

# ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

João Osvaldo de Sousa e Silva

1110544

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# **ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO**

João Osvaldo de Sousa e Silva

1110544

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

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Manuel Jorge Dores de Castro

Professor Adjunto, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Arguente**

Hugo Queirós de Faria

Professor Adjunto, UA



## AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu sincero agradecimento ao Excelentíssimo Senhor Professor Doutor Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo privilégio que me concedeu em ser meu orientador de dissertação, por todo o apoio, compreensão e disponibilidade prestada ao longo da realização deste trabalho, sem os quais não seria possível a sua realização.

Igualmente dedico especial agradecimento ao Excelentíssimo Engenheiro Victor pela ajuda prestada na execução dos provetes de ensaio nas instalações do Laboratório Tecnologia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, e em especial a todos os Docentes do Departamento de Engenharia Mecânica, com quem durante estes cinco anos de formação tive o privilégio de trabalhar, o meu muito obrigado.

Aos meus amigos e colegas de Mestrado, dirijo-lhes um cumprimento muito especial.

Finalmente, o meu maior agradecimento presto à pessoa mais importante da minha vida e a quem dedico este trabalho: à Minha Mãe, por todos os esforços e sacrifícios em prol da minha formação.



## PALAVRAS CHAVE

Método de Elementos Finitos, modelos de dano coesivo, mecânica da fratura, adesivo estrutural, juntas adesivas, junta em degrau, ensaios mecânicos.

## RESUMO

As ligações adesivas são atualmente a técnica de união que mais se tem generalizado em diversos sectores industriais como automóvel, aeroespacial, construção civil, mobiliário e aeronáutico, entre outros. De facto, a utilização de adesivos estruturais em construções mecânicas tem verificado um enorme crescimento, pois esta técnica tem vindo a substituir os métodos de ligação convencionais tais como brasagem, rebtagem, ligações aparafusadas e soldadura. A utilização de adesivos estruturais é um processo especialmente adequado na obtenção de estruturas leves, devido a um conjunto interessante de atributos, que vem solucionando as necessidades até então existentes em termos de processos produtivos, fazendo com que esta técnica seja cada vez mais competitiva. Hoje em dia existem vários tipos de configurações de junta disponíveis, sendo que as mais comuns são as de sobreposição simples, sobreposição dupla e de chanfro. As juntas em degrau são um tipo de geometria particular que tem vindo a ser alvo de estudo nomeadamente no que se refere à distribuição de tensões que se desenvolvem na camada adesiva. Contudo, as características deste tipo de configuração ainda não são totalmente conhecidas.

O trabalho experimental e numérico realizado tem como objetivo avaliar o desempenho à tração de juntas adesivas em degrau, em função do tipo de adesivo utilizado. Para o efeito foram testados três tipos de adesivos, o adesivo frágil Araldite® AV138, o adesivo moderadamente dúctil Araldite® 2015 e o adesivo dúctil Sikaforce® 7752. Igualmente, foi considerada a variação do valor do comprimento de sobreposição ( $L_0$ ) da junta para posterior análise da sua influência na resistência. No âmbito do trabalho numérico desenvolvido, foram executas análises pelo método de elementos finitos (MEF) convencional na obtenção da distribuição de tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e de corte ( $\tau_{xy}$ ) que se desenvolvem na camada adesiva. Com recurso a modelos de dano coesivo (MDC) foi realizado o estudo dos modos de rotura e da evolução da variável de dano durante o processo de dano. Foi também alvo de análise a capacidade dos MDC na realização de previsão da resistência da junta. Com o estudo desenvolvido, verifica-se que o tipo de adesivo desempenha um papel fundamental no que diz respeito à capacidade de carga ( $P_{máx}$ ) da junta, sendo que o adesivo frágil mostra melhor desempenho para menores valores de  $L_0$ , enquanto os adesivos dúcteis obtêm melhores resultados para maiores valores de  $L_0$ . Pela análise dos valores numéricos obtidos com recurso aos MDC constatou-se que estes revelam uma boa capacidade na determinação do comportamento das juntas.



## KEYWORDS

Finite Element Method, cohesive zone models, fracture mechanics, structural adhesive, adhesive joints, stepped-lap joint, mechanical tests.

## ABSTRACT

Adhesive bonding is currently one of the most widespread joining techniques in several industrial fields such as automotive, aerospace, construction, furniture, aeronautics and sports equipment, among others. In fact, the use of adhesive bonds in mechanical structures has been growing, and replacing conventional bonding methods such as brazing, riveting, fastening and welding. Adhesive bonding is indeed a suitable process in lightweight construction, due to an interesting set of advantages, which can solve the needs of industrial processes, making this joining technique competitive in current days. Several joint configurations are available for the designer, and the most common are single-lap, double-lap and scarf joints. The stepped-lap joint is a particular joint design, which has been subjected to some investigations on the stress distributions that develop in adhesive layer. However, the characteristics of this joint configuration are not yet fully known.

The present work experimentally and numerically evaluates the tensile strength of stepped-lap joints bonded with three adhesives, the brittle Araldite® AV138, the moderately ductile Araldite® 2015 and the ductile Sikaforce® 7752, considering varying values of overlap length ( $L_0$ ). A conventional Finite Element Method (FEM) analysis was undertaken to compare through-thickness normal ( $\sigma_y$ ) and shear ( $\tau_{xy}$ ) stresses in the adhesive layer between joint configurations. Additionally, a Cohesive Zone Model (CZM) analysis was considered to study the failure modes and the CZM damage variable during failure, and to evaluate the CZM technique's capability in predicting the joint strength. It was shown that the type of adhesive has a high influence on the maximum load ( $P_{m\acute{a}x}$ ) predictions, with brittle adhesives showing a better behaviour for smaller  $L_0$  values and ductile adhesives with a higher performance for bigger values of  $L_0$ . The CZM analysis revealed good predictive capabilities and enabled a full understanding of the joints' behaviour.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cr	Crómio
CTCM	Critério de tensão de corte máxima
CTNM	Critério da tensão normal máxima
Cu	Cobre
CZM	<i>Cohesive zone model</i>
DCB	<i>Double-cantilever beam</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EN	<i>Euro Norm</i>
ENF	<i>End-notched flexure</i>
Fe	Ferro
FEM	<i>Finite element method</i>
JSD	Junta sobreposição dupla
JSS	Junta sobreposição simples
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos

---

MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
pH	Potencial hidrogeniônico
PRF	Plástico reforçado com fibras
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de vinila
Si	Silício
TAST	<i>Thick-adherend shear test</i>
TFFV	Técnica do fecho fenda da virtual
Ti	Titânio
Zn	Zinco

---

---

 Lista de Símbolos
 

---

$E$ (Pa)	Módulo de Young
$G$ (Pa)	Módulo de elasticidade transversal
$G_{IC}$ (N/mm)	Tenacidade à tração
$G_{IIC}$ (N/mm)	Tenacidade ao corte
$L_0$ (mm)	Comprimento de sobreposição
$L_T$ (mm)	Comprimento total provete
$N$	Número de degraus
$P$ (N)	Força resistente da junta
$P_{máx}$ (N)	Força máxima resistente da junta
$S$ (mm)	Parâmetro de cota de maquinagem
$t_A$ (mm)	Espessura de adesivo da porção longitudinal ao carregamento
$t_{A1}$ (mm)	Espessura de adesivo da porção transversal ao carregamento
$t_n^0$ (Pa)	Resistência coesiva à tração
$t_p$ (mm)	Espessura do substrato
$t_s^0$ (Pa)	Resistência coesiva ao corte
$x$ (mm)	Distância desde a extremidade esquerda do adesivo
$x/L_0$	Distância normalizada ao longo do comprimento de sobreposição do adesivo
$\gamma_f$ (%)	Deformação de rotura ao corte
$\delta$ (mm)	Deslocamento associado à solicitação de tração da junta
$\delta_{máx}$ (mm)	Deslocamento associado à força máxima resistente da junta

---

---

$\delta_n^0$ (mm)	Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração
$\delta_s^0$ (mm)	Deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte
$\varepsilon_f$ (%)	Deformação da rotura à tração
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_e$ (Pa)	Tensão de cedência à tração
$\sigma_f$ (Pa)	Tensão de rotura à tração
$\sigma_y$ (Pa)	Tensão normal segundo a espessura ou de arrancamento
$\sigma_y/\tau_{méd}$ (Pa)	Tensão de arrancamento normalizada para as juntas em degrau
$\tau_f$ (Pa)	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{xy}$ (Pa)	Tensão de corte
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ (Pa)	Tensão de corte normalizada para as juntas em degrau
$\tau_y$ (Pa)	Tensão de cedência ao corte

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Geometria e respetivos parâmetros dimensionais da junta em degrau. ....	2
Figura 2 – Exemplo de aplicação das <i>dismantlable adhesive joints</i> na indústria do calçado [5]. ....	8
Figura 3 – Ilustração dos conceitos de adesão e coesão numa junta adesiva [8]. ....	9
Figura 4 – Representação esquemática das regiões típicas de uma junta adesiva [2]. ....	9
Figura 5 – Distribuição de tensões de ligações soldadas, rebitadas e coladas [9]. ....	11
Figura 6 – Esquema genérico de aplicação de ligações adesivas na construção da estrutura de um avião comercial [10]. ....	12
Figura 7 – Aplicação de juntas adesivas nos painéis da fuselagem do reator [10]. ....	13
Figura 8 – Pormenores da construção do chassi do Jaguar® F-Type com recurso adesivos estruturais [11]. ....	14
Figura 9 – Construção do Lotus® EVORA com recurso a robot industrial na aplicação de adesivo [12]. ...	15
Figura 10 – Reparação do monocoque do Lamborghini® Aventador com recurso a <i>patches</i> de adesivo em filme nas áreas fragilizadas após cura em autoclave [13]. ....	16
Figura 11 – Placa circuito integrado [4]. ....	17
Figura 12 – Esquema típico de um <i>microchip</i> produzido com recurso a adesivos [10]. ....	17
Figura 13 – Exemplos típicos de aplicação de adesivos estruturais na construção de embarcações [14].	18
Figura 14 – Pormenor da solução construtiva do caixilho de uma janela, com aplicação de adesivos na colagem dos elementos que a integram [15]. ....	18
Figura 15 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforço de tração [16]. ....	19
Figura 16 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de compressão [16]. ....	20
Figura 17 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de corte [16]. ....	20
Figura 18 – Resistência ao corte vs. comprimento e largura de sobreposição [9]. ....	21
Figura 19 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de clivagem [9]. ....	21
Figura 20 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de arrancamento [9]. ....	22
Figura 21 – Esquema ilustrativo da rotura coesiva [2]. ....	23
Figura 22 – Esquema ilustrativo da rotura adesiva [2]. ....	23
Figura 23 – Esquema ilustrativo da rotura mista [2]. ....	24
Figura 24 – Esquema ilustrativo da rotura do aderente [2]. ....	24
Figura 25 – Efeito da rigidez do adesivo na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição [22]. ....	25
Figura 26 – Distribuição de tensões em função espessura adesivo [22]. ....	26
Figura 27 – Esquema ilustrativo dos esforços de clivagem e arrancamento [1]. ....	27
Figura 28 – Classificação dos adesivos tendo em conta o seu desempenho (adaptado de[2]). ....	30
Figura 29 – Esquema representativo de uma junta com um filete de adesivo [3]. ....	38
Figura 30 – Distribuição de tensões locais junto das extremidades de sobreposição com inclusão de filete de adesivo [53]. ....	39

Figura 31 – Esquema representativo de uma junta de chanfro interior [9].	39
Figura 32 – Distribuição da tensão de corte em junta de chanfro exterior vs. JSS [56].	40
Figura 33 – Combinação de adesivos com diferente módulo de elasticidade longitudinal [2].	40
Figura 34 – Gradação de propriedades dos aderentes numa JSS [61].	41
Figura 35 – Esquema do modelo implementado nos cálculos EF [62].	42
Figura 36 – Distribuição de cada componente de tensão: (a) interface adesiva transversal ao carregamento; (b) interface adesiva de longitudinal ao carregamento [62].	44
Figura 37 – Distribuição da tensão principal máxima normalizada nas interfaces transversais ao carregamento superior, inferior e plano médio do adesivo [62].	45
Figura 38 – Efeito da espessura de adesivo $t_1$ na máxima tensão principal normalizada $\sigma_1/\sigma_0$ : (a) na interface adesiva transversal ao carregamento superior; (b) perto da face ( $x/w=0$ ) [62].	45
Figura 39 – Efeito do número de degraus $N$ na máxima tensão principal normalizada $\sigma_1/\sigma_0$ : (a) na interface de adesivo transversal ao carregamento; (b) perto da extremidade ( $x/W=0$ ) [62].	46
Figura 40 – Distribuição da máxima tensão principal junto da extremidade da interface transversal ao carregamento [62].	47
Figura 41 – Comparação das deformações experimentais vs. numéricas obtidas por EF [62].	48
Figura 42 – Parâmetros geométricos das juntas adesivas: (a) JSS (Type-I), (b) junta de 1 degrau (Type-II), (c) junta de 3 degraus (Type-III) [63].	49
Figura 43 – Média das tensões máximas de rotura das juntas adesivas obtidas experimentalmente [63].	50
Figura 44 – Relação entre a força de rotura e deslocamento para as diversas geometrias obtidas experimentalmente: (a) para provetes colados com adesivo SBT9244, (b) para provetes colados com adesivo DP460 [63].	50
Figura 45 – Comparação de resultados numéricos e experimentais das cargas de rotura das juntas [63].	51
Figura 46 – Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo SBT9244: (a) tensão de arrancamento ( $\sigma_y$ ), (b) tensão de corte ( $\tau_{xy}$ ) [63].	52
Figura 47 – Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo DP460: (a) tensão de arrancamento ( $\sigma_y$ ), (b) tensão de corte ( $\tau_{xy}$ ) [63].	52
Figura 48 – Estratégias de configuração de junta para evitar esforço: (a) arrancamento e (b) clivagem [1].	54
Figura 49 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ da liga de alumínio AW 6082-T651 [65].	58
Figura 50 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [67].	59
Figura 51 – Adesivo Araldite® AV138 [64].	59
Figura 52 – Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml [64].	60
Figura 53 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [67].	61
Figura 54 – Adesivo Sikaforce® 7752 [64].	62
Figura 55 – Curvas $\sigma$ - $\varepsilon$ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [69].	62
Figura 56 – Esquema representativo da geometria de junta em degrau e respetivas condições fronteira.	63
Figura 57 – Serrote de disco.	65

Figura 58 – Pormenor do <i>setup</i> de corte.....	66
Figura 59 – Fresadora Gambin <sup>SA</sup> modelo 1m. ....	67
Figura 60 – <i>Setup</i> realizado para operação de maquinação dos degraus.....	68
Figura 61 – Pormenor do <i>setup</i> de maquinação, onde se observa o posicionamento de calços na parte inferior substrato.....	68
Figura 62 – Esquema de cotagem para efeito de maquinação.....	69
Figura 63 – Pormenor da operação de lixagem da superfície do substrato.....	70
Figura 64 – Aspeto da superfície dos substratos após tratamento superficial.....	70
Figura 65 – Pormenor de aplicação adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015.....	71
Figura 66 – Aspeto da junta após a sua montagem.....	72
Figura 67 – Remoção dos excessos de adesivos mais salientes.....	73
Figura 68 – Acabamento final dos provetes com mó abrasiva.....	74
Figura 69 – Aspeto de um provete pronto a ensaiar.....	74
Figura 70 – Máquina Shimadzu – Autograph AG-X.....	75
Figura 71 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 e $L_0=12,5$ mm.....	76
Figura 72 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 e $L_0=25$ mm.....	76
Figura 73 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 e $L_0=37,5$ mm.....	77
Figura 74 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 e $L_0=50$ mm.....	77
Figura 75 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 e $L_0=12,5$ mm.....	78
Figura 76 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 e $L_0=25$ mm.....	79
Figura 77 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 e $L_0=37,5$ mm.....	79
Figura 78 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 e $L_0=50$ mm.....	80
Figura 79 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7752 e $L_0=12,5$ mm.....	81
Figura 80 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7752 e $L_0=25$ mm.....	81
Figura 81 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7752 e $L_0=37,5$ mm.....	82
Figura 82 – Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7752 e $L_0=50$ mm.....	82
Figura 83 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 e $L_0=12,5$ mm.....	83
Figura 84 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 e $L_0=25$ mm.....	83
Figura 85 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 e $L_0=37,5$ mm.....	84

Figura 86 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm.....	84
Figura 87 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm. ....	85
Figura 88 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm. ....	85
Figura 89 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm. ....	85
Figura 90 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm. ....	86
Figura 91 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm. ....	86
Figura 92 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm. ....	87
Figura 93 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm. ....	87
Figura 94 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm. ....	87
Figura 95 – Valores experimentais de $P_{máx}$ das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em função do valor de $L_0$ . ....	88
Figura 96 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à criação da geometria da junta no módulo <i>Part</i> . 91	91
Figura 97 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® com pormenor de cotagem da zona de colagem da junta. ..	91
Figura 98 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente às configurações do material dos aderentes: (a) <i>toolbox</i> das propriedades elásticas e (b) <i>toolbox</i> das propriedades plásticas.....	92
Figura 99 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente às configurações do material adesivo: (a; b e c) <i>toolbox</i> das propriedades de dano e sua evolução e (d) <i>toolbox</i> das propriedades elásticas.....	93
Figura 100 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à atribuição das propriedades dos aderentes às partições do modelo numérico.....	94
Figura 101 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à atribuição das propriedades do adesivo às partições do modelo numérico.....	94
Figura 102 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à definição da condição de encastramento da junta. ....	95
Figura 103 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à definição da condição de deslocamento da junta. ....	95
Figura 104 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à definição dos parâmetros de incrementação. .96	96
Figura 105 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à definição do elemento de malha dos aderentes. ....	96
Figura 106 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à definição do elemento de malha do adesivo. ..	97
Figura 107 – Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente à definição do <i>bias ratio</i> da junta. ....	97
Figura 108 – Pormenor do refinamento da malha imposto pelo <i>bias ratio</i> . ....	98
Figura 109 – Pormenor do aspeto da malha do modelo numérico.....	98
Figura 110 – Lei triangular do MDC [77].....	99
Figura 111 – Esquema representativo da normalização de $L_0$ da junta em degrau.....	103
Figura 112 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de $L_0$ . ....	104
Figura 113 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de $L_0$ . ....	104
Figura 114 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de $L_0$ . ....	105

Figura 115 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de $L_0$ .	106
Figura 116 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de $L_0$ .	106
Figura 117 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de $L_0$ .	107
Figura 118 – Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para o adesivo Araldite® AV138.	109
Figura 119 – Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para o adesivo Araldite® 2015.	110
Figura 120 – Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para o adesivo Sikaforce® 7752.	110
Figura 121 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.	112
Figura 122 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm.	112
Figura 123 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm.	113
Figura 124 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm.	113
Figura 125 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm.	114
Figura 126 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm.	114
Figura 127 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm.	115
Figura 128 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm.	115
Figura 129 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm.	116
Figura 130 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm.	116
Figura 131 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm.	117
Figura 132 – Evolução da variável de dano SDEG em função de $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm.	117
Figura 133 – Esquema referente à identificação e localização das regiões de rotura.	118
Figura 134 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm.	119
Figura 135 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm.	120

Figura 136 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ para juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm. ....	120
Figura 137 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ em juntas adesivas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm. ....	121
Figura 138 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm. ....	122
Figura 139 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm. ....	122
Figura 140 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=37,5$ mm. ....	123
Figura 141 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm. ....	123
Figura 142 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm. ....	124
Figura 143 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=25$ mm. ....	124
Figura 144 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm. ....	125
Figura 145 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=50$ mm. ....	125
Figura 146 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ mm. ....	126
Figura 147 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=25$ mm. ....	127
Figura 148 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=37,5$ mm. ....	127
Figura 149 – Curvas $P$ - $\delta$ experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm. ....	128
Figura 150 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 em função do valor de $L_0$ . ....	129
Figura 151 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com adesivo Araldite® 2015 em função do valor de $L_0$ . ....	129
Figura 152 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do valor de $L_0$ . ....	130
Figura 153 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para o Araldite® AV138: JSS, JSD e juntas em degrau. ....	131
Figura 154 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para o Araldite® 2015: JSS, JSD e juntas em degrau. ....	132
Figura 155 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para o Sikaforce® 7752: JSS, JSD e juntas em degrau. ....	133

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características das juntas adesivas [2, 9].	11
Tabela 2 – Tipos de juntas vs. vantagens/desvantagens [9].	27
Tabela 3 – Parâmetros mecânicos e geométricos definidos no estudo de Ichikawa et al. [62].	43
Tabela 4 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [64].	57
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651; dados do fabricante [64].	58
Tabela 6 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [67, 68].	60
Tabela 7 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [67].	61
Tabela 8 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [69].	63
Tabela 9 – Parâmetros usados na geometria de junta.	64
Tabela 10 – Comprimento de corte dos substratos.	65
Tabela 11 – Parâmetros de maquinagem (operação fresagem).	66
Tabela 12 – Parâmetro de cota de maquinagem dos degraus.	69
Tabela 13 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A$ de 0,2 mm [87].	101
Tabela 14 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com $t_A$ de 0,2 mm [88].	102
Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com $t_A=0,2$ mm [64].	102
Tabela 16 – Tabela resumo dos modos de rotura numéricos.	119



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização da dissertação</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Ligações adesivas</b>	<b>7</b>
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	12
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	19
2.1.4	Parâmetros que afetam o desempenho das juntas	24
2.1.5	Configurações possíveis de junta	27
2.1.6	Adesivos estruturais	29
2.1.7	Tipos de adesivos estruturais	30
<b>2.2</b>	<b>Previsão de resistência de juntas adesivas</b>	<b>33</b>
2.2.1	Modelos analíticos	34
2.2.2	Métodos numéricos	34
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	35
2.2.2.2	Mecânica da fratura	35
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	36
2.2.2.4	Mecânica do dano	37
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido	37
<b>2.3</b>	<b>Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência</b>	<b>38</b>
2.3.1	Filetes de adesivo	38
2.3.2	Chanfros interiores e exteriores	39

---

2.3.3	Utilização de dois adesivos.....	40
2.3.4	Gradação de propriedades dos aderentes .....	40
2.3.5	Utilização de degraus na zona de sobreposição.....	41
2.3.6	Outras alterações .....	53
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>57</b>
<b>3.1</b>	<b>Trabalho experimental .....</b>	<b>57</b>
3.1.1	Materiais utilizados .....	57
3.1.1.1	Substratos .....	57
3.1.1.2	Adesivos .....	58
3.1.1.2.1	Araldite® AV138.....	59
3.1.1.2.2	Araldite® 2015 .....	60
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752 .....	62
3.1.2	Geometria das juntas .....	63
3.1.3	Processo de fabrico .....	64
3.1.4	Ensaio das juntas .....	74
3.1.5	Resultados obtidos .....	75
3.1.5.1	Curvas P- $\delta$ .....	76
3.1.5.2	Modos de rotura .....	83
3.1.5.3	Resistência das juntas .....	88
<b>3.2</b>	<b>Trabalho numérico .....</b>	<b>90</b>
3.2.1	Condições da análise numérica .....	90
3.2.2	Modelo de dano coesivo .....	98
3.2.2.1	Modelo de dano triangular .....	98
3.2.2.2	Determinação das propriedades coesivas .....	100
3.2.2.2.1	Araldite® AV138.....	100
3.2.2.2.2	Araldite® 2015 .....	101
3.2.2.2.3	Sikaforce® 7752 .....	102
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	102
3.2.3.1	Tensões de arrancamento .....	103

---

---

3.2.3.2	Tensões de corte.....	105
3.2.3.3	Discussão de resultados.....	108
3.2.4	Estudo da variável de dano .....	108
3.2.4.1	Dano correspondente a $P_{máx}$ .....	109
3.2.4.2	Evolução do dano com o carregamento .....	111
3.2.5	Modos de rotura experimentais e numéricos.....	118
3.2.6	Previsão do comportamento.....	121
3.2.7	Comparação da resistência das juntas em degrau com juntas de sobreposição simples e dupla 130	
3.2.7.1	Araldite® AV138.....	131
3.2.7.2	Araldite® 2015 .....	131
3.2.7.3	Sikaforce® 7752 .....	132
4	CONCLUSÕES.....	137
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	141



# INTRODUÇÃO

**1.1 Contextualização**

**1.2 Objetivos**

**1.3 Organização da dissertação**



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Na conjuntura atual da engenharia de produção, novas técnicas e metodologias produtivas têm vindo a ser desenvolvidas e aperfeiçoadas, sendo que a utilização de juntas adesivas estruturais assume nos dias de hoje um lugar de destaque. O seu grande potencial e versatilidade levou a que esta rapidamente se proliferasse a outras indústrias, como é o caso da indústria automóvel, naval, energética, telecomunicações e construção.

As ligações adesivas oferecem um leque de vantagens interessantes quando comparadas com os métodos mais tradicionais como por exemplo: baixa adição de peso à estrutura, possibilidade de automatização, distribuição mais uniforme das tensões e amortecimento de vibrações [1]. Por outro lado, as ligações adesivas permitem realizar a ligação de diferentes materiais (i.e., união de substratos dissimilares, prescindindo da utilização de elementos mecânicos como por exemplo parafusos/rebites). Além do mais, trata-se de um processo produtivo substancialmente mais económico (uma vez que se prescinde de tratamentos de estabilização após produção, que ocorreriam com outros processos de ligação devido às tensões internas e/ou alteração da estrutura microscópica dos aderentes) [2]. De salientar que as ligações adesivas se revelam particularmente adequadas na obtenção de peças/estruturas de geometria complexa, que de outra forma não poderiam ser realizadas.

Porém, o processo de ligação com recurso a adesivos apresenta limitações. De referir que, na maior parte dos casos, não existe possibilidade de desmontagem, a junta apresenta fraca resistência ao arrancamento, a sua resistência é dependente do tipo de adesivo e pode haver necessidade de cura a elevadas temperaturas. No que diz respeito ao comportamento e desempenho das ligações adesivas, estas encontram-se condicionadas por diferentes variáveis tais como materiais utilizados na ligação (substrato e adesivo) e respetivas características mecânicas, pela preparação superficial dos substratos e condições de colagem e, não menos importante, pelo meio ambiente onde estas se encontram em serviço [2]. Outro fator que afeta o desempenho de uma ligação adesiva diz respeito ao tipo de geometria/configuração de junta, que deve ser atendido atempadamente no projeto da ligação de forma a evitar forças de arrancamento, e igualmente recorrer a geometrias que evitem tensões localizadas.

Atualmente, existe uma grande variedade de configurações de junta sendo as mais comuns juntas de sobreposição, cilíndricas, canto e em T [3].

Devido à crescente utilização e generalização das ligações adesivas torna-se essencial a existência de ferramentas que permitam o seu projeto/dimensionamento expedito, para análises prévias do seu comportamento e desempenho. O método de elementos finitos (EF), combinado com critérios ou modelos de dano mais ou menos complexos, revela-se hoje em dia uma ferramenta fundamental no campo das ligações adesivas. No âmbito das técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo (MDC) assumem grande importância, por combinar os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para previsão do desempenho da ligação.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação realizada no âmbito da unidade curricular DPEST consiste na realização do estudo experimental e numérico do comportamento de juntas adesivas com configuração geométrica em degrau (*stepped-lap joint*), caso particular das juntas de sobreposição [2], solicitadas à tração, com o intuito de se aferir propriedades e avaliar o desempenho de este tipo de solução construtiva.

O trabalho experimental realizado considerou diferentes condições geométricas, ou seja, o estudo consistiu na avaliação do desempenho da geometria em degrau considerando os seguintes parâmetros geométricos identificados na Figura 1:

- Número de degraus ( $N$ ) constante;
- Espessura substrato ( $t_p$ ) constante;
- Espessura de adesivo ( $t_A$  e  $t_{A1}$ ) constante;
- Comprimento de sobreposição ( $L_O$ ) variável;
- Comprimento total do provete ( $L_T$ ) constante.

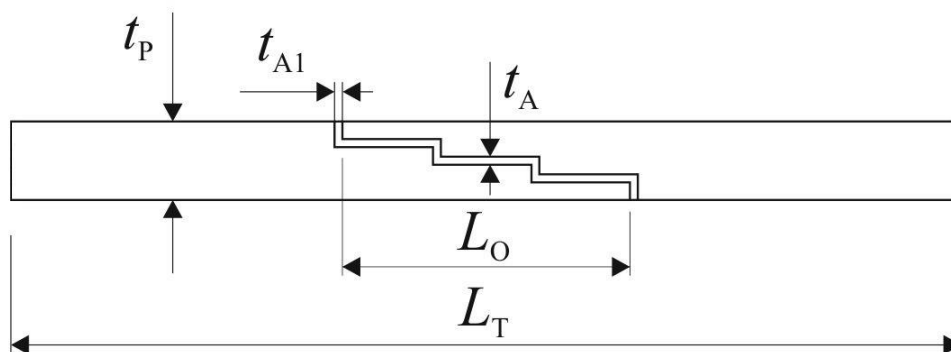


Figura 1 – Geometria e respetivos parâmetros dimensionais da junta em degrau.

Para as configurações de junta em análise foram igualmente testados três tipos de adesivos: Araldite® AV138, Araldite®2015 e Sikaforce®7752.

