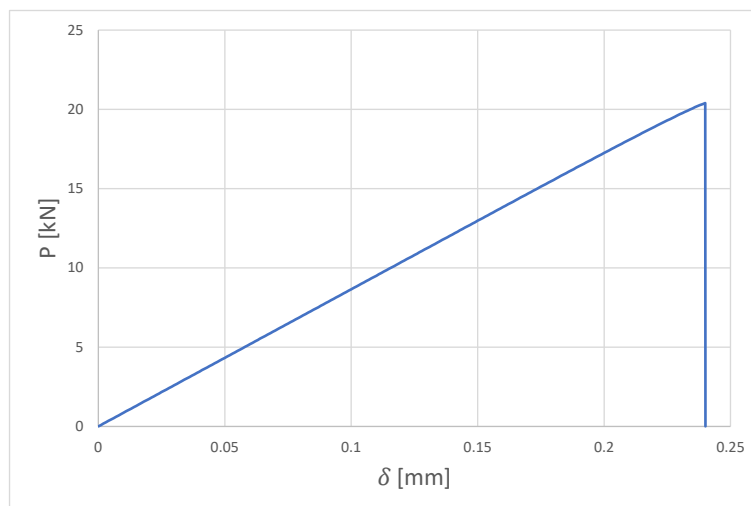


Figura 142 - Curva  $P$ - $\delta$  obtida para a geometria de base.

### Obtenção da energia de rotura

A  $ER$ , medida por intermédio do Sistema Internacional ( $SI$ ) em [N.m] ou Joule (J), foi determinada por intermédio das curvas  $P$ - $\delta$ , uma vez que corresponde ao valor da área abaixo de cada curva traçada. Nesta etapa, é aconselhável recuperar os dados e as folhas de cálculo referentes a cada geometria de junta adesiva analisada. A estas, deve ser adicionada uma coluna entre as correspondentes ao eixo das abcissas e das ordenadas das curvas  $P$ - $\delta$ , que mede a distância entre cada incremento da análise anterior através da diferença entre o  $\delta$  de incrementos consecutivos. Deve ter sido em consideração que, mesmo após tratar os dados, não podem ser realizadas as operações entre matrizes que envolvam valores negativos. De acordo com os parâmetros de computação da análise numérica definidos no módulo *step* e na Figura 129, cada coluna adicionada vai traduzir valores correspondentes ao tamanho inicial e máximo definidos para cada incremento. Através do *software* Excel, a função “=SOMARPRODUTO(matriz adicional formada pela diferença entre o  $\delta$  de incrementos consecutivos ;  $P$ )/1000” permite determinar a  $ER$ . Foi necessário dividir o produto entre matrizes por 1000, para trabalhar com unidades do  $SI$ .

### Obtenção da variável de dano no instante da carga máxima

Na presente etapa, não é requerida a transformação do modelo para ser possível obter  $sdeg$  no instante da carga máxima. Após combinar os dados referentes ao  $\delta$  e à reação global no encastramento na direção longitudinal, foi gerada a curva  $P$ - $\delta$ . O número de incrementos até atingir  $P_{máx}$  deve ser maximizado para facilitar a visualização e a análise da variável de dano. No que diz respeito ao tratamento de dados requerido para gerar a curva  $P$ - $\delta$ , e sem contabilizar a análise posterior ao incremento correspondente a  $P_{máx}$ , o manual do utilizador sugere definir o incremento correspondente à carga máxima, sem contabilizar o incremento inicial, que é referente

à origem da curva  $P-\delta$ . O valor de  $P_{máx}$  foi obtido anteriormente através da função “=máximo(coluna referente ao eixo das ordenadas)”. Através da função “=PROCV( $P_{máx}$ ; coluna referente ao eixo das ordenadas da curva  $P-\delta$ ;2;falso)” pode ser economizado muito tempo no que diz respeito ao tratamento de dados, uma vez que a função permite identificar o incremento correspondente à carga máxima, que vai corresponder ao *step frame* selecionado para obter a evolução da variável de dano no instante da carga máxima ao longo de  $L_0$ . Após submeter o *job*, o utilizador deve aguardar o término da análise. Quando a coluna *step time*/LPF atingir o  $\delta$  imposto na definição das condições fronteira (módulo *Load*), a análise está concluída.

Após obter os resultados da análise numérica do ensaio de tração, é necessário gerar um *path*, ou seja, um caminho coincidente a direção longitudinal e a interface entre o aderente não hidroformado e adesivo. Ao contrário da análise da distribuição das tensões de corte e arrancamento ao longo de  $L_0$ , a variável *sdeg* deve ser monitorizada numa das interfaces, o que permite obter o valor de *sdeg* dos elementos coesivos representativos do adesivo. Na barra de tarefas e através do menu *tools*, deve ser criado um *path* do tipo *edge list* (uma aresta une dois nós coincidentes com a direção longitudinal, com as duas extremidades opostas da camada adesiva e é concorrente com a interface entre o adesivo e o aderente não hidroformado). Numa das extremidades é selecionada uma aresta e na oposta é selecionado o nó/ponto correspondente, gerando automaticamente o caminho mais curto entre os dois. De acordo com a Figura 143, é de notar que a direção do *path* criado deve ser compatível com as análises realizadas à posteriori para as diferentes configurações de juntas adesivas propostas (de cima para baixo), requerendo muitas vezes editar a orientação do caminho através do comando *flip direction*, facilitando a interpretação dos resultados e a comparação dos mesmos com a geometria de base original. A evolução da variável de dano no instante da carga máxima foi avaliada ao longo deste *path* [108].

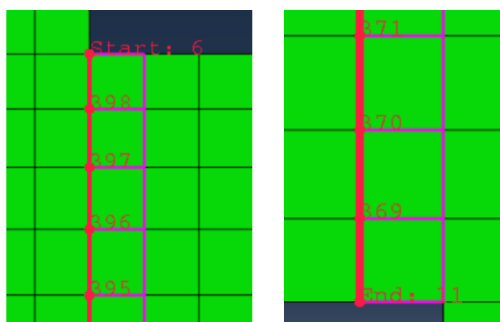


Figura 143 - Direção do *path* coincidente com a interface entre o aderente e o adesivo, idêntico para todas as configurações de junta analisadas.

No modo *visualization*, na opção *create XY data*, devem ser aplicadas as instruções ao *path*, de acordo com a Figura 144. Deve ser selecionado o caminho delineado anteriormente na posição indeformada (*undeformed*), ou seja, antes da junta deformar devido ao esforço de tração aplicado. Na opção *x-values*, é recomendado selecionar a opção de distância normalizada (*normalized distance*), o que garante que os gráficos de dispersão gerados em seguida fiquem compreendidos entre 0 e 1, facilitando a comparação dos resultados para as diferentes geometrias de juntas. Uma vez que as análises numéricas não foram interrompidas no primeiro incremento, a opção *step/frame* na opção *y-values* permite selecionar o incremento da solução gerada. Na presente etapa, o *step/frame* selecionado deve corresponder ao instante em que se atinge o valor de  $P_{máx}$ . A Figura 144 ilustra as instruções relativas ao *path* para obter *sdeg*, para a geometria de junta cujo  $\theta$  é nulo, ou *overlap*, com o adesivo Araldite® AV138. A variável de saída deve se selecionada na

opção *field output variable*, e deve optar-se pela variável *sdeg*. As instruções ao *path* devem ser guardadas e a consulta destes valores pode ser feita através da opção *XY data manager* ou através do menu *plug-ins* (Excel *utilities*), disponível na barra de tarefas.

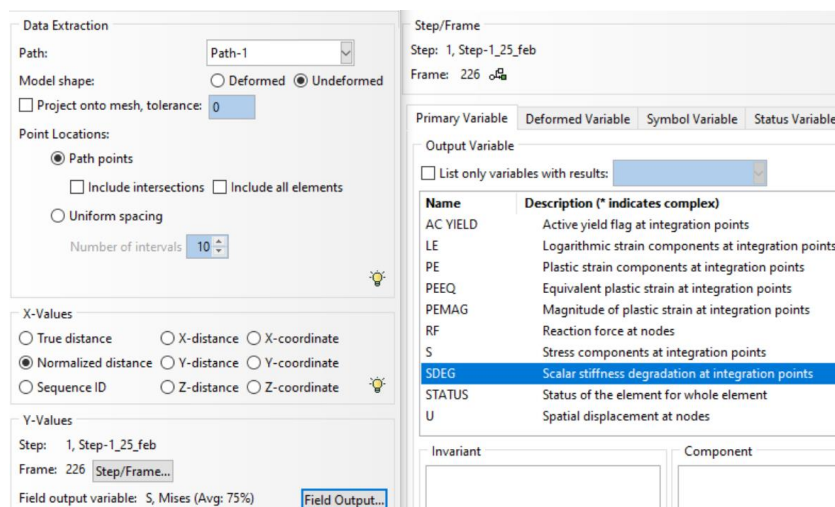


Figura 144 – Aplicação das instruções ao *path* para obter a variável de dano no instante da carga máxima.

As duas colunas de dados que permitem traçar os gráficos referentes à variável de dano no instante da carga máxima apresentam medições de grandezas díspares, e acima de 1000 incrementos. Deve ser utilizado um gráfico de dispersão de linhas retas sem amaciamento, como é ilustrado na Figura 145 [6].

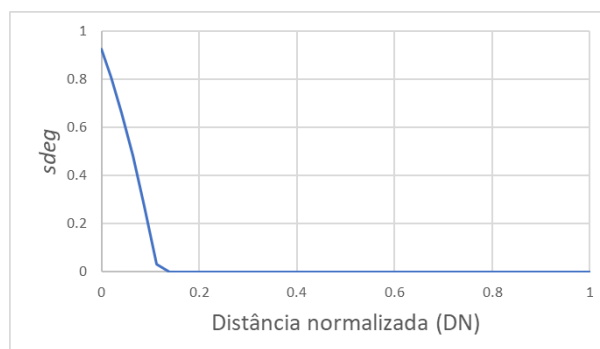


Figura 145 - Obtenção da variável de dano no instante da carga máxima para a geometria de base.

### Evolução da percentagem de plastificação do nó mais crítico dos aderentes

Na presente etapa, deve ser recuperado o modelo numérico associado à obtenção das curvas  $P-\delta$ . Esta fase da análise numérica e tratamento de dados tem como principal objetivo sobrepor as curvas  $P-\delta$  obtidas para cada geometria de junta com a evolução de  $PA$  para o incremento correspondente a  $P_{máx}$ . Ambas as curvas são descritas em função de  $\delta$ .

Inicialmente, devem ser visualizados os resultados da análise anterior para cada modelo e, se possível, optar por visualizar a variável *PEEQ* (*equivalent plastic strain*) para o incremento máximo determinado a priori. Através da barra de tarefas e do menu *tools*, o utilizador deve optar pela opção *query* e *distance*, determinando a distância entre a linha que delimita uma partição e o nó mais crítico, de acordo com a Figura 146.

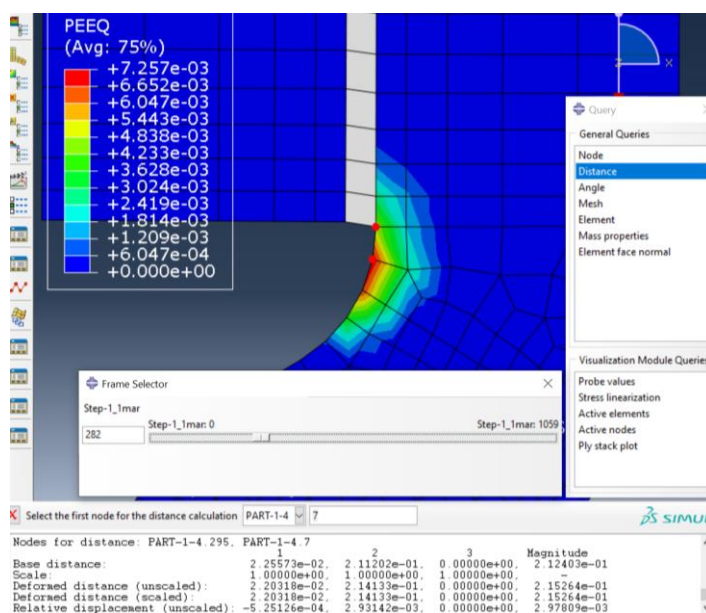


Figura 146 - Determinação da distância entre uma linha que define o limite de uma partição e o nó mais crítico.

Após identificar a distância entre o limite de uma partição e o nó mais crítico dos aderentes, o utilizador deve reabrir o módulo *part*, e editar o *sketch* relativo à definição das partições (*partition sketch*). A Figura 147 ilustra a traçagem de uma linha auxiliar e a possibilidade de definir a distância determinada anteriormente na Figura 146. É de notar que, após confirmação das alterações, o modelo deve ser regenerado para as novas condições serem incluídas na análise.

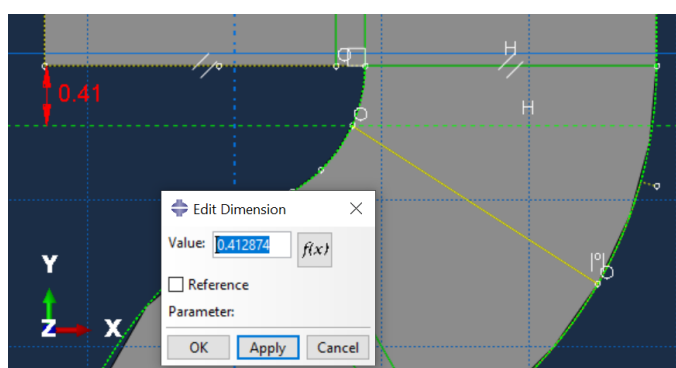


Figura 147 - Traçagem de uma linha auxiliar e a possibilidade de definir a distância que define o limite de uma partição e o nó mais crítico.

No módulo *step*, deve ser criado um *set* através do menu *tools*. O *set* deve ser do tipo *geometry* e designado de forma intuitiva. O *set* deve ainda coincidir com o ponto amarelo que representa o nó mais crítico, de acordo com a Figura 148.



Figura 148 - Set coincidente com ponto amarelado que representa o nó mais crítico.

Ainda no módulo *step*, e através da opção *history output request manager*, deve ser definida a variável de saída *PEEQ* pertencente à família *strains*. O domínio abrangido pela variável de saída está associado somente ao *set* criado anteriormente e não a todo o modelo.

De acordo com as condições da análise numérica definidas no APÊNDICE A, é aconselhado ao utilizador verificar que as secções definidas no modelo original não se alteraram e, se necessário, redefinir as secções face à criação da nova partição e perda das propriedades definidas anteriormente. É aconselhável redefinir os parâmetros de malha novamente pelo mesmo motivo que é necessário redefinir as secções. O utilizador deve verificar minuciosamente se os controlos de malha, as sementes locais, o tipo e a forma dos elementos que constituem a malha não variam face ao modelo utilizado para obter as curvas  $P$ - $\delta$ .

No módulo *job*, o utilizador deve submeter o modelo para nova análise. Após obtenção dos resultados, o utilizador deve recorrer ao módulo *visualization* para extrair os dados referentes à evolução de  $PA$ , para o incremento correspondente a  $P_{máx}$  e no nó crítico. A opção *common plot sections* permite identificar a numeração associada a cada nó com uma cor predefinida, de acordo com a Figura 149. A presente função é essencial para identificar qual o número associado ao nó mais crítico, facilitando a combinação dos dados à posteriori.

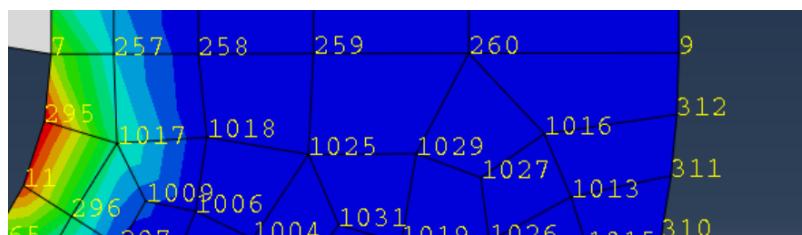


Figura 149 - Numeração associada a cada nó com uma cor predefinida.

Ainda no módulo *job*, e através do menu *create XY data* e da opção *ODB field output*, deve ser seleccionada a variável de saída  $PEEQ$  e a posição da variável de saída deve corresponder a um elemento nodal que inclua o nó mais crítico a analisar, de acordo com a Figura 150.

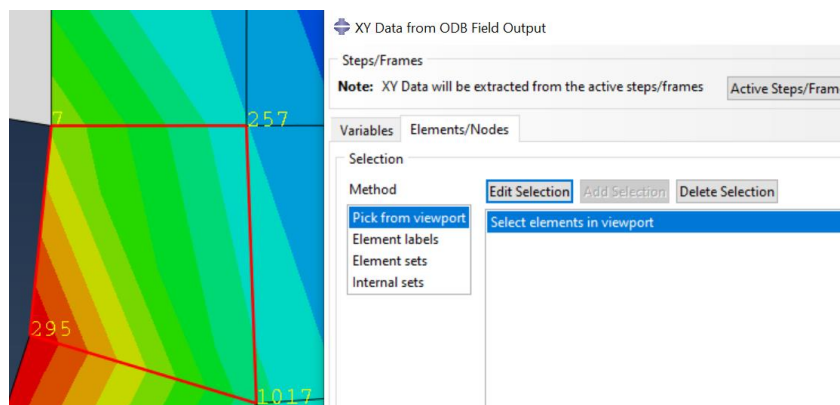


Figura 150 - Seleção da variável de saída  $PEEQ$  e posição da variável de saída correspondente com um dos elementos nodais que inclua o nó mais crítico a analisar.

Os dados referentes ao  $\delta$  não precisam de ser manipulados, uma vez que o  $\delta$  da extremidade não encastrada da junta é igual em todos os nós coincidentes com a mesma. A Figura 151 ilustra a criação de uma base de dados correspondente ao  $\delta$  nos elementos coincidentes com a extremidade da junta adesiva [239]. De seguida, na opção *create XY data*, deve ser escolhida a opção “*operate on XY data*”, e combinados os dados guardados anteriormente através da seguinte expressão: “combine (“Deslocamento”, “ $PEEQ$  nó crítico”)”.

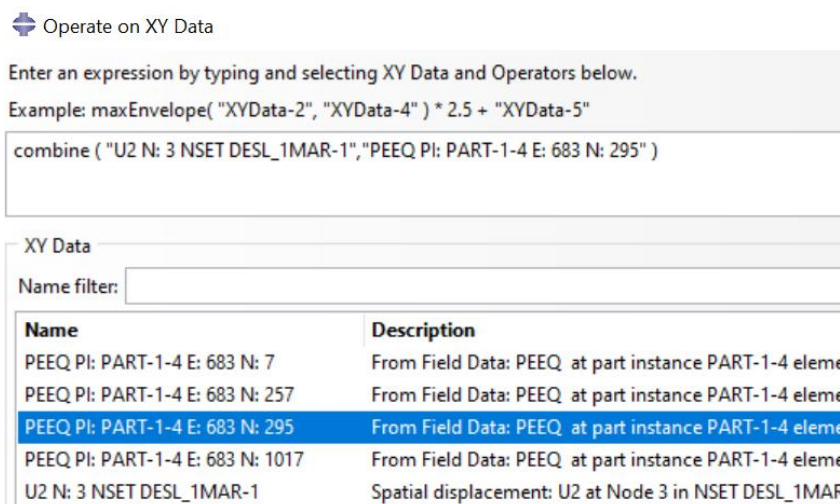


Figura 151 - Combinação das variáveis de saída, de acordo com a Figura 57.

O manual de utilizador [239] recomenda visualizar a expressão combinada sob a forma gráfica, de maneira a perceber se a curvas geradas são coerentes com a geometria de junta testada e as condições fronteira impostas. Por último, resta extrair os valores da curva para uma folha de cálculo. Para tal, basta seleccionar a opção *XY Data Manager*, e copiar os valores referentes à curva diretamente para a folha de cálculo. Os dados referentes à curva devem ser agrupados em duas colunas e representados através de um gráfico de dispersão com linhas retas, sendo que a evolução da variável *PEEQ* é representada em percentagem e deve ser multiplicada por 100. Após o cálculo, é definida como *PA*. A Figura 152 ilustra o gráfico que combina a curva *P-δ* e a evolução de *PA* em função de *δ*, para a geometria de base.