O trabalho numérico realizado consistiu na análise por MEF recorrendo ao *software* ABAQUS® das juntas adesivas experimentalmente testadas. O estudo numérico consistiu na determinação da distribuição de tensões de arrancamento (*peel*) ( $\sigma_y$ ) e de corte (*shear*) ( $\tau_{xy}$ ) na camada adesiva. Igualmente com recurso aos MDC foi determinada a variável de dano SDEG (*stiffness degradation*), que expressa o fenómeno da degradação do adesivo desde o início da aplicação da carga até à sua rotura completa. Igualmente é realizada a discussão dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos, em que estes são explicados em função das análises de tensão e de dano. É também realizada a comparação dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  numéricos e experimentais, onde se pretende validar a capacidade dos MDC na previsão da resistência das juntas em degrau. Finalmente, é realizada a comparação em termos de resistência das juntas em degrau com juntas de sobreposição simples (JSS) e juntas de sobreposição dupla (JSD).

### 1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, esta dissertação encontra-se dividida em 4 capítulos, que se passam a apresentar:

No 1º capítulo é contextualizado o tema abordado, definidos os objetivos propostos no presente trabalho e descrita de forma sumária a organização da dissertação.

O 2º capítulo consiste na revisão bibliográfica do tema abordado, onde é realizado um preambulo às ligações adesivas. Dentro deste capítulo é realizada a caracterização das juntas adesivas focando as suas propriedades, bem como expostos alguns exemplos práticos de aplicação desta técnica. São ainda apresentados os possíveis esforços e modos de rotura que podem existir nas ligações adesivas, bem como as possíveis configurações geométricas de junta. Também neste capítulo são enumerados e caracterizados os vários exemplos de adesivos estruturais conhecidos, e apresentadas as técnicas mais relevantes atualmente disponíveis na previsão da resistência das juntas adesivas, a destacar modelos analíticos e modelos numéricos. No final do capítulo são referidos estudos anteriormente realizados no âmbito das juntas em degrau.

O 3º capítulo corresponde ao desenvolvimento, ou seja, este capítulo encontra-se orientado para o trabalho experimental e numérico realizado. No que diz respeito ao trabalho experimental realizado, são referidos os materiais constituintes das juntas e é feita uma descrição pormenorizada de todas as propriedades destes, para estudo e análise de resultados obtidos experimentalmente. É também descrito o processo de fabrico envolvido na produção das juntas, bem como a geometria e condições nas quais as juntas foram testadas. Após a descrição do trabalho experimental são apresentadas as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) e os resultados de resistência, seguidos de uma

análise pormenorizada para cada caso de junta em estudo. No trabalho numérico é apresentado o procedimento realizado no *software* ABAQUS®, onde se incluem considerações e condições de análise numérica, os MDC utilizados, e expostas as condições da análise 2D de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  das juntas para as diferentes condições geométricas. Igualmente, apresenta-se o estudo da variável de dano SDEG durante o processo de rotura do adesivo, e é efetuada a previsão do comportamento das juntas quanto à sua resistência para cada tipo de geometria. No fim do capítulo é feita uma comparação entre os valores de resistência obtidos numericamente e experimentalmente, com vista a avaliar a capacidade do método de previsão proposto ser aplicado na previsão de resistência destas juntas.

No 4º capítulo são apresentadas as conclusões obtidas do trabalho realizado, assim como é realizada referência a possíveis trabalhos futuros.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

**2.1 Ligações adesivas**

**2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas**

**2.3 Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência**



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

Historicamente é difícil precisar com certeza quando e onde as técnicas relacionadas com a utilização de adesivos começaram a ser utilizadas, contudo achados arqueológicos sugerem a sua utilização desde os tempos mais remotos da história da humanidade. Em 1963 nas montanhas de Harz na Alemanha foram encontrados utensílios utilizados pelo espécime Neanderthal, durante os períodos do paleolítico e mesolítico, que revelaram após estudo cuidadoso dos artefactos arqueológicos a utilização de resina proveniente da bétula (vulgarmente conhecida como *birch pitch*) empregue como adesivo para realizar a união entre uma estrutura de madeira a uma lâmina de pedra pontiaguda [4].

Perante os factos históricos é possível afirmar que as ligações com recurso a adesivos são de longe a técnica de ligação mais universal e genérica, em que praticamente e tecnicamente todos os materiais podem ser unidos por meio de um material de junção. A grande maioria dos materiais de ligação naturais, hoje em dia foi substituída por completo por adesivos preparados sinteticamente. De facto, durante os anos 40 e 50 decorreram avanços extremamente importantes, que contribuiriam para um novo paradigma de ligações com recurso a adesivos. Os problemas relacionados com fraca durabilidade e fragilidade foram ultrapassados, com aparecimento dos primeiros adesivos à base de polímeros sintéticos como caso dos epóxidos, fenólicos, acrílicos e uretanos [2].

Importa ainda fazer a distinção entre um adesivo dito “vulgar” (i.e. não estrutural) de um adesivo de alto desempenho (i.e. estrutural), visto que hoje em dia a sua classificação é realizada segundo este critério. Resumidamente, um adesivo é do tipo estrutural quando resiste a forças de separação substanciais (7 MPa ao corte) providenciando desta forma rigidez e resistência à estrutura [2, 3]. Um adesivo não estrutural é um adesivo genérico utilizado em aplicações de baixa responsabilidade, este tipo de adesivo encontra-se disponível nas mais diversas formas comerciais como por exemplo: colas de contacto, fitas adesivas e borrachas sintéticas.

Nos tempos atuais a tecnologia de ligação por adesivos estruturais é uma técnica emergente nos métodos de produção devido ao seu potencial, de onde se destaca a grande flexibilidade de projeto e a facilidade de implementação em sequências industriais de baixa cadência (filosofia de peça única) ou produção em massa. Nos dias

de hoje as ligações adesivas estruturais assumem-se como alternativa às técnicas produtivas convencionais a diferentes níveis, sendo empregues em sectores *high-tech* como na indústria aeroespacial ou em sectores mais tradicionais como na indústria do calçado.

Recentemente, dentro dos desafios que se colocam no campo das ligações adesivas, tem sido desenvolvido um novo tipo de ligação denominado de “*dismantlable adhesive joint*” onde é permitida a reciclagem dos diferentes componentes que integram a ligação adesiva. Um bom exemplo da aplicação das “*dismantlable adhesive joints*” pode ser encontrado na indústria do calçado (Figura 2), onde os diversos componentes integrantes da sola são unidos por adesivos que permitem a “desmontagem” da estrutura. Este conceito contempla a utilização de adesivos que na sua composição contêm microcápsulas constituídas por revestimento termoplástico e núcleo de hidrocarbono líquido, que quando sujeitas a altas temperaturas expandem-se provocando a rotura do adesivo e conseqüente separação dos diversos componentes [5].

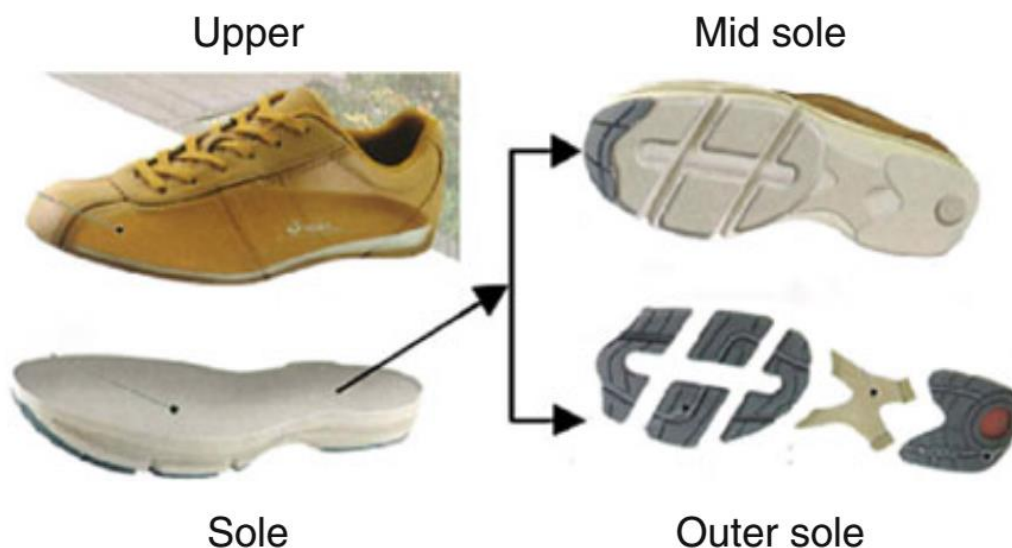


Figura 2 – Exemplo de aplicação das *dismantlable adhesive joints* na indústria do calçado [5].

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

A ligação de componentes por intermédio de adesivo é um processo de contacto superfície-superfície entre materiais similares e/ou dissimilares, em que se utiliza uma substância que normalmente é de um tipo diferente, que adere às superfícies dos materiais a serem unidos (denominados aderentes), onde se estabelece um vínculo físico-mecânico que permite a transferência de forças entre ambos [6].

De acordo com a norma DIN EN 923 [7], um adesivo é uma substância não metálica capaz de unir materiais por fixação à sua superfície (i.e. processo de adesão), em que o vínculo estabelecido entre os elementos supõe existência de resistência interna (i.e. coesão).

Antes de mais importa fazer distinção entre os conceitos de adesão e coesão que se encontram intrinsecamente associados às ligações adesivas (Figura 3). A adesão é a atracção entre duas substâncias resultantes das forças intermoleculares que se estabelece entre elas. A coesão está associada às forças intermoleculares que se verificam dentro de uma substância [2].

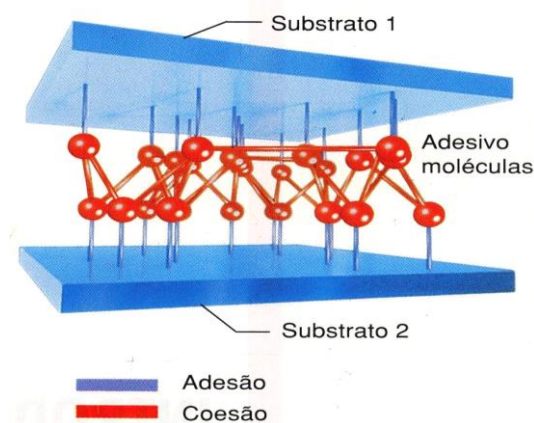


Figura 3 – Ilustração dos conceitos de adesão e coesão numa junta adesiva [8].

Igualmente, é conveniente definir e caracterizar as diferentes regiões que constituem uma ligação adesiva, conforme se ilustra na Figura 4.

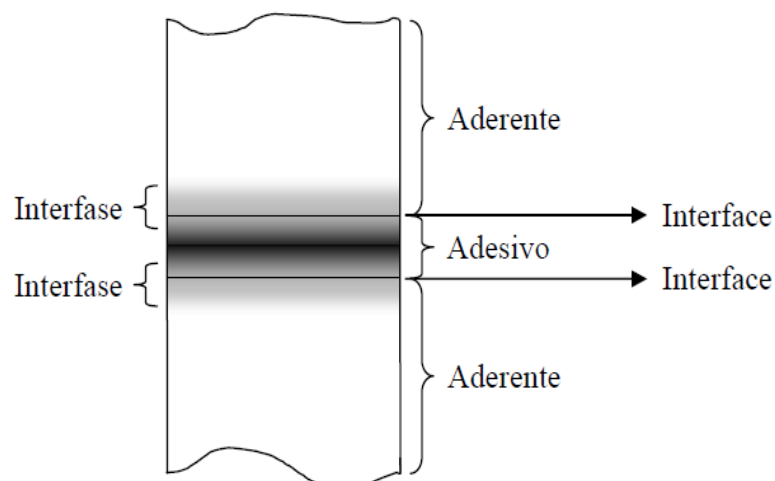


Figura 4 – Representação esquemática das regiões típicas de uma junta adesiva [2].

Numa ligação adesiva distinguem-se duas regiões distintas: a interfase e a interface. A interfase define-se como uma fina região que se localiza na zona de contacto entre o adesivo e aderente, e que possui características químicas e físicas diferentes da parte maciça do aderente e do adesivo [2]. A interface, também designada por camada limite, caracteriza-se como sendo o plano de contacto de duas superfícies de materiais diferentes, sendo que esta se encontra contida na interfase [2].

As ligações adesivas são uma técnica de união bastante atrativa tipicamente utilizada na construção de estruturas *lightweight/lightframe*, como por exemplo nas carrocerias de automóveis que utilizam aço, alumínio, vidro, soluções compósitas e plásticos técnicos na sua estrutura (i.e., *body-in-white*). De facto, as ligações adesivas são particularmente adequadas para a união de superfícies de grandes dimensões de materiais diferentes, tal como na construção de estruturas *sandwich*.

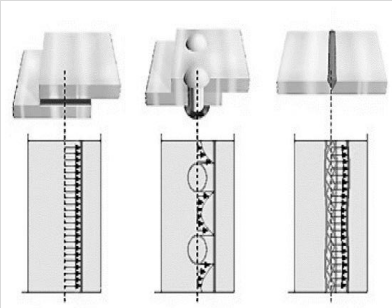
As principais características apresentadas pelas ligações adesivas encontram-se sumariamente descritas na Tabela 1 [2, 9].

Por outro lado, uma das muitas vantagens da união com recurso a adesivos é a pouca ou nenhuma entrega térmica a que a junta é submetida para criar a ligação. Como resultado, a estrutura dos aderentes a serem unidos não é afetada e as deformações ou tensões internas que geralmente estão relacionadas com a aplicação de calor neste caso raramente ocorrem, o que evita a necessidade de tratamentos de estabilização/alívio de tensões.

De modo a obter montagens de alto desempenho, a produção deve atender aos requisitos/características específicas dos materiais utilizados, mas também devem ser considerados os seguintes aspetos [2]:

- Seleção adequada do adesivo tendo em vista a aplicação a que se destina;
- Projeto da junta;
- Preparação superficial adequada dos substratos;
- Fabrico da junta, uma vez que as condições nas quais as ligações são produzidas têm influência na qualidade da ligação;
- Controlo de qualidade da junta.

Tabela 1 – Características das juntas adesivas [2, 9].

Ligação Adesiva	
Permanência/Tipo de ligação	Ligação tipicamente permanente.
Distribuição de tensões	<p>Os aderentes não são fragilizados por concentrações localizadas de tensão como é caso das ligações aparafusadas/rebitadas (Figura 5).</p> <p>A distribuição de tensões está relacionada com a área superficial de contacto, sendo que as ligações adesivas permitem distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da área da junta, que se traduz no aumento da capacidade de transmissão de carga e rigidez da ligação.</p>  <p>Figura 5 – Distribuição de tensões de ligações soldadas, rebitadas e coladas [9].</p>
Aparência	Boa aparência, pois permite obter estruturas com contornos regulares.
Ligação dos materiais	Permite ligação entre diferentes materiais retendo as suas características específicas (e.g. estruturas compósitas).
Resistência à temperatura	Apresenta resistência limitada a altas temperaturas. Dependente do material de base do adesivo, para juntas submetidas a tensões contínuas o intervalo de temperatura encontra-se limitado entre os 120°C / 300°C.
Resistência mecânica	Resistente à corrosão e à fadiga.
Preparação	Limpeza/tratamento das superfícies dos aderentes é um aspeto crítico para a obtenção de bons resultados.
Equipamento	Passível de automatização. Devido ao processo de cura não ser instantâneo, torna-se necessário o uso de <i>gabarit</i> para posicionamento dos aderentes, o que se considera uma desvantagem do método.
Custos (consumível)	Adesivos estruturais são caros (e.g. bi-componente).
Meio envolvente	Apresenta sensibilidade especialmente a solventes.
Tempo de produção	De segundos a horas de acordo com o tipo de adesivo/junta (processo de cura).
Garantia de qualidade	Limitado a ensaios não destrutivos.
Propriedades dinâmicas	Amortecimento intrínseco de vibrações.
Aplicabilidade	Quase universal (e.g. paredes finas).

### 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Podem ser encontrados exemplos bem-sucedidos da utilização da tecnologia de ligações adesivas em vários campos de aplicação. Ao escolher o melhor adesivo para uma aplicação específica, devem ser considerados os limites de resistência às solicitações (cargas) estáticas, cíclicas ou de impacto. Igualmente, deve ser ponderada a expectativa da vida útil do adesivo, que depende das condições de serviço em termos de envelhecimento. Em termos de projeto, não só a capacidade de resistência e as propriedades do material do adesivo devem ser avaliadas/consideradas, mas também os seus requisitos de processamento característicos desempenham um papel importante na avaliação da adequação para uma determinada aplicação.

Hoje em dia, o forte crescimento da utilização de adesivos é uma realidade que transversalmente se aplica em diversos sectores tais como:

- **Indústria Aeronáutica**

São utilizados adesivos essencialmente na construção da estrutura do avião (Figura 6), onde diversas partes são unidas por adesivos, mesmo em aplicações de extrema exigência em termos mecânicos, como as proteções dos reatores (Figura 7). Neste caso, as vibrações e a temperatura são fatores condicionantes no dimensionamento da junta e escolha do adesivo.

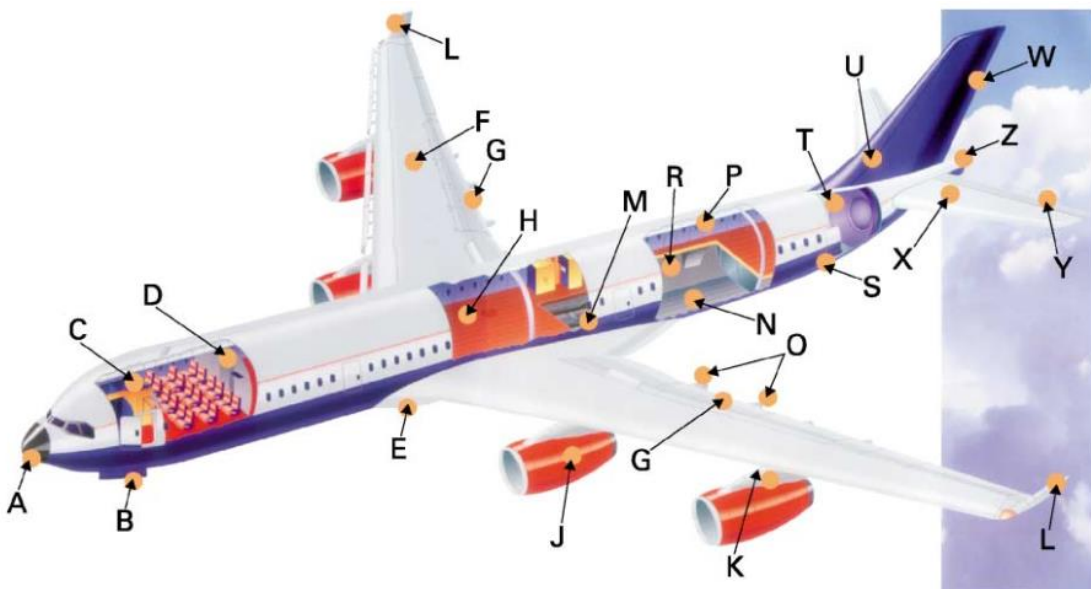


Figura 6 – Esquema genérico de aplicação de ligações adesivas na construção da estrutura de um avião comercial [10].

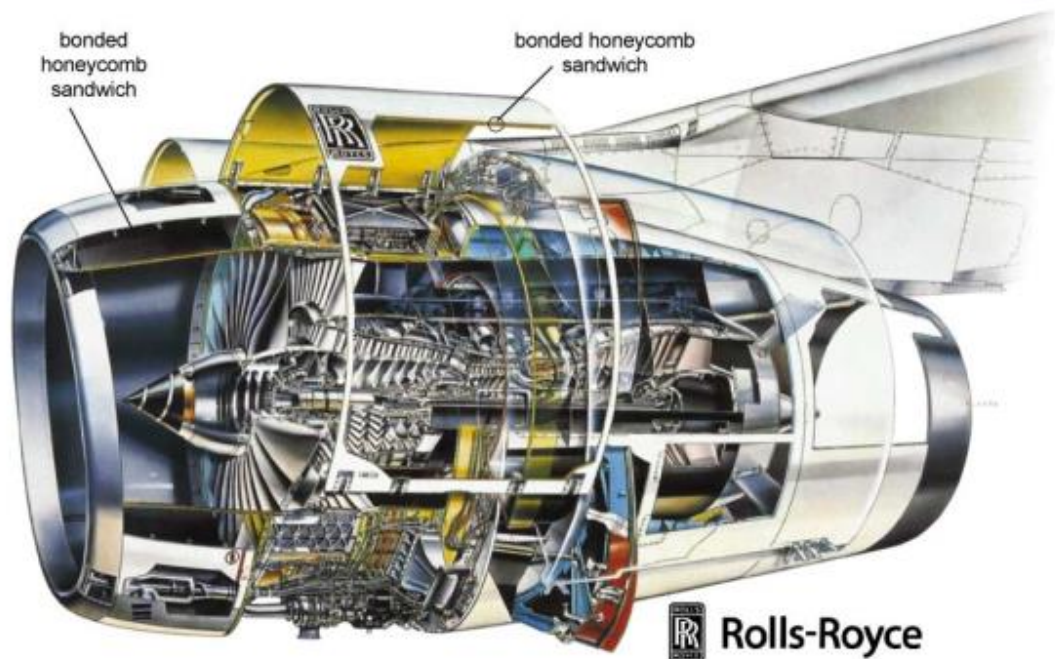


Figura 7 – Aplicação de juntas adesivas nos painéis da fuselagem do reator [10].

- **Indústria Automóvel**

Relativamente à aplicação de adesivos no sector automóvel, os fabricantes britânicos são considerados os pioneiros e detentores do estado de arte desta tecnologia. A necessidade de se substituir a utilização de aço na construção de chassis/*body in white* por alumínio, plásticos técnicos e soluções compósitas com intuito de se diminuir peso das estruturas levou à aplicação de juntas adesivas, pois estes tipos de materiais não são possíveis de ligar pelos métodos tradicionais.

Na Figura 8 é mostrada a conceção do *body in white* do Jaguar® F-Type, onde se utilizam painéis de alumínio estampados ligados integralmente por meio de adesivo estrutural. Em algumas partes do chassis pode verificar-se a combinação da técnica de adesivos estruturais com a técnica de rebtagem de forma a assegurar a rigidez específica da estrutura. Por outro lado, observa-se a aplicação de adesivo com recurso a ferramentas semiautomáticas (dispensadores) e a utilização de *gabarit* para posicionamento dos painéis durante a construção e a cura do *body in white*.



Figura 8 – Pormenores da construção do chassis do Jaguar® F-Type com recurso adesivos estruturais [11].

Na Figura 9 observa-se a automatização do processo de aplicação de adesivos através de robot industrial, na produção monocoque do modelo EVORA produzido pela Lotus®.



Figura 9 – Construção do Lotus® EVORA com recurso a robot industrial na aplicação de adesivo [12].

Na Figura 10 é mostrada a técnica de reparação do monocoque do Lamborghini® Aventador, com recurso à aplicação de *patches* de adesivo em filme, nas áreas fragilizadas detetadas pelos técnicos após a sua saída do autoclave.



Figura 10 – Reparação do monocoque do Lamborghini® Aventador com recurso a *patches* de adesivo em filme nas áreas fragilizadas após cura em autoclave [13].

- **Indústria Eletrónica**

Na indústria eletrónica a aplicação de adesivos torna-se cada vez mais utilizada na produção de circuitos integrados (Figura 11), uma vez que as fixações convencionais de microcircuitos em plástico e cerâmica têm sido substituídas por adesivos condutores anisotrópicos.

Hoje em dia as estruturas dos módulos *multichip* híbridas são produzidas por meio de adesivos isolantes e resistentes ao calor, utilizados para ligar a estrutura do *chip* ao substrato de silício (Figura 12).

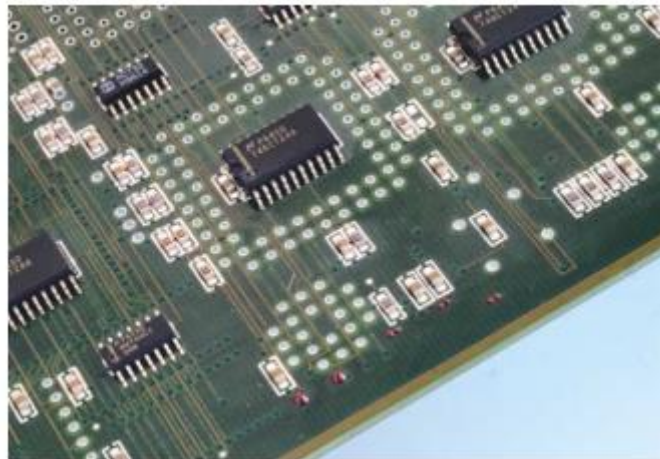


Figura 11 – Placa circuito integrado [4].

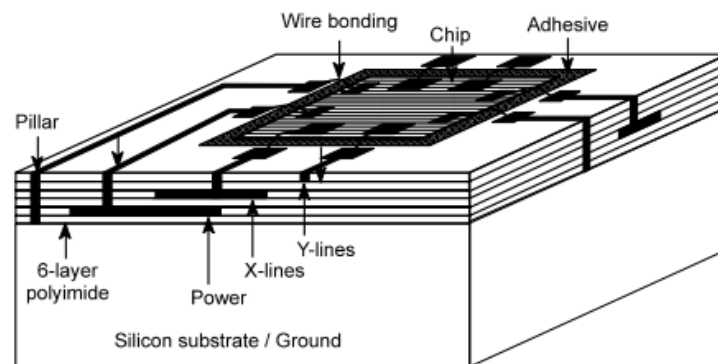


Figura 12 – Esquema típico de um *microchip* produzido com recurso a adesivos [10].

#### • Indústria Naval

Os plásticos reforçados com fibras (PRF) são tipicamente os materiais usados na construção de embarcações de recreio e pesca. Para ligação dos diversos componentes das embarcações, a utilização de adesivos estruturais é técnica preferencialmente utilizada na junção dos seguintes materiais:

- PRF – (placa) madeira;
- PRF – Policloreto de vinilo (PVC);
- PRF – metal (alumínio ou aço).

Em termos de aplicações dos adesivos na construção naval (Figura 13), destacam-se:

- Forros internos do casco;
- Ligação do convés ao casco;

- Junção de painéis do casco;
- Ligação das janelas aos painéis;
- Colagem de *decks* decorativos no convés.

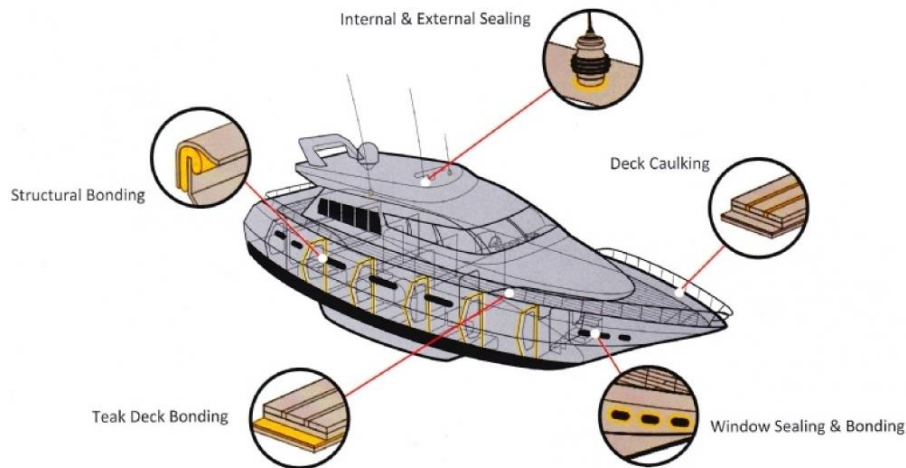


Figura 13 – Exemplos típicos de aplicação de adesivos estruturais na construção de embarcações [14].

#### • Indústria da Construção

Na indústria da construção existem variadas aplicações, como por exemplo:

- Caixilharia (Figura 14);
- Colagem de madeiras;
- Selantes (bucha química).

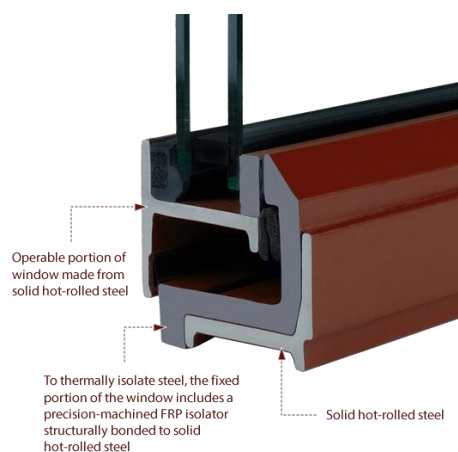


Figura 14 – Pormenor da solução construtiva do caixilho de uma janela, com aplicação de adesivos na colagem dos elementos que a integram [15].

### 2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Os modos de carregamento fundamentais a que uma ligação adesiva estrutural pode estar sujeita são: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento [2].

- **Esforços de tração**

Este tipo de carregamento consiste na aplicação de forças perpendiculares ao plano da junta, que originam esforços normais de tração ao longo da totalidade da junta. Neste caso, a distribuição das tensões normais através do comprimento de colagem não é uniforme, pois surgem picos de tensões nas extremidades da zona de sobreposição (Figura 15).

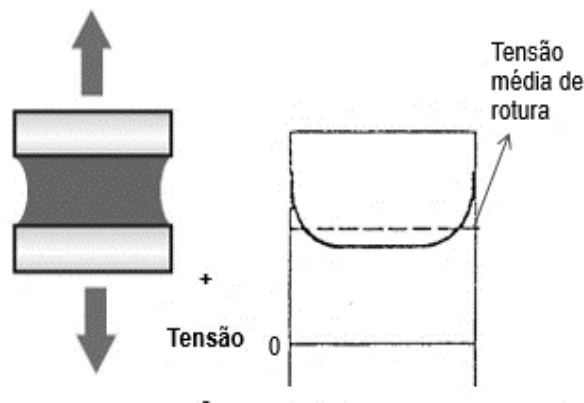


Figura 15 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforço de tração [16].

O aparecimento dos picos de tensão nas extremidades fica a dever-se à dificuldade em controlar a espessura do adesivo e de se garantir que as forças atuantes sejam precisamente axiais. Desta forma originam-se tensões de clivagem e de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição.

- **Esforços de compressão**

Nos esforços de compressão, tal como nos esforços de tração, as cargas devem-se manter perfeitamente perpendiculares à superfície de ligação, de modo a que o adesivo permaneça em compressão pura. Um adesivo sob compressão dificilmente rompe, a não ser em alguns pontos fracos devido à distribuição desigual de tensões. Na verdade, uma junta em compressão pura praticamente não necessita de adesivo [16].

A distribuição das tensões é constante em toda a junta (Figura 16), e esta só rompe se a distribuição das tensões não for uniforme.

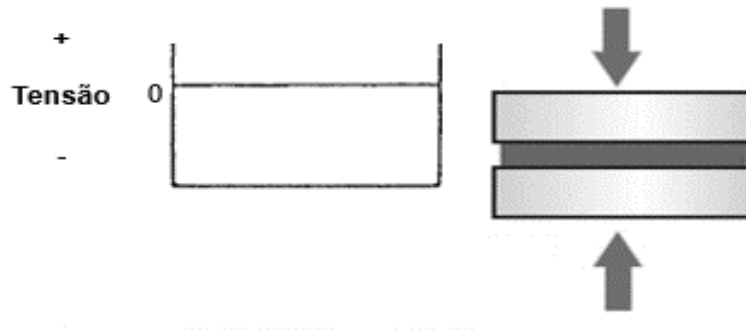


Figura 16 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de compressão [16].

### • Esforços de Corte

Carregamento caracterizado pela aplicação de forças no plano do adesivo, que provocam o escorregamento entre os dois aderentes. Observa-se que as extremidades da junta ficam sujeitas a concentrações de tensões elevadas, enquanto a região central da junta pouco contribui para a sustentação da carga (Figura 17).

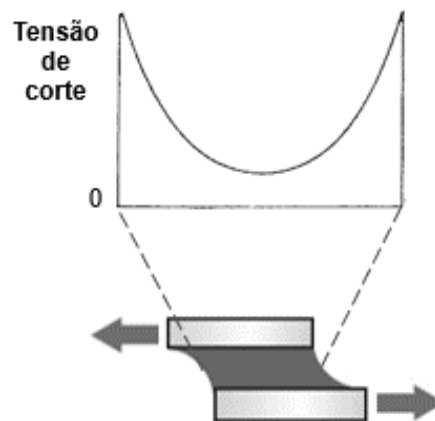


Figura 17 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de corte [16].

Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, e descreve a forma como cada aderente se deforma longitudinalmente. Desta forma, verifica-se que os aderentes apresentam uma taxa crescente de deformação desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da sobreposição [17], devido ao comportamento elástico dos aderentes e à continuidade existente na interface adesivo/substrato [18].

O aumento da largura da ligação torna a junta mais resistente porque aumenta a área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que correspondem aos locais onde o nível de tensões é mais elevado. Já o aumento do comprimento de sobreposição

provoca um aumento da resistência da junta mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes (Figura 18).

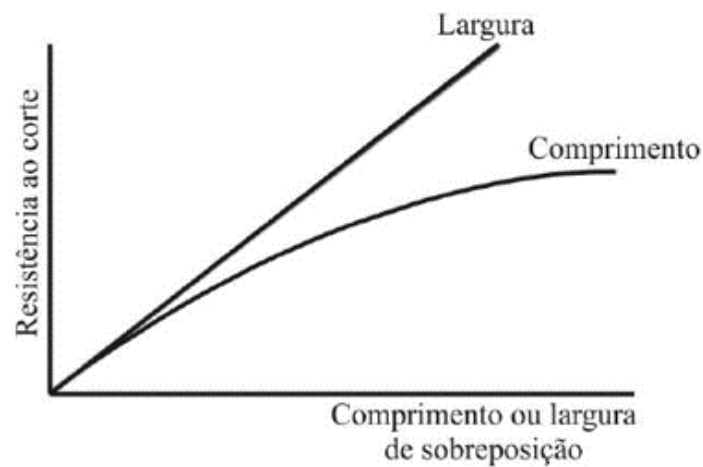


Figura 18 – Resistência ao corte vs. comprimento e largura de sobreposição [9].

- **Esforços de clivagem - *cleavage***

Os esforços de clivagem são provocados por forças de tração aplicadas na extremidade de uma junta rígida. Neste caso existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que está sob as forças de clivagem e que tendem a separar os substratos. Já a extremidade oposta pouco contribui para a resistência da junta (Figura 19). Este tipo de sollicitação deve ser evitado no carregamento das juntas adesivas.

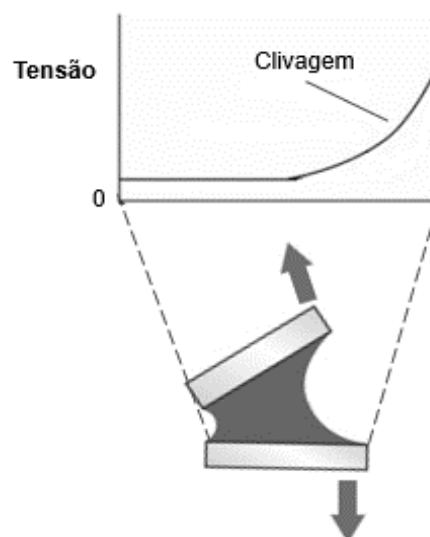


Figura 19 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de clivagem [9].

- **Esforços de arrancamento - *peel***

Os esforços de arrancamento são um caso bastante idêntico aos esforços de clivagem, com a diferença de pelo menos um dos aderentes ser bastante flexível e poder deformar-se plasticamente por ação das forças aplicadas, o que leva à concentração das forças de tração numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação (Figura 20).

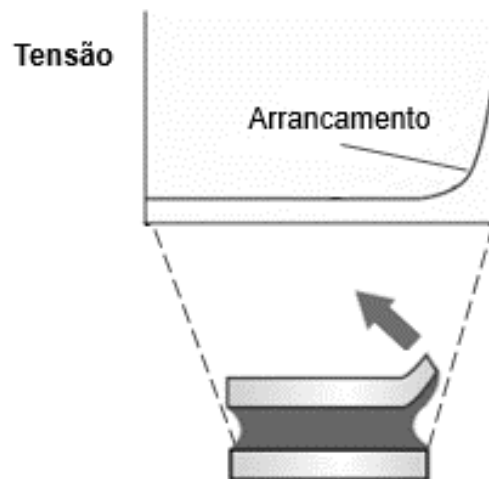


Figura 20 – Esquema de carregamento e distribuição de tensões em esforços de arrancamento [9].

Relativamente aos esforços de arrancamento, os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e, conseqüentemente, maior resistência da junta adesiva.

As ligações adesivas têm como intuito a transmissão de carga entre os componentes ligados, assegurando a integridade da estrutura produzida quando sujeita a solicitações estáticas e/ou dinâmicas. Como forma de aferir o comportamento e sucesso no fabrico deste tipo de ligações, é fundamental a correta avaliação dos modos de rotura induzidos nas juntas adesivas [16].

As juntas adesivas, ao estarem sujeitas aos diferentes tipos de carregamento anteriormente mencionados, podem sofrer vários tipos de rotura. Segundo a norma ASTM D 5573 – 99 [19] prevêm-se os seguintes modos de rotura:

- Rotura adesiva, na interface entre o aderente e o adesivo;
- Rotura coesiva, no interior do adesivo;
- Rotura do substrato;
- Rotura mista.

A caracterização do modo de rotura é fundamental para compreender por completo as propriedades do adesivo e da junta que esta sob investigação. Os modos de rotura são determinados por:

- Qualidade da junta;
- Geometria da junta;
- Tipo de carregamento.

- **Rotura coesiva**

Ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. As superfícies de rotura estão ambas cobertas por adesivo (Figura 21), o que indica que houve uma boa preparação das superfícies.



Figura 21 – Esquema ilustrativo da rotura coesiva [2].

A ocorrência deste modo de rotura é o desejado em situações onde se pretende salvaguardar a integridade dos aderentes.

- **Rotura adesiva**

Ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Após rotura verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo, enquanto a superfície do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo (Figura 22). Neste caso ocorre falha na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente. A rotura adesiva pode ocorrer se houver má preparação das superfícies das juntas.

Saliente-se ainda que muitas roturas consideradas inicialmente adesivas são na realidade roturas coesivas. De facto, uma observação rigorosa da superfície do substrato revela, por vezes, a existência de uma fina película de adesivo [9].



Figura 22 – Esquema ilustrativo da rotura adesiva [2].

- **Rotura mista**

Consiste numa combinação de rotura adesiva e coesiva (Figura 23). Este modo de rotura deve-se à limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou à má preparação (fabrico) do adesivo. Neste tipo de rotura os aderentes não são danificados [9].



Figura 23 – Esquema ilustrativo da rotura mista [2].

- **Rotura do aderente**

A rotura coesiva do aderente (Figura 24) é o modo de rotura preferencial, pois demonstra que a junta foi corretamente projetada e concebida. A rotura coesiva no aderente é demonstrativa de uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder ou se aproximar da resistência nominal do aderente [9].



Figura 24 – Esquema ilustrativo da rotura do aderente [2].

#### 2.1.4 Parâmetros que afetam o desempenho das juntas

No projeto de ligações adesivas, fatores como as propriedades dos materiais (substratos e adesivos) e a sua configuração (espessura do adesivo e comprimento de sobreposição) devem ser considerados de forma a garantirem um desempenho adequado atendendo aos esforços e ao meio a que a junta se encontra sujeita.

Devido à distribuição de tensões nas juntas adesivas não ser uniforme, ou seja, a média da tensão de corte ser muito menor do que a tensão máxima local, as roturas tendem a ocorrer sempre onde há maior concentração de tensão. De modo a melhorar a resistência da junta, é fundamental reduzir esses picos de tensão. Para este efeito, deve-se ter em consideração as seguintes orientações [17]:

- **Propriedades do adesivo**

Os adesivos que apresentam melhores propriedades a nível da resistência não garantem que a resistência da junta seja superior [20]. A resistência da junta não depende apenas da resistência do adesivo, mas também da sua ductilidade e rigidez. Os adesivos com

elevada ductilidade e flexibilidade geralmente têm uma resistência baixa. No entanto, quando usados numa junta, a sua capacidade para distribuir uniformemente as tensões ao longo da área de sobreposição (baixa rigidez) e para se deformar plasticamente pode resultar numa resistência do conjunto muito superior quando comparada com a obtida pela utilização de adesivos mais resistentes e rígidos [21].

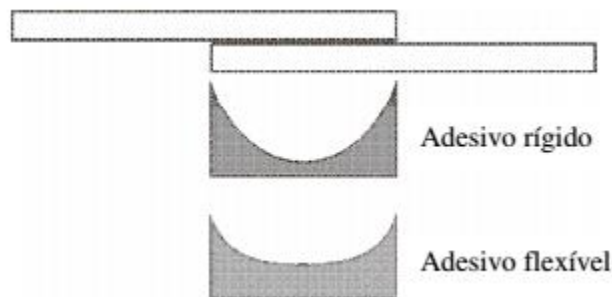


Figura 25 – Efeito da rigidez do adesivo na distribuição de tensões ao longo do comprimento de sobreposição [22].

Conforme é representado na Figura 25, os adesivos mais flexíveis apresentam uma distribuição mais uniforme de tensões em comparação com adesivos rígidos, para os quais se observa uma elevada concentração de tensões nas extremidades de sobreposição. O ideal seria ter um adesivo com boa resistência mecânica, bastante ductilidade e flexível. Contudo, estas três características são difíceis de combinar num adesivo, por isso é normalmente escolhido um adesivo dúctil [17].

- **Propriedades do substrato**

Outro fator que influencia o desempenho das juntas é o material dos substratos. Para se obter uma junta adesiva com elevado desempenho, é essencial uma boa capacidade de adesão entre os substratos e o adesivo. As propriedades dos substratos, como já referido, também são de grande importância, pois têm um enorme impacto na resistência da junta. Das propriedades mais relevantes do material do substrato que influenciam a resistência da ligação destacam-se o módulo de elasticidade e a resistência. A resistência do substrato é fundamental e pode explicar diversas roturas de juntas [22, 23]. Por outro lado, o módulo de elasticidade dos substratos desempenha igualmente um papel preponderante na resistência da junta. Em substratos metálicos a ocorrência de deformações plásticas devido à concentração de tensões na vizinhança das extremidades do comprimento de sobreposição pode originar a rotura prematura do adesivo. A utilização de substratos de menor rigidez confere à junta alguma ductilidade, que se revela benéfica pois permite que a rotura seja controlada pela cedência do substrato [2].

- **Espessura do adesivo**

Uma das características geométricas mais importantes no que diz respeito à distribuição de tensões e resistência da junta é o valor da espessura do adesivo. Com base em resultados experimentais, para adesivos estruturais, uma junta com uma resistência ótima deverá ter uma camada fina de adesivo, compreendida entre 0,1 – 0,2 mm [22]. Para valores superiores a 0,2 mm, Crocombe [24] mostra que nas JSS a resistência é menor, apesar dos modelos analíticos de Volkersen [18] e Goland e Reissner [25] preverem o seu aumento.

Através de uma análise elástica, verifica-se que existe uma maior concentração de tensões nas extremidades de  $L_0$  quando a camada adesiva é de menor espessura (Figura 26a) do que numa camada de adesivo com uma espessura superior (Figura 26b), em que a distribuição de tensões é mais uniforme. Embora existam teorias que procuram esclarecer o porquê de espessuras superiores a 0,2 mm causarem piores valores de resistência, não existe consenso [22]. Gleich et al. [26] e Adams e Peppiatt [27] também defendem que o aumento da espessura condiciona a resistência da junta, mas por motivos diferentes. Gleich et al. [26], através do uso de EF, observaram que existe um aumento das tensões de corte e de arrancamento na interface e na zona de sobreposição da junta com o aumento da espessura. Por outro lado, Adams e Peppiatt [27] afirmaram que, com o aumento da espessura do adesivo, a probabilidade de ocorrerem defeitos internos tais como porosidades e microfissuras aumenta significativamente.



Figura 26 – Distribuição de tensões em função espessura adesivo [22].

- **Comprimento de sobreposição**

O efeito de  $L_0$  foi abordado em detalhe por Karachalios et al. [28] para aços macios e de alta resistência, e para dois adesivos estruturais. A resistência da junta aumentou de forma mais acentuada para sobreposições curtas, mas para as juntas com substrato em aço macio, devido à plastificação dos substratos, atingiu-se um patamar de resistência para valores de  $L_0 > 25$  mm, ao contrário do que aconteceu com os substratos de aços de alta resistência. Esta ocorrência não foi observada para as juntas de aços de alta resistência até ao valor limite de  $L_0 = 60$  mm.

O aumento da largura de sobreposição aumenta proporcionalmente a resistência da junta. No entanto, o efeito de  $L_0$  depende do tipo de adesivo (dúctil ou frágil) e do tipo de substrato. Se for usado um adesivo dúctil e um substrato elástico, a resistência da junta é proporcional ao valor de  $L_0$ , pois o adesivo tem a capacidade de se deformar plasticamente e de redistribuir as tensões. Se o adesivo em causa for frágil e o substrato elástico, a resistência da junta não é proporcional a  $L_0$  na medida em que a carga máxima suportada pela junta está sempre limitada pelos picos de tensão nas extremidades da sobreposição. No caso de substratos plásticos, a resistência da junta é ditada pelas características do substrato (domínio plástico), e o aumento de  $L_0$  não se repercute na resistência da junta [29].

### 2.1.5 Configurações possíveis de junta

Atendendo às considerações anteriormente expostas e partindo do pressuposto que juntas adesivas apresentam mau desempenho quando submetidas a esforços de arrancamento e clivagem (Figura 27), seguidamente expõem-se as configurações de junta mais usuais e respetivas considerações (Tabela 2).

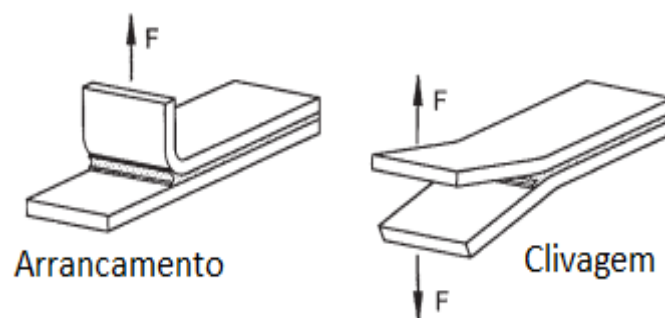







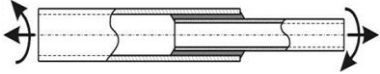
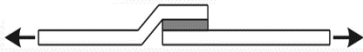


Figura 27 – Esquema ilustrativo dos esforços de clivagem e arrancamento [1].

Tabela 2 – Tipos de juntas vs. vantagens/desvantagens [9].

Tipos de juntas	Vantagens	Desvantagens
<p>Topo a topo</p>	<p>Simples de fabricar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Eficácia reduzida (concentração de tensões de arrancamento e corte nas extremidades);</li> <li>• Não permite esforços de flexão (clivagem).</li> </ul>

<p>Chanfro interior</p> 	<p>Diminui os gradientes de esforço ao longo do adesivo.</p>	<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>Chanfro exterior</p> 	<p>Diminui os efeitos de arrancamento nas extremidades.</p>	
<p>Degrau</p> 	<p>Diminui os esforços de arrancamento.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Tempo de fabrico mais elevado e caro;</li> <li>• Em materiais compósitos, a maquinagem pode danificar as fibras;</li> <li>• Com substratos em compósito, torna-se mais económico e comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, uma vez que se evita a necessidade de se proceder a operações de maquinagem pós cura.</li> </ul>
<p>JSS</p> 	<p>Simples de fabricar.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Aplicação de carga não centrada provoca efeitos de flexão;</li> <li>• Flexão origina tensões de arrancamento (menor resistência da junta).</li> </ul>
<p>JSD</p> 	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Reduz os efeitos de flexão;</li> <li>• Não requer maquinagem dos aderentes.</li> </ul>	<p>Produção mais morosa do que as juntas JSS.</p>
<p>Cobre-junta</p> 	<p>Resistência superior às juntas de JSS.</p>	<p>Sujeita a esforços de arrancamento.</p>
<p>Cobre-junta dupla</p> 	<p>Reduz o aparecimento de esforços de flexão.</p>	<p>Tempo de fabrico mais elevado.</p>

<p style="text-align: center;">Tubular</p> 	<p style="text-align: center;">Muito útil na ligação de tubos/ veio-cubo.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Para a união das partes aderentes, pelo menos uma delas deve ser chanfrada num ângulo de 15-30° e os aderentes devem ser unidos sob movimentos circulares lentos;</li> <li>• Algumas das soluções para assegurar que o adesivo preenche toda a cavidade, passam pela utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar.</li> </ul>
<p style="text-align: center;">De ressalto</p> 	<p style="text-align: center;">Garante o alinhamento de forças.</p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Dificuldade em fabricar o ressalto;</li> <li>• Substratos frágeis ou de alta resistência aumentam a dificuldade de produção.</li> </ul>

### 2.1.6 Adesivos estruturais

Existe uma grande variedade de adesivos, bem como diversos critérios para os agrupar. Os adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, rigidez, resistência mecânica, resistência térmica, fragilidade, resistência à ação dos agentes químicos, composição química, modo de endurecimento, custo e desempenho.

Em termos de engenharia os adesivos caracterizam-se segundo o seu desempenho, dividindo-se em dois grupos distintos, os estruturais e não estruturais. Os adesivos estruturais apresentam elevados valores de resistência mecânica e são normalmente utilizados em ligações de materiais de elevada resistência, tais como madeiras, compósitos e metais, permitindo uma resistência média ao corte da ligação adesiva superior a 6,9 MPa à temperatura ambiente [30]. São também conhecidos como um material que não sofre fluência sob ação de cargas bastante elevadas. Os adesivos estruturais são geralmente utilizados em ambientes com condições adversas e são sujeitos a solicitações em que as juntas necessitem de elevada durabilidade [30].

Na Figura 28 representa-se a divisão dos principais tipos de adesivos segundo o seu desempenho [2].

Adesivos		
Estruturais	Não Estruturais	
Fenólicos	Fenólicos - vinilo Fenólicos - nitrilo Fenólicos - policloropreno Fenólicos - neopreno	Borrachas sintéticas Silicone Policloropreno Nitrilo Polisulfureto
Acrílicos	Anaeróbicos Cianoacrilatos Modificados	Poliésteres Termofusíveis Inorgânicos
Poliuretanos		Colas de contacto
Poliaromáticos de alta temperatura	Poliimididas Bismaleimididas Polibenzimidazol	
Melaminas		
Epóxidos	Epóxidos - poliamida Epóxidos - polisulfureto Epóxidos - fenólicos Epóxidos - poliuretano Epóxidos - nitrilo Epóxidos - nylons Epóxidos modificados Epóxidos - polisulfitos Resinas de epóxido	

Figura 28 – Classificação dos adesivos tendo em conta o seu desempenho (adaptado de[2]).

### 2.1.7 Tipos de adesivos estruturais

Podem-se considerar as seguintes famílias de adesivos estruturais [31]:

- Adesivos Fenólicos;
- Adesivos Acrílicos;
- Adesivos de Poliuretano;
- Adesivos de Poliamida;
- Adesivos Epóxidos.

Os adesivos epóxidos e os adesivos fenólicos são os mais usados na indústria de construção mecânica, utilizados na colagem estrutural de componentes [31].

- Adesivos Fenólicos

Inicialmente, a sua utilização resumia-se à colagem de madeira, mas posteriormente passaram a ser usados na colagem de metal. No entanto, as suas características de adesão são algo limitadas, assim como a resistência ao choque e às vibrações. De modo a ultrapassar esta limitação, têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina

fenólica com a resina vinílica ou um elastômero (nitrilos ou policloropreno). Os adesivos fenólicos-vinílicos garantem uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento, e a sua resistência à fadiga é também superior devido às propriedades plastificantes da fase vinílica. Já os adesivos fenólicos-policloropreno apresentam uma resistência mecânica superior às vibrações e às baixas temperaturas. No entanto, estes são sensíveis aos agentes químicos.

- Adesivos Acrílicos

Os adesivos acrílicos podem ser divididos em: adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados.

Os adesivos anaeróbicos têm uma grande aplicação na ligação de peças de geometrias cilíndricas, tais como a fixação de rolamentos, peças estriadas e roscadas. São geralmente líquidos monocomponentes que podem ser curados à temperatura ambiente e são de fácil utilização. O processo de endurecimento dá-se por uma reação de polimerização do tipo radical-livre, uma vez eliminado o oxigénio. Estes adesivos normalmente não curam fora da junta, já que estão em contacto com o oxigénio. Dá-se como exemplo o excesso do adesivo criado na altura do fabrico das juntas, cuja remoção é facilitada devido à ausência de cura. A sua resistência é bastante variável, contudo esta pode ser próxima da demonstrada pelos adesivos epóxicos.

Os cianoacrilatos permitem colagens muito rápidas, quase instantâneas. A cura destes adesivos é influenciada pela humidade, pelo teor de pH do meio e pela espessura da junta colada. Apresentam uma resistência à tração excelente mas fragilidade e baixa resistência ao arrancamento.

Nos adesivos acrílicos modificados, a modificação faz-se com a introdução de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Estes adesivos apresentam elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Possuem baixa contração durante o processo de cura e permitem a obtenção de ligações fortes com uma preparação mínima das superfícies. Os adesivos acrílicos modificados, são aplicados na união de uma grande variedade de materiais (especialmente plásticos e metais). Como desvantagens, citam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada flamabilidade.

- Adesivos Poliuretanos

Os adesivos poliuretanos resultam da reação entre um polioliol ou poliéster-polioliol com isocianato. Estes adesivos possuem uma resistência ao corte e à tração inferiores quando comparados com outros adesivos, contudo estes adesivos distinguem-se pelas seguintes características:

- Boa resistência ao arrancamento;

- Boa resistência às vibrações e ao choque;
- Boa flexibilidade;
- Bom comportamento a baixa temperatura;
- Boas características de adesão em superfícies metálicas.

Além das características anteriormente referidas, os adesivos poliuretanos apresentam ainda bom comportamento em condições ambientais severas, cobrem uma gama de temperatura de serviço entre -200 a 80°C e apresentam elevada resistência ao corte (na ordem dos 20 MPa). O seu processo de cura ocorre à temperatura ambiente ou a elevadas temperaturas. Devido à sua boa molhabilidade e flexibilidade, os poliuretanos aderem de forma eficaz a polímeros que geralmente são complicados de colar.

- Adesivos de Poliamida

Os adesivos de poliamida, ou adesivos poliaromáticos de elevada temperatura, são os adesivos que melhor comportamento apresentam a elevadas temperaturas ( $\geq 200^\circ\text{C}$ ). Estes adesivos são caros e difíceis de manusear durante o fabrico das juntas (*open time*). Os adesivos de poliamida encontram-se disponíveis no mercado sob a forma de líquidos e filmes. São geralmente utilizados em aplicações de baixo peso sujeitas a temperaturas mais elevadas, como chips e outros componentes eletrónicos. A sua cura é naturalmente mais difícil e problemática pois requer períodos elevados com ciclos de pressão e temperaturas altas.

- Adesivos Epóxidos

Os adesivos epóxidos destacam-se a nível de uso comercial no conjunto dos adesivos estruturais existentes devido às suas características mecânicas e químicas superiores [9]. Estes adesivos são amplamente utilizados na indústria automóvel, aeronáutica e de construção. Devido à sua elevada resistência e fácil aplicação, estes adesivos permitem uma diversidade de aplicações no campo das construções mecânicas.

Os adesivos epóxidos caracterizam-se sobretudo pela baixa densidade, elevada resistência ao arrancamento e elevada resistência ao corte. Permitem diferentes formulações, uma vez que estão disponíveis diversas resinas e endurecedores. São comercializados em diferentes formas, desde líquida de baixa viscosidade até sólida, ou mesmo em filmes. O processo de cura de um adesivo epóxido só com um componente ocorre geralmente a uma temperatura de 120°C devido ao facto do catalisador estar inativo à temperatura ambiente. Para adesivos com dois componentes a cura pode ser efetuada a partir dos 5°C sendo que, com o aumento da temperatura, se observa a diminuição do tempo de cura. O tempo necessário para se processar a cura total poderá variar entre 10 a 15 minutos até vários dias. Geralmente a cura não necessita de aplicação de pressão, apenas requer o posicionamento entre as peças a serem coladas.

É importante ainda salientar que as propriedades dos epóxidos podem ser modificadas e melhoradas com a inclusão de outras resinas, como a poliamida, polisulfito, fenólica, nitrilo, nylon, entre outras.

## 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a não existência de modelos materiais precisos e critérios de rotura adequados levavam ao sobredimensionamento de juntas adesivas, que resultava em estruturas mais pesadas e mais dispendiosas, ou seja, estruturas não otimizadas. Com a disponibilidade de metodologias de previsão credíveis de projeto/dimensionamento, apareceram novas possibilidades para o uso eficiente e emprego de juntas adesivas. Podem ser escolhidas duas alternativas para análise de juntas adesivas: análise por modelos forma fechada (métodos de análise analíticos) ou métodos numéricos (e.g. análises MEF). O início do estudo de juntas adesivas remonta à década de 30 com o modelo de forma fechada de Volkersen [18], que considera os materiais totalmente elásticos e a deformação do adesivo apenas em corte. No entanto, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo se deformar plasticamente, se forem utilizados substratos compósitos, ou se forem empregues diferentes materiais nos substratos (i.e., substratos heterogêneos/ dissimilares) (e.g. alumínio-polímero reforçado com fibra de vidro (PRFV); alumino-fibra de aramida).

A análise MEF é a técnica mais consensual para análise de juntas adesivas, e Adams et al. [27] foram os pioneiros nesta técnica. Aspectos como rotação da junta, plasticidade dos aderentes e do adesivo e a influência dos filetes de adesivo foram estudados em primeiro lugar por Harris e Adams [32]. A abordagem pela mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência de juntas adesivas foi utilizada nas análises iniciais, e esta requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. A análise por MEF também pode ser usada em conjunto com critérios de mecânica da fratura para previsão de resistência, quer pelo fator de intensidade de tensão ou abordagens energéticas, como a técnica do fecho fenda da virtual (TFFV). Contudo, com estas técnicas de modelação, o crescimento da fenda torna-se desfavorável devido ao *remeshing* que ocorre durante a análise devido à sua propagação, o que resulta num esforço computacional elevado [33]. Nas últimas décadas foram introduzidos grandes desenvolvimentos na modelação numérica de juntas a destacar: a modelação de dano pela combinação das técnicas MDC com EF recorrendo a elementos coesivos. Esta técnica combina o MEF convencional para as regiões que não são suscetíveis de sofrer dano e uma abordagem da mecânica da fratura, através dos elementos coesivos, para simular a propagação de dano. Uma alternativa mais recente para modelar a propagação de dano nos materiais é o MEF Extendido, que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamentos descontínuos.