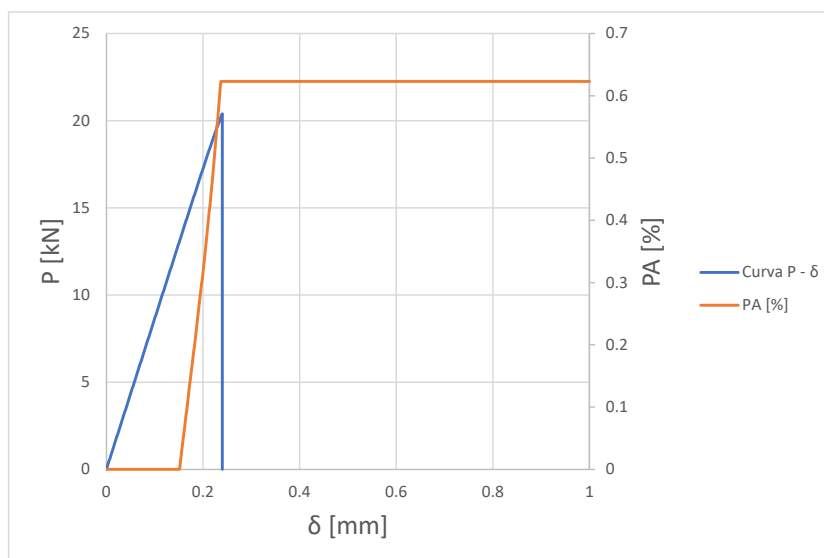


Figura 152 - Combinação da curva *P-δ* e de *PA* em função de *δ*, para a geometria de base.

### Análise de tensões na junta - Obtenção das tensões de corte e arrancamento

Nesta etapa da análise numérica, é requerida a transformação do modelo para ser possível obter o campo de tensões de corte e arrancamento ao longo de  $L_0$ . É recomendado gravar o ficheiro com um nome idêntico ao do modelo coesivo, ainda que deva constar no final da designação alguma referência à presente etapa.

No módulo *property*, é recomendado eliminar as propriedades coesivas do adesivo, ou seja, modelar o adesivo como sólido. No que diz respeito às propriedades elásticas do adesivo, o  $E$  mantém-se inalterado, e admite-se que o adesivo tem um comportamento isotrópico com  $\nu=0,3$ . No menu *section manager*, a secção atribuída ao elemento de ligação era do tipo coesivo, e deve ser criada uma secção conforme as correspondentes aos aderentes, do tipo sólido homogéneo. No módulo *mesh*, é necessário realizar alterações no modelo de base ao nível dos controlos de malha e da dimensão das sementes, ou por tamanho aproximado ou por número de elementos. A malha gerada no modelo de base desassociasse do conjunto a par das novas definições. De acordo com a Figura 153, deve ser atribuída uma malha estruturada formada por quadriláteros coincidentes com as direções ortogonais à partição correspondente ao elemento adesivo, em concordância com as áreas retangulares definidas pelas partições nos aderentes. Neste modelo, o adesivo é definido por elementos do tipo *axisymmetric stress* (CAX4) [239].



Figura 153 - Malha estruturada do adesivo formada por quadriláteros coincidentes com as direções ortogonais, em concordância com as áreas retangulares definidas pelas partições nos aderentes (modelo para obtenção de tensões).

De acordo com a Figura 154, antes de gerar a malha, é necessário aumentar significativamente o refinamento da mesma (por exemplo, em 1000%). Nos segmentos de reta que se encontram entre as partições definidas na direção radial, utiliza-se um *bias* duplo com tamanho máximo de 0,05 e mínimo de 0,02 mm, obtendo-se um maior refinamento nas extremidades dos segmentos. Nas regiões não ligadas dos aderentes ao elemento coesivo aplicou-se um *bias* simples, garantindo maior refinamento nas proximidades do adesivo, com tamanho máximo de 0,25 e mínimo de 0,02 mm. Nas extremidades dos aderentes definiu-se um *bias* simples, com tamanho dos elementos compreendido entre 0,02 e 0,06 mm. Os tamanhos dos elementos nas três partições definidas em concordância com o processo de fabrico responsável pelo ressalto exterior vão ser definidas em função do tamanho aproximado de cada elemento, de 0,02 mm no caso. No que diz respeito aos aderentes, resta definir as sementes ao longo das partições definidas anteriormente e coincidentes com a direção radial. Ao longo destas partições, utilizou-se um *bias* simples com tamanho compreendido entre 0,02 e 0,06 mm. Nos contornos correspondentes a  $t_a$  são aplicados 10 elementos coesivos [240].

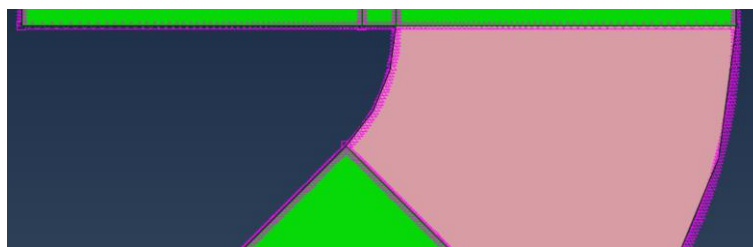


Figura 154 – Aumento do refinamento da malha em 1000%, para obtenção das tensões de corte e arrancamento.

Após associar os controlos de malha, definir os elementos, otimizar os parâmetros e atribuir as respetivas sementes, resta gerar a malha. A Figura 155 ilustra a malha gerada para a geometria de base nas regiões mais críticas (transição entre o aderente e o adesivo). O modelo criado para avaliar o estado de tensão da junta de base é constituída por 98586 elementos, ao invés dos 1212

elementos obtidos para o modelo homólogo utilizado para obter as curvas  $P-\delta$ . Uma vez que se pretende interromper a análise no primeiro incremento, o *software* não gerou um número exagerado de elementos, e a exigência da capacidade de processamento computacional não fica comprometida.



Figura 155 - Malha gerada no modelo de base nas regiões mais críticas, especialmente na transição entre o aderente e o adesivo, para a geometria de base para o modelo de obtenção de tensões.

De seguida, é necessário submeter o *job* e interromper a análise numérica no primeiro incremento (*Process terminated by external request (SIGTERM or SIGINT received)*). Após obter os resultados da análise numérica do ensaio de tração para o primeiro incremento, vão ser extraídas as tensões de corte e arrancamento na direção longitudinal coincidente com o comprimento de sobreposição. É necessário criar um *path* coincidente a direção longitudinal e o centro da camada adesiva, que se assemelha ao definido para obter as curvas  $P-\delta$ . De acordo com a Figura 156, é de notar que a direção do *path* criado deve ser compatível com as análises realizadas à posteriori para as diferentes configurações de juntas adesivas propostas (de cima para baixo), requerendo muitas vezes editar a orientação do caminho através do comando *flip direction*, o que facilita a interpretação dos resultados e a comparação dos mesmos com a geometria de base original. É ao longo deste *path* que vão ser extraídas as tensões de arrancamento e de corte [108].

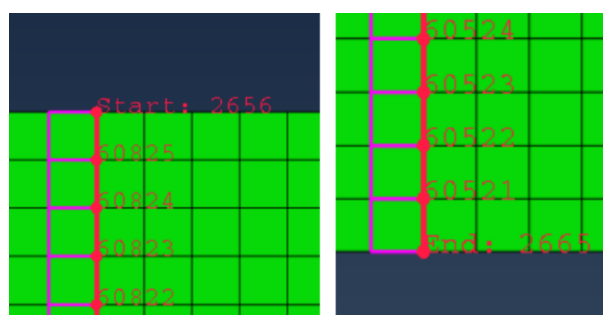


Figura 156 - Direção do *path* criado compatível com as análises realizadas à posteriori para as diferentes configurações (de cima para baixo).

De acordo com a Figura 157, devem ser aplicadas as instruções ao *path* no modo *visualization* e na opção *create XY data*. Deve ser selecionado o caminho delineado anteriormente na posição indeformada (*undeformed*), ou seja, antes de a junta se deformar devido ao esforço de tração aplicado. Na opção *x-values*, é recomendado selecionar a opção de distância normalizada (*normalized distance*), o que garante que o eixo das abcissas dos gráficos de dispersão referentes à distribuição de tensões ao longo de  $L_0$  fique compreendido entre 0 e 1.

Se a análise numérica não for interrompida no primeiro incremento, a opção *step/frame* na opção *y-values* permite selecionar para que incremento é que o utilizador pretende obter os resultados. A variável de saída deve ser selecionada na opção *field output variable*, e deve ser escolhida a variável *S12* para obter a distribuição das tensões de corte, ou a variável *S11* para obter a distribuição das tensões de arrancamento.

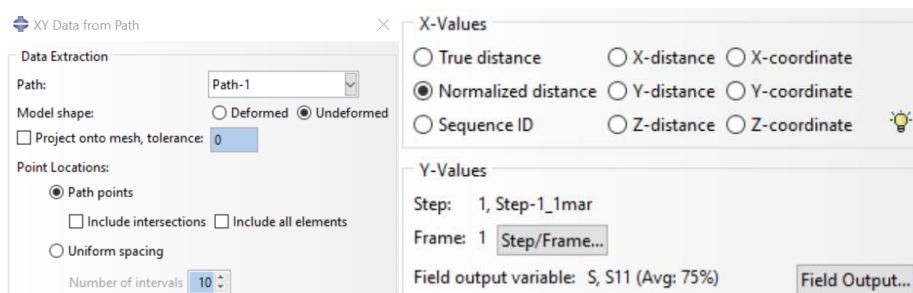


Figura 157 - Aplicação das instruções ao *path*.

### Tratamento dos dados

Após aplicar as instruções ao *path*, as tensões de arrancamento e de corte devem ser guardadas com uma designação sugestiva, para à posteriori serem exportados os dados para a folha de cálculo no Excel. A consulta destes valores pode ser feita através da opção *XY data manager* ou através do menu *plug-ins* (*Excel utilities*). As duas colunas de dados que permitem traçar os gráficos referentes a cada uma das tensões apresentam medições de grandezas díspares, e acima de 1000 incrementos. Desta maneira, deve ser utilizado um gráfico de dispersão de linhas retas sem amaciamento para descrever a distribuição do estado de tensões ao longo do *path* criado, como é ilustrado na Figura 158 [6].

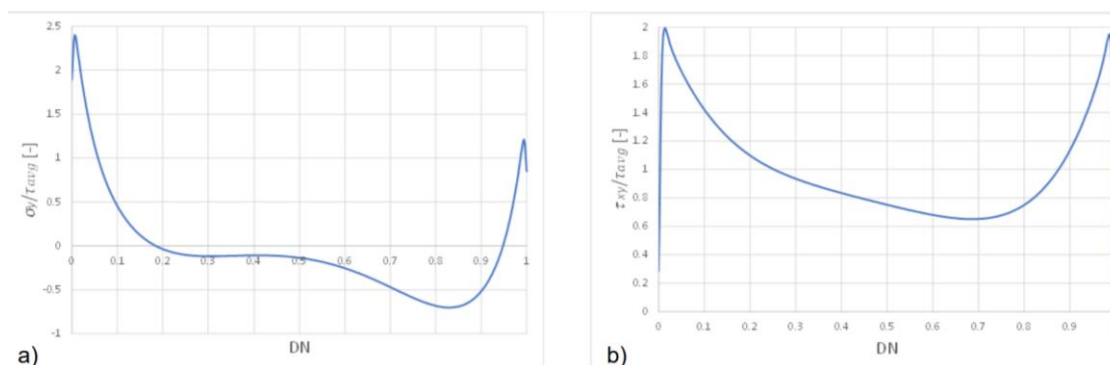


Figura 158 - Tensões de arrancamento e de corte ao longo do *path* criado, obtidas para a geometria de base.

Os gráficos ilustrados na Figura 158 resultam de um conjunto de operações efetuadas ao conjunto de dados extraídos do *XY data manager*. No que diz respeito às tensões de corte obtidas no *software* (*S12*), é necessário criar uma coluna auxiliar, correspondente ao tamanho de cada incremento ou à largura da barra, que deve conter " $n - 1$ " valores do que a coluna correspondente ao eixo das abcissas original. É requerido gerar uma outra coluna e transformar os valores obtidos para as tensões de corte ao longo de  $L_0$ , obtendo os valores absolutos. A  $\tau_{avg}$  deve ser obtida através do comando "SOMARPRODUTO (coluna auxiliar, correspondente ao tamanho de cada incremento ou à largura da barra, que deve conter " $n - 1$ " valores do que a coluna correspondente ao eixo das abcissas original; valores absolutos das tensões de corte ao longo de  $L_0$ )". A Figura 158.b) representa um gráfico de dispersão que conjuga o valor original obtido para o eixo das abcissas e uma terceira coluna auxiliar, que resulta do quociente entre as tensões de corte ao longo de  $L_0$  (valor absoluto) e  $\tau_{avg}$ . No que diz respeito às tensões de arrancamento obtidas no *software* (*S11*), a Figura 158.a) ilustra um gráfico de dispersão que resulta da combinação dos valores obtidos para o eixo das abcissas com os valores obtidos para o eixo das ordenadas divididos por  $\tau_{avg}$ .

### 7.3. APÊNDICE C

O APÊNDICE C contempla o efeito da variação do ângulo do filete adesivo, e foi criado com o propósito de auxiliar a realização das análises e interpretação dos resultados provenientes do estudo numérico, ilustrados no Subcapítulo 0.

#### Curvas $P-\delta$

Relativamente às condições numéricas enunciadas para o caso da geometria de base, é necessário transformar o modelo de base. No módulo *part*, deve ser personalizado o *section sketch* de maneira a representar a adição dos filetes adesivos, após definir completamente a geometria de revolução. A Figura 159 ilustra os contornos exteriores da junta adesiva com filete adesivo, para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $\gamma=15^\circ$ .

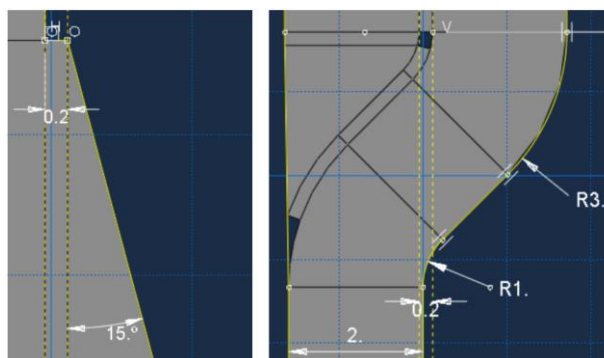


Figura 159 - Contornos exteriores da junta adesiva com filete adesivo para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $\gamma=15^\circ$ .

De seguida, é requerida a redefinição das partições em conformidade com a adição dos filetes. Vão ser adicionadas sete partições no total em relação à geometria de base, com o objetivo de aumentar a precisão dos resultados obtidos e evitar problemas de convergência da malha que discretiza o corpo. A maior precisão dos resultados está diretamente relacionada com a menor distorção da malha em secções próxima da curvatura induzida pelo processo de hidroformagem. A Figura 160 ilustra a definição das novas partições e a remoção de uma secção com recurso ao menu *remove faces*, para o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ . Relativamente à definição das novas partições, é de referir o menu *offset curves*, que permite projetar um determinado contorno em função do eixo de revolução e da distância entre os contornos imposta.

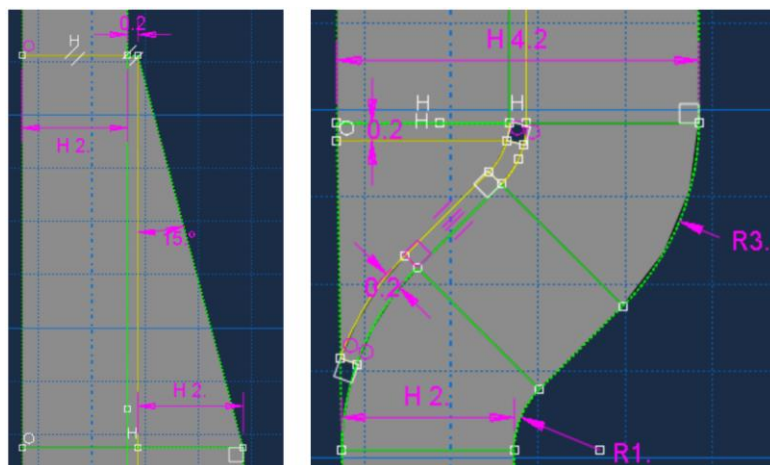


Figura 160 - Definição das novas partições e a remoção de uma secção com recurso ao menu *remove faces*, para o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ .

De seguida, o utilizador deve definir uma secção do tipo sólida homogénea, através do módulo *property* e do menu *section assignment manager*, para a partição corresponde à adição de uma porção de adesivo adjacente ao raio de curvatura obtido por hidroformagem.

De seguida, foi necessário aceder aos controlos gerais de solução no módulo *step*, em *General Solution Controls*, e foram alteradas algumas condições com o objetivo de melhorar a convergência da solução em cada incremento. Na eventualidade de ocorrência de não linearidades geométricas que possam comprometer as análises, torna-se necessário personalizar estes comandos [51]. O principal objetivo da personalização dos parâmetros de controlo consiste em aumentar significativamente o número de tentativas e de iterações, para o *software* gerar soluções nos incrementos que coincidem com o início da propagação do dano.

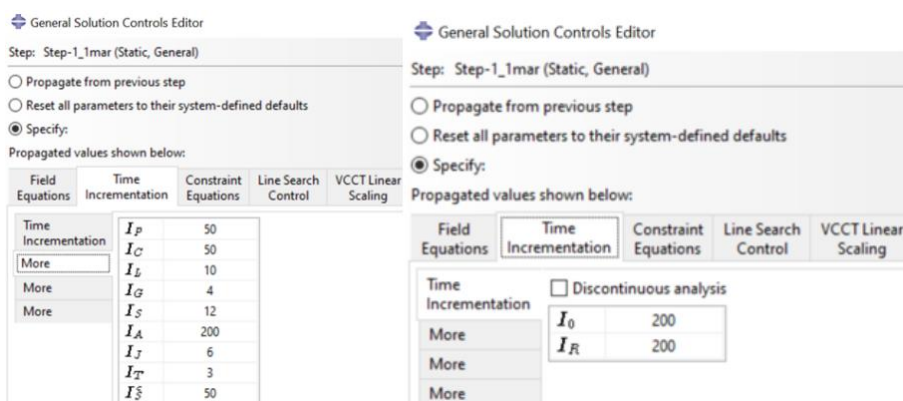


Figura 161 - Alteração dos controlos gerais de solução, e melhoria da convergência da solução para cada incremento.

No módulo *mesh*, foi necessário redefinir os controlos de malha e o tipo de elementos, otimizar os parâmetros e atribuir as respetivas sementes. As partições correspondentes à adição de filetes de adesivo e aos arcos de coroa circular implicam a criação de uma malha livre (*free*), representada pela cor rosa, ao invés de uma malha dominada por quadriláteros ortogonais. A malha associada ao elemento de ligação adesivo é representada pela cor amarela, dominada por quadriláteros e do tipo *sweep*. Deve ser utilizada para gerar a malha de elementos coesivos, de maneira a modelar a propagação do dano.

De acordo com a Figura 162, através do comando *redefine sweep path*, deve ser garantido que cada elemento coesivo vai ligar-se a um nó da interface interior do aderente hidroformado e a um nó coincidente com o contorno exterior do aderente não hidroformado, evitando a união de elementos da mesma interface.

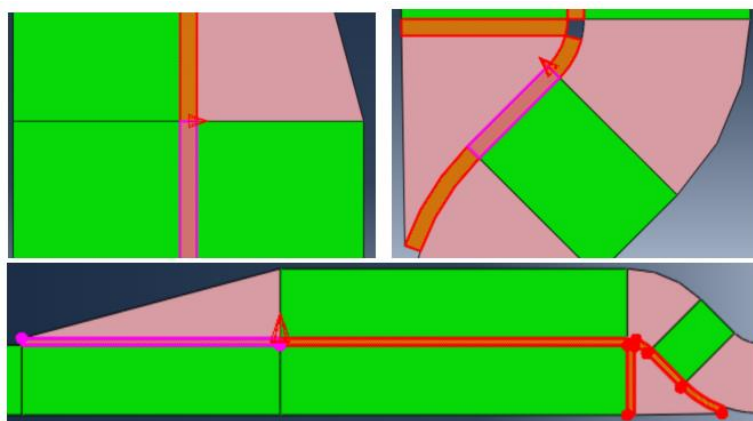


Figura 162 - Elementos coesivos ligados a um nó da interface interior do aderente hidroformado e a um nó coincidente com o contorno exterior do aderente não hidroformado, para o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ .

A Figura 163 ilustra a atribuição dos diferentes controlos de malha, de acordo com o código de cores enunciado. A Figura 164 ilustra as sementes atribuídas às arestas correspondentes aos contornos exteriores dos constituintes da junta adesiva e às partições definidas, para o adesivo Araldite® AV138 e para  $\gamma=15^\circ$ .

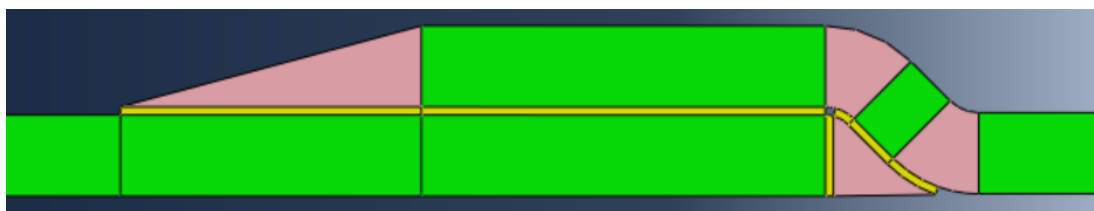


Figura 163 - Atribuição dos diferentes controlos de malha, de acordo com o código de cores, para o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ .

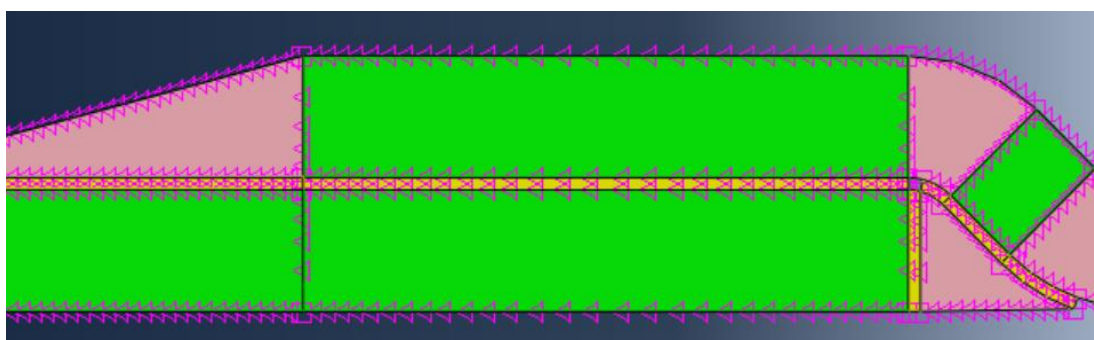


Figura 164 - Sementes atribuídas às arestas correspondentes aos contornos exteriores dos constituintes da junta adesiva e às partições definidas, para o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ .

A Figura 165 ilustra a malha obtida para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $\gamma=15^\circ$ , constituída por 1654 elementos. É de notar o refinamento de malha próximo das regiões mais críticas, correspondentes ao início da propagação do dano.

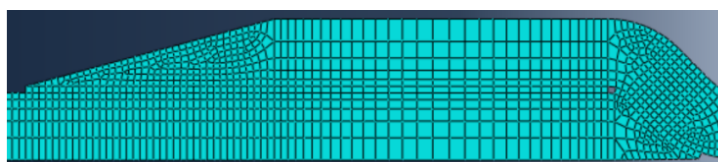


Figura 165 - Malha obtida para o adesivo Araldite® AV138, cujo valor de  $\gamma=15^\circ$ .

A curva  $P-\delta$  da geometria de junta que utiliza o adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$  encontra-se ilustrada na Figura 166.

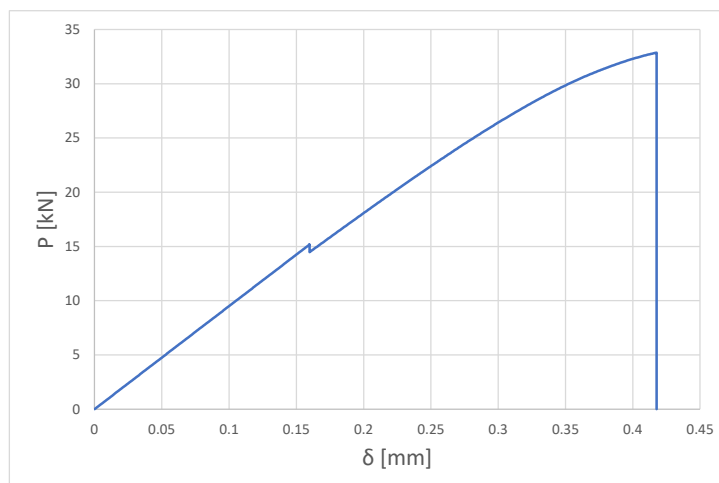


Figura 166 - Curva  $P-\delta$  obtida para a junta com adesivo Araldite® AV138 e  $\gamma=15^\circ$ .

### Tensões de corte e arrancamento

O processo de obtenção das tensões de corte e arrancamento até à etapa correspondente à submissão do *job* assemelha-se à descrição efetuada no APÊNDICE A. Todavia, o tratamento de dados associado a esta geometria de junta adesiva requer outros cuidados.

Após obter os resultados da análise numérica do ensaio de tração para o primeiro incremento, vão ser extraídas as tensões de corte e arrancamento compatíveis com as direções ortogonais do modelo de revolução modelado numericamente. No âmbito do estudo do efeito da variação de  $\gamma$ , tornou-se necessário definir três *paths* coincidentes com o centro da camada adesiva.

De acordo com a Figura 167, é de notar que a direção dos caminhos traçados deve ser compatível com as análises realizadas à posteriori para as diferentes configurações de juntas adesivas propostas. O *path* 1, de sentido descendente, coincide com o comprimento de sobreposição adesivo e a direção longitudinal da junta, e em tudo se assemelha ao caminho traçado na análise da distribuição de tensões para a geometria de base. O *path* 2, de sentido descendente, coincide com a projeção dos contornos exteriores das partições hidroformadas. O *path* 3 foi definido desde a partição removida para o interior da junta adesiva, coincidente com a direção transversal da junta a extremidade do aderente não hidroformado. Os caminhos traçados devem ser do tipo *edge list - add before - by shortest distance*, requerendo, por vezes, personalização da orientação do caminho através do comando *flip direction*.

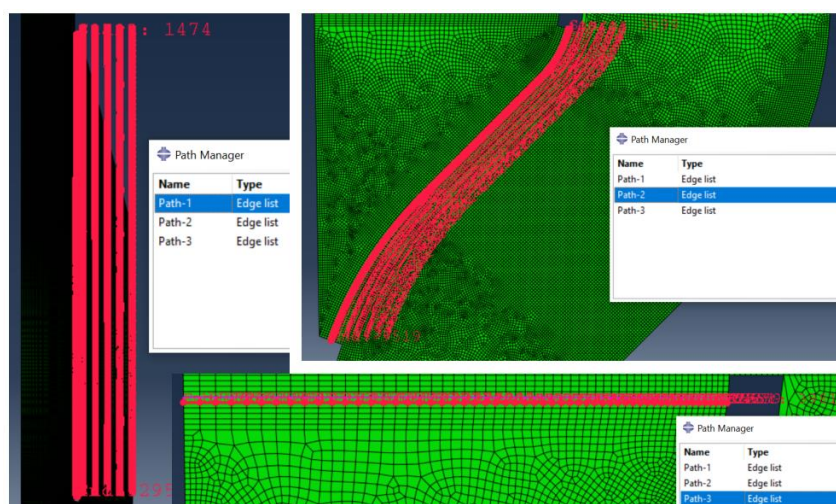


Figura 167 - Direção dos *paths* criados para análise da distribuição de tensões em função de  $\gamma$ .

No modo *visualization*, na opção *create XY data*, devem ser aplicadas as instruções aos diferentes *paths*. Relativamente ao estudo da geometria de base, na opção *x-values*, é recomendado seleccionar a opção de distância real (*true distance*). A Tabela 153 ilustra as variáveis de saída a extrair em função do *path* a analisar.

Tabela 153 - Variáveis de saída a extrair em função do *path* a analisar, no âmbito do estudo do efeito de  $\gamma$ .

| Variáveis de saída | Path 1 |              | Path 2 |              | Path 3 |              |
|--------------------|--------|--------------|--------|--------------|--------|--------------|
| S11                | x      | $\sigma_y'$  | x      | $\sigma_y'$  |        |              |
| S22                |        |              | x      | $\sigma_x'$  | x      | $\sigma_y'$  |
| S12                | x      | $\tau_{xy}'$ | x      | $\tau_{xy}'$ | x      | $\tau_{xy}'$ |

De acordo com a Figura 167, é de notar que o *path 2* não se encontra orientado em concordância com as direções ortogonais segundo as quais são obtidos os campos de tensões pelo *software*. Deste modo, e de acordo com as Equações (7) e (8), é necessário transformar estes valores para o referencial correspondente às direções ortogonais, cujo principal objetivo consiste em obter  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ , ao longo da camada de adesivo. Para o presente estudo, o valor de  $\varphi = -45^\circ$  para todas as geometrias de junta analisadas.

$$\sigma_y = \left( \frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} \right) - \left( \frac{\sigma'_x - \sigma'_y}{2} \right) \times \cos(2 \times \varphi) - \tau'_{x'y'} \times \sin(2 \times \varphi) \quad (7)$$

$$\tau_{xy} = - \left( \frac{\sigma'_x + \sigma'_y}{2} \right) \times \sin(2 \times \varphi) + \tau'_{x'y'} \times \sin(2 \times \varphi) \quad (8)$$

A Figura 168 ilustra o referencial para o qual os dados são extraídos do *software* ( $x'y'$ ) e o referencial compatível com as direções ortogonais e que permite obter o campo de tensões ao longo da sobreposição adesiva ( $xy$ ), no caso do *path 2*.

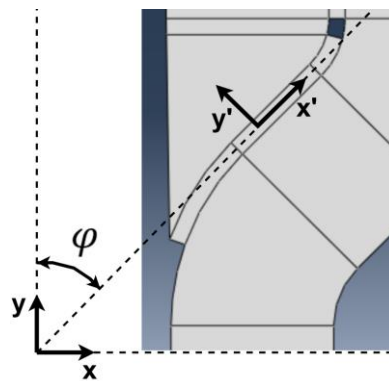


Figura 168 - Referencial para o qual os dados são extraídos do *software* ( $x'y'$ ), e referencial compatível com as direções ortogonais e que permite obter o campo de tensões ao longo de  $L_0$  ( $xy$ ).

Para os diferentes *paths*, é de notar que  $\tau_{avg}$  é sempre obtida em função do *path 1*, correspondente à sobreposição adesiva, e através da função “=SOMARPRODUTO( $x'(i+1)/L_0 - x'(i)/L_0$ ; - S12\_PATH1)”. Devem ser selecionados apenas os valores a partir de  $x'/L_0 = 0$ , para garantir que os valores são obtidos em função do valor de  $L_0$  original.

### Obtenção das tensões de arrancamento

No caso do *path 1*, as células representadas a azul correspondem aos valores extraídos diretamente do *software*. A coluna designada por  $x$  corresponde à posição relativa em relação à origem do *path*. É aconselhável recorrer ao menu *tools*, e através da opção *query* deve ser determinada a distância entre a extremidade superior da camada adesiva e o nó que coincide com o início da sobreposição relativamente à geometria de base. Desta maneira, a coluna designada por  $x'$  corresponde à posição relativa em relação à origem do *path* subtraída pela distância anteriormente mencionada. A coluna designada por  $x'/L_0$  corresponde à etapa em que se normalizam as distâncias face à geometria de base e constitui o eixo das abcissas do gráfico ilustrado. A coluna designada por “S11\_PATH1” corresponde à evolução das tensões de arrancamento ao longo da camada adesiva e é extraída diretamente do *software*. A última coluna, designada por “T.arrancamento”, é formada pelo conjunto de valores da penúltima coluna divididos pela  $\tau_{avg}$  e constitui o eixo das ordenadas do gráfico ilustrado. A Figura 169 ilustra a folha de cálculo utilizada para o tratamento de dados e obtenção das tensões de arrancamento ao longo do *path 1*.

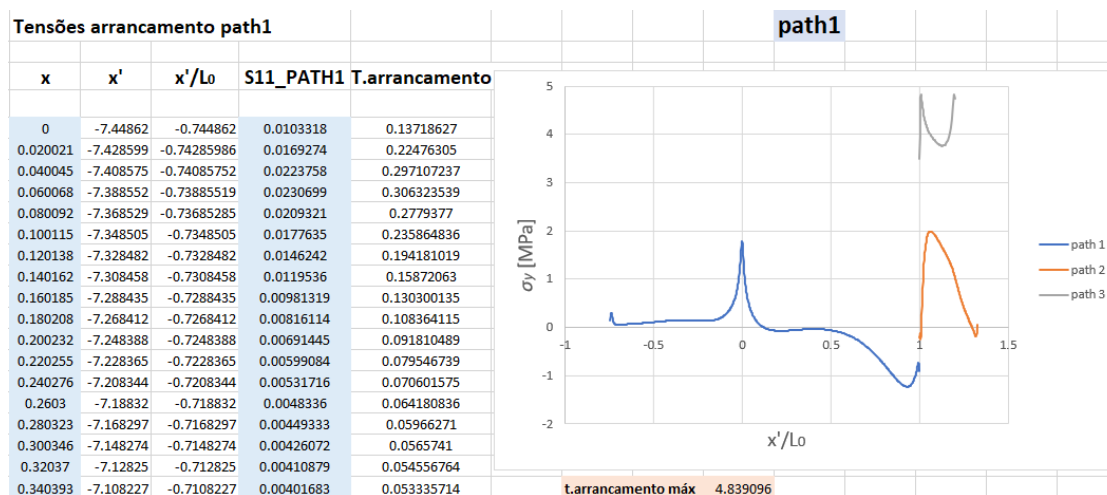


Figura 169 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de arrancamento ao longo do *path 1*.

No caso do *path 2*, as células representadas a vermelho correspondem aos valores extraídos diretamente do *software*. A coluna designada por  $x$  corresponde à posição relativa em relação à origem do *path*. A coluna designada por “ $(x'/L_0) + 1$ ” corresponde à etapa em que se normalizam as distâncias face à geometria de base e constitui o eixo das abcissas do gráfico ilustrado. É de notar que a soma enunciada garante que a evolução do campo de tensões no *path 2* é representada imediatamente à direita da evolução das tensões no *path 1*. A terceira coluna representa a distância entre os incrementos, face à sua posição relativa ou normalizada. A quarta, quinta e sexta coluna correspondem às variáveis de saída extraídas para o caso do *path 2*, de acordo com a Tabela 153. A sétima e oitava coluna resultam da aplicação das Equações (7) e (8). A última coluna corresponde aos valores absolutos da divisão entre os valores da tensão de arrancamento após aplicação da Equação (7) e a  $\tau_{avg}$ , e constitui o eixo das ordenadas do gráfico ilustrado. A Figura 170 ilustra a folha de cálculo utilizada para o tratamento de dados e obtenção das tensões de arrancamento ao longo do *path 2*.

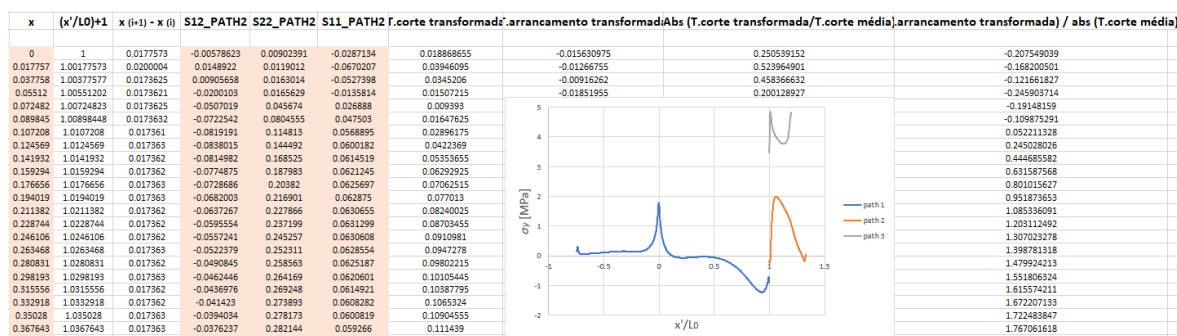


Figura 170 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de arrancamento ao longo do *path 2*.

No caso do *path 3*, as células representadas a cinzento correspondem aos valores extraídos diretamente do *software*. A coluna designada por  $x$  corresponde à posição relativa em relação à origem do *path*. A segunda coluna com valores corresponde à etapa em que se normalizam as distâncias face à geometria de base e constitui o eixo das abcissas do gráfico ilustrado, e é de notar que a soma enunciada garante que a evolução das tensões no *path 3* é representada imediatamente à direita da evolução das tensões no *path 1*. A terceira coluna corresponde à evolução dos valores da tensão de arrancamento obtidos diretamente do *software*.

A última coluna, designada por “T.arrancamento”, é formada pelo quociente entre os valores da penúltima coluna e  $\tau_{avg}$ , e constitui o eixo das ordenadas do gráfico ilustrado. A Figura 171 ilustra a folha de cálculo utilizada para o tratamento de dados e obtenção das tensões de arrancamento ao longo do *path 3*.

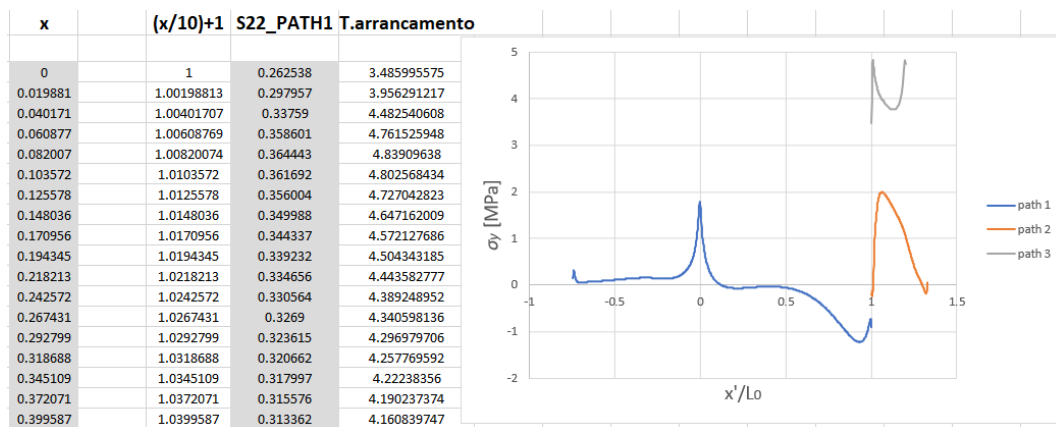


Figura 171 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de arrancamento para o caso do *path 3*.

### Obtenção das tensões de corte

No caso do *path 1*, as células representadas a azul correspondem aos valores extraídos diretamente do *software*. A coluna designada por  $x$  corresponde à posição relativa em relação à origem do *path*. É aconselhável recorrer ao menu *tools*, e através da opção *query* deve ser determinada a distância entre a extremidade superior da camada adesiva e o nó que coincide com o início da sobreposição relativamente à geometria de base. Desta maneira, a coluna designada por  $x'$  corresponde à posição relativa em relação à origem do *path* subtraída pela distância anteriormente mencionada.

A coluna designada por  $x'/L_0$  corresponde à etapa em que se normalizam as distâncias face à geometria de base e constitui o eixo das abcissas do gráfico ilustrado. A quarta coluna representa a distância entre os incrementos, face à sua posição relativa ou normalizada. A quinta coluna corresponde à evolução das tensões de corte ao longo da camada adesiva e é extraída diretamente do *software*. A penúltima coluna corresponde à inversão dos valores extraídos diretamente do programa. A última coluna, designada por “T.corte”, é formada pelo conjunto de valores da penúltima coluna divididos pela  $\tau_{avg}$  e forma o eixo das ordenadas do gráfico ilustrado. A Figura 172 ilustra a folha de cálculo utilizada para o tratamento de dados e obtenção das tensões de corte ao longo do *path 1*.

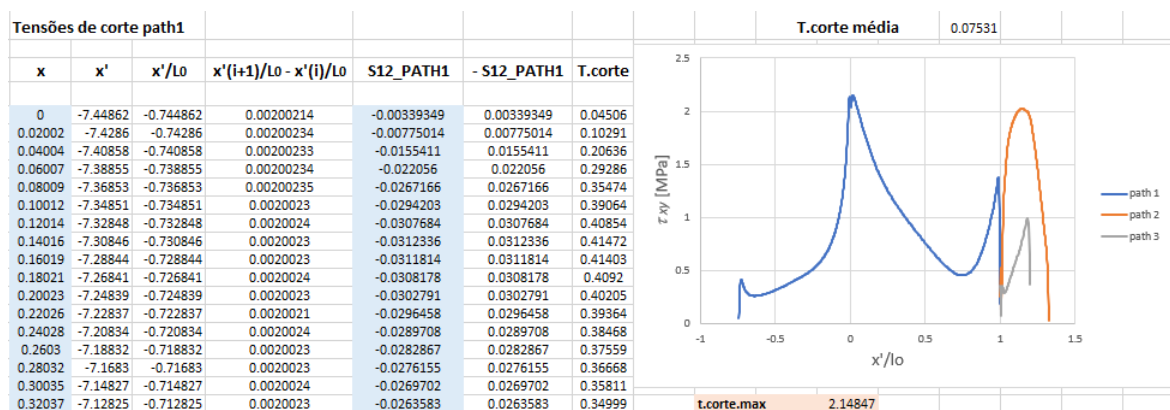


Figura 172 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de corte ao longo do *path 1*.