Em suma, a previsão da resistência das juntas pode ser feita com recurso às seguintes técnicas:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fratura;
- Modelos de dano coesivo;
- Mecânica do dano;
- MEF Extendido.

### 2.2.1 Modelos analíticos

No início da análise estrutural de ligações adesivas, os métodos preditivos consistiam em formulações analíticas. Os trabalhos desenvolvidos por Volkersen [18] e Goland e Reissner [25] foram precursores de uma série de estudos teóricos que tinham como vantagem a simplicidade em determinar os campos de tensão nas estruturas ligadas por adesivos devido ao uso de hipóteses simplificadoras em termos de geometria das estruturas, carregamento e condições fronteira, dando soluções eficientes de forma fechada. Assim, as estruturas ligadas por adesivos estruturais podem ser analisadas rapidamente, embora com muitas suposições incorporadas [34]. Com estes modelos, as tensões e deformações podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento fletor atuante na estrutura. A resistência era tipicamente prevista por critérios baseados em tensões ou deformações. Hoje em dia, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, embora os estudos analíticos também foram alvo de melhorias ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, considerando nas análises a não-linearidade material empregue na camada adesiva [35] ou análises geométricas não-lineares [36].

### 2.2.2 Métodos numéricos

Estão atualmente disponíveis técnicas avançadas de modelação que garantem previsões de rotura precisas, que superam as limitações dos métodos analíticos. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou região interfacial, que se traduz na redução da capacidade de transferência de carga. Simulações pelo-MEF com base na modelação da mecânica dos meios contínuos assumem erradamente que ocorre plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo de mecânica do dano pode simular o dano nos elementos por redução das cargas transferidas. Como resultado, torna-se possível a simulação do dano e fratura passo-a-passo para um caminho pré-definido ou arbitrariamente dentro de uma região finita [37]. Apesar deste facto, este é ainda um campo inovador sob intenso desenvolvimento, no que diz respeito a técnicas de

modelação mais precisas, métodos de estimativa de parâmetros de materiais mais fiáveis e simples, aumento da robustez e eliminação de problemas de convergência [38]. As técnicas de modelação de dano podem ser locais ou contínuas. Dentro da modelação local de dano, este ocorre numa linha ou superfície (análise 2D ou 3D, respetivamente), que simula rotura interfacial entre materiais, por exemplo, entre a ligação adesiva e o aderente, a fratura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Pela modelação contínua, o dano estende-se por uma área ou volume finito (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular a rotura ou modelar fratura coesiva do adesivo.

### *2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos*

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos por modelos analíticos ou por análises EF, são normalmente utilizados em critérios de rotura para estimar a resistência da ligação. Isto é conseguido quando os valores previstos, obtidos por critérios baseados em tensões ou deformações (e.g. o critério da tensão normal máxima, CTNM, ou no critério de tensão de corte máxima, CTCM), alcançam a resistência dos componentes da estrutura.

A mecânica dos meios contínuos foi rapidamente empregue em aplicações estruturais após a possibilidade de utilização da técnica EF em juntas adesivas [32]. As vantagens desta técnica incluem a possibilidade de análise de estruturas ligadas por adesivo com ou sem dano inicial, e sob uma solicitação arbitrária. Não obstante, estes critérios incluem uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas ligadas por adesivos são propensas a tensões localizadas nas extremidades das regiões de sobreposição (picos de tensão), devido às arestas vivas. Como resultado, numa análise EF de uma estrutura ligada por adesivo, a tensão nas extremidades das regiões de sobreposição aumenta com o refinamento da malha e não é atingida a convergência, o que resulta em previsões dependentes desta [34]. Com decorrer dos anos, foram introduzidas melhorias nesta técnica de modelação, tais como a definição de critérios de tensões e deformações mais complexos para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de meios contínuos mais realistas. Contudo, a dependência de parâmetros de malha não está ainda resolvida.

### *2.2.2.2 Mecânica da fratura*

A Mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os materiais são contínuos. Deste modo, defeitos existentes na estrutura ou dois materiais ligados com cantos reentrantes, obviamente, não são propriamente modelados com esta técnica. De facto, a mecânica dos meios contínuos não fornece nenhuma solução para o estado de tensão destes pontos singulares. As fendas são os defeitos mais comuns em estruturas, para as

quais foram desenvolvidas as técnicas da mecânica da fratura. Na mecânica da fratura, é bem aceite que tensões calculadas pela mecânica dos meios contínuos são singulares (infinitas) nas extremidades da fenda.

Sabe-se que tal singularidade existe sempre quando o ângulo de fenda é inferior a  $180^\circ$ . Este valor foi proposto por Williams [39] para tensões singulares num entalhe. Este argumento é igualmente aplicável para as tensões singulares em dois materiais ligados em conjunto com um canto reentrante.

A mecânica da fratura tem sido aplicada com sucesso em muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos que tratam de juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação,  $G$ , e respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura [40], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda se propaga na interface ou perto dela. No entanto, a fratura de juntas adesivas ocorre geralmente em modo misto por causa da variabilidade das propriedades entre os diferentes materiais e do complexo campo de tensões. Neste caso podem ser utilizados critérios de rotura em modo misto, de forma análoga aos critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito de superfície ou envelope de fratura para lidar com a mixicidade do carregamento.

### 2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação computacional de métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) teve grande sucesso há algumas décadas, mas estas técnicas estão limitadas ao comportamento elástico dos materiais. Além disso, alguns adesivos estruturais tendem a desenvolver zonas plásticas que podem ser maiores do que a espessura dos aderentes. Os MDC foram desenvolvidos no final de 1950/início de 1960 [41] para descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo coesivo à frente da extremidade da fenda, permitindo obter uma solução precisa na previsão de danos em estruturas ligadas por adesivos. Os MDC foram desde então testados para simular a iniciação e propagação de fendas em problemas de rotura coesiva, interfacial ou delaminação de estruturas em compósito. Os MDC podem ser implementados em elementos de mola ou mais convencionalmente em elementos coesivos [42], que podem ser facilmente incorporados em análises pela técnica EF para modelar o comportamento de rotura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [43]. O princípio base do conceito dos MDC é a definição de uma ou mais regiões ou interfaces, designadas por zonas de processo de rotura introduzidas artificialmente em estruturas, em que se possibilita o crescimento do dano pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. Isto é possível pela definição de leis de tração-separação para modelar as interfaces ou regiões finitas. As leis dos MDC são aplicadas entre os pares de nós homólogos dos elementos coesivos, que podem ligar nós sobrepostos, que podem representar diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais sem contato

para simular uma camada fina, (e.g., para simular uma ligação adesiva). Os MDC descrevem a propagação macroscópica do dano em função de leis de tração-separação estabelecidas entre os nós homólogos ao longo do caminho de propagação da fenda. As leis de tração-separação são tipicamente construídas por tramos lineares em cada uma das fases de carregamento [44], embora uma ou mais fases possam ser definidas de forma diferente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

#### 2.2.2.4 *Mecânica do dano*

Na mecânica do dano, considera-se um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva de materiais através da redução da rigidez ou da resistência, como por exemplo em ligações adesivas [45], delaminações ou rotura de matrizes em compósitos [46], de modo a representar o dano ocorrido nos materiais durante o carregamento. Esta variável de dano pode ser usada numa lei de evolução de dano para modelar o dano antes do início da criação da fenda e o crescimento da mesma. Segundo Voyiadjis e Kattan [47], as variáveis de dano podem ser classificadas em 2 grupos principais: variáveis que introduzem dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de dano, e as variáveis relacionadas com a definição física de um tipo de dano específico, tais como porosidades ou área relativa de microcavidades. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para problemas estáticos e do número de ciclos para problemas de fadiga. Para juntas coladas, foram publicados poucos trabalhos neste domínio. Para a fadiga, a mecânica do dano não faz uma distinção clara entre a iniciação de fadiga e as fases subsequentes de propagação da mesma, apesar de fornecer uma base para a análise de previsão [45]. Ainda assim, pode ser simulada a evolução do dano antes da macrofissuração.

#### 2.2.2.5 *Método de Elementos Finitos Extendido*

O MEF extendido é uma melhoria recente da técnica EF para modelar o crescimento do dano em estruturas. Este método baseia-se em leis de dano para a previsão da fratura que são assentes em critérios de resistência dos materiais para a iniciação de dano e de deformações para a avaliação de rotura (definido como  $G_{IC}$ ), em vez de valores de resistência coesiva à tração/corte ( $t_n^0/t_s^0$ ) ou deslocamentos correspondentes à resistência coesiva à tração/corte ( $\delta_n^0/\delta_s^0$ ) usados nos MDC. O MEF extendido tem como vantagem, em relação MDC, a não obrigatoriedade das fendas seguirem um caminho pré-definido. Na verdade, as fendas propagam-se livremente dentro de uma região do material, sem que seja necessário o ajustamento da malha para que esta coincida com a geometria das descontinuidades, ou que haja necessidade de se proceder ao *remeshing* durante a análise [48]. Este método é uma extensão da modelação MEF convencional, cujas características fundamentais foram apresentadas no final dos anos 90 por Belytschko et al. [49]. O MEF extendido baseia-se no conceito de partição da

unidade e pode ser implementado no MEF tradicional através da introdução de funções locais de enriquecimento para os deslocamentos nodais perto da fenda para permitir o seu crescimento e a separação entre as faces de fenda [50]. Devido ao crescimento de dano, as extremidades da fenda modificam continuamente a sua posição e orientação em função das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente com a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF na proximidade da extremidade da fenda.

### 2.3 Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência

Uma junta adesiva ideal é aquela na qual, perante qualquer modo de carregamento, o adesivo é sempre solicitado na direção que mais resiste à rotura [51]. No entanto, isso nem sempre é possível. Algumas geometrias podem ser inviáveis de fabricar principalmente devido aos custos elevados na sua realização. Neste capítulo, são apresentadas algumas estratégias utilizadas na conceção de ligações adesivas a fim de obter o melhor desempenho e rendimento das juntas produzidas.

#### 2.3.1 Filetes de adesivo

Conforme estudos levados a cabo por Harris e Adams [52], a presença de um filete de adesivo (Figura 29) melhora o comportamento da junta, uma vez que se consegue redução dos picos de tensão verificados nas extremidades de sobreposição. Esta alteração provoca a redução local das tensões instaladas no adesivo e também no substrato, com especial destaque para redução das tensões de arrancamento e corte, particularmente no caso de materiais compósitos.

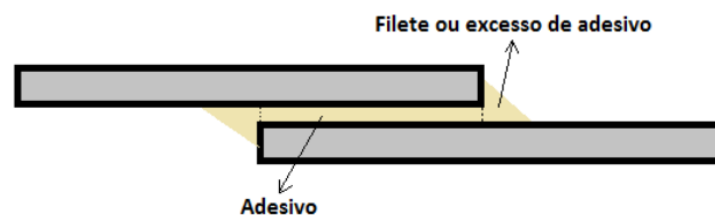


Figura 29 – Esquema representativo de uma junta com um filete de adesivo [3].

A inclusão de um filete de adesivo permite uma transferência de tensão mais suave e reduz de forma significativa as tensões máximas, obtendo-se reduções dos picos de tensão de cerca de 50% ou mais (Figura 30). Por sua vez, esta alteração conduz a um aumento da resistência da junta, especialmente na presença de adesivos frágeis [2].

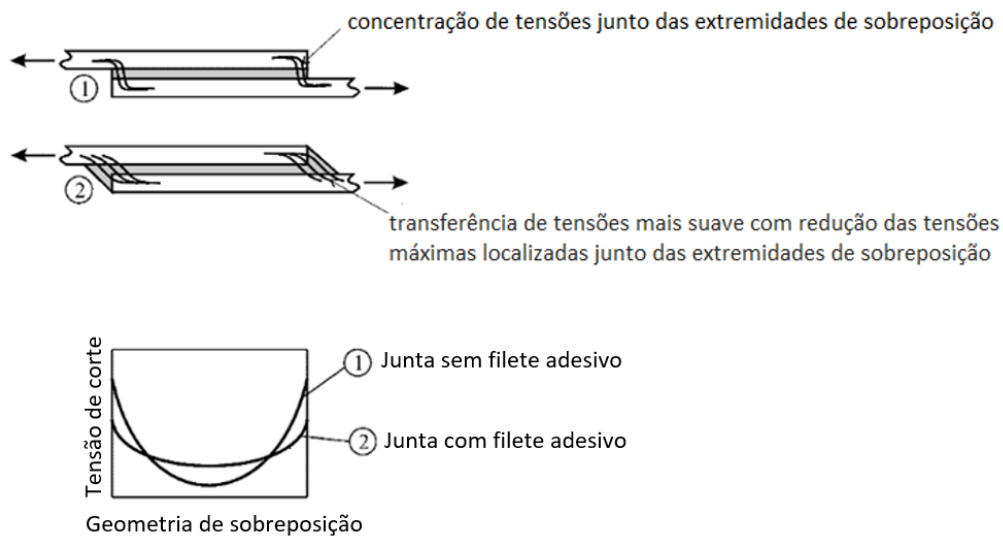


Figura 30 – Distribuição de tensões locais junto das extremidades de sobreposição com inclusão de filete de adesivo [53].

### 2.3.2 Chanfros interiores e exteriores

A junta de chanfro interior (Figura 31), assim como a junta em degrau, produzem a diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, o que por sua vez permite aumentar a resistência da junta. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto [54]. A dificuldade de maquinar os degraus ou as rampas encarece o seu processo de fabrico [27]. Com substratos em compósito, torna-se mais económico e comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, prescindindo-se assim a necessidade de se recorrer a operações de maquinagem [55].



Figura 31 – Esquema representativo de uma junta de chanfro interior [9].

As juntas com chanfros exteriores foram desenvolvidas para reduzir os picos de tensão que ocorrem nas extremidades das JSS [2, 9]. Com esta modificação, há uma diminuição da concentração de tensões e uma distribuição mais uniforme das mesmas (Figura 32) [51].

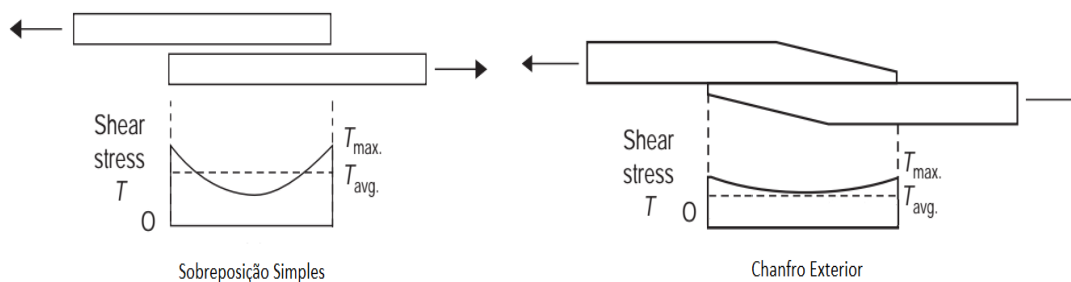


Figura 32 – Distribuição da tensão de corte em junta de chanfro exterior vs. JSS [56].

### 2.3.3 Utilização de dois adesivos

Outra possibilidade para melhorar a distribuição de tensões em juntas expostas ao corte incluem o uso de adesivos com módulos de elasticidade diferentes. Para aumentar a resistência de juntas adesivas unidas por adesivos rígidos e frágeis, pode-se aplicar um adesivo flexível e dúctil na extremidade de sobreposição para diminuir os picos de tensão, como evidenciado na Figura 33. O conceito foi inicialmente proposto por Raphael [57], que desenvolveu um modelo analítico para este caso. Srinivas [58] efetuou estudos paramétricos sobre este tema onde utilizou um modelo analítico e Pires et al. [59] validaram os resultados experimentais do modelo de Raphael através de análises MEF.

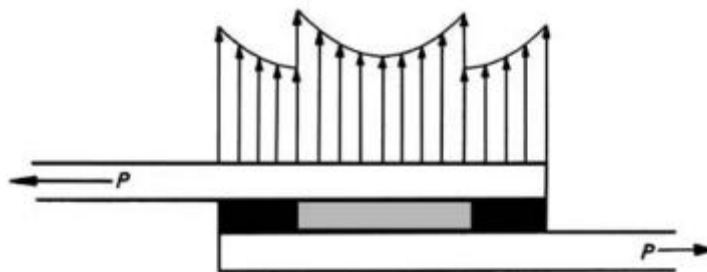


Figura 33 – Combinação de adesivos com diferente módulo de elasticidade longitudinal [2].

Apesar de esta técnica ser de difícil aplicação, permite diminuir as concentrações de tensões e aumentar a resistência relativamente a juntas com um único adesivo frágil. Esta técnica é muito utilizada no campo aeronáutico, devido ao bom comportamento tanto a altas como a baixas temperaturas.

### 2.3.4 Gradação de propriedades dos aderentes

Estudos desenvolvidos por Ganesh [60] abordaram a influência da gradação longitudinal do módulo de Young dos aderentes na região de sobreposição, em juntas solicitadas à tração, com configuração de sobreposição simples e dupla (Figura 34) em aderentes de

PRFV. Foi efetuado através do MEF o estudo da distribuição de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  na espessura média do adesivo em juntas com diferentes esquemas de gradação do módulo de Young na zona de sobreposição, e realizada a comparação dos resultados obtidos com valores apresentados por juntas típicas (sem gradação do módulo na zona de sobreposição).

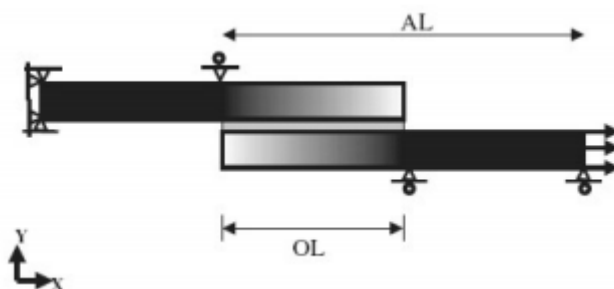


Figura 34 – Gradação de propriedades dos aderentes numa JSS [61].

A gradação do módulo de Young foi conseguida com a variação do ângulo de orientação das fibras do reforço na altura da construção/empilhamento da estrutura laminada.

Com a implementação da técnica de gradação do módulo de Young dos aderentes, conseguiu-se a diminuição da rigidez do laminado nas extremidades de sobreposição, o que originou uma redução de 20% nas tensões  $\tau_{xy}$  de pico no adesivo nessas regiões comparativamente com juntas sem modificação de propriedades dos aderentes. Também se verificou um ligeiro aumento das tensões de corte na região central de sobreposição, embora não tenham sido observadas alterações significativas nas distribuições de tensões  $\sigma_y$ .

No presente estudo, também foi analisada a influência da gradação longitudinal do módulo de Young na distribuição de tensões  $\sigma_x$  no adesivo ao longo de todo o comprimento de sobreposição da junta. Constatou-se que o processo de gradação provoca uma redistribuição das tensões  $\sigma_x$  na camada adesiva ao longo de todo o comprimento de sobreposição, evitando os picos de tensão localizados nas extremidades de sobreposição das juntas *standard*, o que se revela benéfico para o aumento da resistência e capacidade de carga da junta.

Esta técnica é uma alternativa bastante atrativa em estruturas compósitas/laminadas, visto que as tensões  $\sigma_y$  e especialmente  $\tau_{xy}$  diminuem, obtendo-se juntas com distribuições de tensões mais uniformes e com melhor desempenho.

### 2.3.5 Utilização de degraus na zona de sobreposição

As juntas adesivas que utilizam degraus na zona de sobreposição são genericamente designadas por juntas em degrau (*stepped-lap joint*), tratando-se de um tipo particular

de geometria que se encontra em fase de estudo e desenvolvimento das suas possíveis aplicações.

Neste subcapítulo descrevem-se com detalhe alguns dos trabalhos científicos mais relevantes realizados até ao momento no âmbito deste tipo de configuração de junta.

No campo das juntas em degrau, foi desenvolvido por Ichikawa et al. [62] um trabalho numérico onde se pretende analisar a distribuição de tensões e realizar a previsão da resistência deste tipo de junta quando sujeita à tração. No trabalho numérico realizado através do MEF tridimensional, Ichikawa et al. [62] estudaram a influência dos seguintes parâmetros na distribuição de tensões e resistência da ligação:

- Espessura do adesivo;
- Número de degraus.

A análise EF recorreu ao *software* ANSYS®, considerando o regime elasto-plástico de deformação do adesivo, e consistiu no estudo da distribuição de tensões nas interfaces e da previsão de resistência da junta. Para validação dos resultados numéricos obtidos e avaliação da capacidade do MEF aplicado na previsão da resistência, foi realizado ensaio experimental onde se registaram os valores das deformações e respetivos valores de carga de rotura da ligação, para comparação e discussão de resultados.

Na Figura 35 mostra-se a geometria do modelo tridimensional implementado no MEF aplicado no estudo de Ichikawa et al. [62] no cálculo da distribuição de tensões e na previsão da resistência da junta adesiva em degrau quando sujeita à tração. Igualmente, é definido o sistema de eixos cartesianos ( $x$ ,  $y$ ,  $z$ ) adotado no presente estudo, e são expostas as condições fronteira nas quais este foi parametrizado.

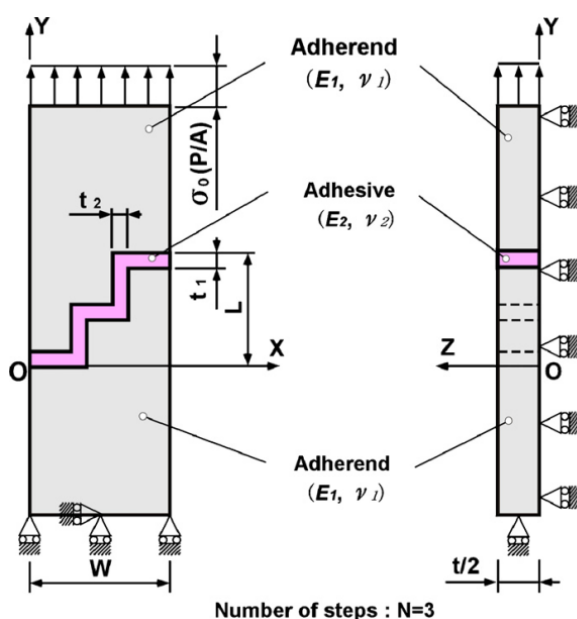


Figura 35 – Esquema do modelo implementado nos cálculos EF [62].

Conforme se observa na Figura 35, encontram-se definidos diferentes tipos de variáveis/parâmetros, que se identificam na Tabela 3.

Tabela 3 – Parâmetros mecânicos e geométricos definidos no estudo de Ichikawa et al. [62].

Parâmetro	Dimensão
$E_1$	Módulo de Young do aderente
$\nu_1$	Coefficiente de Poisson do aderente
$E_2$	Módulo de Young do adesivo
$\nu_2$	Coefficiente de Poisson do adesivo
$t_1$	Espessura do adesivo na direção segundo eixo $y$ (camada adesiva transversal ao carregamento)
$t_2$	Espessura do adesivo na direção segundo eixo $x$ (camada adesiva longitudinal ao carregamento)
$N$	Número de degraus
$W$	Largura do provete
$t$	Espessura do provete

Para determinar a resistência da junta quando sujeita a tensões de tração, os cálculos desenvolvidos no MEF foram executados no intervalo elasto-plástico do adesivo. A resistência da junta foi prevista pelo critério da tensão principal máxima, ou seja, quando o valor da tensão principal máxima ( $\sigma_1$ ) na extremidade da interface do adesivo atinge a tensão de rotura do adesivo ( $\sigma_c$ ) sujeito à tensão tração ( $\sigma_0$ ), este valor da tensão de tração ( $\sigma_0$ ) é definido como sendo o valor da resistência da junta. Para verificação dos resultados obtidos pelo MEF, foram realizados ensaios experimentais com o objetivo de comparar os valores de deformação e resistência.

Na Figura 36(a) mostra-se o gráfico relativo à distribuição de cada componente de tensão na interface do adesivo transversal ao carregamento. A abcissa é normalizada pela distância  $x/W$  da junta e a ordenada representa o valor de cada componente de tensão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$ .

Na Figura 36(b) representa-se o gráfico obtido pelo MEF relativo à distribuição de cada componente de tensão na interface do adesivo longitudinal ao carregamento. A abcissa é normalizada pela distância  $y/L$  da junta e a ordenada representa o valor das componentes de tensão  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$ .

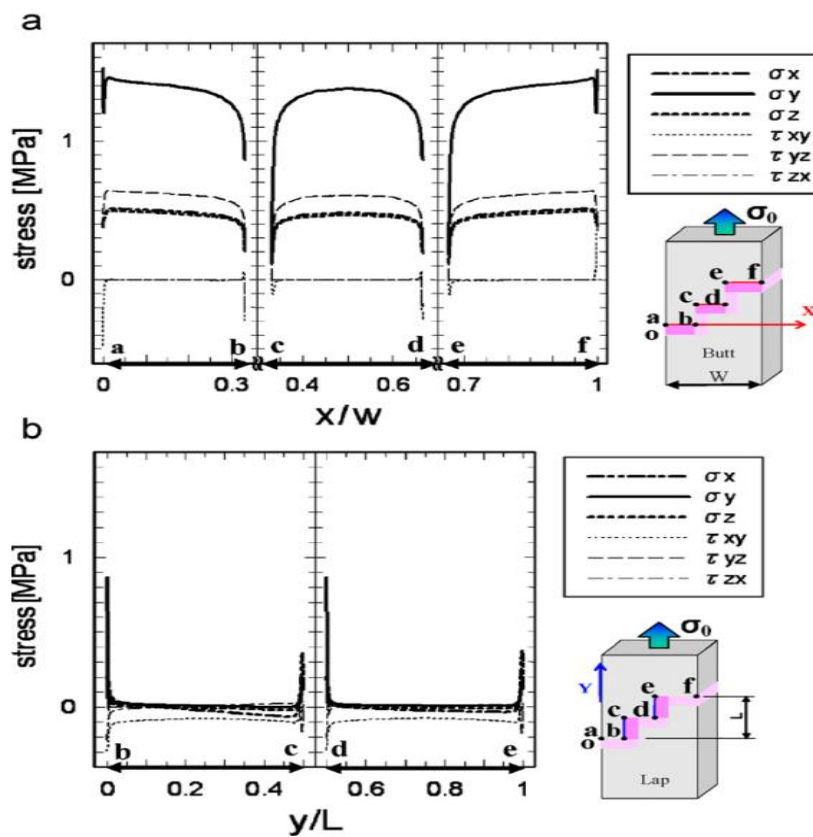


Figura 36 – Distribuição de cada componente de tensão: (a) interface adesiva transversal ao carregamento; (b) interface adesiva de longitudinal ao carregamento [62].

Pela análise dos gráficos pode observar-se que a componente de tensão  $\sigma_y$  é maior nas interfaces do adesivo transversais ao carregamento, uma vez que a direção da componente de tensão  $\sigma_y$  é a mesma que a da direção da carga ( $\sigma_0$ ). Por outro lado, verifica-se que a componente de tensão  $\sigma_y$  na interface longitudinal ao carregamento do adesivo é aproximadamente nula ao longo do comprimento de sobreposição, com exceção das suas extremidades em que se verificam picos de tensão. Desta forma, e uma vez que o valor de componente de tensão na interface do adesivo transversal ao carregamento é maior que o verificado na interface longitudinal, conclui-se que o processo de rotura da junta se inicia nas arestas exteriores da interface do adesivo transversal ao carregamento.

A Figura 37 mostra o gráfico obtido pelo MEF relativo à normalização da distribuição da tensão principal máxima  $\sigma_1/\sigma_0$ , na interface superior (*upper*) e inferior (*lower*) e respetivo plano médio (*middle*) da camada adesiva transversal ao carregamento. A abcissa é normalizada pela distância  $x/W$  na direção segundo o eixo  $x$  e a ordenada representa o valor normalizado da máxima tensão principal  $\sigma_1/\sigma_0$ .

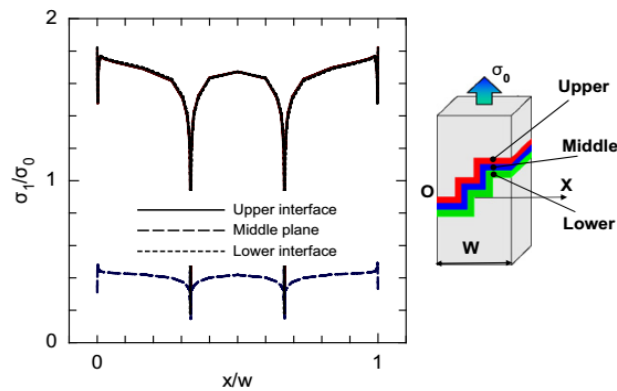


Figura 37 – Distribuição da tensão principal máxima normalizada nas interfaces transversais ao carregamento superior, inferior e plano médio do adesivo [62].

Pela análise gráfica é verificado que a máxima tensão principal normalizada  $\sigma_1/\sigma_0$  atinge o seu valor máximo nas extremidades da interface do adesivo superior. No que diz respeito às tensões instaladas no plano médio e interface inferior da camada adesiva, estas assumem valores relativamente baixos comparativamente com interface adesiva superior. De referir que a diferença entre a distribuição de tensões entre a interface transversal ao carregamento superior e inferior é inferior a 1%.