No caso do *path 2*, as células representadas a vermelho correspondem aos valores extraídos diretamente do programa. A coluna designada por " $(x'/L_0) + 1$ " corresponde à etapa em que se normalizam as distâncias face à geometria de base e constitui o eixo das abcissas do gráfico ilustrado. É de notar que a soma enunciada garante que a evolução das tensões no *path 2* é representada imediatamente à direita da evolução das tensões no *path 1*. A última coluna corresponde aos valores absolutos do quociente entre os valores da tensão de corte após aplicação da Equação (8) a  $\tau_{avg}$ , e constitui o eixo das ordenadas do gráfico ilustrado. A Figura 173 ilustra a folha de cálculo utilizada para o tratamento de dados e obtenção das tensões de corte ao longo do *path 2*.

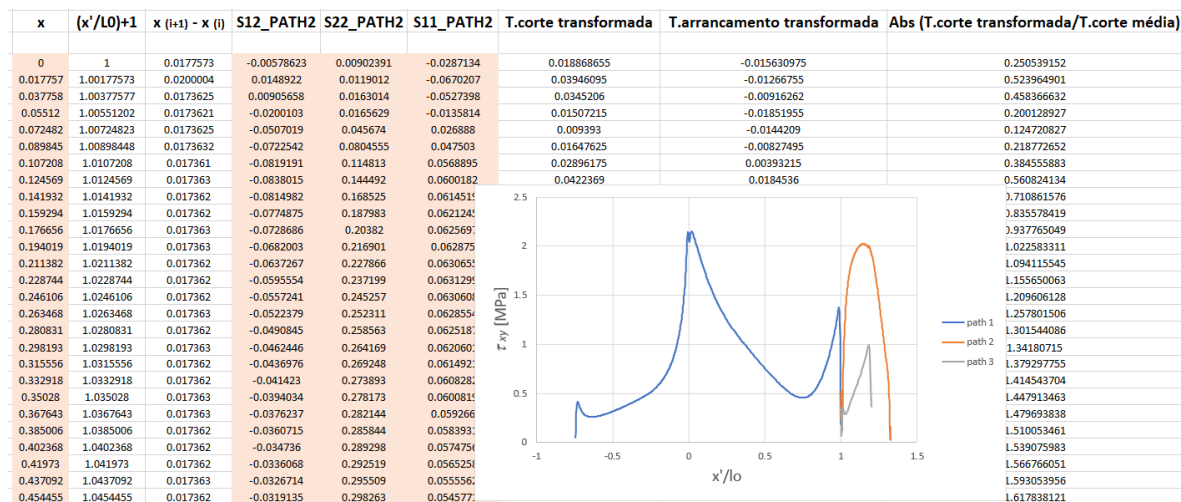


Figura 173 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de corte ao longo do *path 2*.

No caso do *path 3*, as células representadas a cinzento correspondem aos valores extraídos diretamente do *software*. A coluna designada por  $x$  corresponde à posição relativa em relação à origem do *path*. A segunda coluna advém da etapa em que se normalizam as distâncias face à geometria de base e constitui o eixo das abcissas do gráfico. É de notar que a soma enunciada garante que a evolução das tensões no *path 3* seja representada imediatamente à direita da evolução das tensões ao longo do *path 1*. A terceira coluna com valores corresponde à evolução dos valores da tensão de corte obtidos diretamente do *software*. A última coluna, designada por "T.corte", é formada pelo conjunto de valores da penúltima coluna divididos por  $\tau_{avg}$  e constitui o eixo das ordenadas do gráfico ilustrado. A Figura 174 ilustra a folha de cálculo utilizada para o tratamento de dados e obtenção das tensões de corte no *path 3*.

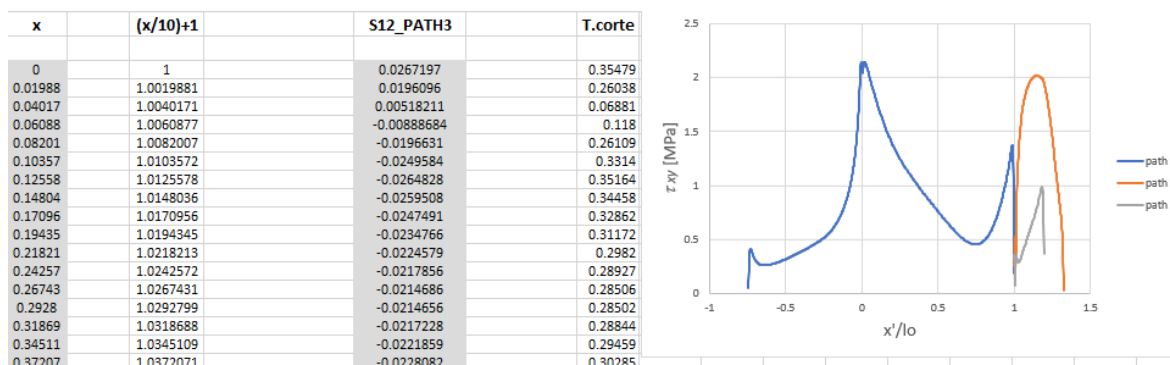


Figura 174 - Tratamento de dados para obtenção das tensões de corte no *path 3*.

### Obtenção de *sdeg*

Após obter os resultados da análise numérica do ensaio de tração, é necessário gerar um *path*, ou seja, traçar um caminho coincidente com a interface entre a camada adesiva e o aderente não hidroformado. Assim como foi mencionado anteriormente, a variável *sdeg* deve ser obtida na interface entre as diferentes secções definidas, uma vez que os elementos coesivos vão sendo eliminados da análise há medida que atingem a rotura.

A obtenção da variável de dano no instante da carga máxima implica prolongar o *path* para além do comprimento de sobreposição coincidente com a direção longitudinal da junta adesiva. A Figura 175 ilustra a definição do caminho mais curto entre a aresta mais próxima da extremidade não hidroformada e o filete de adesivo incluído na análise para a geometria de junta cujo  $\gamma=15^\circ$ .

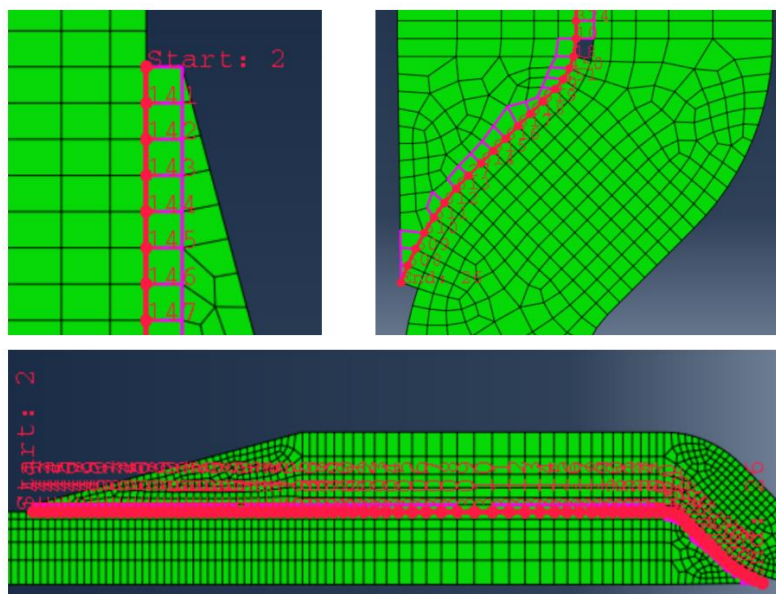


Figura 175 - Definição do caminho mais curto entre a aresta mais próxima da extremidade não hidroformada e o filete de adesivo incluído na análise para a geometria de junta cujo  $\gamma=15^\circ$ .

É de referir que foram realizados testes numéricos com o objetivo de concluir se o *path* gerado deveria incluir a interface entre a camada de adesivo na direção transversal da junta e o aderente não hidroformado. Optou-se por incluir a interface adjacente aos arcos de coroa circular, já que a camada de adesivo anterior entrava em rotura por ser maioritariamente solicitada a esforços de tração. A evolução da variável de dano no instante da carga máxima é avaliada ao longo deste *path* [108].

Devem ser aplicadas as instruções ao *path* de acordo com a Figura 176, para a geometria de junta cujo  $\gamma=15^\circ$ . Deve selecionar-se o caminho delineado anteriormente, na posição indeformada (*undeformed*). Na opção *x-values*, ao contrário do procedimento descrito para a geometria de base, é recomendado selecionar a opção de distância real (*true distance*). Uma vez que a adição do filete adesivo vai implicar um comprimento de sobreposição diferente do original, optou-se por normalizar a distância apenas na fase do tratamento de dados. O *step/frame* selecionado deve corresponder ao instante em que se atinge  $P_{m\acute{a}x}$ .

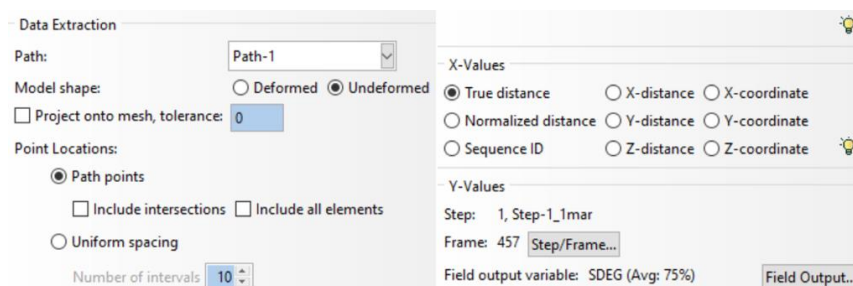


Figura 176 - Aplicação das instruções ao *path* para obter a variável de dano no instante da carga máxima, para a geometria de junta cujo  $\gamma=15^\circ$ .

De acordo com a Figura 177, é aconselhável recorrer ao menu *tools*, e através da opção *query* deve ser determinada a distância entre a extremidade superior da camada adesiva e o nó que coincide com o início da sobreposição relativamente à geometria de base, o que garante que os gráficos de dispersão gerados à posteriori fiquem compreendidos entre 0 e 1, facilitando a comparação de resultados para as diferentes geometrias de juntas analisadas.

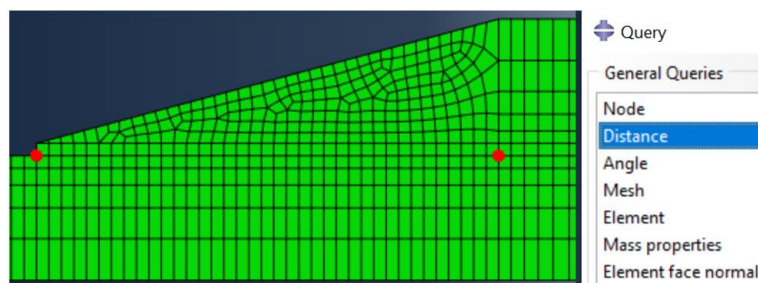


Figura 177 - Determinação da distância entre a extremidade superior da camada adesiva e o nó que coincide com o início da sobreposição relativamente à geometria de base.

A folha de cálculo representada na Figura 177 ilustra o tratamento de dados requerido para obter a evolução da variável do dano para o instante da carga máxima, para  $\gamma=15^\circ$ . As colunas representadas a amarelo são referentes aos dados obtidos diretamente a partir do *software*. A segunda coluna resulta da subtração da distância real obtida após detalhar as informações do *path* pela distância entre a extremidade superior da camada adesiva e o nó que coincide com o início da sobreposição relativamente à geometria de base. A terceira coluna representa os valores correspondentes ao eixo das abcissas já normalizados, na medida em que os valores obtidos para a segunda coluna foram divididos pelo valor de  $L_0=10$  mm, associado à geometria de base.

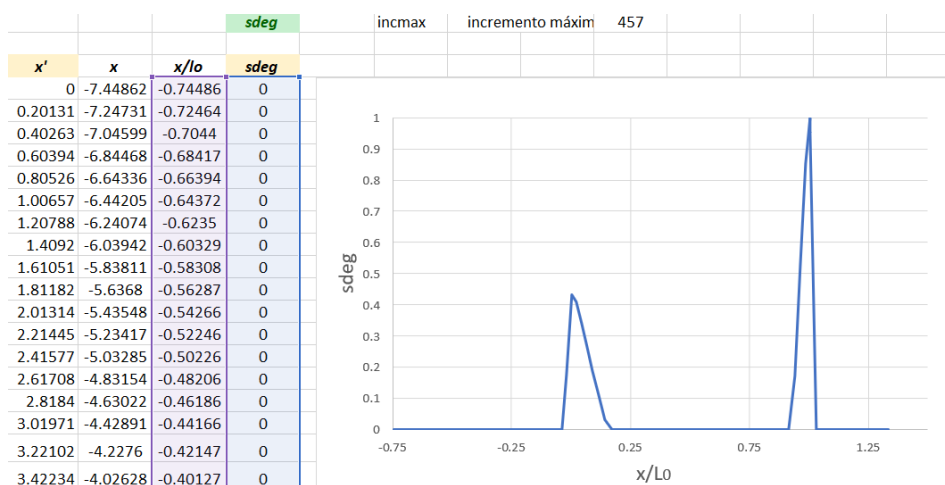


Figura 178 - Tratamento de dados para obtenção de *sdeg* no instante correspondente a  $P_{máx}$ , para  $\gamma=15^\circ$ .

## 7.4. APÊNDICE D

O APÊNDICE D foi criado com o propósito de auxiliar a realização das análises e interpretação dos resultados provenientes do estudo numérico, ilustrados no Subcapítulo 3.4.7.4. Este espaço contempla as condições da análise numérica e o tratamento de dados, para as juntas tubulares bi-adesivas, com aderente não hidroformado de PRFC.

### Condições da análise numérica

Este espaço é reservado à descrição pormenorizada do pré-processamento dos modelos que constituem as juntas tubulares bi-adesivas formadas por um aderente não hidroformado de PRFC. Devem ser consideradas todas as etapas relativas às condições da análise numérica mencionadas APÊNDICE A, na eventualidade de complementarem as alterações aos modelos englobados pela presente análise. Uma vez que a geometria de base é a referência face a qualquer proposta de alteração geométrica, o modelo foi recuperado e foram adicionadas as partições referentes às camadas interlaminar e intralaminar do aderente não hidroformado de PRFC, de acordo com a Figura 179.



Figura 179 - Adição das partições referentes às camadas interlaminar e intralaminar do aderente não hidroformado de PRFC, relativamente à geometria de base.

A Figura 180 ilustra a definição das partições para uma geometria de junta para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo valor de  $L_1=25\% L_0=1,25$  mm. À esquerda, é possível identificar a distância definida entre a interface adesiva e a camada intralaminar, a espessura das camadas interlaminar e intralaminar do PRFC e ainda a distância entre lâminas, igual a 0,08 mm.

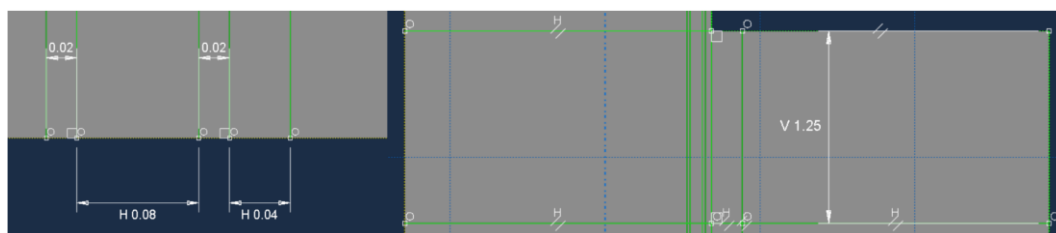


Figura 180 - Definição das partições para uma geometria de junta para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo valor de  $L_1=25\% L_0=1,25$  mm.

No módulo *property*, e na opção *create datum csys (3 points)*, deve ser criado um sistema de coordenadas do tipo retangular formado por três pontos que permita atribuir as constantes de engenharia à secção sólida homogénea do aderente não hidroformado de PRFC, em concordância com a direção dos eixos definidos, de acordo com a Figura 181.

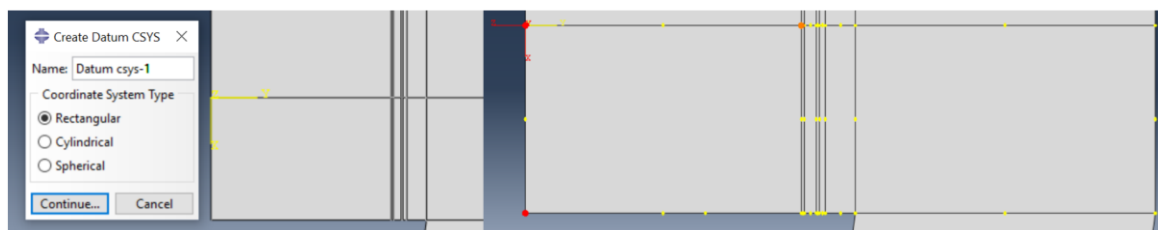


Figura 181 - Sistema de coordenadas do tipo retangular formado por três pontos que permite atribuir as constantes de engenharia à secção sólida homogénea do aderente não hidroformado de PRFC.

A Figura 182 ilustra as opções que o utilizador deve seleccionar no menu *edit material orientation* para definir a orientação do material, e reforça a ideia de que as lâminas do PRFC não vão ser definidas por intermédio das constantes de engenharia.

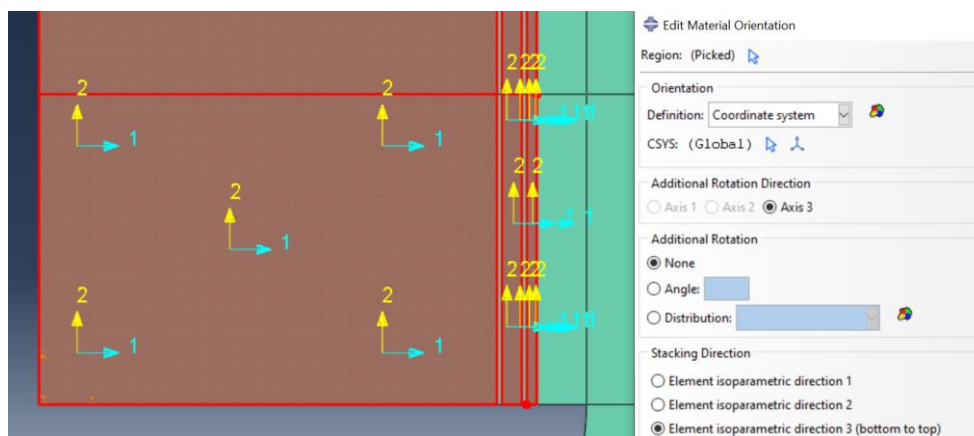


Figura 182 - Direções principais do sistema de eixos definido para atribuir as propriedades ao aderente não hidroformado.

Na opção *material manager*, devem ser adicionados três materiais relativamente à geometria de base. Deve incluir-se o adesivo Araldite® 2015, e atribuí-lo às extremidades da sobreposição adesiva, o PRFC que corresponde à secção sólida homogénea (Figura 183) e ainda as propriedades das camadas interlaminar e intralaminar do aderente não hidroformado (Figura 184) [229]. É de notar que vão ser atribuídas propriedades coesivas e elásticas às lâminas do composto.

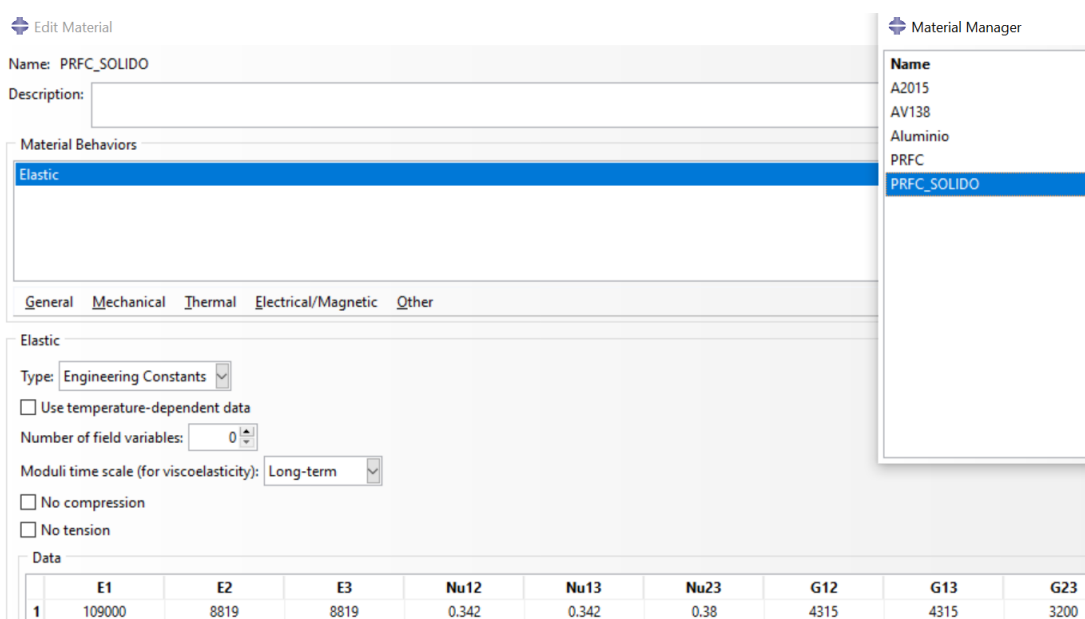


Figura 183 - Constantes de engenharia que definem o PRFC correspondente à secção sólida homogénea do aderente não hidroformado.

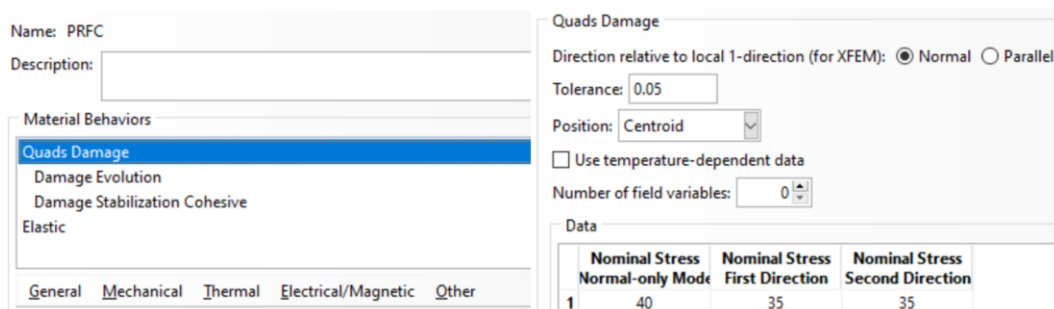


Figura 184 - Propriedades coesivas e elásticas das camadas interlaminar e intralaminar do compósito da união.

De seguida, são atribuídas as secções às diferentes partições criadas anteriormente. Os dois adesivos que incorporam esta configuração bi-adesiva e as lâminas do compósito devem ser definidas no menu *section manager* como secções do tipo coesivo, e as restantes do tipo sólido homogéneo.

A malha associada ao elemento de ligação adesivo é representada pela cor amarela, dominada por quadriláteros e do tipo *sweep*. Deve ser utilizada para gerar a malha de elementos coesivos, de maneira a modelar a propagação do dano. Através do comando *redefine sweep path*, deve ser garantido que cada elemento coesivo vai ligar um nó da interface interior e exterior, evitando a união de elementos da mesma interface, de acordo com a Figura 185.

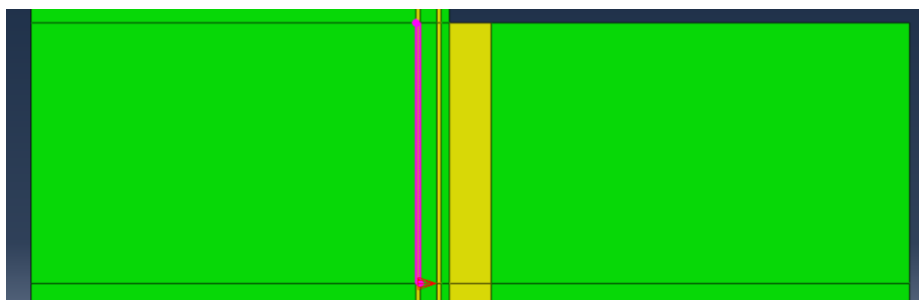


Figura 185 - Atribuição dos controlos de malha aos elementos coesivos, em concordância com os pressupostos da discretização da malha.

Este pormenor é válido para a camada de sobreposição adesiva e para as camadas interlaminar e intralaminar do PRFC. As sementes vão ser definidas em função do número de elementos coesivos ao longo de  $t_a$  e das lâminas do PRFC. De acordo com a Figura 186, apenas um elemento coesivo foi aplicado nos segmentos correspondentes a estas secções. Após associar os controlos de malha, definir os elementos, otimizar os parâmetros e atribuir as respetivas sementes, o processo de geração da malha, submissão do *job* e ainda as opções disponíveis no modo *visualization* assemelham-se às operações enunciadas no APÊNDICE B.

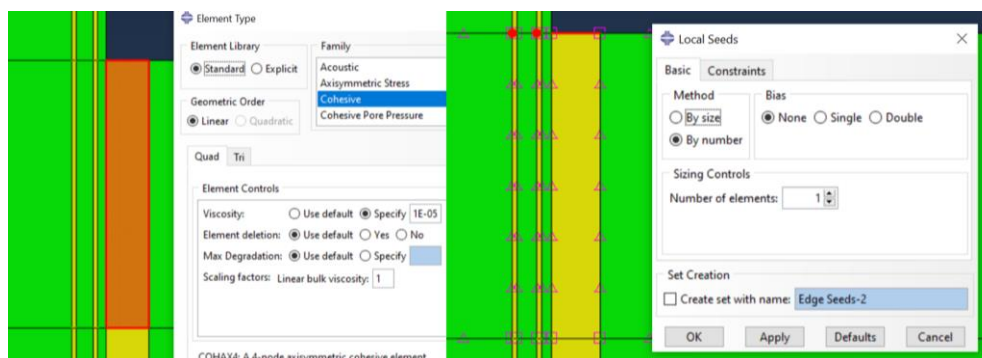


Figura 186 - Definição do tipo de elemento e das sementes locais no caso dos elementos coesivos que constituem a junta bi-adesiva, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

### Tratamento de dados

Relativamente ao tratamento de dados, o processo de obtenção das curvas  $P$ - $\delta$ ,  $ER$ , variável do dano (*path 1*) e distribuição das tensões de corte e arrancamento ao longo do comprimento de sobreposição (*path 1*) assemelha-se à descrição efetuada no APÊNDICE A. Para a obtenção de  $sdeg$  no instante correspondente a  $P_{máx}$ , devem ser seguidos os passos descritos no APÊNDICE B. No entanto, é necessário definir três *paths*. O utilizador deverá traçar três caminhos de propagação do dano coincidentes com a direção longitudinal da união adesiva e as interfaces entre o adesivo e o aderente não hidroformado (*path 1*), a camada intralaminar e o espaço reservado entre lâminas do compósito de PRFC (*path 2*), e a camada interlaminar e a secção sólida homogênea do PRFC (*path 3*). A Figura 187 ilustra o *path 1*, coincidente com a direção longitudinal da união adesiva e a interface entre o adesivo e o aderente não hidroformado.

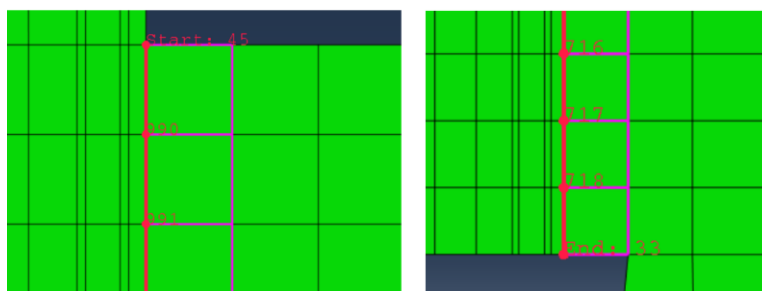


Figura 187 - *Path 1*, coincidente com a direção longitudinal da união adesiva e a interface entre o adesivo e o aderente não hidroformado.

A Figura 188 ilustra o *path 2*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e a interface entre a camada intralaminar e o espaço reservado entre lâminas do PRFC.

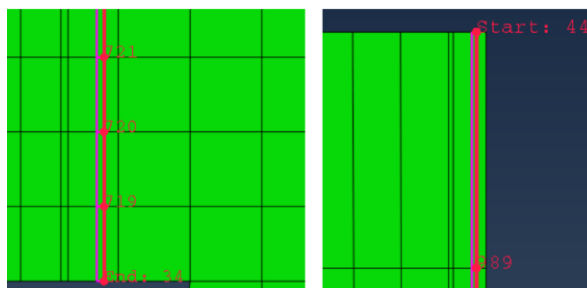


Figura 188 - *Path 2*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e a interface entre a camada intralaminar e o espaço reservado entre lâminas do PRFC.

A Figura 189 ilustra o *path 3*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e a interface entre a camada interlaminar e a secção sólida homogênea do PRFC.

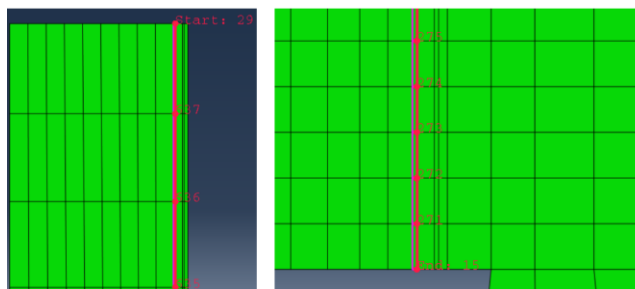


Figura 189 - *Path 3*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e a interface entre a camada interlaminar e a secção sólida homogênea do PRFC.

Face a estes novos pressupostos, as instruções relativas aos *paths* 2 e 3 devem ser obtidas em função da distância real (*true distance*), e os dados devem ser manipulados de maneira a sobrepor os resultados obtidos na zona correspondente à ligação adesiva. No módulo *property*, é recomendado eliminar as propriedades coesivas dos adesivos e das camadas interlaminar e interlaminar do PRFC. No que diz respeito às propriedades elásticas destas secções, admite-se que o material atribuído a cada uma terá um comportamento isotrópico e um  $\nu=0,3$ . No menu *section manager*, a secção atribuída aos elementos de ligação e às lâminas do PRFC era do tipo coesiva. Estas devem ser consideradas como sólidas homogêneas.

Após obter os resultados da análise numérica do ensaio de tração para o primeiro incremento, vão ser extraídas as tensões de corte e arrancamento na direção longitudinal coincidente com o meio da espessura de sobreposição adesiva (*path 1*), e com o meio das camadas intralaminar (*path 2*) e interlaminar (*path 3*) do PRFC. É necessário definir três *paths*. A Figura 190 ilustra o *path 1*, coincidente com a direção longitudinal da união adesiva e o meio da espessura da camada adesiva.

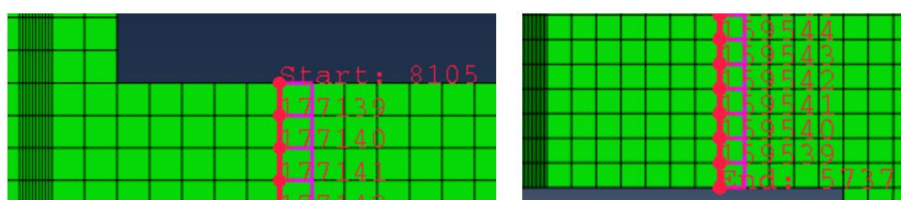


Figura 190 - *Path 1*, coincidente com a direção longitudinal da união adesiva e o meio da espessura da camada adesiva.

A Figura 191 ilustra o *path 2*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e o meio da espessura da camada intralaminar do PRFC.

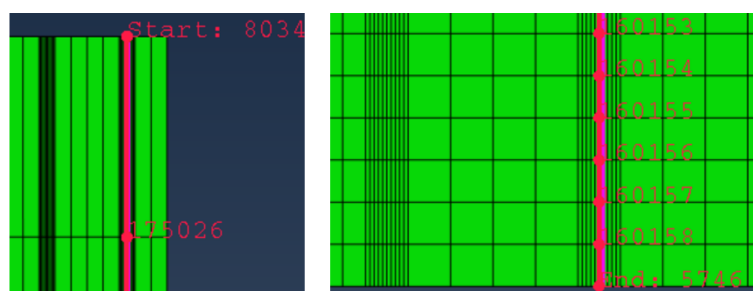


Figura 191 - *Path 2*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e o meio da espessura da camada intralaminar do PRFC.

A Figura 192 ilustra o *path 3*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e o meio da espessura da camada interlaminar do PRFC.

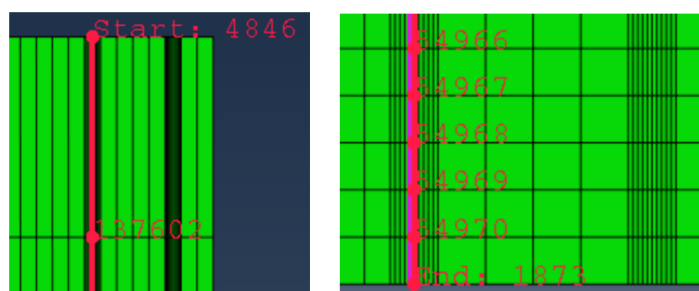


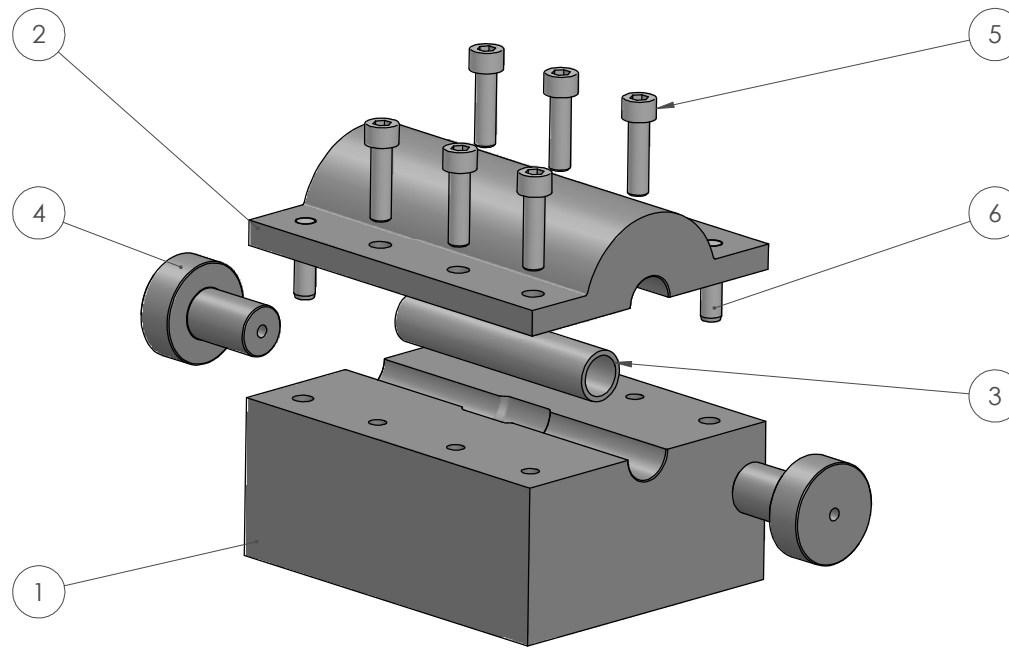
Figura 192 - *Path 3*, coincidente com a direção longitudinal do conjunto e o meio da espessura da camada interlaminar do PRFC.



### **7.5. APÊNDICE E**

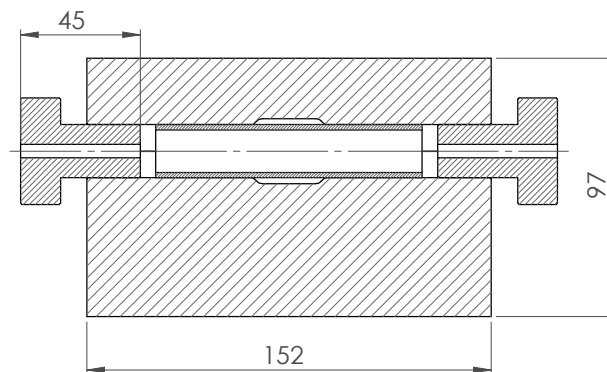
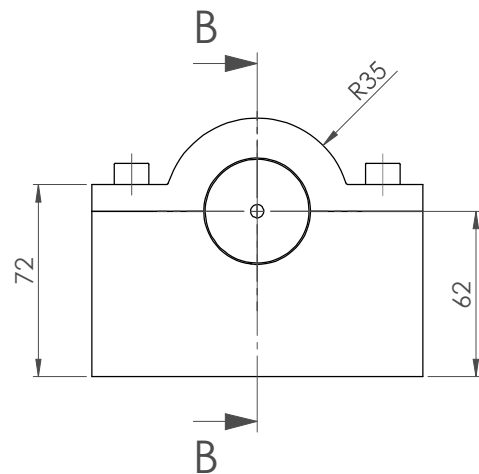
O APÊNDICE E ilustra os desenhos de conjunto, as vistas explodidas e os desenhos de fabrico do molde de hidroformagem. Todos os desenhos foram elaborados de acordo com os princípios básicos de desenho técnico, de acordo com autor Moraes [241], e de maneira a poder referenciar as cotas dependentes nos desenhos de fabrico, é de notar a necessidade de retificar todos os blocos.

página propositadamente em branco

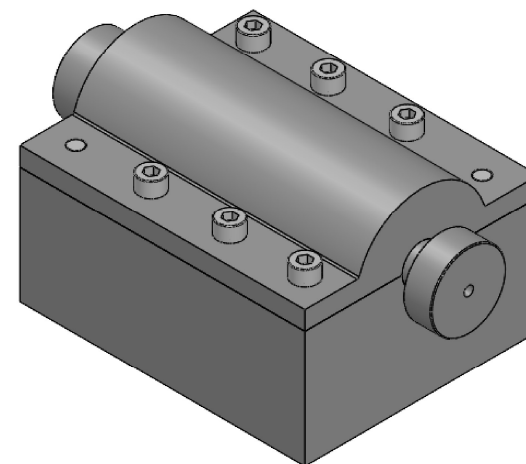
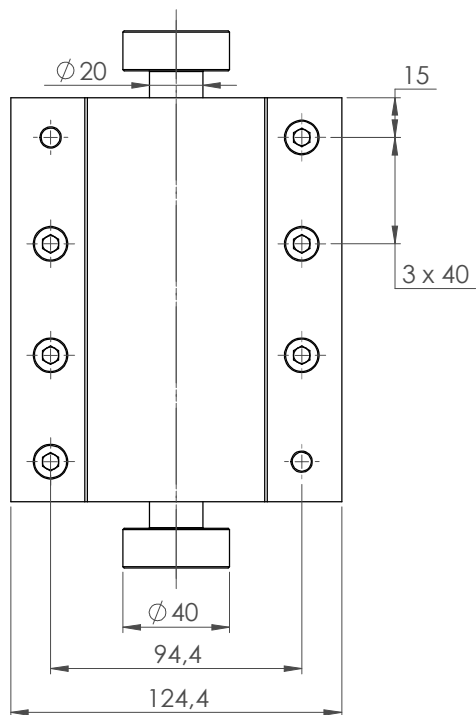


| Nº PEÇA | DESIGNAÇÃO                               | MATERIAL                  | QTD. |
|---------|------------------------------------------|---------------------------|------|
| 1       | PARTE INFERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM | AI SI 304                 | 1    |
| 2       | PARTE SUPERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM | AI SI 304                 | 1    |
| 3       | PERFIL TUBULAR Ø20 x 2 x 100             | LIGA ALUMÍNIO AW6082-T651 | 1    |
| 4       | PISTÃO/ÊMBOLO                            | AI SI 304                 | 2    |
| 5       | ISO 4762 M8 x 30 - 30N                   |                           | 6    |
| 6       | ISO 2336 - 8 m6 x 30 - A1                |                           | 2    |

|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                                 |                              |                              |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|-------------------------------------------------|------------------------------|------------------------------|
| ESCALA<br>1:2                                                                                                                                    | Departamento responsável<br>Departamento de Engenharia Mecânica |                                                 |                              |                              |
| Pessoa responsável<br>ANDRÉ LIMA FARIA                                                                                                           | Designação<br>VISTA EXPLODIDA<br>ASSEMBLY MOLDE HIDROFORMAGEM   |                                                 |                              |                              |
| DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA<br>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO<br>Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431<br>4200-072 Porto |                                                                 | Revisão<br>Prof. Doutor José<br>Joaquim Machado | Número<br>1181096            |                              |
|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                                 | Data de edição<br>19/06/2023 | Idioma<br>PT<br>Folha<br>1/1 |