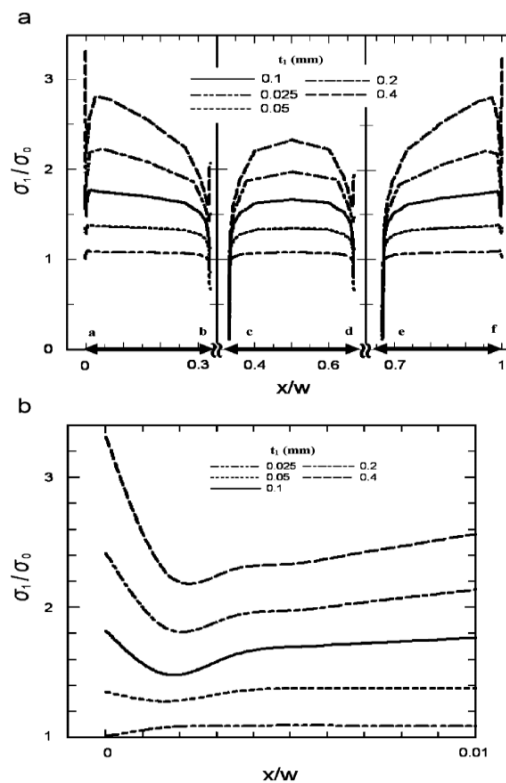


Figura 38 – Efeito da espessura de adesivo  $t_1$  na máxima tensão principal normalizada  $\sigma_1/\sigma_0$ : (a) na interface adesiva transversal ao carregamento superior; (b) perto da face ( $x/w=0$ ) [62].

O gráfico da Figura 38(a) mostra o efeito da variação da espessura  $t_1$  de adesivo na distribuição da tensão principal máxima normalizada  $\sigma_1/\sigma_0$  nas interfaces transversais ao carregamento do adesivo. A espessura  $t_1$  foi feita variar entre 0,05; 0,1; 0,2 e 0,4 mm nos modelos processado pelo MEF. Como se pode observar pela Figura 38(a) os picos de tensão localizam-se no ponto “a” ( $x/W=0$ ) e no ponto “f” ( $x/W=1$ ).

A Figura 38(b) mostra a evolução gráfica do efeito da variação da espessura de adesivo  $t_1$  na distribuição de tensões normalizadas  $\sigma_1/\sigma_0$  perto da aresta da interface do adesivo transversal ao carregamento. A tensão máxima normalizada  $\sigma_1/\sigma_0$  decresce à medida que o valor de  $t_1$  decresce, o que leva a concluir que, em termos de resistência da junta, esta pode ser aumentada pela diminuição da espessura  $t_1$  do adesivo.

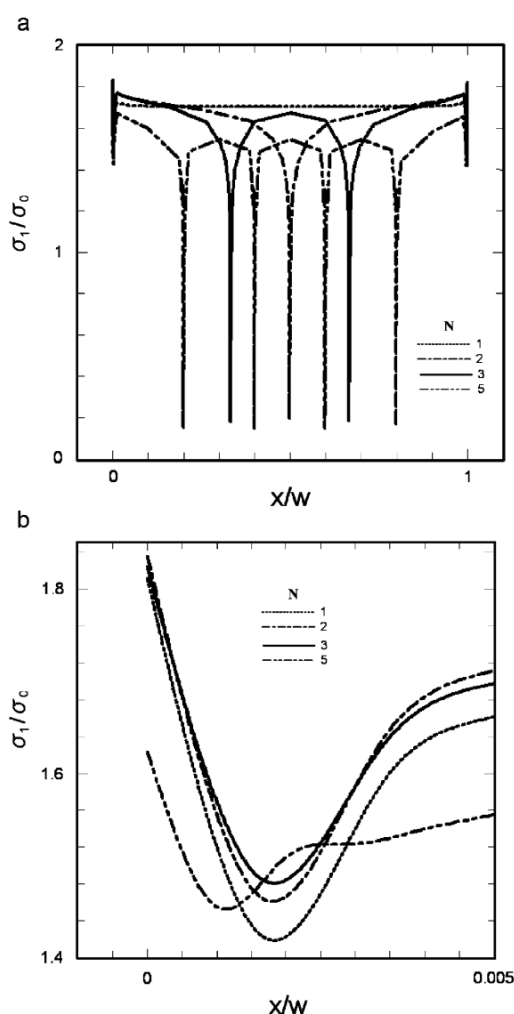


Figura 39 – Efeito do número de degraus  $N$  na máxima tensão principal normalizada  $\sigma_1/\sigma_0$ : (a) na interface de adesivo transversal ao carregamento; (b) perto da extremidade ( $x/W=0$ ) [62].

Também foi verificado o efeito da variação do número de degraus ( $N$ ) da junta. Na Figura 39(a) mostra-se o efeito da variação do número de degraus na distribuição da tensão

principal máxima  $\sigma_1/\sigma_0$  nas interfaces transversais ao carregamento do adesivo. O número de degraus foi variado entre 1, 2, 3 e 5 no estudo numérico. Como se verifica, os picos de tensão encontram-se no ponto “a” ( $x/W=0$ ) e no ponto “f” ( $x/W=1$ ).

A Figura 39(b) mostra a evolução da distribuição de tensões normalizadas  $\sigma_1/\sigma_0$  perto da aresta da interface transversal ao carregamento do adesivo em função da variação de número de degraus da junta. Como se pode verificar, o valor de  $\sigma_1/\sigma_0$  perto da aresta decresce à medida que o número de degraus aumenta, o que leva a concluir que a resistência da junta sujeita a tensões de tração pode ser aumentada com aumento do número de degraus.

A resistência das juntas em degrau foi prevista usando o critério tensão principal máxima. A Figura 40 mostra a distribuição da tensão principal máxima  $\sigma_1$  na interface transversal ao carregamento do adesivo junto da aresta ( $x/W=0$ ). Quando a junta é sujeita a uma tensão estática de  $\sigma_0=28$  MPa, a máxima tensão principal na aresta da interface do adesivo atinge a sua tensão de rotura  $\sigma_c=50.96$  MPa. Em resultado do estudo numérico, a resistência de uma junta em degrau foi estimada em 28 MPa.

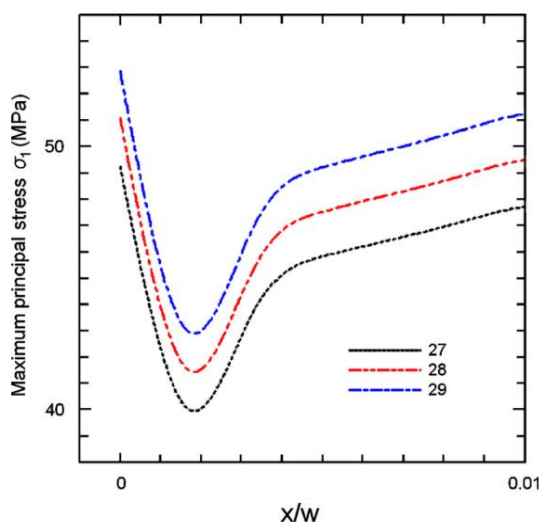


Figura 40 – Distribuição da máxima tensão principal junto da extremidade da interface transversal ao carregamento [62].

Relativamente às deformações sofridas, a Figura 41 mostra o gráfico comparativo das deformações numéricas e experimentais registadas com recurso a extensómetros colados ao longo da camada adesiva da junta. A ordenada no gráfico representa a deformação  $\varepsilon_y$  na direção segundo  $y$  e a abcissa representa o valor da largura normalizada da junta  $x/W$ .

Pela análise gráfica, considera-se que foi obtida uma boa concordância entre deformações previstas numericamente e registadas experimentalmente nos pontos de

medição dos extensômetros, que valida desta forma a capacidade do MEF na previsão da deformação.

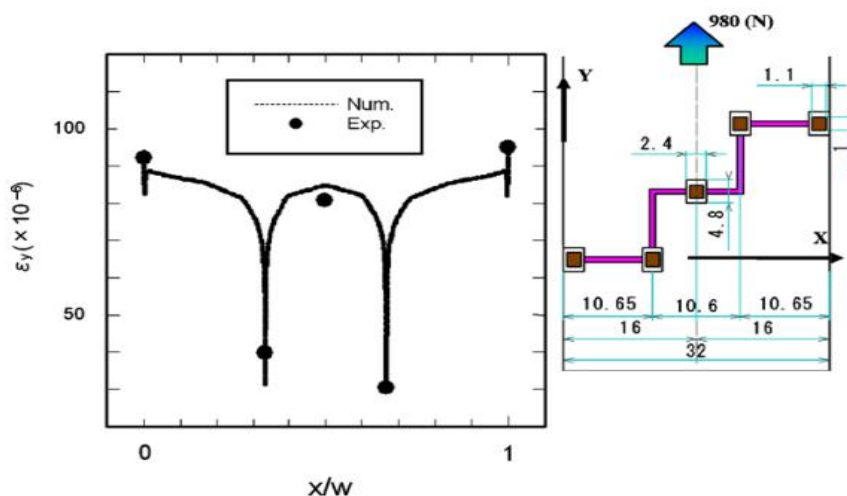


Figura 41 – Comparação das deformações experimentais vs. numéricas obtidas por EF [62].

O valor apurado no estudo numérico pelo MEF relativo à resistência da junta foi de 28 MPa, enquanto a resistência apurada experimentalmente foi de aproximadamente 29 MPa, o que reforça inequivocamente a capacidade da técnica EF na previsão das propriedades das juntas adesivas.

Seguidamente expõe-se outro trabalho levado a cabo no âmbito do estudo de juntas adesivas em degrau, desenvolvido por Akpinar [63]. Neste trabalho, pretende-se analisar e comparar o comportamento e desempenho de três configurações geométricas distintas pelo MEF, mantendo constante a área de colagem. As configurações de junta em análise neste trabalho foram:

- JSS (Type-I);
- Junta em degrau de 1 degrau (Type-II);
- Junta em degrau de 3 degraus (Type-III).

Por outro lado, o presente estudo pretende igualmente avaliar a influência do tipo de adesivo na resistência da junta. Para o efeito, foram testados dois tipos de adesivos: um adesivo dúctil e um adesivo rígido frágil. No que diz respeito ao adesivo de caráter rígido o escolhido foi o bi-componente DP460 produzido pela 3M®, já o adesivo dúctil selecionado foi o adesivo do tipo filme SBT9244 da 3M®. Relativamente ao material dos aderentes, foi selecionada a liga de alumínio AA2024-T3.

De forma a validar os resultados numéricos obtidos pela técnica EF, foram realizados testes experimentais para comparação e discussão de resultados. As configurações geométricas e parâmetros experimentais das juntas em análise são apresentadas na

Figura 42. De salientar que, apesar de serem analisadas três configurações distintas, o presente estudo contempla a utilização de provetes com aderentes da mesma espessura, comprimento e largura.

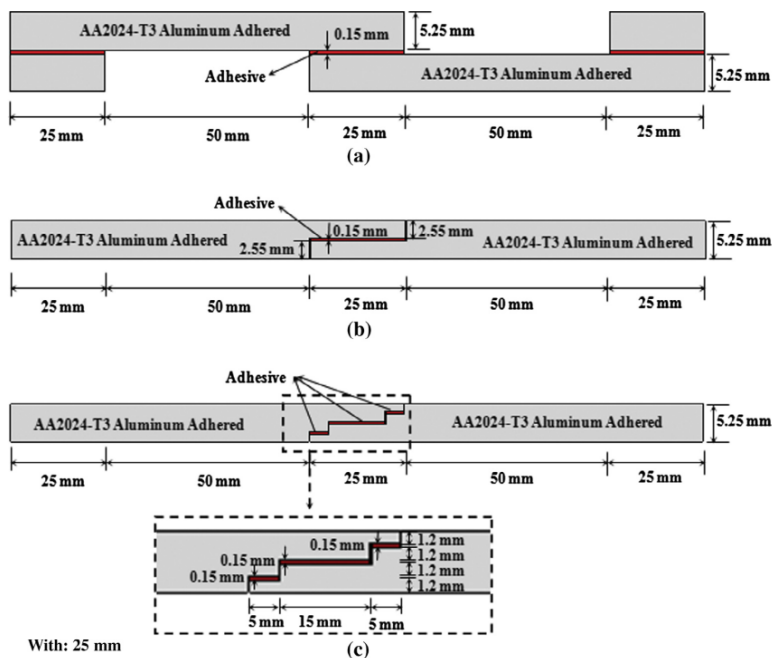


Figura 42 – Parâmetros geométricos das juntas adesivas: (a) JSS (Type-I), (b) junta de 1 degrau (Type-II), (c) junta de 3 degraus (Type-III) [63].

Em termos de procedimento experimental, as juntas foram solicitadas à tração com uma velocidade de 1 mm/min. De salientar que, para cada geometria, as condições fronteira (*setup* de montagem) e carga aplicada foram sempre as mesmas.

Para modelação das geometrias em análise pela técnica EF, foi escolhido o *software* ANSYS®. A análise de tensões nas juntas foi realizada usando um modelo não linear tridimensional, no qual se considera a não-linearidade do comportamento dos materiais e não-linearidades geométricas. A parametrização 3D contempla igualmente o emprego de malha refinada nas zonas críticas da junta (região de colagem). O modelo material implementado no estudo pelo-MEF foi o de endurecimento isotrópico multi-linear de von Mises. Já no que diz respeito ao cálculo da tensão equivalente  $\sigma_{eq}$  e da deformação equivalente  $\varepsilon_{eq}$  da camada adesiva e dos aderentes, o modelo recorre ao critério de cedência de von Mises na sua determinação.

A Figura 43 representa as tensões de rotura experimentais das diferentes geometrias em função do adesivo empregue. Na Figura 44 apresentam-se os gráficos da força-deslocamento obtidos para cada condição geométrica e de colagem.

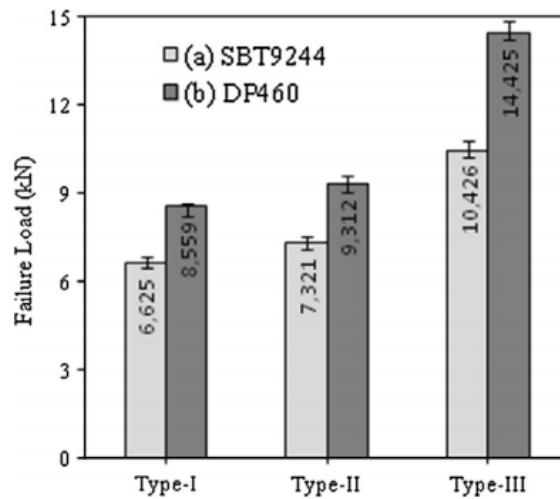


Figura 43 – Média das tensões máximas de rotura das juntas adesivas obtidas experimentalmente [63].

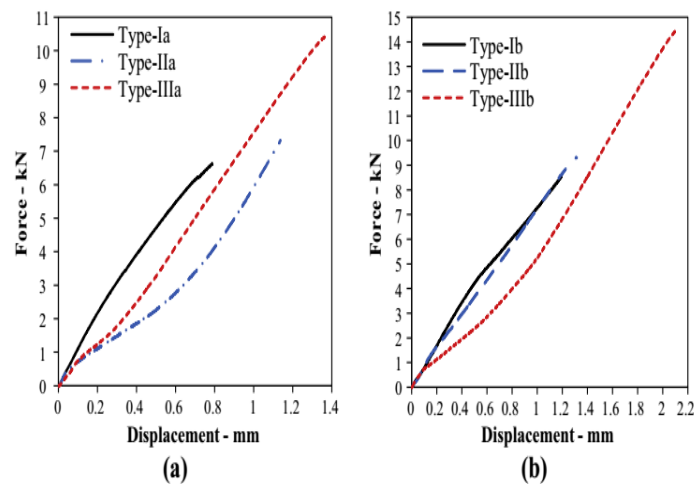


Figura 44 – Relação entre a força de rotura e deslocamento para as diversas geometrias obtidas experimentalmente: (a) para provetes colados com adesivo SBT9244, (b) para provetes colados com adesivo DP460 [63].

Numa análise preliminar dos valores das tensões de rotura expostas na Figura 43, verifica-se que as juntas em degrau apresentam maior capacidade de carga que a JSS, independentemente do tipo de adesivo utilizado.

Atendendo ao gráfico da Figura 43, e comparando a JSS (Type-I) e a junta em degrau (Type-II) colada com adesivo dúctil SBT9244, verifica-se que o minimizar do efeito do momento fletor, que se desenvolve na JSS (Type-I) devido à excentricidade da carga, resulta num substancial aumento quantitativo de resistência, cerca de 11%. Embora o incremento de resistência verificado não seja de grandeza consideravelmente elevada,

tal facto pode ser relacionado com a redução da rigidez devido à diminuição da espessura do aderente na zona de sobreposição da junta em degrau.

Quando se procede à comparação da JSS (Type-I) com a junta em degrau de 3 degraus (Type-III), verifica-se um aumento de cerca de 60% na resistência à rotura da junta, o que demonstra um aumento bastante apreciável.

No que se refere às tensões de arrancamento (*peel*), comparando a JSS (Type-I) com a junta em degrau (Type-II), verifica-se que a tensão de arrancamento ocorre nas arestas de sobreposição da junta, que origina o aparecimento de fendas que rapidamente se propagam para o centro da área de sobreposição, que provocam a rotura da ligação. Para a junta em degrau (Type-III) a tensão de arrancamento ocorre perto da aresta da zona de sobreposição. Mais tarde o mecanismo de dano volta a ocorrer, ou seja, dá-se uma vez mais o aparecimento da tensão de arrancamento, resultando numa nova fenda que se propaga instantaneamente. Este mecanismo de dano faseado permite que a resistência da junta seja incrementada significativamente, pois a rotura é retardada pela descontinuidade de planos da junta em degrau no desenvolvimento e propagação do mecanismo de dano.

Relativamente aos resultados obtidos nas juntas com adesivo frágil DP460 em termos de resistência, verifica-se que a junta em degrau (Type-II) e a junta em degrau (Type-III) veem aumentadas a sua resistência em 8,8% e 68%, respetivamente, quando comparadas com a JSS (Type-I).

As curvas força-deslocamento ilustradas na Figura 44 mostram que a minimização do efeito do momento fletor, originado pela excentricidade da carga na JSS (Type-I), traduz-se num aumento da capacidade de carga e deformação das juntas em degrau.

No que diz respeito aos resultados numéricos do estudo desenvolvido por Akpınar [63], é assumido que a tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ), calculada pelo critério de von Mises, tem em linha de conta que a rotura da junta ocorre quando a tensão equivalente  $\sigma_{eq}$  calculada em qualquer ponto da camada adesiva atinge a tensão de rotura do adesivo.

De acordo com os resultados da análise efetuada pela técnica EF, verifica-se uma boa relação entre os valores numéricos e experimentais, conforme se mostra na Figura 45.

Joint types	Experimental failure load, $F_{EXP}$ (N)	FEA failure load, $F_{FEA}$ (N)	$F_{FEA}/F_{EXP}$
Type I a	6625	6890	1.04
Type I b	8559	8120	0.95
Type II a	7321	7680	1.05
Type II b	9312	9140	0.98
Type III a	10,426	10,730	1.03
Type III b	14,425	14,050	0.97

Figura 45 – Comparação de resultados numéricos e experimentais das cargas de rotura das juntas [63].

Na Figura 46 e Figura 47 mostram-se os resultados obtidos na análise numérica efetuada pela técnica EF relativos às tensões de arrancamento  $\sigma_y$  e de corte  $\tau_{xy}$ , em função do adesivo de colagem.

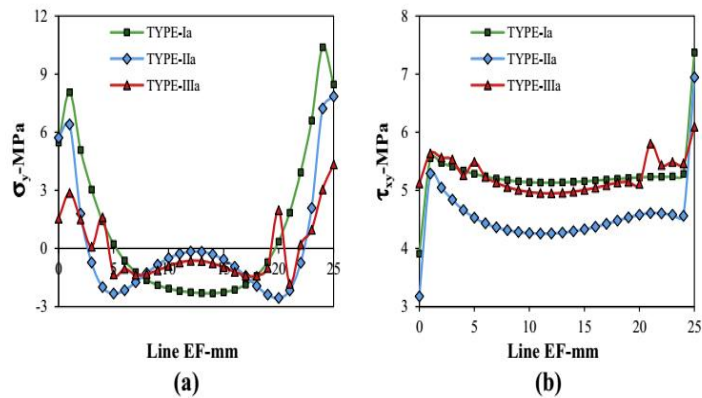


Figura 46 – Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo SBT9244: (a) tensão de arrancamento ( $\sigma_y$ ), (b) tensão de corte ( $\tau_{xy}$ ) [63].

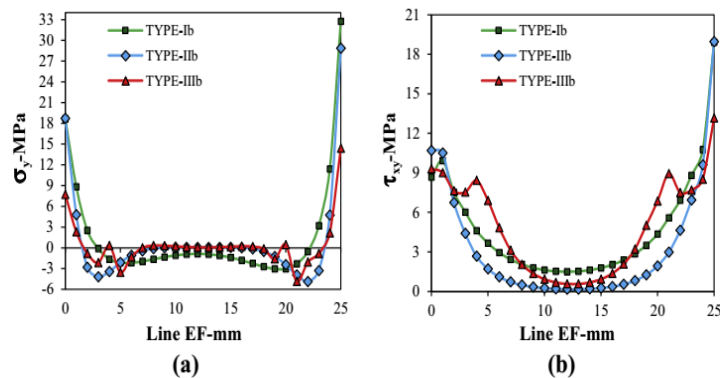


Figura 47 – Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva ao longo da linha EF para juntas coladas com adesivo DP460: (a) tensão de arrancamento ( $\sigma_y$ ), (b) tensão de corte ( $\tau_{xy}$ ) [63].

Pela análise dos gráficos obtidos (Figura 46 e Figura 47), pode ser observado que os locais críticos onde a concentração de tensões ocorre e atinge o seu valor máximo localiza-se nas extremidades de sobreposição da junta.

Relativamente à distribuição de tensões de arrancamento nas juntas coladas com adesivo SBT9244 (Figura 46(a)), verifica-se que estas assumem o seu valor máximo nas suas extremidades, e decrescem à medida que se progride para região central da zona de colagem, onde assumem valores compressivos. Este tipo de comportamento é mais evidente na JSS (Type-I). Nas juntas em degrau na região central de colagem o efeito de compressão não é tão patente, uma vez que o momento fletor originado pela excentricidade da carga se encontra atenuado.

Além disso, com a execução de degraus, verifica-se uma diminuição da tensão de arrancamento nas zonas localizadas nas extremidades de sobreposição, o que é benéfico, uma vez que as tensões de arrancamento são um fator preponderante no início do dano da junta adesiva.

No que diz respeito à tensão de corte que se desenvolve ao longo do comprimento de sobreposição, esta assume o seu máximo no ponto  $F$  e o seu mínimo no ponto  $E$ . Comparando a JSS (Type-I) com a junta em degrau (Type-II), verifica-se uma diminuição ligeira do pico de tensão máximo e mínimo da tensão de corte. Já na junta em degrau verifica-se uma diminuição drástica do pico de tensões de corte nas extremidades, comparativamente com as restantes configurações. Além disso, a junta em degrau (Type-III) apresenta uma distribuição mais homogénea da tensão de corte ao longo da junta.

Na Figura 47(a) e (b) são mostrados os gráficos de distribuição de arrancamento e de corte, respetivamente, para juntas coladas com adesivo DP460.

Relativamente ao desenvolvimento das tensões de arrancamento, verifica-se que o pico de tensão se localiza no ponto  $F$ , em todas as juntas. A tensão de arrancamento diminui à medida que se progride para região central da área de colagem de sobreposição, assumindo valor nulo nessa região. Em todo caso, à medida que se incrementa o número de degraus verifica-se uma diminuição das tensões de arrancamento de pico.

Relativamente à tensão de corte, verifica-se que esta não apresenta distribuição homogénea ao longo do comprimento de sobreposição. Nestes casos, a tensão de corte assume o seu valor máximo no ponto  $F$  e o seu valor mínimo surge na região central da zona de colagem. Outro fenómeno que se verifica é o deslocar dos picos de tensão de corte das extremidades para as zonas mais internas da zona de colagem no caso da junta em degrau (Type-III).

Perante os resultados numéricos do estudo, verifica-se o aumento da resistência das juntas em degrau comparativamente com a junta de sobreposição, uma vez que para a mesma solicitação de tração, os valores de pico das tensões de arrancamento e corte diminuem.

### 2.3.6 Outras alterações

Como já anteriormente referido na secção 2.1.3, os esforços de arrancamento e clivagem devem ser evitados e isto pode ser conseguido do ponto de vista do design mecânico da junta com recurso a algumas estratégias, como evidenciado na Figura 48 [1].

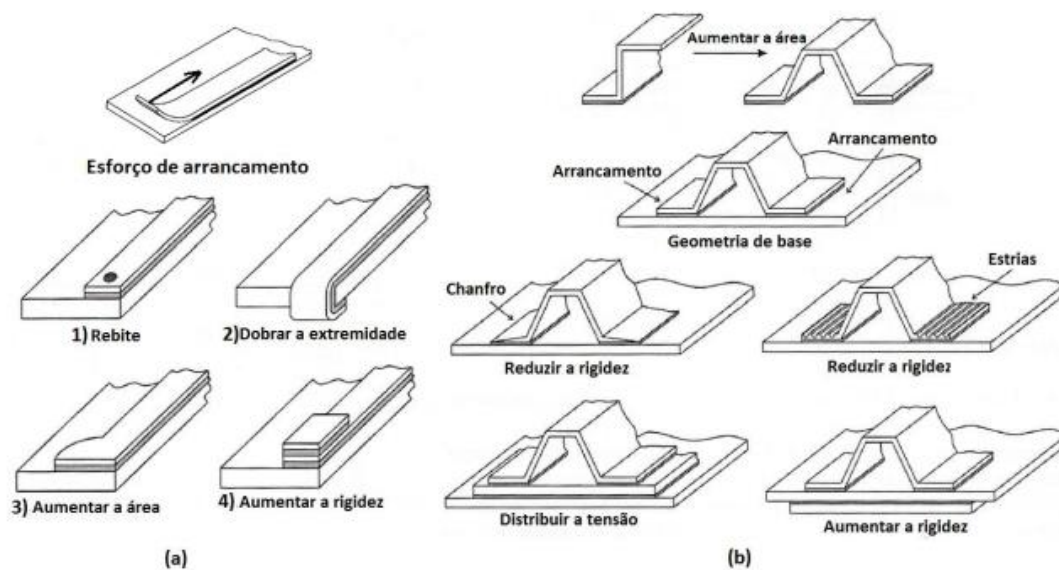


Figura 48 – Estratégias de configuração de junta para evitar esforço: (a) arrancamento e (b) clivagem [1].

Na Figura 48(a) mostram-se algumas estratégias utilizadas para minimizar esforços de arrancamento, bem como a prática mais comum para se conseguir aumento da rigidez, em aderentes finos, através da colagem de reforços sobre a superfície destes. Contudo, nestes casos, as solicitações de flexão podem eventualmente induzir clivagem no adesivo.

Na Figura 48(b) apresentam-se as soluções aplicadas na concepção das juntas reforçadas para minimizar efeitos de clivagem. Desta forma consegue-se melhorar a resistência às forças de flexão pelo aumento da área de colagem.

# DESENVOLVIMENTO

**3.1 Trabalho experimental**

**3.2 Trabalho numérico**



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Trabalho experimental

Neste subcapítulo aborda-se o trabalho experimental realizado no âmbito da presente dissertação. Em primeiro lugar é realizada uma apresentação detalhada dos materiais utilizados na execução das juntas, onde se referem as suas principais características mecânicas. Seguidamente especificam-se as dimensões geométricas das juntas em análise, e descrevem-se com detalhe as várias etapas do processo de fabrico dos provetes. De referir que no âmbito do presente trabalho foram realizados 5 provetes por geometria, de modo a garantir uma amostragem que confira um grau de confiança satisfatório ao estudo. Em último lugar, são definidas as condições de ensaio e apresentados os resultados obtidos no que concerne aos modos de rotura, curvas  $P-\delta$ , resistência das juntas e respetiva análise e comentário de resultados.

#### 3.1.1 Materiais utilizados

Nesta secção é realizada uma apresentação detalhada dos materiais utilizados no trabalho experimental, mais concretamente no que se refere ao material dos substratos e adesivos.

##### 3.1.1.1 Substratos

Os provetes foram produzidos a partir da liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida como liga estrutural da série 6000, com magnésio e silício como principais elementos de liga (Tabela 4). A escolha desta liga de alumínio deve-se à vasta utilização na produção de componentes estruturais a partir de perfis extrudidos, ou em peças obtidas por maquinagem.

Tabela 4 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [64].

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
% Mínimo	0,70	0,60	0,40	0	0	0	0	0	----
% Máxima	1,30	1,20	1,00	0,50	0,25	0,20	0,10	0,05	Resto

A sua ampla utilização deve-se a propriedades como a elevada resistência à tração (mínimo de 300 MPa, especificado pelo fabricante), obtida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de aproximadamente 180°C (Tabela 5).

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651; dados do fabricante [64].

Espessura [mm]	Tensão de rotura mínima [MPa]	Tensão de cedência 0,2% mínima [MPa]	Alongamento mínimo [%]	Dureza Brinell	Módulo de elasticidade [GPa]
3,00	300	255	9	91	70

As juntas adesivas de componentes de alumínio são normalmente usadas nas indústrias de aeronáutica e automóvel [16], onde propriedades como a elevada energia de superfície, assim como a sua relação resistência/peso, fazem deste tipo de material uma boa solução.

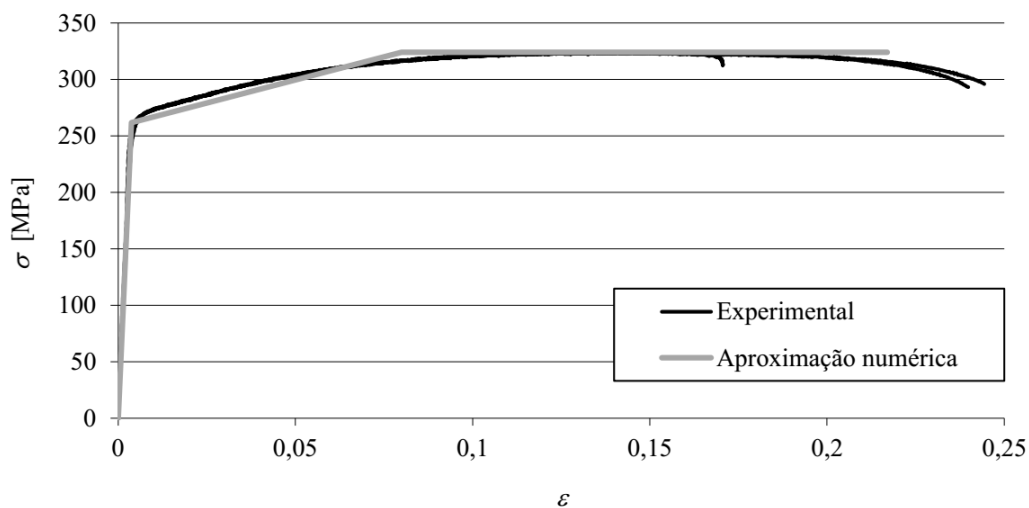


Figura 49 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW 6082-T651 [65].

Campilho et al. [65] caracterizaram esta liga de alumínio à tração, de acordo com a norma ASTM E8M [66], onde registaram as seguintes propriedades:  $E=70,07 \pm 0,83$  GPa,  $\sigma_y=261,67 \pm 7,65$ , tensão de rotura ( $\sigma_f$ ) de  $324,00 \pm 0,16$  MPa e deformação de rotura à tração ( $\epsilon_f$ ) de  $21,70 \pm 4,24\%$ . A Figura 49 mostra as curvas de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) desta liga e respetiva aproximação numérica.

### 3.1.1.2 Adesivos

Todos os adesivos utilizados nos ensaios são de bi-componente (resina + endurecedor), dois de base epóxico e um de base de poliuretano. Os três adesivos apresentam uma

viscosidade baixa, o que facilita a sua deposição nas superfícies a ligar, permitindo variar facilmente a espessura de adesivo e colmatar alguma falta de planeza dos substratos [64].

### 3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138 (Figura 51), fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência (Figura 50 e Tabela 6), e é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [67].

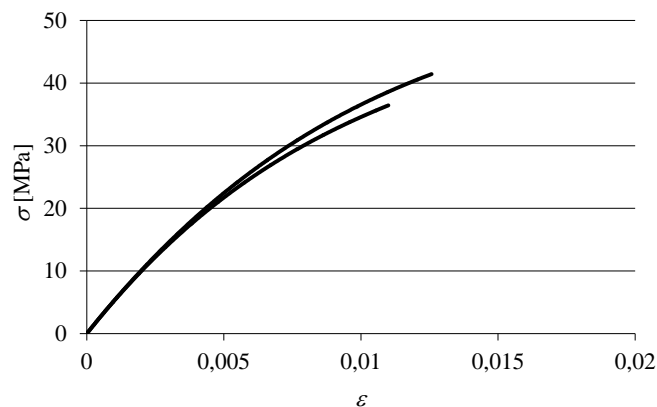


Figura 50 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [67].

Este adesivo de base epóxico, termoendurecível, é composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 51). Este adesivo é fornecido em duas embalagens e, como tal, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes, utilizando uma balança digital. A relação de mistura utilizada neste adesivo é de 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de  $\pm 5\%$ . Este adesivo apresenta-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis [64].



Figura 51 – Adesivo Araldite® AV138 [64].

Tabela 6 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [67, 68].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, $E$ [GPa]	4,89 ± 0,81
Coefficiente de Poisson, $\nu^b$	0,35
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	36,49 ± 2,47
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	39,45 ± 3,18
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	1,21 ± 0,10
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	1,56 ± 0,01
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	25,1 ± 0,33
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	30,2 ± 0,40
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	7,8 ± 0,7
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	0,20 <sup>a</sup>
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	0,38 <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Valores estimados na referência [68]; <sup>b</sup> Valores do fabricante

### 3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo estrutural Araldite® 2015, igualmente fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pela baixa contração, comportamento moderadamente dúctil e alta resistência ao corte e à clivagem. É um adesivo de base epóxico, termoendurecível, composto por dois componentes e fornecido em cartucho (Figura 52). Este adesivo é composto por resina e endurecedor, e aplica-se com uma pistola manual, o que permite de forma simples e fácil aplicar o adesivo com recurso a um bico que mistura os dois componentes em quantidades iguais. Apresenta-se como uma pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente.



Figura 52 – Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml [64].

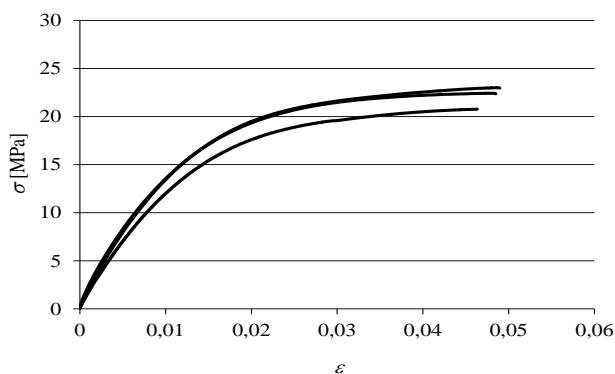


Figura 53 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [67].

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona ou isopropanol (para plásticos), a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 53 [67].

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensão. A Tabela 7 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo [67].

Tabela 7 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [67].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, $E$ [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, $\nu^a$	0,33
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	$14,6 \pm 1,3$
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	$17,9 \pm 1,8$
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	$43,9 \pm 3,4$
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$

<sup>a</sup> Valores do fabricante

### 3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo estrutural Sikaforce® 7752 é fornecido pela empresa Sika® em dois componentes separados, e caracteriza-se pela sua base de poliuretano estrutural tixotrópico (Figura 54). A sua resina polioli com cargas e endurecedor de base isocianato possui uma baixa emissão de gases e perdas voláteis, e oferece uma boa resistência a altas temperaturas [64].



Figura 54 – Adesivo Sikaforce® 7752 [64].

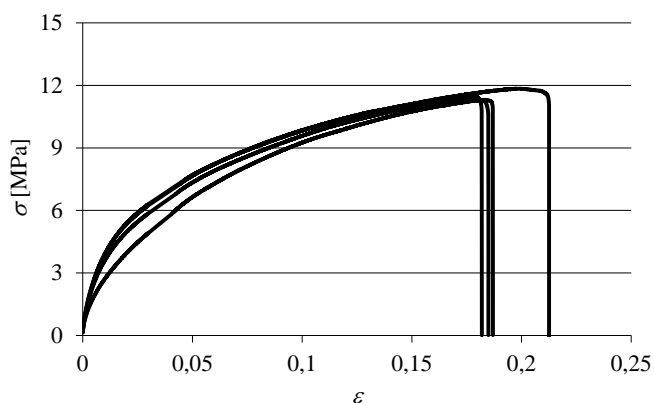


Figura 55 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [69].

O Sikaforce® 7752 é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, com grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas. Este adesivo encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 55 [69]. Na Tabela 8 são indicados os principais valores das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [69].

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, $E$ [GPa]	$0,49 \pm 0,09$
Coefficiente de Poisson, $\nu^a$	0,30
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	$19,18 \pm 1,40$
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	$5,16 \pm 1,14$
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	$10,17 \pm 0,64$
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	$54,82 \pm 6,38$
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	$2,36 \pm 0,17$
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	$5,41 \pm 0,47$

<sup>a</sup> Valores do fabricante

### 3.1.2 Geometria das juntas

A junta adesiva em estudo com geometria em degrau encontra-se representada esquematicamente na Figura 56.

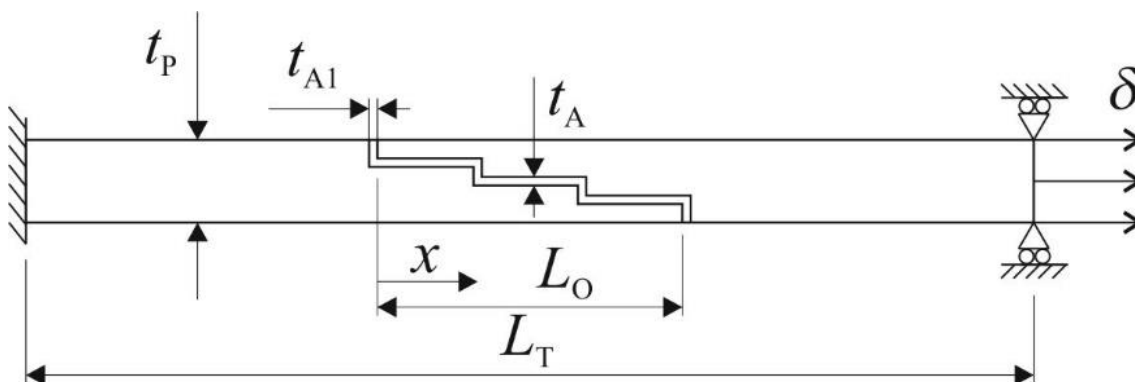


Figura 56 – Esquema representativo da geometria de junta em degrau e respectivas condições fronteira.

Na Tabela 9 definem-se os parâmetros de cota presentes na Figura 56 para as 4 configurações de junta contempladas no presente estudo.

Tabela 9 – Parâmetros usados na geometria de junta.

Parâmetro	Valor
Número de degraus ( $N$ )	3
Espessura do substrato ( $t_p$ )	3 mm
Espessura de adesivo longitudinal ao carregamento ( $t_A$ )	0,2 mm
Espessura de adesivo transversal ao carregamento ( $t_{A1}$ )	0,2 mm
Comprimento de sobreposição ( $L_0$ )	12,5; 25; 37,5 e 50 mm
Comprimento total do provete ( $L_T$ )	170 mm

### 3.1.3 Processo de fabrico

Nesta secção descreve-se com detalhe o processo de fabrico das juntas em degrau estudadas nesta dissertação, contemplando as seguintes etapas:

- Corte dos substratos;
  - Maquinagem dos degraus;
  - Preparação superficial dos substratos (após maquinagem);
  - Preparação dos adesivos (mistura dos componentes);
  - Colagem das juntas e cura dos adesivos;
  - Acabamento pós-cura das juntas.
- 
- Corte dos substratos

A primeira etapa do processo de fabrico da junta consistiu no corte em comprimento dos substratos usados na sua construção a partir de um perfil retangular extrudido da liga de alumínio AW 6082-T651.

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho foi prevista a realização de 5 provetes por adesivo e valor de  $L_0$  de forma a garantir uma amostragem satisfatória para aferições pós-experimentais. Para o efeito foi necessário proceder ao corte de 60 substratos, cujo comprimento de corte é definido em função de  $L_0$  conforme se designa na Tabela 10.

A operação de corte foi realizada nas oficinas mecânicas do ISEP, num serrote de disco (Figura 57).

Tabela 10 – Comprimento de corte dos substratos.

Comprimento de sobreposição – $L_0$ (mm)	Comprimento Substrato (mm)
12.5	91,25
25.0	97,5
37.5	103,75
50.0	110



Figura 57 – Serrote de disco.

No processo de corte dos substratos foi realizado o *setup* conforme se mostra na Figura 58, onde o batente limitador da mesa da máquina é utilizado para ajustar o comprimento de corte pretendido. Com este *setup*, o processo de corte é realizado com maior rapidez e é assegurada a reprodutível do mesmo.



Figura 58 – Pormenor do *setup* de corte.

- Maquinagem dos degraus

A segunda etapa do fabrico das juntas consistiu na maquinagem dos degraus numa das extremidades dos substratos previamente cortados. Esta operação foi realizada na oficina mecânica do ISEP, na fresadora universal Gambin<sup>SA</sup> modelo 1m (Figura 59), cujos parâmetros de trabalho se encontram definidos na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros de maquinagem (operação fresagem).

Parâmetro	Valor
Avanço	100 mm/min
Velocidade rotação	1120 rot/min



Figura 59 – Fresadora Gambin<sup>SA</sup> modelo 1m.

Para a realização da maquinagem dos degraus, foi efetuado um *setup* na máquina tendo em linha de conta a reprodutibilidade da operação e a polivalência nas várias fases de maquinagem. Para o efeito, com recurso à prensa fixa na mesa da máquina e um varão roscado elaborou-se *setup* conforme se ilustra na Figura 60.

Com este *setup* (Figura 60), é possível apenas com uma amarração do substrato em bruto a realização dos 3 degraus. A montagem realizada na mesa da máquina prevê a utilização de um varão roscado utilizado como batente para ajuste do comprimento livre (fora dos mordentes da prensa) da extremidade a ser maquinada, sendo que desta forma é possível realizar as várias fases da operação de maquinagem apenas com um aperto do substrato.

No *setup* criado, foram considerados calços posicionados na parte inferior dos substratos (Figura 61), prevenindo que estes sofram empenos na zona de maquinagem devido à entrada da fresa na peça.



Figura 60 – *Setup* realizado para operação de maquinagem dos degraus.

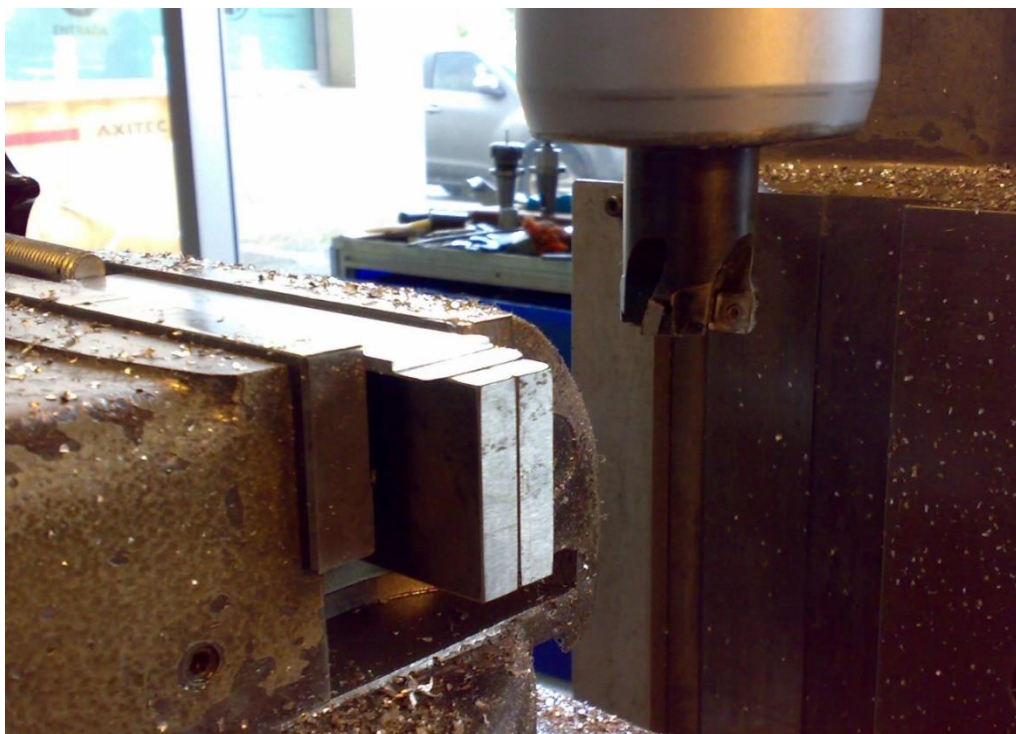


Figura 61 – Pormenor do *setup* de maquinagem, onde se observa o posicionamento de calços na parte inferior substrato.

Para a maquinagem dos degraus foi utilizada uma fresa de aço rápido de 4 navalhas do fabricante de ferramentas DORMER®.

Na Figura 62 apresenta-se um esquema de cotagem genérico para maquinagem dos degraus nos substratos em função de  $L_0$ .

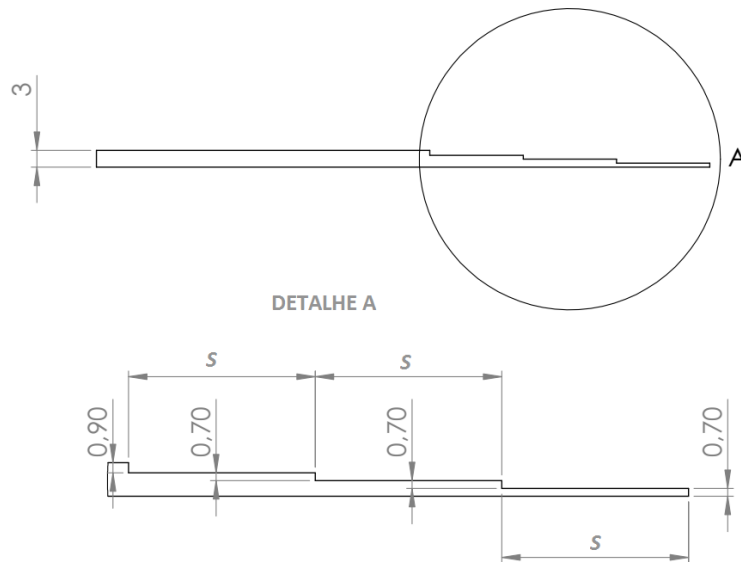


Figura 62 – Esquema de cotagem para efeito de maquinagem.

Na Tabela 12 está definido o parâmetro de cota  $S$  representado na Figura 62 em função do valor de  $L_0$  das geometrias em análise.

Tabela 12 – Parâmetro de cota de maquinagem dos degraus.

Comprimento de sobreposição – $L_0$ [mm]	$S$ [mm]
12,5	4,23
25	8,4
37,5	12,57
50	16,73

- Preparação superficial dos substratos

A terceira etapa do procedimento de fabrico das juntas consiste na preparação superficial dos substratos. Inicialmente nesta fase submete-se a região de colagem dos substratos a uma limpeza superficial cuidada pelo processo passivo mecânico de lixagem (Figura 63). Este método de preparação tem com o propósito a remoção das *weak boundary layers* (i.e., óxidos e revestimentos), que apresentam fraca coesão ou que não

aderem ao substrato ou ao adesivo com resistência suficiente, que comprometem a resistência da junta. No final do processo, pretende-se a remoção das *weak layers* bem como alteração da topografia da superfície dos substratos, conferindo uma rugosidade uniforme. Esta etapa não só proporciona uma melhor molhagem das superfícies por parte do adesivo, como também contribui para uma melhor ancoragem do mesmo.

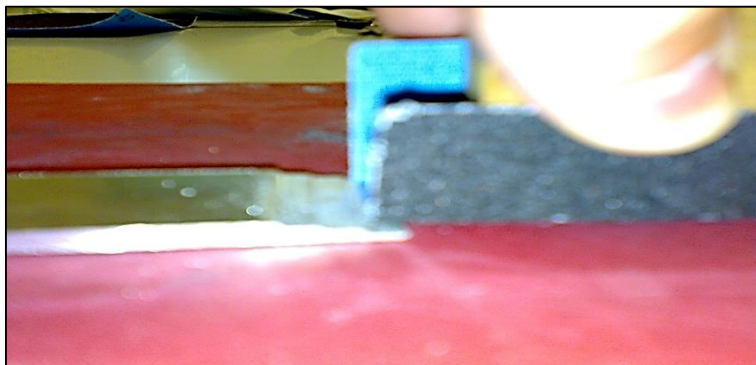


Figura 63 – Pormenor da operação de lixagem da superfície do substrato.

Posteriormente ao tratamento dos substratos por processo de lixagem, estes são sujeitos a uma limpeza manual com acetona, que tem como objetivo remover partículas sólidas deixadas pelo processo de preparação superficial precedente, bem como eliminar vestígios oleosos das superfícies que vão receber adesivo.

Na Figura 64 apresenta-se um conjunto de substratos após conclusão do processo de tratamento superficial.



Figura 64 – Aspeto da superfície dos substratos após tratamento superficial.

- Preparação dos adesivos

De uma forma geral, no processo de produção das juntas a divergência de procedimento deve-se ao modo de preparação, aplicação e cura dos adesivos em estudo: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

De facto, para cada adesivo são seguidas técnicas de preparação diferentes devido às suas características, as quais se passam a definir para cada adesivo:

Para o Araldite® AV138, a preparação da mistura consiste numa proporção de resina/endurecedor de 10 g/4 g. Esta mistura é mexida manualmente até à homogeneização do adesivo. Após a mistura do adesivo, este é aplicado manualmente com recurso a uma espátula sobre a região de colagem.

Por outro lado, a aplicação do adesivo Araldite® 2015, fornecido em bisnagas 50 ml + 50 ml, é realizado através do uso de uma pistola manual de pressão onde a mistura dos componentes é assegurada pelo bico de mistura da própria embalagem. A aplicação na zona de colagem é feita seguindo padrão de zig-zag (Figura 65).

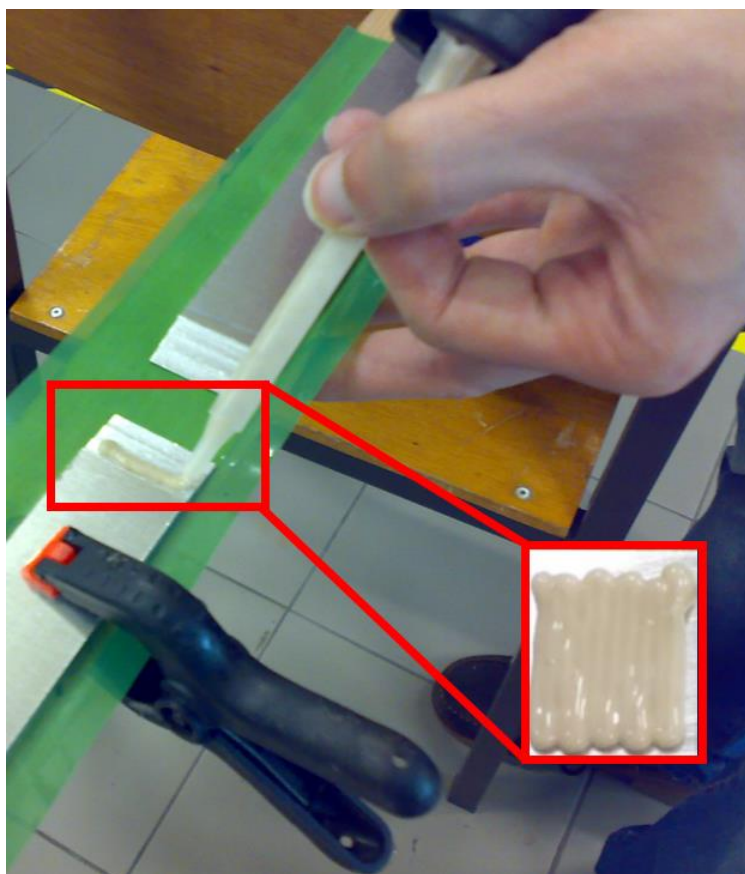


Figura 65 – Pormenor de aplicação adesivo Araldite® 2015.

O Sikaforce® 7752 L60 é um adesivo constituído por dois componentes, fornecido em duas embalagens separadas, uma de resina e outra de endurecedor (Figura 54). A mistura de resina/endurecedor é feita na razão de peso de 5 g/1 g, respetivamente. Após a pesagem e colocação dos componentes num recipiente para a mistura, deve-se proceder à mesma manualmente, durante tempo suficiente para se obter uma mistura homogénea do adesivo. A sua aplicação é realizada através da utilização de uma espátula, que permite espalhar o adesivo sobre a região de colagem.

De ressaltar que para a execução das juntas assegurou-se que quantidade de adesivo preparado é superior à quantidade necessária, de forma a evitar problemas relacionados com a ocorrência de vazios na região de colagem.

- Colagem das juntas e cura dos adesivos

Seguidamente ao trabalho preparatório dos substratos e dos adesivos, procedeu-se à colagem das juntas. Inicialmente começou-se por dispor os substratos sobre réguas de madeira com aplicação entre estes de uma folha de politetrafluoretileno (PTFE), que evita a colagem entre ambos.

Os adesivos são aplicados na região de colagem de um dos substratos, conforme se ilustra na Figura 65, e seguidamente procede-se à apresentação do substrato que se sobrepõe para fecho da junta. Esta operação é realizada com especial cuidado de forma a garantir o correto posicionamento e o alinhamento longitudinal entre substratos. De modo a garantir pressão constante durante processo de cura do adesivo foram aplicados grampos na zona de colagem (Figura 66).

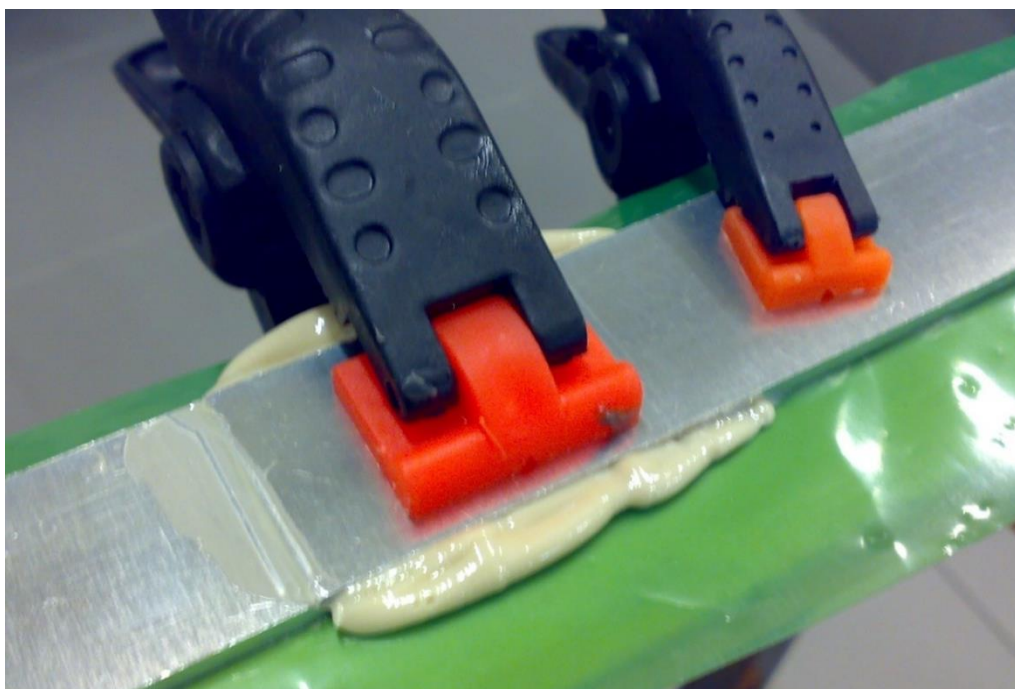


Figura 66 – Aspeto da junta após a sua montagem.

Pela observação da Figura 66 é constatado que, no ato de colagem da junta, o excesso de adesivo aplicado na região de colagem é expulso para os bordos dos provetes, que é necessário remover. Inicialmente retira-se a maior parte do excesso com auxílio de um x-ato. Finalizado todo este processo, os provetes ficam em processo de cura atendendo às especificações particulares de cada adesivo, isto é, cura à temperatura ambiente durante uma semana.

- Acabamento pós-cura das juntas

Como referido anteriormente, após cura total é necessário executar acabamento final dos provetes, eliminado por completo os excessos de adesivo depositados nas arestas exteriores, que influenciam a resistência da junta em análise, que se pretende aferir com rigor.

Inicialmente, com recurso a um alicate (Figura 67) executa-se a remoção dos excessos de maior dimensão.



Figura 67 – Remoção dos excessos de adesivos mais salientes.

Seguidamente, é procedido ao acabamento por mó abrasiva, como se ilustra na Figura 68.



Figura 68 – Acabamento final dos provetes com mó abrasiva.

Na Figura 69 mostra-se aspeto final de um provete pronto para ensaio.

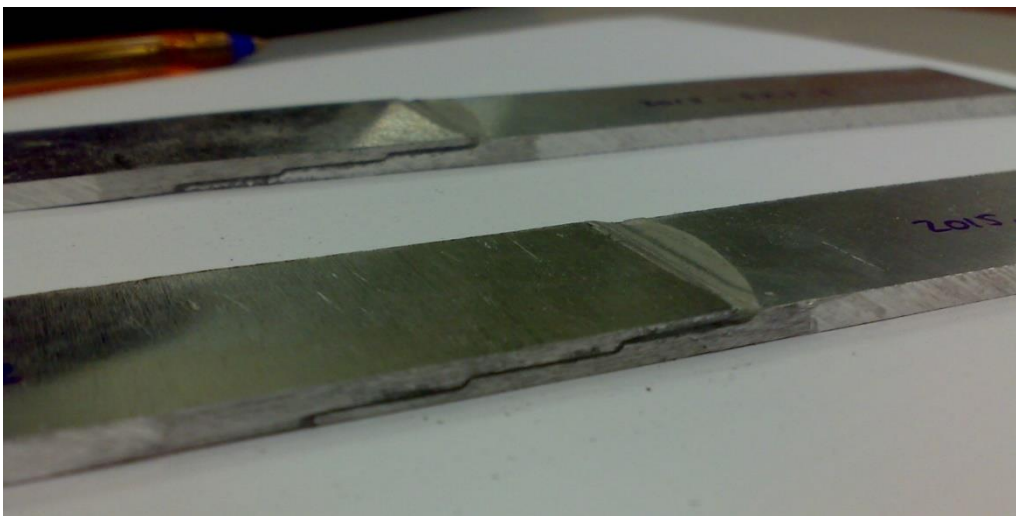


Figura 69 – Aspeto de um provete pronto a ensaiar.