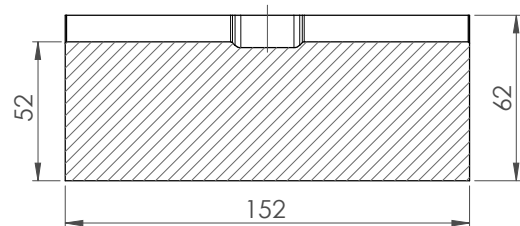


SECÇÃO B-B  
ESCALA 1:2

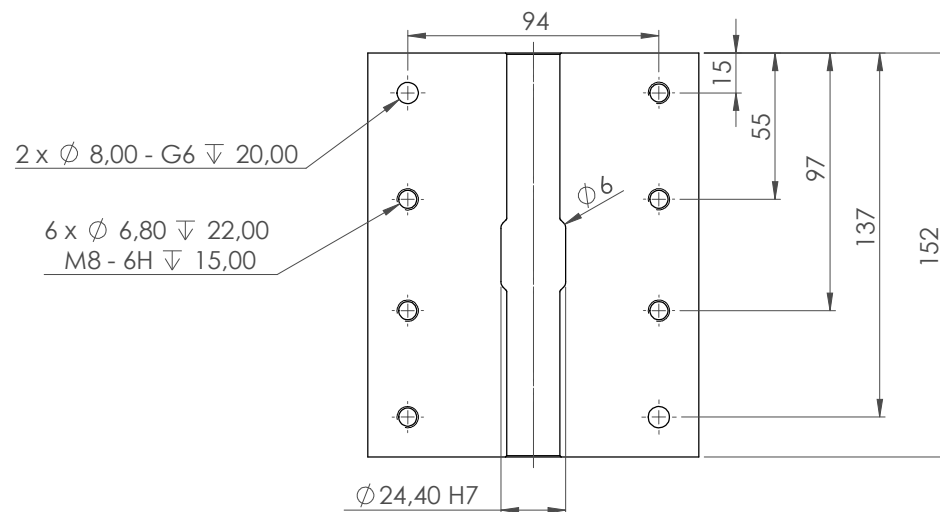
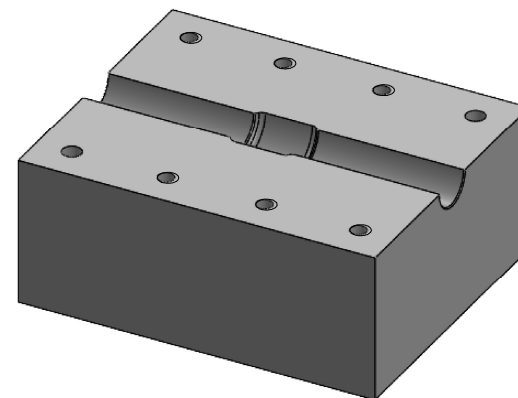
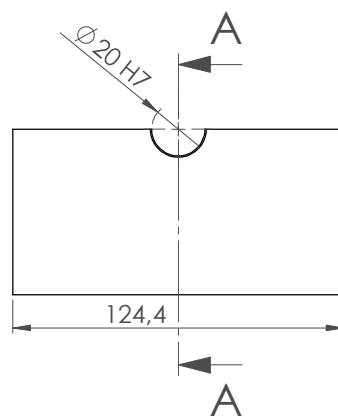


| Nº PEÇA | DESIGNAÇÃO                               | MATERIAL | QTD. |
|---------|------------------------------------------|----------|------|
| 1       | PARTE INFERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM | AISI 304 | 1    |
| 2       | PARTE SUPERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM | AISI 304 | 1    |
| 3       | PERFIL TUBULAR Ø20 x 2 x 100             |          | 1    |
| 4       | PISTÃO/ÊMBOL                             | AISI 304 | 2    |
| 5       | ISO 4762 M8 x 30 - 30N                   | -        | 6    |
| 6       | EN ISO 2338 - 8 m6 x 30 - A1             | -        | 2    |

|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                      |                                               |         |       |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------------------|---------|-------|
| ESCALA<br>1:2                                                                                                                                    | Departamento responsável<br>Departamento de Engenharia Mecânica |                                      |                                               |         |       |
| Pessoa responsável                                                                                                                               | ANDRÉ LIMA FARIA                                                | Designação                           | DESENHO DE CONJUNTO<br>MOLDE DE HIDROFORMAGEM |         |       |
| DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA<br>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO<br>Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431<br>4200-072 Porto |                                                                 | Revisão                              | Número                                        | 1181096 |       |
|                                                                                                                                                  |                                                                 | Prof. Doutor José<br>Joaquim Machado | Data de edição                                | Idioma  | Folha |
|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                      | 19/06/2023                                    | PT      | 1/1   |

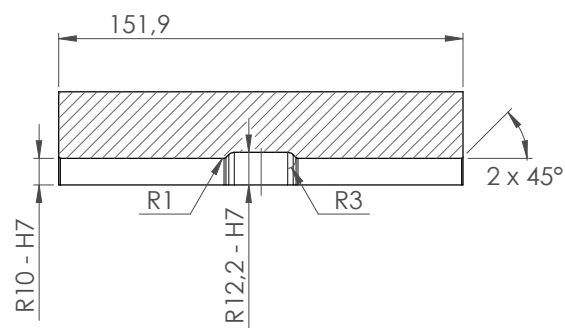
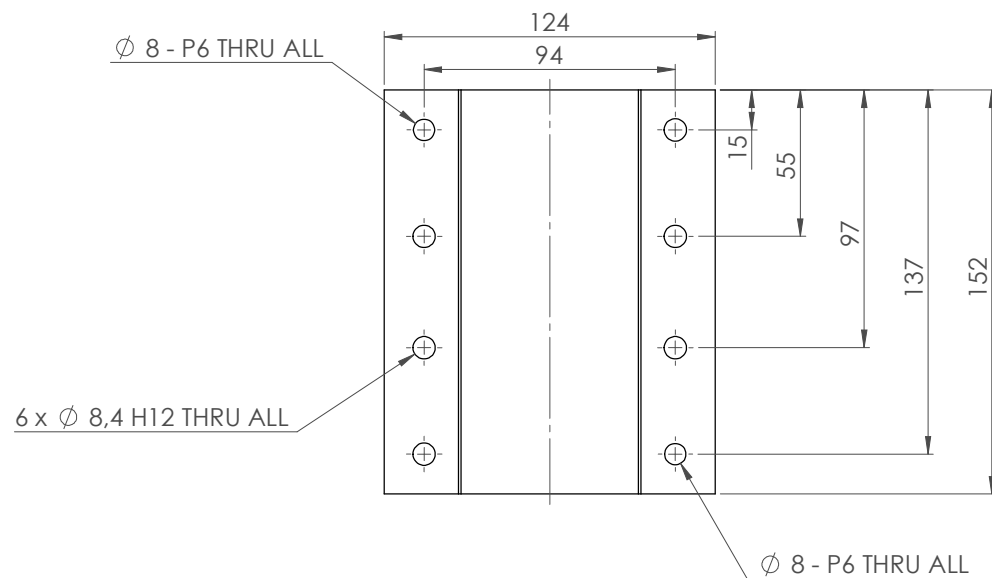


SECÇÃO A-A  
ESCALA 1:2

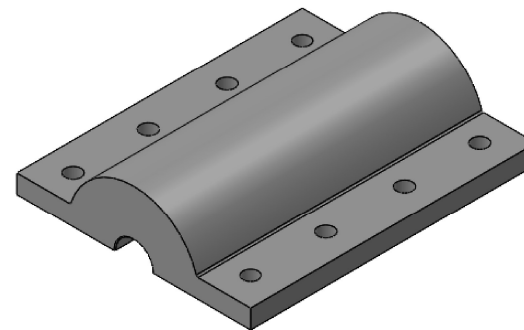
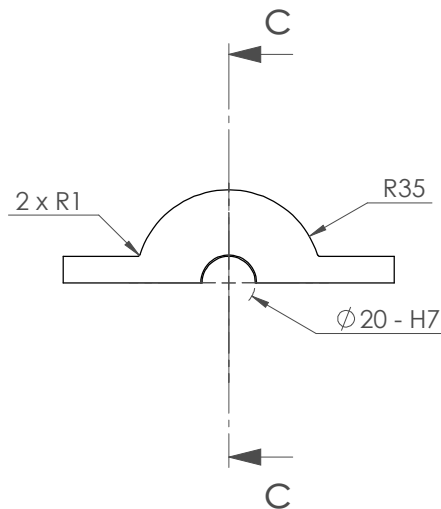


| Nº PEÇA | DESIGNAÇÃO                               | MATERIAL | QTD. |
|---------|------------------------------------------|----------|------|
| 1       | PARTE INFERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM | ASI 304  | 1    |

|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                                                                                    |                                                                     |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------|
| ESCALA<br>1:2                                                                                                                                    | Departamento responsável<br>Departamento de Engenharia Mecânica | Toleranciamento: ISO 8015: ISO 8062 - 3 - DCTG5 - SMI +/- 1,5<br>Tolerâncias gerais: ISO 2768 - mk | Rugosidades gerais: ISO 1302<br>Cantos e chanfros gerais: ISO 13715 |
| Pessoa responsável                                                                                                                               | ANDRÉ LIMA FARIA                                                | Designação                                                                                         | DESENHO DE FABRICO<br>PARTE INFERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM      |
| DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA<br>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO<br>Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431<br>4200-072 Porto | Revisão                                                         | Número                                                                                             | 1181096                                                             |
|                                                                                                                                                  | Prof. Doutor José<br>Joaquim Machado                            | Data de edição                                                                                     | 19/06/2023                                                          |
|                                                                                                                                                  |                                                                 | Idioma                                                                                             | PT                                                                  |
|                                                                                                                                                  |                                                                 | Folha                                                                                              | 1/1                                                                 |

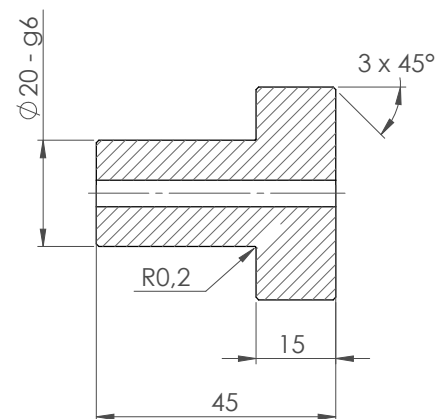
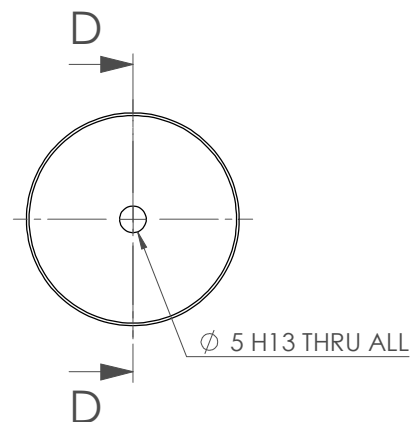


SECÇÃO C-C  
ESCALA 1:2

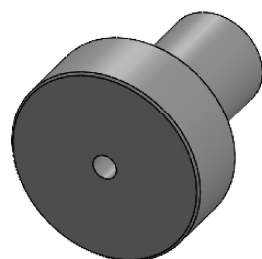


| Nº PEÇA | DESIGNAÇÃO                               | MATERIAL | QTD. |
|---------|------------------------------------------|----------|------|
| 1       | PARTE SUPERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM | ASI 304  | 1    |

|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                                                                                    |                                                                    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| ESCALA<br>1:2                                                                                                                                    | Departamento responsável<br>Departamento de Engenharia Mecânica | Toleranciamento: ISO 8015; ISO 8062 - 3 - DCTG5 - SMI +/- 1,5<br>Tolerâncias gerais: ISO 2768 - mk | Rugosidades gerais: ISO 1302<br>Cantos e chanfros gerais: ISO13715 |
| Pessoa responsável                                                                                                                               | ANDRÉ LIMA FARIA                                                | Designação                                                                                         | DESENHO DE FABRICO<br>PARTE SUPERIOR DO MOLDE DE HIDROFORMAGEM     |
| DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA<br>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO<br>Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431<br>4200-072 Porto |                                                                 | Revisão                                                                                            | Número 1181096                                                     |
|                                                                                                                                                  |                                                                 | Prof. Doutor José Joaquim Machado                                                                  | Data de edição 19/06/2023<br>Idioma PT<br>Folha 1/1                |



SECÇÃO D-D  
ESCALA 1:1



| Nº PEÇA | DESIGNAÇÃO    | MATERIAL | QTD. |
|---------|---------------|----------|------|
| 1       | PISTÃO/ÊMBOLO | AlSi 304 | 1    |

|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                                                    |                                                                |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------------------|
| ESCALA<br>1:1                                                                                                                                    | Departamento responsável<br>Departamento de Engenharia Mecânica | Rugosidades gerais: ISO 1302<br>Cantos e chanfros gerais: ISO13715 | Toleranciamento: ISO 8015<br>Tolerâncias gerais: ISO 2768 - mk |
| Pessoa responsável                                                                                                                               | ANDRÉ LIMA FARIA                                                | Designação                                                         | DESENHO DE FABRICO<br>PISTÃO/ÊMBOLO                            |
| DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA MECÂNICA<br>INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DO PORTO<br>Rua Dr. António Bernardino de Almeida, 431<br>4200-072 Porto |                                                                 | Revisão<br>Prof. Doutor José<br>Joaquim Machado                    | Número<br>1181096                                              |
|                                                                                                                                                  |                                                                 | Data de edição<br>19/06/2023                                       | Idioma<br>PT                                                   |
|                                                                                                                                                  |                                                                 |                                                                    | Folha<br>1/1                                                   |

## 7.6. APÊNDICE F

O APÊNDICE F foi criado com o objetivo de ilustrar as folhas de configuração para a programação das máquinas, fresadora e torno de dois eixos, e ainda as folhas técnicas e de configuração das ferramentas, de acordo com as etapas requeridas para a obtenção do produto final. Após a análise cuidadosa e definição dos parâmetros de funcionamento, foi possível estimar com precisão o custo total da obtenção de todas as partes que integram o molde de hidroformagem.

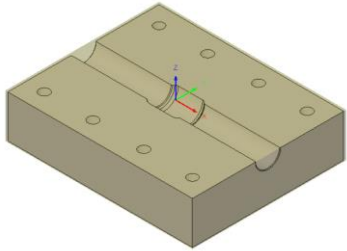
### Configuração Parte Inferior do Molde

A parte inferior do molde contém 6 furos roscados e 2 passantes para guiamento dos pinos cilíndricos, daí o número e a designação das operações coincidirem com a necessidade da passagem de machos para abrir o roscado. Os parafusos utilizados são de cabeça cilíndrica hexagonal, com um chanfro na ponta, uma vez que o diâmetro dos furos é superior a 4 mm. A ligação destes ao molde consiste numa ligação por parafuso com guiamento (Parte Superior do Molde) e peça roscada (Parte Inferior do Molde). Os pinos cilíndricos normalizados têm um comprimento total de 30 mm, sendo que um terço deste valor está apertado na parte superior do molde. Os outros 20 mm garantem o guiamento dos restantes furos concêntricos em ambas as peças. A broca utilizada inicialmente garante um furo com 22 mm de comprimento, para ser possível obter um roscado interior com 15 mm de profundidade, após passagem do macho direito. Estes parâmetros devem ser respeitados aquando da modelação dos componentes, para serem corretamente importados para o *software* que gera as folhas de configuração para as máquinas. A maquinagem das arestas e a opção por chanfros tem o propósito de facilitar o manuseamento dos operários e garantir a segurança dos mesmos. No geral, foram atribuídas tolerâncias geométricas gerais às peças de classe média, e foi considerada a independência entre os toleranciamento geométrico e dimensional.

É de notar que o *software* utilizado recomenda a utilização de um fluído de arrefecimento apropriado para oferecer garantias de maquinagem e prolongar a vida útil das ferramentas. O líquido utilizado pode variar consoante a empresa, no entanto, deve consistir num fluído de arrefecimento à base de água com uma determinada percentagem de um óleo adequado. Todas as tolerâncias enunciadas daqui em diante foram impostas pelo *software* utilizado, e nenhum valor foi manipulado.

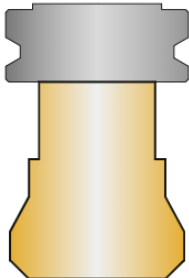
A Tabela 154 ilustra a folha de configuração para a programação da máquina, para o caso da parte inferior do molde. No que diz respeito ao *stock*, estas quantidades apresentam blocos de material com uma margem de alguns milímetros relativamente ao produto final. O custo total da obtenção da parte inferior do molde, considerando o tempo estimado do ciclo majorado e de preparação da máquina, é igual a 167,35 euros.

Tabela 154 - Folha de configuração para a programação da fresadora, para o caso da parte inferior do molde.

| Folha de configuração para a programação da máquina                               |                 |                                                                         |                                        |
|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-------------------------------------------------------------------------|----------------------------------------|
| Configuração Parte Inferior do Molde                                              |                 |                                                                         |                                        |
|  |                 |                                                                         |                                        |
| <i>Stock</i>                                                                      | <i>Part</i>     | Posição mais baixa relativamente ao SCG (Sistema de Coordenadas Global) | Posição mais alta relativamente ao SCG |
| DX: 153,87 [mm]                                                                   | DX: 151,87 [mm] | X: -76,94 [mm]                                                          | X: 76,94 [mm]                          |
| DY: 126,40 [mm]                                                                   | DY: 124,40 [mm] | Y: -63,20 [mm]                                                          | Y: 63,20 [mm]                          |
| DZ: 63,20 [mm]                                                                    | DZ: 62,20 [mm]  | Z: -63,20 [mm]                                                          | Z: 0 [mm]                              |
| Totais                                                                            |                 |                                                                         |                                        |
| Nº de operações                                                                   |                 | 5                                                                       |                                        |
| Nº de ferramentas                                                                 |                 | 5                                                                       |                                        |
| Ferramentas                                                                       |                 | T2, T4, T10, T20, T29                                                   |                                        |
| Posição máxima acima do SCG                                                       |                 | 15,00 [mm]                                                              |                                        |
| Posição máxima abaixo do SCG                                                      |                 | -23,00 [mm]                                                             |                                        |
| Avanço máximo                                                                     |                 | 2750,20 [mm/min]                                                        |                                        |
| Velocidade de rotação máxima da árvore                                            |                 | 10000 [rpm]                                                             |                                        |
| Distância de corte efetivo                                                        |                 | 20539,70 [mm]                                                           |                                        |
| Percurso da ferramenta em vazio                                                   |                 | 1453,58 [mm]                                                            |                                        |
| Tempo estimado de todas as operações                                              |                 | 0,347 [horas]                                                           |                                        |

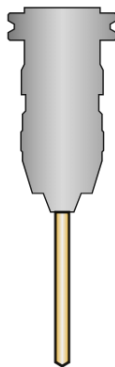
A Tabela 155 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela primeira operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. A posição máxima das ferramentas acima do SCG corresponde em todas as tabelas ao movimento associado à retração da ferramenta utilizada nas operações de fresagem.

Tabela 155 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela primeira operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde.

| Ferramentas: T2 D2 L2                                   |                                          |                                                                                     |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Faceamento perpendicular                          | Posição máxima abaixo do SCG: -1 [mm]    |  |
| Diâmetro: 47 [mm]                                       | Avanço máximo: 541,80 [mm/min]           |                                                                                     |
| Raio de canto da pastilha: 0,8 [mm]                     | Posição da pastilha: 45°                 |                                                                                     |
| Velocidade de rotação máxima da árvore: 1355 [rpm]      |                                          |                                                                                     |
| Comprimento de referência: 68 [mm]                      | Distância de corte efetiva: 1183,34 [mm] |                                                                                     |
| Nº de cortantes: 5                                      | Aproximação/Afastamento: 21,30 [mm]      |                                                                                     |
| Descrição (Fornecedor): ROCA 50 [mm] (SECO TOOLS) [242] |                                          |                                                                                     |
| Tempo estimado do ciclo: 2 [min]: 11 [s] (12,60 + 20%)  |                                          |                                                                                     |
| Operação 1/5                                            |                                          |                                                                                     |
| Descrição: Faceamento                                   | Tolerância: 0,01 [mm]                    |                                                                                     |
| Estratégia: Faceamento perpendicular                    | Passo lateral: 31,78 [mm]                |                                                                                     |
| Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]                    |                                          |                                                                                     |

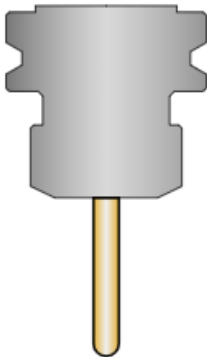
A Tabela 156 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela segunda operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. A furação do tipo “pica-pau” é aconselhada para furos de elevada profundidade, cuja posição e geometria dificultam a eliminação da rebarba e a capacidade de a ferramenta escoar o material em excesso. De acordo com os princípios deste tipo de furação, o avanço máximo considerado corresponde a uma pequena percentagem do aconselhado para operações de fresagem. A ferramenta vai entrar e sair do furo de forma cíclica a uma velocidade superior à de corte, daí a distância percorrida em movimento rápido ser superior à distância de corte efetiva.