#### 3.1.4 Ensaio das juntas

O ensaio das juntas realizou-se no laboratório de ensaios tecnológicos do ISEP na máquina de ensaios de tração Shimadzu AG-X 100 (Figura 70), onde as juntas foram solicitadas à tração. A célula de carga utilizada tem capacidade de 100 kN.



Figura 70 – Máquina Shimadzu – Autograph AG-X.

Para realização dos ensaios foi definida uma velocidade de sollicitação constante de 0,5 mm/min, em que o deslocamento imposto às juntas é realizado sempre até que ocorra a rotura da ligação, ou seja, até que ocorra separação total dos aderentes.

### 3.1.5 Resultados obtidos

Após a realização dos testes experimentais é necessário que os resultados obtidos estejam organizados de forma a permitir a sua análise. Para cada adesivo e valor de  $L_0$  obtiveram-se vários gráficos representativos do comportamento dos diversos provetes ensaiados. Neste subcapítulo são analisadas as curvas  $P-\delta$ , os modos de rotura de todos os provetes ensaiados, a resistência das juntas em função de  $L_0$  e é feita a análise dos resultados.

### 3.1.5.1 Curvas $P-\delta$

Nesta secção são apresentadas as curvas  $P-\delta$  obtidas separadamente por tipo de adesivo e valor de  $L_0$ . Da Figura 71 à Figura 74 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  registadas nos ensaios dos provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de  $L_0$  definidos.

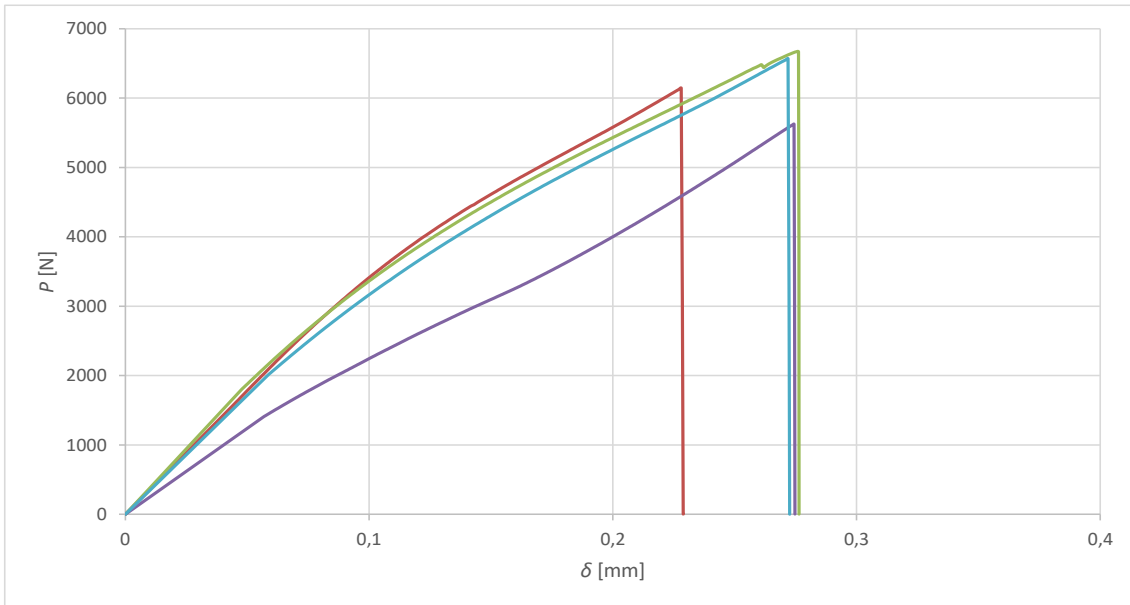


Figura 71 – Curvas  $P-\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm.

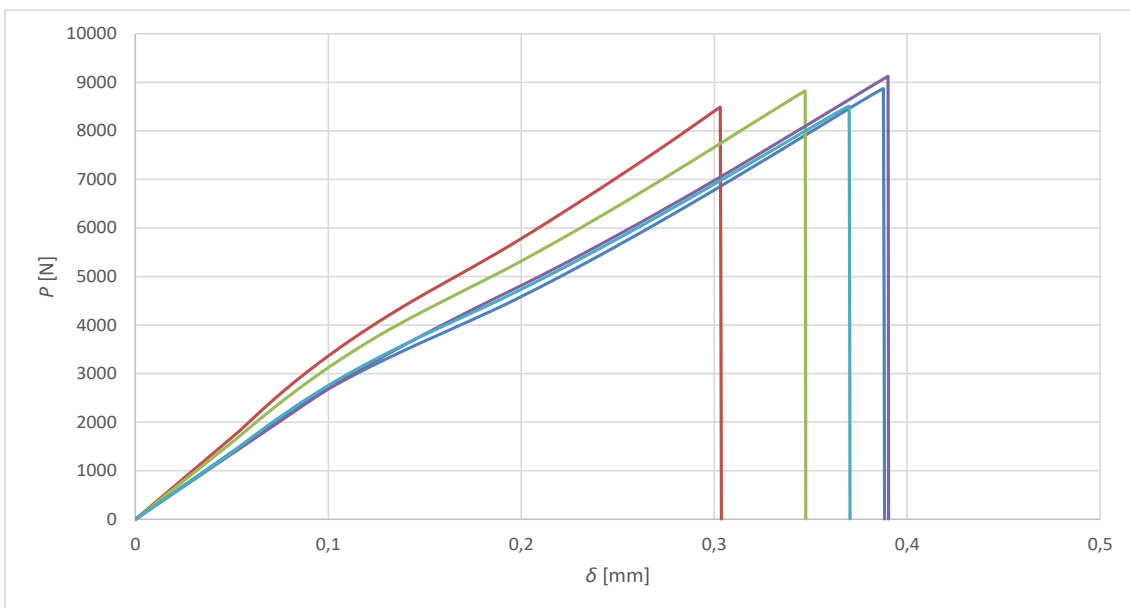


Figura 72 – Curvas  $P-\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=25$  mm.

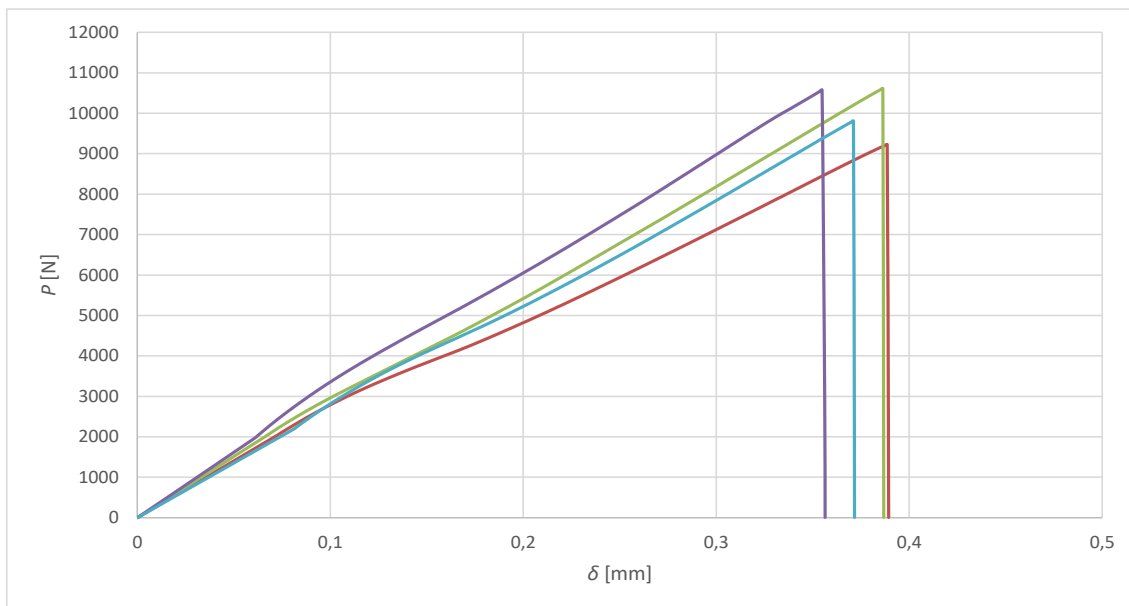


Figura 73 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=37,5$  mm.

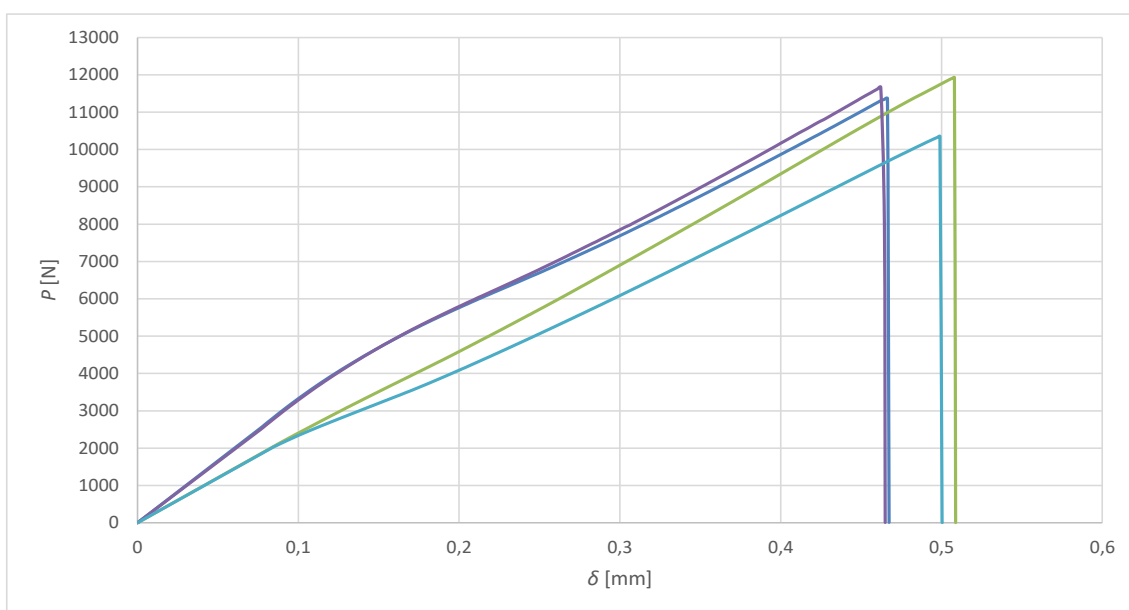


Figura 74 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=50$  mm.

A partir da análise das curvas  $P$ - $\delta$  das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 verifica-se que existe um bom acordo entre elas, no que diz respeito ao valor de  $P_{\text{máx}}$ .

As juntas apresentam um comportamento elástico até que se atinja  $P_{\text{máx}}$ . O comportamento elástico caracteriza-se por uma evolução aproximadamente linear dos valores de  $P$  em relação a  $\delta$  até se atingir a rotura total do adesivo.

Como se pode verificar da Figura 71 à Figura 74, as curvas  $P$ - $\delta$  dos vários provetes ensaiados apresentam uma variação substancial no que concerne aos deslocamentos. Suspeita-se que a má preparação das juntas e alguma divergência na geometria dos provetes devido à maquinagem dos degraus tenha influenciado os valores de deslocamento. No entanto, verifica-se que os deslocamentos de rotura que se evidenciaram foram baixos, o que demonstra o carácter frágil do adesivo Araldite® AV138, que não permite plastificação dos aderentes de alumínio. Em conclusão, com o aumento do  $L_0$ , verifica-se o aumento dos valores de resistência das juntas, acompanhados com aumento do valor de deslocamento.

Da Figura 75 à Figura 78 representam-se as curvas  $P$ - $\delta$  dos ensaios de provetes de junta colada com adesivo Araldite® 2015, para os quatro valores de  $L_0$  testados.

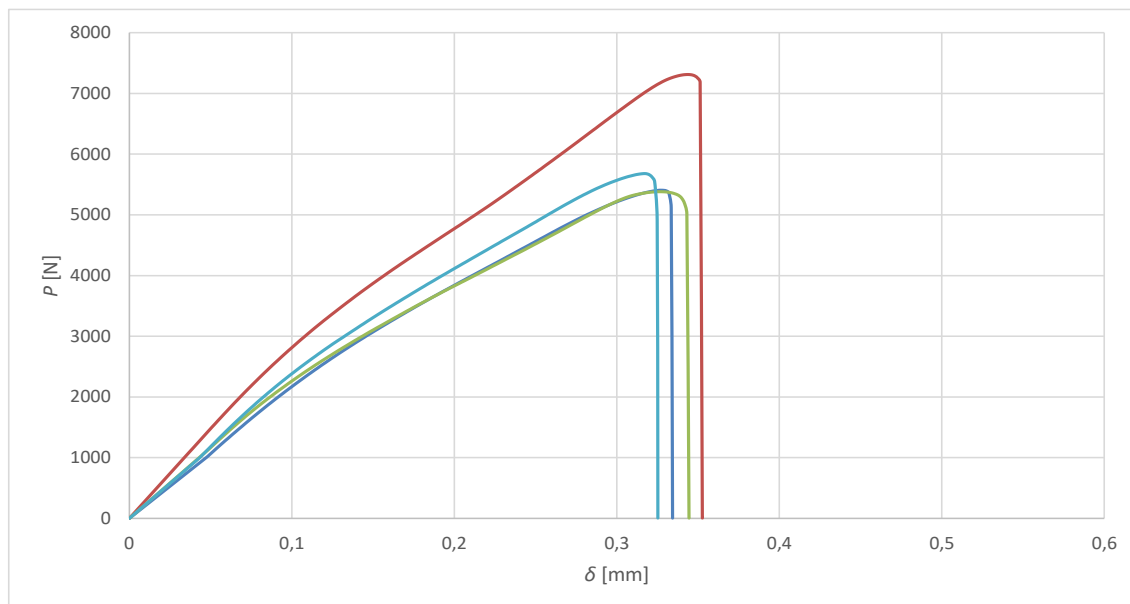


Figura 75 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=12,5$  mm.

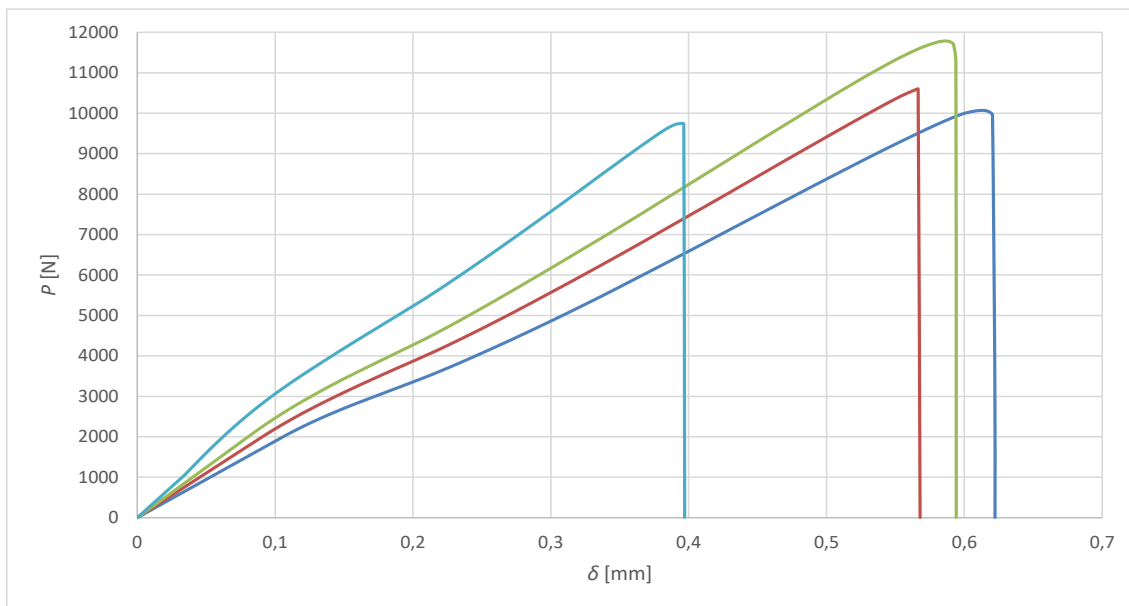


Figura 76 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=25$  mm.

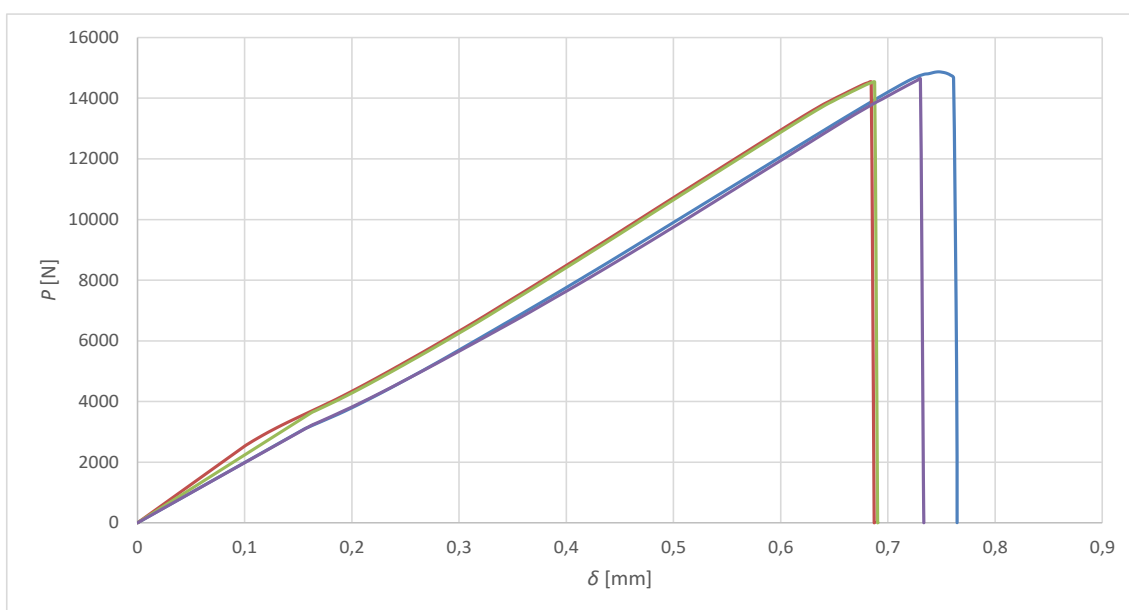


Figura 77 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm.

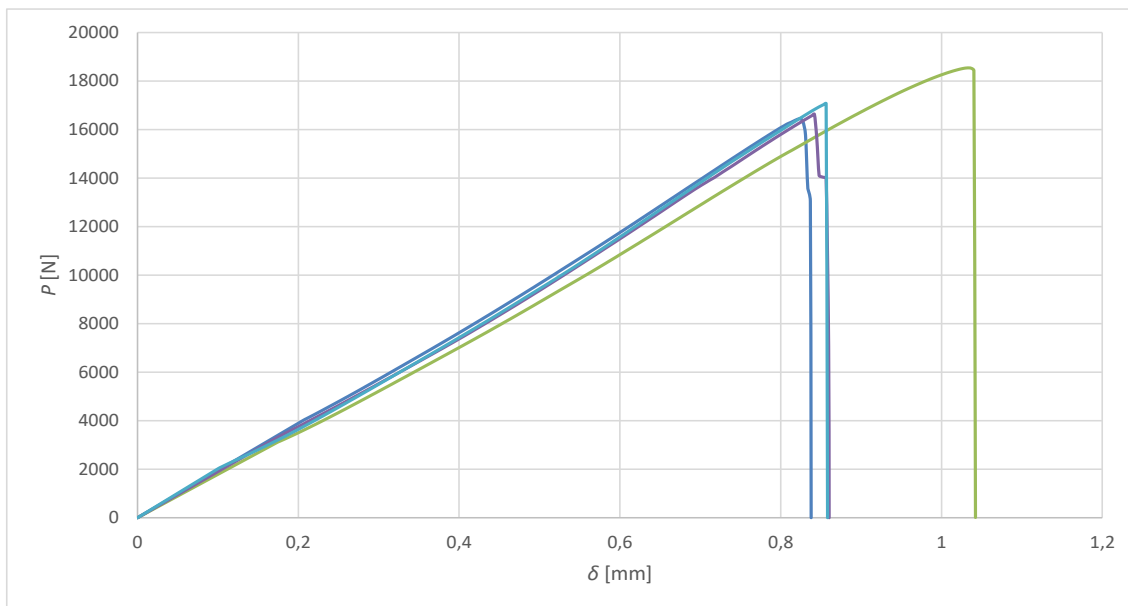


Figura 78 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=50$  mm.

Tal como nas curvas  $P$ - $\delta$  registadas nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para as juntas coladas com o Araldite® 2015 obteve-se um comportamento elástico até à proximidade de  $P_{máx}$ , região em que se observa uma ligeira plastificação na curva  $P$ - $\delta$  devido à ductilidade do adesivo.

Através da análise da Figura 75 à Figura 78 verifica-se que os conjuntos de curvas  $P$ - $\delta$  de cada valor de  $L_0$  estão de acordo entre eles relativamente aos valores de resistência, deslocamentos de carga máxima e de rotura. O adesivo Araldite® 2015 é mais dúctil que o adesivo Araldite® AV138, o que induziu a plastificação dos aderentes para valores de  $L_0$  maiores. Para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 verifica-se que a resistência e deslocamento de rotura da junta adesiva apresentam valores superiores aos evidenciados para o adesivo Araldite® AV138. Como seria de esperar, com o aumento de  $L_0$ , os valores da resistência e deslocamento de rotura aumentaram.

Da Figura 79 à Figura 82 representam-se as curvas  $P$ - $\delta$  dos ensaios de provetes das juntas coladas com adesivo Sikaforce® 7752, para os quatro valores de  $L_0$ .

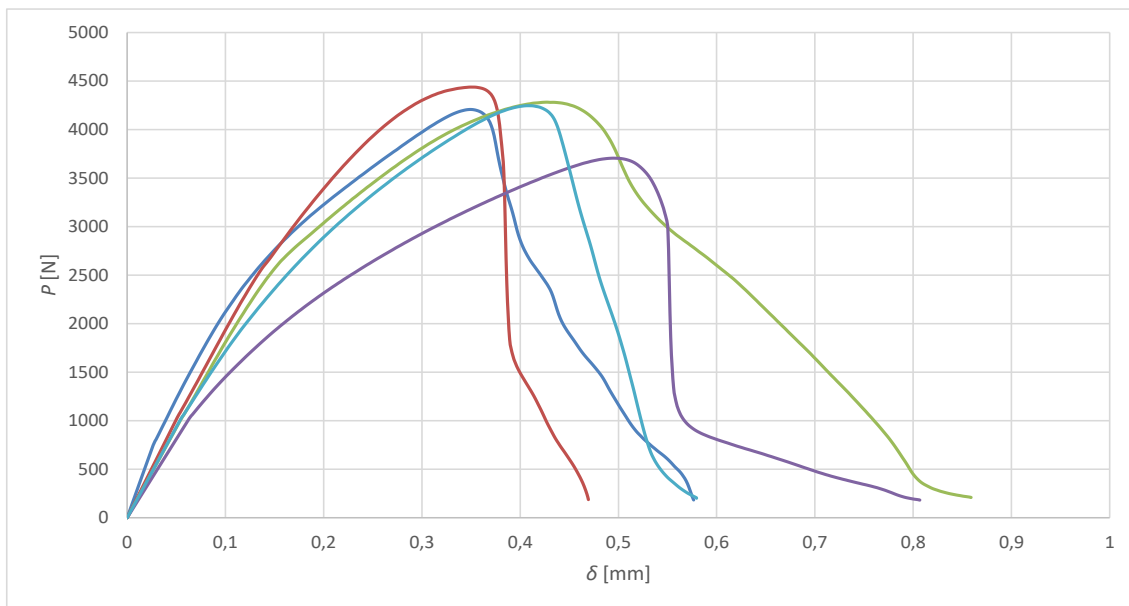


Figura 79 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=12,5$  mm.

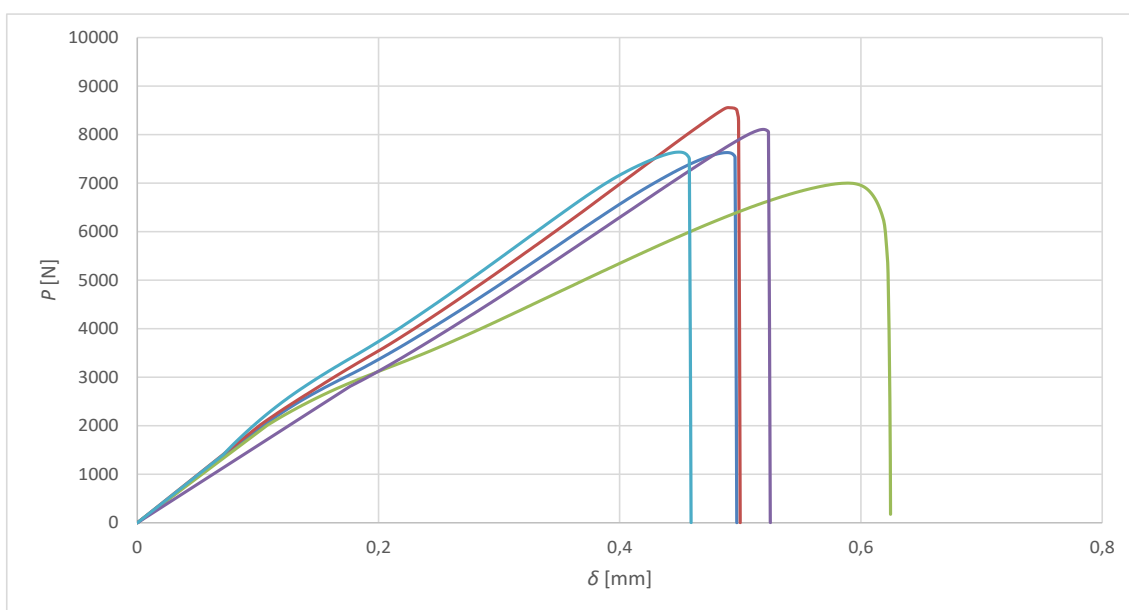


Figura 80 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=25$  mm.

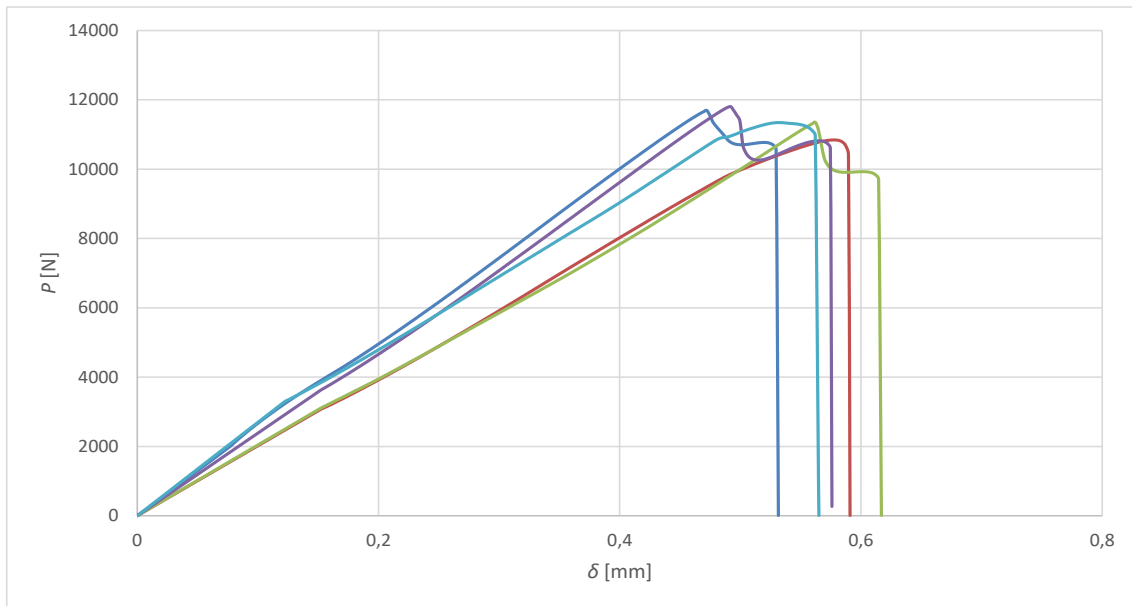


Figura 81 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=37,5$  mm.