Tabela 156 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela segunda operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde.

| Ferramentas: T4 D4 L4                                        |                                                    |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Furação “Pica-pau”                                     | Posição máxima abaixo do SCG: -23 [mm]             | Suporte (Fornecedor): CT40 - Drill Chuck 1 – 13 [mm] (Lyndex - Nikken)               |
| Diâmetro: 7 [mm]                                             | Avanço máximo: 95,49 [mm/min]                      |  |
| Ângulo de ponta: 118°                                        | Velocidade de rotação máxima da árvore: 1592 [rpm] |                                                                                      |
| Comprimento: 90 [mm]                                         | Distância de corte efetiva: 212 [mm]               |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 2                                           | Distância de movimento rápido: 586,11 [mm]         |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): Broca 7 [mm] (Pecol Mastercut) [243] |                                                    |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 2 [min]: 20 [s] (13,50 + 20%)       |                                                    |                                                                                      |
| Operação 2/5                                                 |                                                    |                                                                                      |
| Descrição: Furação                                           | Tolerância: 0,01 [mm]                              |                                                                                      |
| Estratégia: Furação “Pica-pau”                               | Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]               |                                                                                      |

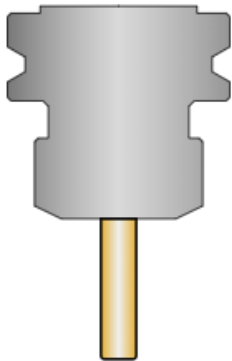
A Tabela 157 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela terceira operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. É de notar que a definição dos parâmetros utilizados pela ferramenta responsável pelo roscado interior foi criteriosa, na medida em que o passo do parafuso M8 escolhido é de 1,25 mm. Este pormenor é particularmente relevante, na medida em que o avanço máximo e velocidade de rotação máxima da árvore têm de ser compatíveis com o passo do parafuso utilizado.

Tabela 157 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela terceira operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde.

| Ferramentas: T29 D29 L29                              |                                            |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Macho direito                                   | Posição máxima abaixo do SCG: -23 [mm]     | Suporte: BT40 - B4C3 - 0032                                                          |
| Diâmetro: 8 [mm]                                      | Avanço máximo: 500 [mm/min]                |  |
| Velocidade de rotação máxima da árvore: 400 [rpm]     |                                            |                                                                                      |
| Comprimento: 50 [mm]                                  | Distância de corte efetiva: 424 [mm]       |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 3                                    | Distância de movimento rápido: 374,11 [mm] |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): FT10R1 (Walter)               |                                            |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 0 [min]: 47 [s] (4,50 + 20%) |                                            |                                                                                      |
| Operação 3/5                                          |                                            |                                                                                      |
| Descrição: Furação                                    | Tolerância: 0,01 [mm]                      |                                                                                      |
| Estratégia: Roscado interior                          | Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]       |                                                                                      |

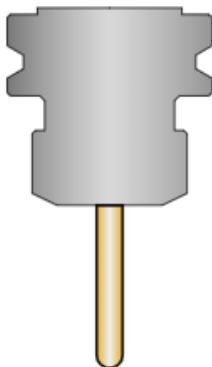
A Tabela 158 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. A estratégia de movimento ou desbaste dinâmico tem como principal objetivo garantir a manutenção do binário constante com a respetiva eliminação da apara. O *stock to leave* é referente à margem de material deixado na parede radial e axial para operações de fresagem de acabamento.

Tabela 158 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde.

| Ferramentas: T10 D10 L10                              |                                                    |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Fresagem de topo com raio de canto              | Posição máxima abaixo do SCG: -10,50 [mm]          | Suporte: BT40 - B4C3 - 0032                                                          |
| Diâmetro: 10 [mm]                                     | Velocidade máxima de rotação da árvore: 7639 [rpm] |  |
| Raio: 1 [mm]                                          |                                                    |                                                                                      |
| Avanço máximo: 2750,20 [mm/min]                       |                                                    |                                                                                      |
| Comprimento: 40 [mm]                                  | Distância de corte efetiva: 4043,54 [mm]           |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 3                                    | Distância de movimento rápido: 442,40 [mm]         |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): FT10R1 (Walter)               |                                                    |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 1 [min]: 38 [s] (9,40 + 20%) |                                                    |                                                                                      |
| Operação 4/5                                          |                                                    |                                                                                      |
| Descrição: Controlo adaptativo de avanço              | Tolerância: 0,01 [mm]                              |                                                                                      |
| Estratégia: Estratégia de movimento dinâmico          | Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]               |                                                                                      |
| Stock to Leave: 0,5 [mm]                              | Profundidade de corte máxima: 10 [mm]              |                                                                                      |
| Passo lateral: 4 [mm]                                 | Desvio do passo: 0,4 [mm]                          |                                                                                      |

A Tabela 159 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela quinta operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde. É de notar que o número de cortantes utilizados podia ser majorado, na tentativa de diminuir o tempo de maquinagem. No entanto, a alteração das características da ferramenta pode implicar a formação de arestas postiças indesejáveis.

Tabela 159 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quinta operação de fresagem para obtenção da parte inferior do molde.

| Ferramentas: T20 D20 L20                              |                                                     |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Ferramenta esférica                             | Posição máxima abaixo do SCG: -13,20 [mm]           | Suporte: BT40 - B4C3 - 0032                                                          |
| Diâmetro: 8 [mm]                                      | Velocidade máxima de rotação da árvore: 10000 [rpm] |  |
| Raio: 4 [mm]                                          |                                                     |                                                                                      |
| Avanço máximo: 1600 [mm/min]                          |                                                     |                                                                                      |
| Comprimento: 50 [mm]                                  | Distância de corte efetiva: 14676,81 [mm]           |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 2                                    | Distância de movimento rápido: 29,65 [mm]           |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): FT10R1 (Walter)               |                                                     |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 9 [min]:11 [s] (52,90 + 20%) |                                                     |                                                                                      |
| Operação 5/5                                          |                                                     |                                                                                      |
| Descrição: Paralelo                                   | Tolerância: 0,01 [mm]                               |                                                                                      |
| Estratégia: Descrição de movimentos paralelos         | Passo lateral: 0,40 [mm]                            |                                                                                      |
| Stock to Leave: 0 [mm]                                | Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]                |                                                                                      |

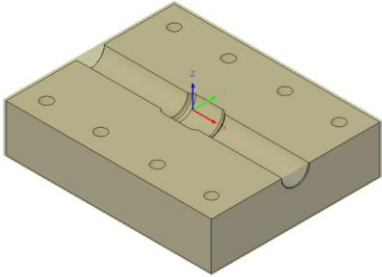
### Configuração Parte Superior do Molde

No que diz respeito à folha de configuração para a programação da máquina para a parte superior do molde, uma alternativa à proposta atual podia consistir na compra de chapas retificadas para obter a parte inferior do molde, de acordo com as soluções disponibilizadas pelos fabricantes referenciados [244-246]. Esta alteração iria aliviar o orçamento de maquinagem, por não se considerarem as etapas correspondentes à furação. Na eventualidade de o utilizador optar pela alternativa (compra de chapas previamente maquinadas), as dimensões do *stock* vão coincidir com as da peça (*part*). Até esta etapa, somente vão ser consideradas operações de fresagem.

A Tabela 160 ilustra a folha de configuração para a programação da máquina, para o caso da parte superior do molde. No que diz respeito ao *stock*, estas quantidades apresentam blocos de material com uma margem de alguns milímetros relativamente ao produto final. Relativamente à folha de configuração para a programação da máquina anterior, as operações são muito semelhantes, excluindo as operações de passagem de um macho direito para obter o roscado pretendido.

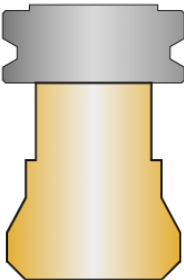
O custo total da obtenção da parte superior do molde, considerando o tempo estimado do ciclo majorado e de preparação da máquina, é igual a 167,50 euros.

Tabela 160 - Folha de configuração para a programação da máquina, para o caso da parte superior do molde.

| Folha de configuração para a programação da máquina                                |                 |                                         |                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-----------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| Configuração Parte Superior do Molde                                               |                 |                                         |                                        |
|  |                 |                                         |                                        |
| Stock                                                                              | Part            | Posição mais baixa relativamente ao SCG | Posição mais alta relativamente ao SCG |
| DX: 153,87 [mm]                                                                    | DX: 151,87 [mm] | X: -76,94 [mm]                          | X: 76,94 [mm]                          |
| DY: 126,40 [mm]                                                                    | DY: 124,40 [mm] | Y: -63,20 [mm]                          | Y: 63,20 [mm]                          |
| DZ: 36 [mm]                                                                        | DZ: 35 [mm]     | Z: -36 [mm]                             | Z: 0 [mm]                              |
| Totais                                                                             |                 |                                         |                                        |
| Nº de operações                                                                    |                 | 4                                       |                                        |
| Nº de ferramentas                                                                  |                 | 4                                       |                                        |
| Ferramentas                                                                        |                 | T2, T4, T10, T20                        |                                        |
| Posição máxima acima do SCG                                                        |                 | 15,00 [mm]                              |                                        |
| Posição máxima abaixo do SCG                                                       |                 | -36,00 [mm]                             |                                        |
| Avanço máximo                                                                      |                 | 2750,20 [mm/min]                        |                                        |
| Velocidade de rotação máxima da árvore                                             |                 | 10000 [rpm]                             |                                        |
| Distância de corte efetivo                                                         |                 | 20231,25 [mm]                           |                                        |
| Percurso da ferramenta em vazio                                                    |                 | 1176,43 [mm]                            |                                        |
| Tempo estimado de todas as operações                                               |                 | 0,350 [horas]                           |                                        |

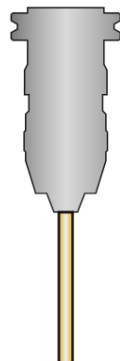
A Tabela 161 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela primeira operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde. A posição máxima das ferramentas acima do SCG corresponde em todas as tabelas ao movimento associado à retração da ferramenta utilizada nas operações de fresagem.

Tabela 161 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela primeira operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde.

| Ferramentas: T2 D2 L2                                   |                                          |                                                                                                              |
|---------------------------------------------------------|------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Facejamento perpendicular                         | Posição máxima abaixo do SCG: - 1 [mm]   | Suporte: BT40 - Blank<br> |
| Diâmetro: 47 [mm]                                       | Avanço máximo: 541,80 [mm/min]           |                                                                                                              |
| Raio de canto da pastilha: 0,8 [mm]                     | Posição da pastilha: 45°                 |                                                                                                              |
| Velocidade de rotação máxima da árvore: 1355 [rpm]      |                                          |                                                                                                              |
| Comprimento de referência: 68 [mm]                      | Distância de corte efetiva: 1183,34 [mm] |                                                                                                              |
| Nº de cortantes: 5                                      | Aproximação/Afastamento: 21,30 [mm]      |                                                                                                              |
| Descrição (Fornecedor): ROCA 50 [mm] (SECO TOOLS) [242] |                                          |                                                                                                              |
| Tempo estimado do ciclo: 2 [min]: 11 [s] (12,50 + 20%)  |                                          |                                                                                                              |
| Operação 1/4                                            |                                          |                                                                                                              |
| Descrição: Facejamento                                  | Tolerância: 0,01 [mm]                    |                                                                                                              |
| Estratégia: Facejamento perpendicular                   | Passo lateral: 31,78 [mm]                |                                                                                                              |
| Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]                    |                                          |                                                                                                              |

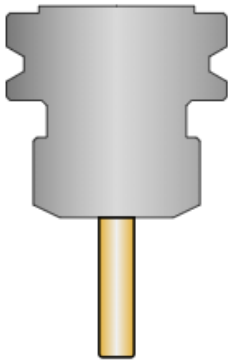
A Tabela 162 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela segunda operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde. A furação do tipo “pica-pau” é aconselhada para furos de elevada profundidade, cuja dimensão dificulta a eliminação da rebarba e a capacidade de a ferramenta escoar o excesso de material. De acordo com os princípios deste tipo de furação, o avanço máximo considerado corresponde a uma pequena percentagem do aconselhado para operações de fresagem. A ferramenta vai entrar e sair do furo de forma cíclica a uma velocidade superior à de corte, daí a distância percorrida em movimento rápido ser superior à distância de corte efetiva.

Tabela 162 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela segunda operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde.

| Ferramentas: T4 D4 L4                                  |                                                    |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Furação “Pica-pau”                               | Posição máxima abaixo do SCG: -36 [mm]             | Suporte (Fornecedor): CT40 - Drill Chuck 1 – 13 [mm] (Lyndex - Nikken)               |
| Diâmetro: 8 [mm]                                       | Avanço máximo: 95,49 [mm/min]                      |  |
| Ângulo de ponta: 118 °                                 | Velocidade de rotação máxima da árvore: 1592 [rpm] |                                                                                      |
| Comprimento: 90 [mm]                                   | Distância de corte efetiva: 320 [mm]               |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 2                                     | Distância de movimento rápido: 694,14 [mm]         |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): Broca 8 [mm] (Pecol Mastercut) |                                                    |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 3 [min]: 29 [s] (19,90 + 20%) |                                                    |                                                                                      |
| Operação 2/4                                           |                                                    |                                                                                      |
| Descrição: Furação                                     | Tolerância: 0,01 [mm]                              |                                                                                      |
| Estratégia: Furação “Pica-pau”                         | Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]               |                                                                                      |

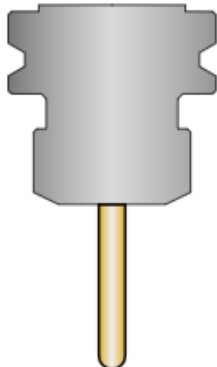
A Tabela 163 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela terceira operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde. A estratégia de movimento ou desbaste dinâmico tem como principal objetivo garantir a manutenção do binário constante com a respetiva eliminação da apara. O *stock to leave* é referente à margem de material deixado na parede radial e axial para operações de fresagem de acabamento.

Tabela 163 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela terceira operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde.

| Ferramentas: T10 D10 L10                              |                                                    |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Fresagem de topo com raio de canto              | Posição máxima abaixo do SCG: -10,50 [mm]          | Suporte: BT40 - B4C3 - 0032                                                          |
| Diâmetro: 10 [mm]                                     | Velocidade máxima de rotação da árvore: 7639 [rpm] |  |
| Raio: 1 [mm]                                          |                                                    |                                                                                      |
| Avanço máximo: 2750,20 [mm/min]                       |                                                    |                                                                                      |
| Comprimento: 40 [mm]                                  | Distância de corte efetiva: 4051,09 [mm]           |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 3                                    | Distância de movimento rápido: 431,33 [mm]         |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): FT10R1 (Walter)               |                                                    |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 1 [min]: 38 [s] (9,30 + 20%) |                                                    |                                                                                      |
| Operação 3/4                                          |                                                    |                                                                                      |
| Descrição: Controlo adaptativo de avanço              | Tolerância: 0,01 [mm]                              |                                                                                      |
| Estratégia: Estratégia de movimento dinâmico          | Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]               |                                                                                      |
| Stock to Leave: 0,5 [mm]                              | Profundidade de corte máxima: 10 [mm]              |                                                                                      |
| Passo lateral: 4 [mm]                                 | Desvio do passo: 0,4 [mm]                          |                                                                                      |

A Tabela 164 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde.

Tabela 164 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de fresagem para obtenção da parte superior do molde.

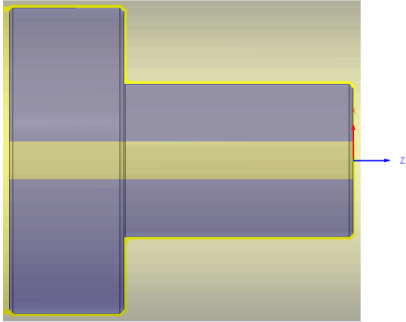
| Ferramentas: T20 D20 L20                              |                                                     |                                                                                     |
|-------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------|-------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Ferramenta esférica                             | Posição máxima abaixo do SCG: - 13,20 [mm]          | Suporte: BT40 - B4C3 - 0032                                                         |
| Diâmetro: 8 [mm]                                      | Velocidade máxima de rotação da árvore: 10000 [rpm] |  |
| Raio: 4 [mm]                                          |                                                     |                                                                                     |
| Avanço máximo: 1600 [mm/min]                          |                                                     |                                                                                     |
| Comprimento: 50 [mm]                                  | Distância de corte efetiva: 14676,81 [mm]           |                                                                                     |
| Nº de cortantes: 2                                    | Distância de movimento rápido: 29,65 [mm]           |                                                                                     |
| Descrição (Fornecedor): FT10R1 (Walter)               |                                                     |                                                                                     |
| Tempo estimado do ciclo: 9 [min]:11 [s] (52,50 + 20%) |                                                     |                                                                                     |
| Operação 4/4                                          |                                                     |                                                                                     |
| Descrição: Paralelo                                   | Tolerância: 0,01 [mm]                               |                                                                                     |
| Estratégia: Descrição de movimentos paralelos         | Passo lateral: 0,40 [mm]                            |                                                                                     |
| Stock to Leave: 0 [mm]                                | Posição máxima acima do SCG: 15 [mm]                |                                                                                     |

### Configuração Pistão/Êmbolo

A Tabela 165 ilustra a folha de configuração para a programação da máquina, para o caso do pistão/êmbolo. No que diz respeito ao *stock*, estas quantidades apresentam blocos de material com uma margem de alguns milímetros relativamente ao produto final. É de notar que o utilizador pretende que a máquina opere a velocidades de corte constantes. As dimensões do pistão/êmbolo implicam que a velocidade de rotação do torno tenda para infinito para posições remoção de material próximas do eixo de revolução. Desta maneira, deve limitar-se a velocidade de rotação da bucha para zelar pela vida útil da máquina e das ferramentas, e ainda pela segurança do operador.

O custo total da obtenção do pistão/êmbolo considerando o tempo estimado do ciclo majorado e de preparação da máquina é igual a 94,47 euros.

Tabela 165 - Folha de configuração para a programação do torno de dois eixos, para o caso do pistão/êmbolo.

| Folha de configuração para a programação da máquina                                |             |                                         |                                        |
|------------------------------------------------------------------------------------|-------------|-----------------------------------------|----------------------------------------|
| Configuração Pistão/Êmbolo                                                         |             |                                         |                                        |
|  |             |                                         |                                        |
| <i>Stock</i>                                                                       | <i>Part</i> | Posição mais baixa relativamente ao SCG | Posição mais alta relativamente ao SCG |
| DX: 42 [mm]                                                                        | DX: 40 [mm] | X: -21 [mm]                             | X: 21 [mm]                             |
| DY: 42 [mm]                                                                        | DY: 40 [mm] | Y: -21 [mm]                             | Y: 21 [mm]                             |
| DZ: 50 [mm]                                                                        | DZ: 45 [mm] | Z: 1 [mm]                               | Z: 1 [mm]                              |
| Totais                                                                             |             |                                         |                                        |
| Nº de operações                                                                    |             | 6                                       |                                        |
| Nº de ferramentas                                                                  |             | 4                                       |                                        |
| Ferramentas                                                                        |             | T2, T7, T12, T14                        |                                        |
| Posição máxima à direita do SCG                                                    |             | 16,00 [mm]                              |                                        |
| Posição máxima à esquerda do SCG                                                   |             | -48,13 [mm]                             |                                        |
| Avanço máximo das ferramentas                                                      |             | 400 [mm/min]                            |                                        |
| Velocidade de rotação máxima da bucha                                              |             | 5000 [rpm]                              |                                        |
| Distância de corte efetivo                                                         |             | 668,16 [mm]                             |                                        |
| Distância de movimento em vazio (sem operar)                                       |             | 3013,45 [mm]                            |                                        |
| Tempo estimado de todas as operações                                               |             | 0,374 [horas]                           |                                        |

A Tabela 166 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pelas primeiras três operações de torneamento para obter o pistão/êmbolo. O raio da ferramenta utilizada coincide com as características das ferramentas mais usuais para realizar operações de desbaste. O ângulo de incidência da pastilha representa um pormenor geométrico de particular interesse para o operador, na medida em que a pastilha é formada por dois gumes de corte de cada lado e pode ser manipulada de forma a dobrar o seu tempo de vida útil. A compensação *tip tangent* implica que a máquina vai considerar o ponto de interseção das tangentes da ponta da ferramenta como referência para operar. A ferramenta T2 D2 foi escolhida para poder desempenhar as três primeiras operações de torneamento, e foi por isso necessário minimizar as velocidades de desbaste. Uma alternativa podia consistir no aumento do avanço máximo para as operações de desbaste, desde que a ferramenta fosse substituída com regularidade entre operações. Relativamente à terceira operação, apesar de a ferramenta poder desbastar até 1,20 mm por passagem, o *stock to leave* reservado para os acabamentos é de apenas 0,3 mm.

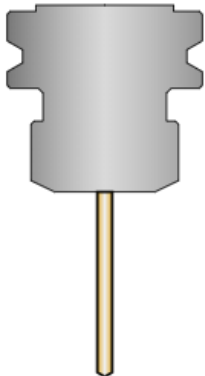
Tabela 166 - Folha de configuração da ferramenta responsável pelas primeiras três operações de torneamento para obter o pistão/êmbolo.

| Ferramentas: T2 D2                                     |                                               |                                                                                       |
|--------------------------------------------------------|-----------------------------------------------|---------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Ferramenta de torneamento                        | Posição máxima à esquerda do SCG: -48,13 [mm] | Suporte: ISO L Right                                                                  |
| Pastilha: ISO D 55°                                    | Avanço máximo: 400 [mm/min]                   |  |
| Raio de ponta: 0,8 [mm]                                | Aresta de corte da pastilha: 11,63 [mm]       |                                                                                       |
| Velocidade de rotação máxima da bucha: 5000 [rpm]      |                                               |                                                                                       |
| Secção transversal: T                                  | Distância de corte efetivo: 448,64 [mm]       |                                                                                       |
| Tolerância: M                                          | Distância de movimento em vazio: 551,88 [mm]  |                                                                                       |
| Ângulo de incidência da pastilha: N 0°                 | Compensação: <i>Tip tangent</i>               |                                                                                       |
| Orientação da ferramenta no torno: Radial              |                                               |                                                                                       |
| Tempo estimado do ciclo: 8 [min]: 40 [s] (46,30 + 20%) |                                               |                                                                                       |
| Operação 1/6                                           |                                               |                                                                                       |
| Descrição: Torneamento/Facejamento                     | Tolerância: 0,01 [mm]                         |                                                                                       |
| Estratégia: Remoção de material do topo da peça        | Posição máxima à direita do SCG: 7 [mm]       |                                                                                       |
| Posição máxima à esquerda do SCG: 0 [mm]               | Velocidade de corte: 60 [m/min]               |                                                                                       |
| Avanço por rotação: 0,08 [mm]                          | Distância de corte efetivo: 29,39 [mm]        |                                                                                       |
| Tempo estimado do ciclo: 0 [min]: 30 [s] (2,60 + 20%)  | Distância de movimento em vazio: 56,56 [mm]   |                                                                                       |

| <b>Operação 2/6</b>                                    |                                              |
|--------------------------------------------------------|----------------------------------------------|
| Descrição: Desbaste de perfil lateral                  | Tolerância: 0,01 [mm]                        |
| Profundidade máxima de corte por passagem: 1,20 [mm]   | Posição máxima à direita do SCG: 7 [mm]      |
| Posição máxima à esquerda do SCG: - 46,20 [mm]         | Velocidade de corte: 60 [m/min]              |
| Avanço por rotação: 0,08 [mm]                          | Distância de corte efetivo: 347,03 [mm]      |
| Tempo estimado do ciclo: 6 [min]: 50 [s] (36,50 + 20%) | Distância de movimento em vazio: 385,51 [mm] |
| <b>Operação 3/6</b>                                    |                                              |
| Descrição: Acabamento                                  | Tolerância: 0,01 [mm]                        |
| Profundidade máxima de corte por passagem: 1,20 [mm]   | Posição máxima à direita do SCG: 7 [mm]      |
| Posição máxima à esquerda do SCG: - 48,13 [mm]         | Velocidade de corte: 60 [m/min]              |
| Avanço por rotação: 0,08 [mm]                          | Distância de corte efetivo: 72,23 [mm]       |
| Tempo estimado do ciclo: 1 [min]:20 [s] (7,20 + 20%)   | Distância de movimento em vazio: 109,82 [mm] |

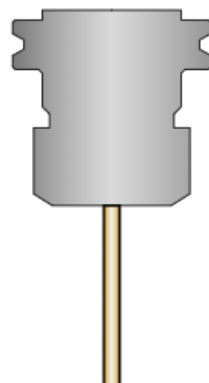
A Tabela 167 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo. A furação do tipo “pica-pau” é aconselhável para furos de elevada profundidade, cuja dimensão dificulta a eliminação da rebarba e a capacidade de a ferramenta escoar o material em excesso. De acordo com os princípios deste tipo de furação, o avanço máximo considerado corresponde a uma pequena percentagem do aconselhado para operações de fresagem. A ferramenta vai entrar e sair do furo de forma cíclica a uma velocidade superior à de corte, daí a distância percorrida em movimento rápido ser superior à distância de corte efetiva. A ferramenta vai penetrar o pistão 2 mm e recuar à posição mais recuada, de forma cíclica.

Tabela 167 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quarta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo.

| Ferramentas: T14 D14 L14                              |                                                        |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Furação “Pica-pau”                              | Posição máxima à esquerda do SCG: - 47,44 [mm]         | Suporte: Maritool BT40 - B4C3 - 0032                                                 |
| Diâmetro: 4,80 [mm]                                   | Ângulo de ponta: 118 [°]                               |  |
| Avanço máximo da ferramenta: 101,86 [mm/min]          | Velocidade máxima de rotação da ferramenta: 2546 [rpm] |                                                                                      |
| Comprimento: 60 [mm]                                  | Distância de corte efetiva: 57,32 [mm]                 |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 2                                    | Distância de movimento em vazio: 2331,57 [mm]          |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): broca 5 [mm] (Dormer)         |                                                        |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 1 [min]: 02 [s] (5,50 + 20%) |                                                        |                                                                                      |
| Operação 4/6                                          |                                                        |                                                                                      |
| Descrição: Furação                                    | Tolerância: 0,01 [mm]                                  |                                                                                      |
| Estratégia: Furação “Pica-pau”                        | Posição máxima à direita do SCG: 16 [mm]               |                                                                                      |

A Tabela 168 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela quinta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo. A operação de mandrilagem implica que a ferramenta entre e saia da peça com a mesma velocidade, para garantir os parâmetros de maquinagem. Atualmente, estão disponíveis no mercado brocas-mandril que permitiriam obter o furo maquinado pretendido, no entanto, implicariam a existência de um sistema de refrigeração interna da peça.

Tabela 168 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela quinta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo.

| Ferramentas: T12 D12 L12                              |                                                        |                                                                                      |
|-------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Mandril                                         | Posição máxima à esquerda do SCG: - 45 [mm]            | Suporte: Maritool CAT40-ER32-2.35                                                    |
| Diâmetro: 5 [mm]                                      | Velocidade máxima de rotação da ferramenta: 3183 [rpm] |  |
| Avanço máximo da ferramenta: 254,65 [mm/min]          |                                                        |                                                                                      |
| Comprimento: 58 [mm]                                  | Distância de corte efetiva: 100 [mm]                   |                                                                                      |
| Nº de cortantes: 5                                    | Distância de movimento em vazio: 22 [mm]               |                                                                                      |
| Descrição (Fornecedor): CAT40-ER32-2.35 (Maritool)    |                                                        |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 0 [min]: 24 [s] (2,10 + 20%) |                                                        |                                                                                      |
| Operação 5/6                                          |                                                        |                                                                                      |
| Descrição: Mandrilagem                                |                                                        | Tolerância: 0,01 [mm]                                                                |
| Estratégia: Mandrilagem                               |                                                        | Posição máxima à direita do SCG: 16 [mm]                                             |

A Tabela 169 ilustra a folha de configuração da ferramenta responsável pela sexta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo. A compensação *tip tangent* implica que a máquina vai considerar o ponto de interseção das tangentes da ponta da ferramenta como referência para operar. A operação de sangramento é caracterizada por garantir o avanço e o recuo da ferramenta a uma velocidade de rotação constante. É de notar que o *software* estimou o tempo de ciclo desta operação considerando o tempo despendido entre operações de avanço e recuo da ferramenta, ou seja, não seria incorreto dividir o tempo de ciclo obtido por dois. Independentemente das características da operação de sangramento enunciadas, na fase final da presente etapa e antes de atingir o final do furo maquinado, a velocidade de rotação da ferramenta deve baixar para as 300 rpm. Uma vez que é uma operação minuciosa e a máquina utiliza a largura total do pistão, é de ter em conta a vibração exagerada do conjunto na fase final de passagem da ferramenta, tornando-se necessária a redução do avanço por rotação e da velocidade de corte, consequentemente.

Tabela 169 - Folha de configuração da ferramenta responsável pela sexta operação de torneamento para obter o pistão/êmbolo.

| Ferramentas: T7 D7                                     |                                             |                                                                                      |
|--------------------------------------------------------|---------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------|
| Tipo: Sangramento                                      | Posição máxima à esquerda do SCG: - 47 [mm] |  |
| Pastilha: Quadrada                                     | Largura: 2 [mm]                             |                                                                                      |
| Avanço máximo da ferramenta: 100 [mm/min]              |                                             |                                                                                      |
| Raio de canto: 0,1 [mm]                                | Distância de corte efetiva: 62,20 [mm]      |                                                                                      |
| Compensação: <i>Tip tangent</i>                        | Distância de movimento em vazio: 108 [mm]   |                                                                                      |
| Velocidade máxima de rotação da ferramenta: 5000 [rpm] |                                             |                                                                                      |
| Orientação da ferramenta no torno: Radial              |                                             |                                                                                      |
| Tempo estimado do ciclo: 7 [min]: 37 [s] (40,70 + 20%) |                                             |                                                                                      |
| Operação 6/6                                           |                                             |                                                                                      |
| Descrição: Sangramento                                 | Tolerância: 0,01 [mm]                       |                                                                                      |
| Posição máxima à esquerda do SCG: - 47 [mm]            | Posição máxima à direita do SCG: 7 [mm]     |                                                                                      |
| Distância de corte efetiva: 62,20 [mm]                 | Velocidade de corte: 40 [m/min]             |                                                                                      |
| Avanço por rotação: 0,02 [mm]                          | Distância de movimento em vazio: 108 [mm]   |                                                                                      |

O custo total do molde para hidroformagem, considerando o tempo estimado dos ciclos majorado e de preparação das máquinas, é igual a 429,32 euros.

## 7.7. APÊNDICE G

O APÊNDICE G resume a informação relativa à obtenção dos custos de fabrico de todas as geometrias consideradas relevantes e analisadas numericamente, e o aumento/diminuição percentual do custo de produção da ordem de fabrico em função dos diferentes parâmetros geométricos considerados, relativamente à geometria de base. A presente análise não contempla a influência da variação da resistência mecânica e ductilidade, apenas se centra na obtenção dos custos. As células de tom esverdeado correspondem ao resultado obtido para a geometria de base (Subcapítulo 3.4.1). As células de tom azulado e sem tom atribuído representam o aumento e a diminuição percentual dos custos, respetivamente, relativamente à geometria de base.

O principal objetivo do Subcapítulo 3.5.2 consiste em interligar os diferentes temas abordados ao longo do trabalho, e obter conclusões significativas a partir dos resultados numéricos, da escolha dos fatores e níveis de controlo mais significativos do ponto de vista estatístico e de acordo com o MT, sem esquecer a influência dos custos de fabrico da série de produção estipulada.

### Variação de $d_{EANH}$

A Tabela 170 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $d_{EANH}$ . O nível de controlo correspondente a  $d_{EANH}=5$  mm não foi considerado na presente análise, muito por conta do elevado investimento requerido para obter a geometria circular oca, uma vez que esta geometria de tubo não se encontra disponível no mercado.

Tabela 170 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $d_{EANH}$ .

| Adesivo         | $d_{EANH}$ [mm]         |         |         |
|-----------------|-------------------------|---------|---------|
|                 | 10                      | 15      | 20      |
|                 | Preço/5000 unidades [€] |         |         |
| Araldite® AV138 | 3739,32                 | 5659,32 | 7574,32 |
| Araldite® 2015  | 3709,32                 | 5614,32 | 7519,32 |
| Sikaforce® 7752 | 3719,32                 | 5629,32 | 7539,32 |

A Tabela 171 ilustra a diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 171 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $d_{EANH}$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $d_{EANH}$ [mm]         |       |      |
|-----------------|-------------------------|-------|------|
|                 | 10                      | 15    | 20   |
|                 | Preço/5000 unidades [€] |       |      |
| Araldite® AV138 | 50,63                   | 25,28 | -    |
| Araldite® 2015  | 51,03                   | 25,88 | 0,73 |
| Sikaforce® 7752 | 50,90                   | 25,68 | 0,46 |

Relativamente ao fator  $d_{EANH}$ , a geometria de junta que apresenta a maior diminuição percentual do custo de produção da série, relativamente à geometria de base, utiliza o adesivo Araldite® 2015 e apresenta um valor de  $d_{EANH}=10$  mm.

#### Variação de $L_0$

A Tabela 172 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_0$ . Não foi considerado o nível de controlo  $L_0=5$  mm, pelo facto de se terem registado os piores valores ao nível da resistência mecânica e ductilidade da junta, de acordo com os resultados numéricos apresentados ao longo do Subcapítulo 3.4.

Tabela 172 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_0$ .

| Adesivo         | $L_0$ [mm]              |         |         |
|-----------------|-------------------------|---------|---------|
|                 | 10                      | 15      | 20      |
|                 | Preço/5000 unidades [€] |         |         |
| Araldite® AV138 | 7574,32                 | 8114,32 | 8654,32 |
| Araldite® 2015  | 7519,32                 | 8034,32 | 8544,32 |
| Sikaforce® 7752 | 7539,32                 | 8059,32 | 8584,32 |

A Tabela 173 ilustra o aumento/diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_0$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 173 - Aumento/diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_0$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $L_0$ [mm]              |      |       |
|-----------------|-------------------------|------|-------|
|                 | 10                      | 15   | 20    |
|                 | Preço/5000 unidades [€] |      |       |
| Araldite® AV138 | -                       | 7,13 | 14,26 |
| Araldite® 2015  | 0,73                    | 6,07 | 12,81 |
| Sikaforce® 7752 | 0,46                    | 6,40 | 13,33 |

Relativamente a  $L_0$ , a geometria de junta que apresenta a maior diminuição percentual do custo de produção da série, relativamente à geometria de base, utiliza o adesivo Araldite® 2015 e um valor de  $L_0=10$  mm.

#### Variação de $t_{Ad}$

A Tabela 174 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $t_{Ad}$ . É de notar que não foi considerado o nível de controlo cujo valor de  $t_{Ad}=4$  mm, por implicar um investimento supérfluo em matéria-prima, que não se traduz no aumento da resistência e ductilidade de forma expressiva, já que a rotura se mantém coesiva no adesivo e a partir de um determinado valor, nos adesivos mais dúcteis, apresenta um valor de  $PA$  nulo ou mínimo.

Tabela 174 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $t_{Ad}$ .

| Adesivo         | $t_{Ad}$ [mm]           |         |          |
|-----------------|-------------------------|---------|----------|
|                 | 1                       | 2       | 3        |
|                 | Preço/5000 unidades [€] |         |          |
| Araldite® AV138 | 4194,32                 | 7574,32 | 10744,32 |
| Araldite® 2015  | 4139,32                 | 7519,32 | 10689,32 |
| Sikaforce® 7752 | 4159,32                 | 7539,32 | 10709,32 |

A Tabela 175 ilustra o aumento/diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $t_{Ad}$ , relativamente à geometria de base.

Tabela 175 - Aumento/diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $t_{Ad}$ , relativamente à geometria de base.

| Adesivo         | $t_{Ad}$ [mm]           |      |       |
|-----------------|-------------------------|------|-------|
|                 | 1                       | 2    | 3     |
|                 | Preço/5000 unidades [€] |      |       |
| Araldite® AV138 | 44,62                   | -    | 41,85 |
| Araldite® 2015  | 45,35                   | 0,73 | 41,13 |
| Sikaforce® 7752 | 45,09                   | 0,46 | 41,39 |

Relativamente ao fator  $t_{Ad}$ , a geometria de junta que apresenta a maior diminuição percentual do custo de produção da série, relativamente à geometria de base, utiliza o adesivo Araldite® 2015 e apresenta um valor de  $t_{Ad}=1$  mm.

### Variação de $\theta$

Quanto ao efeito da variação do fator geométrico  $\theta$  e respetivos níveis de controlo, estes não foram incluídos na presente análise de mercado por não provocarem alterações significativas na resistência e ductilidade da junta, quando comparados com a geometria de base.

### Variação de $\gamma$

A Tabela 176 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 176 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138.

| $\gamma$ [°]            |         |         |         |         |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 15                      | 30      | 45      | 60      | 90      |
| Preço/5000 unidades [€] |         |         |         |         |
| 8279,32                 | 8224,32 | 8204,32 | 8194,32 | 7574,32 |

A Tabela 177 ilustra o aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138, relativamente à geometria de base.

Tabela 177 - Aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $\gamma$ , para o adesivo Araldite® AV138, relativamente à geometria de base.

| $\gamma [^\circ]$       |      |      |      |    |
|-------------------------|------|------|------|----|
| 15                      | 30   | 45   | 60   | 90 |
| Preço/5000 unidades [€] |      |      |      |    |
| 9,31                    | 8,58 | 8,32 | 8,19 | -  |

Relativamente a  $\gamma$ , a geometria de junta que apresenta o menor custo de produção da série coincide com a geometria de base.

### **Variação de $\beta$**

A Tabela 178 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 178 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138.

| $\beta [^\circ]$        |         |         |         |         |
|-------------------------|---------|---------|---------|---------|
| 15                      | 30      | 45      | 60      | 90      |
| Preço/5000 unidades [€] |         |         |         |         |
| 6949,32                 | 7284,32 | 7409,32 | 7479,32 | 7574,32 |

A Tabela 179 ilustra a diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138, relativamente à geometria de base.

Tabela 179 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $\beta$ , para o adesivo Araldite® AV138, relativamente à geometria de base.

| $\beta [^\circ]$        |      |      |      |    |
|-------------------------|------|------|------|----|
| 15                      | 30   | 45   | 60   | 90 |
| Preço/5000 unidades [€] |      |      |      |    |
| 8,25                    | 3,83 | 2,18 | 1,25 | -  |

Relativamente à variação do fator  $\beta$ , a geometria de junta que apresenta a maior diminuição percentual do custo de produção da série, relativamente à geometria de base, apresenta um valor de  $\beta=15^\circ$ .

### Juntas tubulares bi-adesivas - Araldite® AV138 e Araldite® 2015

A Tabela 180 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

Tabela 180 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 0% $L_0$                | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| 7574,32                 | 7564,32   | 7549,32   | 7534,32   |

A Tabela 181 ilustra a diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

Tabela 181 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, relativamente à geometria de base.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 0% $L_0$                | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| -                       | 0,13      | 0,33      | 0,53      |

Relativamente ao fator  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, a geometria de junta que apresenta a maior diminuição percentual do custo de produção da série, relativamente à geometria de base, apresenta um valor de  $L_1=75\% L_0$ .

### Juntas tubulares bi-adesivas - Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752

A Tabela 182 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

Tabela 182 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 0% $L_0$                | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| 7574,32                 | 7569,32   | 7559,32   | 7549,32   |

A Tabela 183 ilustra a diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base.

Tabela 183 - Diminuição percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, relativamente à geometria de base.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| 0% $L_0$                | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| -                       | 0,07      | 0,20      | 0,33      |

Relativamente a  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, a geometria de junta que apresenta a maior diminuição percentual do custo de produção da série, relativamente à geometria de base, apresenta um valor de  $L_1=75\% L_0$ .

#### Juntas tubulares bi-adesivas - Araldite® AV138 e Araldite® 2015 - Aderente não hidroformado de PRFC

A Tabela 184 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 184 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Geometria base          | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| 7574,32                 | 19019,32  | 19004,32  | 18989,32  |

A Tabela 185 ilustra o aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 185 - Aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Geometria base          | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| -                       | 151,10    | 150,90    | 150,71    |

Relativamente ao do fator  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Araldite® 2015, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, a junta adesiva que apresenta o menor custo de produção da série é a geometria de base.

### Juntas tubulares bi-adesivas - Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 - Aderente não hidroformado de PRFC

A Tabela 186 resume os custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

Tabela 186 - Custos associados à produção de uma série de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Geometria base          | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| 7574,32                 | 19024,32  | 19014,32  | 19004,32  |

A Tabela 187 ilustra o aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

Tabela 187 - Aumento percentual do custo de produção de 5000 juntas adesivas em função de  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, relativamente à geometria de base.

| $L_1$ [mm]              |           |           |           |
|-------------------------|-----------|-----------|-----------|
| Geometria base          | 25% $L_0$ | 50% $L_0$ | 75% $L_0$ |
| Preço/5000 unidades [€] |           |           |           |
| -                       | 151,17    | 151,04    | 150,90    |

Relativamente a  $L_1$ , para as juntas tubulares bi-adesivas à base de Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, cujo aderente não hidroformado é de PRFC, a junta adesiva que apresenta o menor custo de produção da série é a geometria de referência.