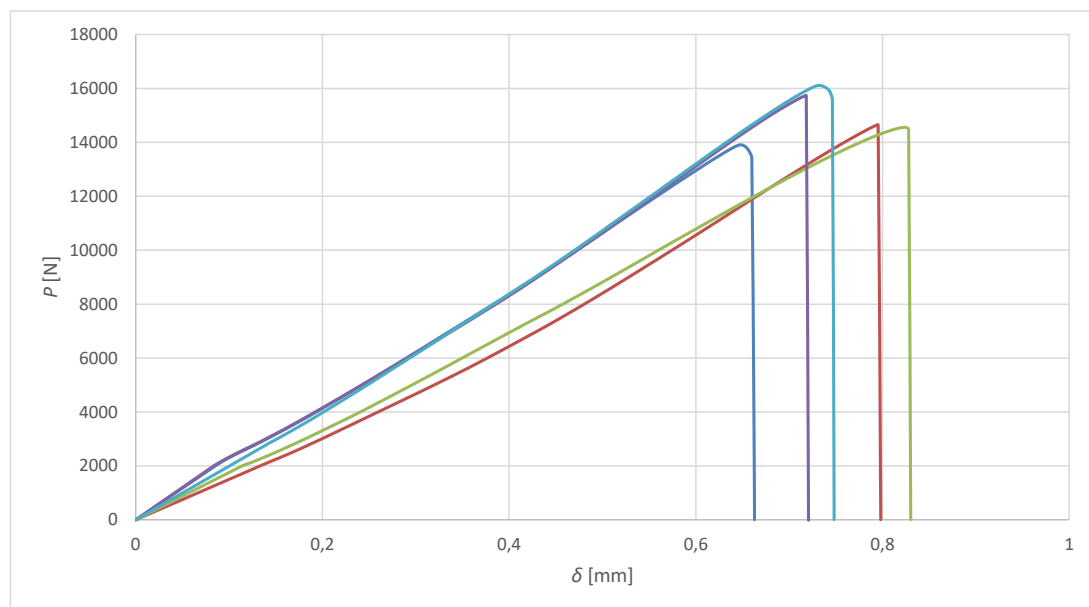


Figura 82 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=50$  mm.

Pela análise da Figura 79 à Figura 82 pode-se observar uma boa repetibilidade das curvas  $P$ - $\delta$ . Relativamente aos resultados obtidos verifica-se que se obteve valores superiores no que concerne a  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  do que os do adesivo Araldite® AV138, mas inferiores aos do adesivo Araldite® 2015. Devido à menor resistência e maior ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se claramente a ocorrência da transição elasto-plástica do

adesivo no domínio de forças atingidas nos ensaios. Após a plastificação do adesivo, as juntas comportam-se de forma praticamente linear até à rotura. Em suma, pela análise das Figura 79 à Figura 82 pode-se constatar um aumento dos valores de  $P_{máx}$  e  $\delta_{máx}$  nas juntas à medida que se incrementa o  $L_0$ .

### 3.1.5.2 Modos de rotura

Nesta secção são apresentados os modos de rotura obtidos para a juntas em degrau, para os três tipos de adesivos utilizados, separadamente por  $L_0$ . Da Figura 83 à Figura 86 representam-se os modos de rotura dos provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de  $L_0$ .



Figura 83 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm.



Figura 84 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=25$  mm.



Figura 85 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=37,5$  mm.



Figura 86 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=50$  mm.

Pela observação da Figura 83 à Figura 86 é possível concluir que os modos de rotura para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 foram semelhantes para todos os valores de  $L_0$ . A presença de adesivo em ambos os aderentes é representativa de rotura coesiva, o que mostra que a ligação entre o adesivo e os aderentes é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Este modo de rotura resulta de uma boa preparação das superfícies dos aderentes.

Da Figura 87 à Figura 90 representam-se os modos de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, para cada um dos valores de  $L_0$ .



Figura 87 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=12,5$  mm.

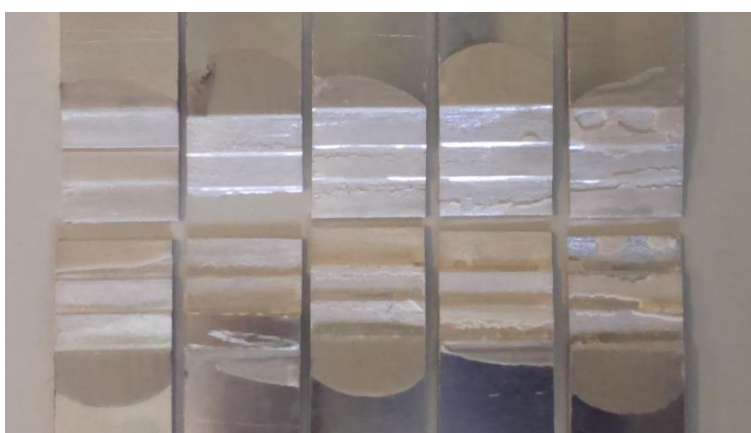


Figura 88 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=25$  mm.

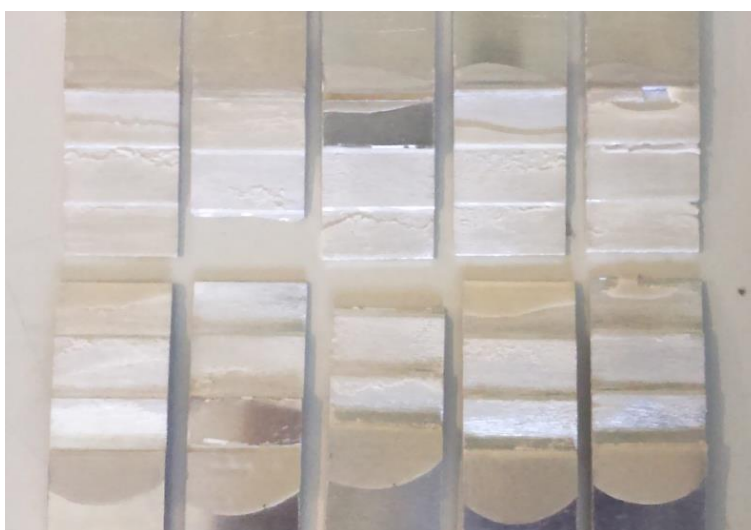


Figura 89 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm.



Figura 90 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=50$  mm.

Através da análise da Figura 87 à Figura 90 é possível verificar que as superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 se tratam de roturas coesivas. Nestes provetes as porções de adesivo nas superfícies de ambos os aderentes foram semelhantes, o que é indicativo de uma rotura perfeitamente coesiva.

Da Figura 91 à Figura 94 representam-se os modos de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, para cada um dos valores de  $L_0$ .

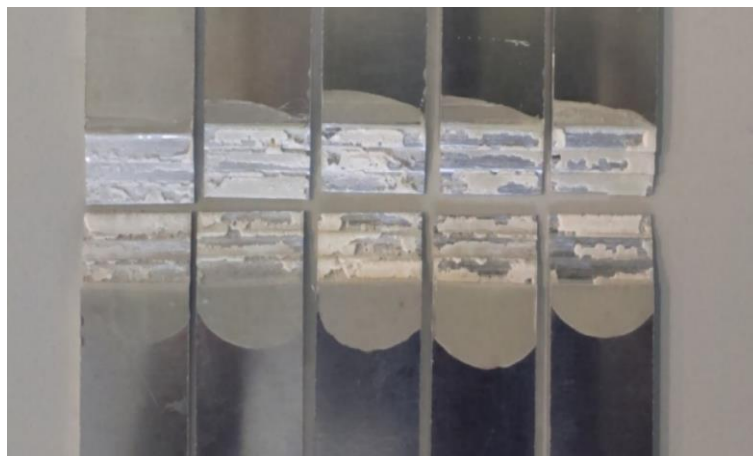


Figura 91 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=12,5$  mm.

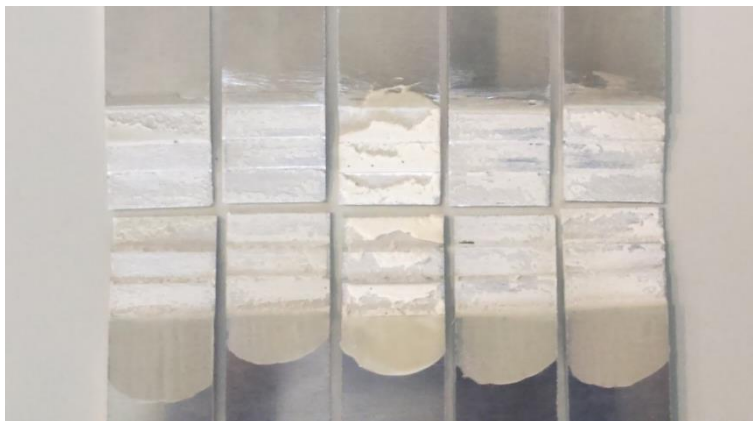


Figura 92 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=25$  mm.



Figura 93 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=37,5$  mm.

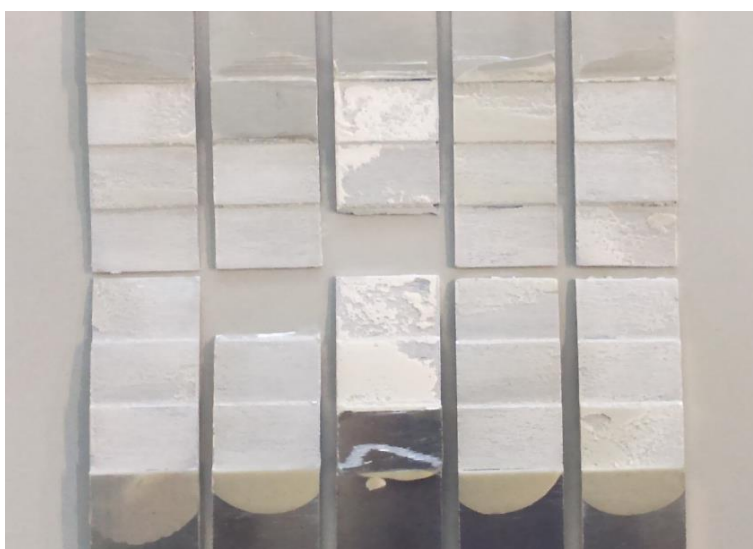


Figura 94 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=50$  mm.

Pela análise da Figura 91 à Figura 94 é possível verificar que as superfícies de rotura obtidas para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 se tratam de roturas coesivas. Neste caso, tal como nos modos de rotura verificados nas juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, constata-se que as porções de adesivo nas superfícies de ambos os aderentes foram semelhantes, o que é indicativo de uma rotura perfeitamente coesiva.

### 3.1.5.3 Resistência das juntas

Neste subcapítulo são apresentados os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos experimentalmente. No mínimo, foram sempre considerados 4 provetes para calcular as mdias e o desvio padrão de cada configurao de junta.

A Figura 95 representa o valor médio e respetivo desvio padrão dos valores experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  em funo de  $L_0$  das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. A partir da análise gráfica da Figura 95  possível concluir que, independentemente do adesivo,  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta com o aumento de  $L_0$ . Naturalmente pode ser inferido que o tipo de adesivo e  $L_0$  têm efeito preponderante nos valores de  $P_{m\acute{a}x}$ , conforme  demonstrado pelos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Igualmente,  possível constatar que a evoluo da resistência em funo de  $L_0$   aproximadamente linear independentemente do adesivo.

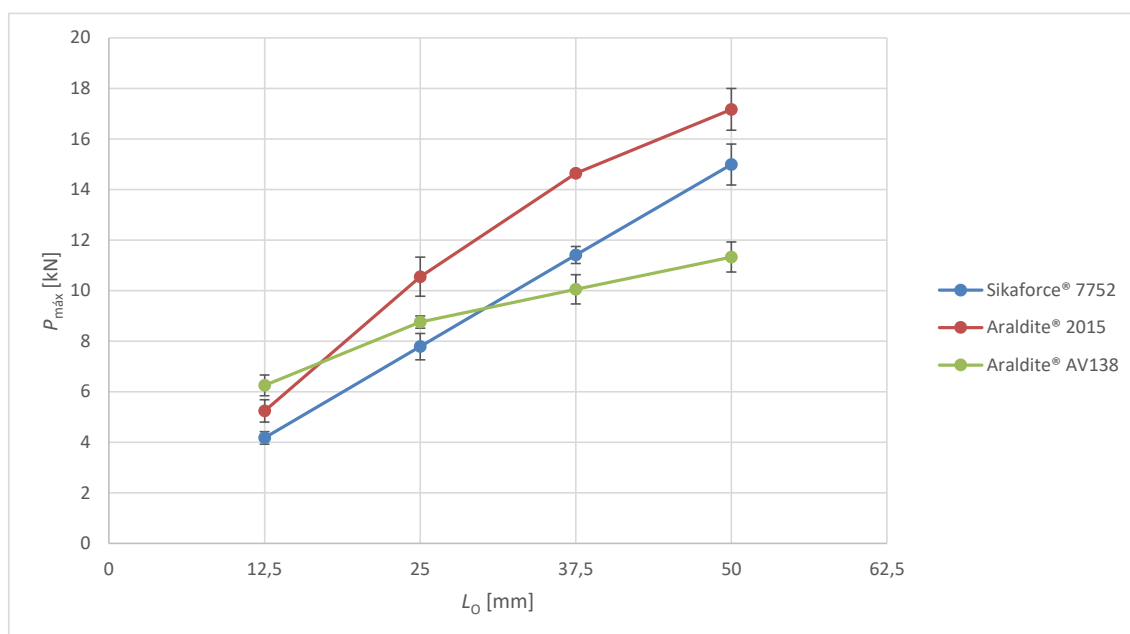


Figura 95 – Valores experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em funo do valor de  $L_0$ .

Analisando o desempenho das juntas coladas com Araldite® AV138, verifica-se que  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta com o aumento do  $L_0$ , embora o incremento de resistência não seja tão

evidente em comparação com os resultados demonstrados com os restantes adesivos. De facto, o aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  no intervalo de valores em que  $L_0$  foi testado foi de 81,2% para o Araldite® AV138, 227,6% para o Araldite® 2015 e 259,0% para o Sikaforce® 7752.

Em relação ao adesivo Araldite® AV138, o seu comportamento frágil é demonstrado pela inexistência de plastificação e redistribuição de tensões após se atingir o valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , sendo que a rotura de ligação ocorre instantaneamente. Quando se procede à comparação dos resultados experimentais de resistência por adesivo e  $L_0$ , verifica-se que o Araldite® AV138 é mais eficiente para o menor  $L_0$  (6,2 kN), enquanto os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 apresentam pior desempenho, verificando-se uma diminuição do valor de  $P_{m\acute{a}x}$  de 16,1 e 33,2%, respetivamente.

Com o aumento de  $L_0$ , os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 progressivamente aumentam o seu desempenho, apresentando melhor comportamento em relação ao adesivo Araldite® AV138. Tal facto pode-se explicar pela ocorrência de plastificação do adesivo antes de rotura da ligação, que permite a redistribuição de tensões na camada adesiva, que contribui para o aumento da resistência das juntas.

Pela observação do gráfico da Figura 95, verifica-se que o adesivo Araldite® 2015 apresenta um melhor desempenho dentro dos três adesivos em ensaio para  $L_0 \geq 25$  mm. Na realidade, é possível constatar que, para  $L_0 = 25$  mm, o adesivo Araldite® 2015 apresenta um valor de resistência de 10,6 kN, enquanto os restantes adesivos atingem menores valores de resistência. Percentualmente verifica-se uma diminuição de 16,9% no caso do Araldite® AV138 e 26,2% para o Sikaforce® 7752 no valor médio de  $P_{m\acute{a}x}$ .

Para  $L_0 = 37,5$  mm o adesivo Araldite® 2015 continua a demonstrar melhor desempenho que os restantes adesivos, com valor apurado de  $P_{m\acute{a}x} = 14,6$  kN. No que respeita aos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos para os restantes adesivos, verifica-se uma diminuição de 31,3% no caso do Araldite® AV138 e 22,1% no caso do Sikaforce® 7752.

Como seria de esperar, para  $L_0 = 50$  mm, o adesivo Araldite® 2015 exhibe melhor resultado em termos de  $P_{m\acute{a}x}$  (17,2 kN), ultrapassando largamente o desempenho dos restantes adesivos em estudo.

No que diz respeito ao comportamento do adesivo Sikaforce® 7752, é importante referir que, de acordo com os resultados obtidos, este adesivo apresenta o maior aumento de resistência com o aumento de  $L_0$  dentro dos três adesivos em análise. Igualmente, é possível constatar, pela análise gráfica da Figura 95 uma evolução perfeitamente linear dos valores de resistência em função  $L_0$ . Este comportamento está relacionado com a ductilidade extremamente elevada deste adesivo, que permite a plastificação completa da camada de adesivo e, conseqüentemente, um valor de  $P_{m\acute{a}x}$  praticamente proporcional a  $L_0$ .

Em suma, e de acordo com resultados obtidos, é possível concluir que os melhores desempenhos são obtidos com a utilização de adesivos dúcteis para  $L_0$  maiores. Em relação aos desvios encontrados, em termos percentuais os maiores valores registados face ao valor referência por adesivo foram de 6,6% para o adesivo Araldite® AV138 ( $L_0=12,5$  mm), 8,5% para o adesivo Araldite® 2015 ( $L_0=12,5$  mm) e 6,7% para o adesivo Sikaforce® 7752 ( $L_0=25$  mm), o que revela boa repetibilidade dos testes.

### 3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo são abordadas as condições de análise numérica usadas na análise das várias configurações de junta e é descrito o MDC triangular utilizado. Em termos de resultados, inicialmente é apresentado um estudo de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  ao longo da posição normalizada ( $x/L_0$ ). Além das tensões, é realizado um estudo da variável de dano dos elementos coesivos representativos do adesivo, para melhor compreender o processo de rotura das juntas. O estudo de resistência que se segue irá fazer uma comparação entre os valores numéricos e experimentais apresentados anteriormente. Finalmente, é feita uma análise global dos resultados obtidos e tiradas as respetivas conclusões.

#### 3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada no *software* ABAQUS® versão 6.14. Este *software* baseia-se no MEF, e foi escolhido pela possibilidade de utilização de um módulo integrado de MDC que permite simular o dano e prever a resistência de juntas adesivas.

Desde o desenho das juntas no *software* ABAQUS® até à realização dos testes, diversos passos são necessários. Todo este processo é descrito de seguida com detalhe, através do procedimento implementado em cada módulo do programa:

- Módulo “Part”: este módulo consiste na realização do desenho da estrutura através dos limites exteriores e posterior divisão em partições, como está representado na Figura 96.



Figura 96 – Imagem do *software* ABAQUS® referente à criação da geometria da junta no módulo *Part*.

É neste módulo que se fazem as alterações da geometria dos aderentes, em função de  $L_0$ , pela alteração dos parâmetros de cotagem definidos na Tabela 9 e Tabela 12, que se apresentam na Figura 97. Para a modelação da camada de adesivo foi necessário proceder à remoção da porção de adesivo entre as porções horizontais e verticais da camada adesiva, através da função *remove faces*, devido às limitações de posicionamento dos elementos coesivos.

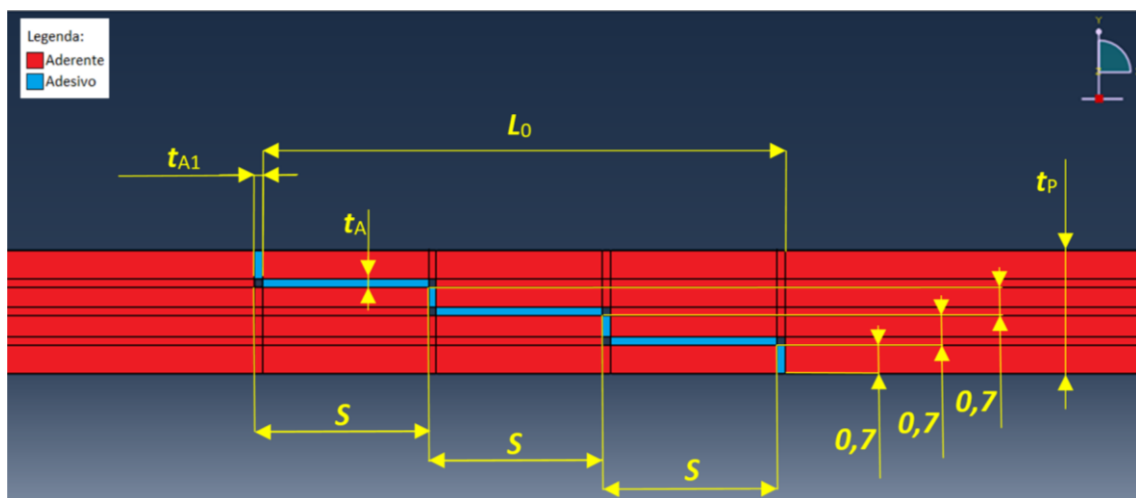


Figura 97 – Imagem do *software* ABAQUS® com pormenor de cotagem da zona de colagem da junta.

- Módulo “*Property*”: consiste na associação das diferentes propriedades para cada partição da estrutura desenhada no módulo “*Part*”. Na Figura 98 mostra-se a introdução das propriedades mecânicas respeitantes à elasticidade e plasticidade dos aderentes e respetivas configurações dos seus parâmetros.

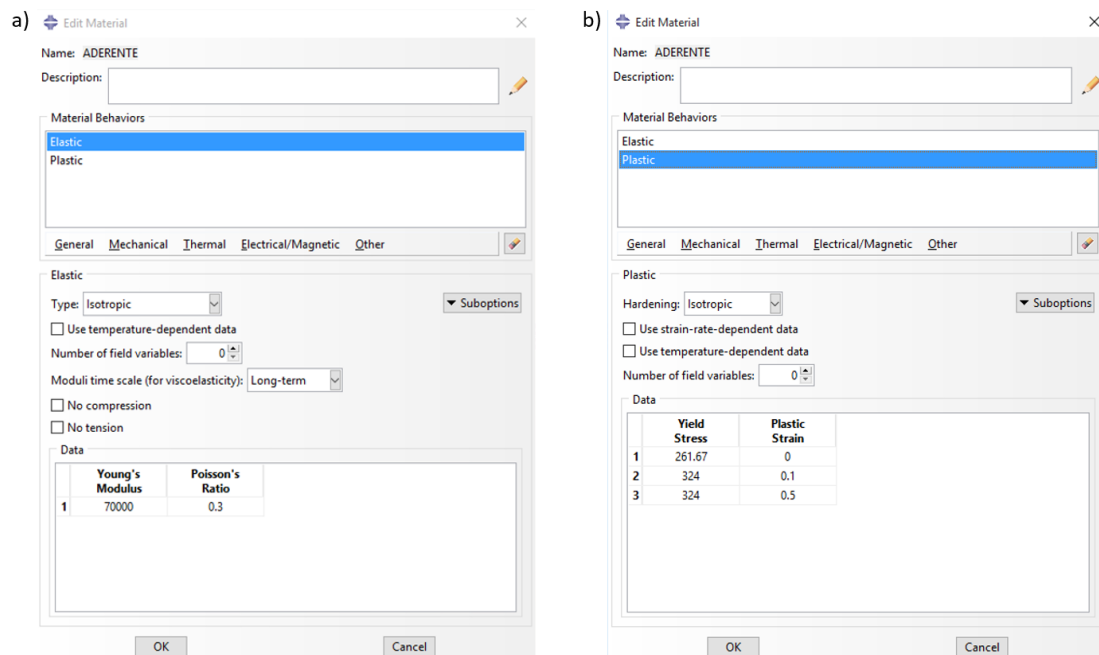


Figura 98 – Imagem do *software* ABAQUS® referente às configurações do material dos aderentes: (a) *toolbox* das propriedades elásticas e (b) *toolbox* das propriedades plásticas.

Na Figura 99 mostra-se a parametrização das propriedades mecânicas do adesivo no *software* ABAQUS®, onde é definido o mecanismo de dano e respetiva evolução, bem como definidas as propriedades elásticas do adesivo.

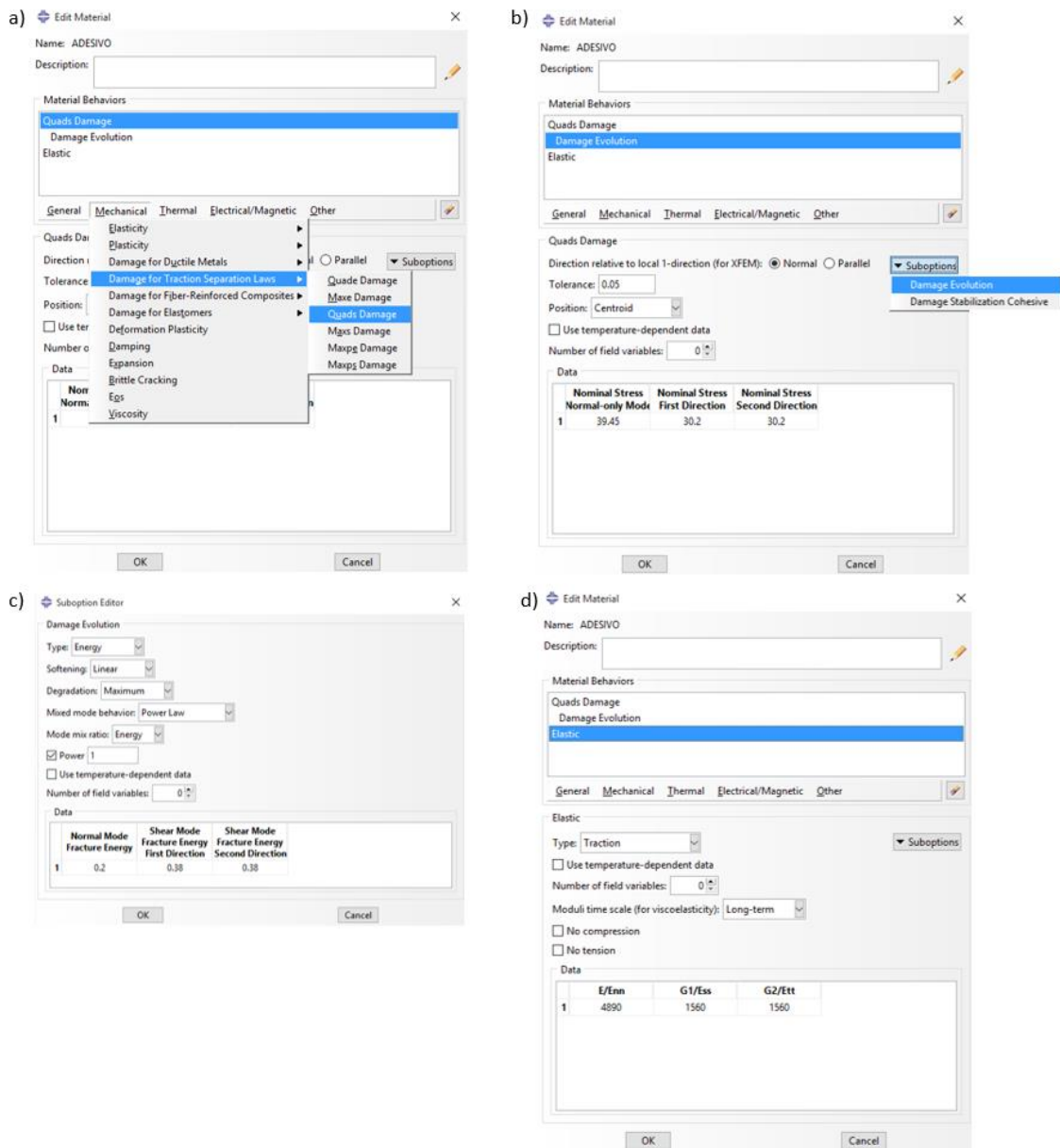


Figura 99 – Imagem do *software* ABAQUS® referente às configurações do material adesivo: (a; b e c) *toolbox* das propriedades de dano e sua evolução e (d) *toolbox* das propriedades elásticas.

Após definição das propriedades mecânicas dos materiais é necessário fazer a sua atribuição “*assignment*” às partições da junta. Na Figura 100 mostra-se a atribuição relativa aos aderentes considerando uma secção do tipo sólida homogénea.

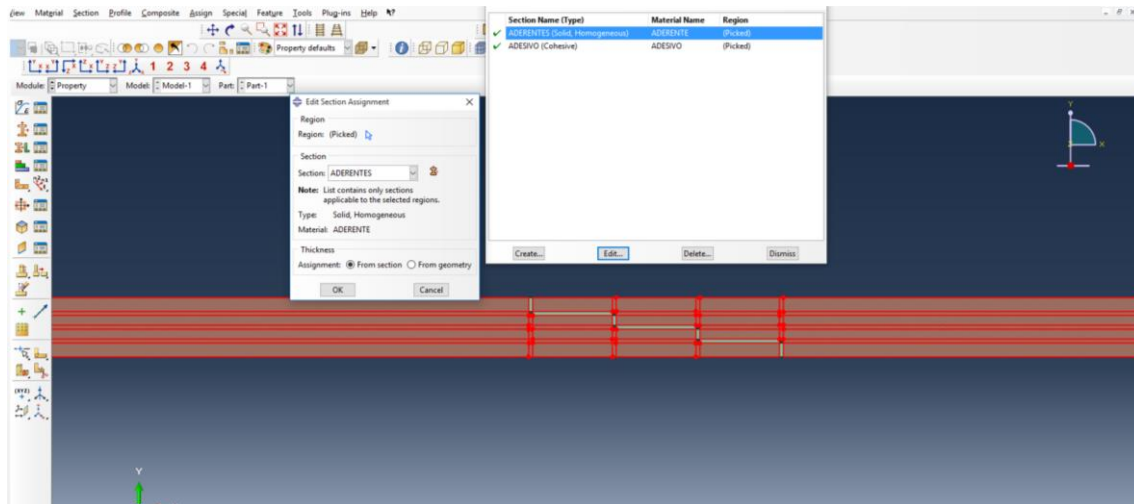


Figura 100 – Imagem do *software* ABAQUS® referente à atribuição das propriedades dos aderentes às partições do modelo numérico.

De seguida mostra-se a atribuição da secção adesiva. É importante referir que, a camada de adesivo, modelada com propriedades coesivas, é considerada uma secção do tipo coesiva, conforme se ilustra na Figura 101.

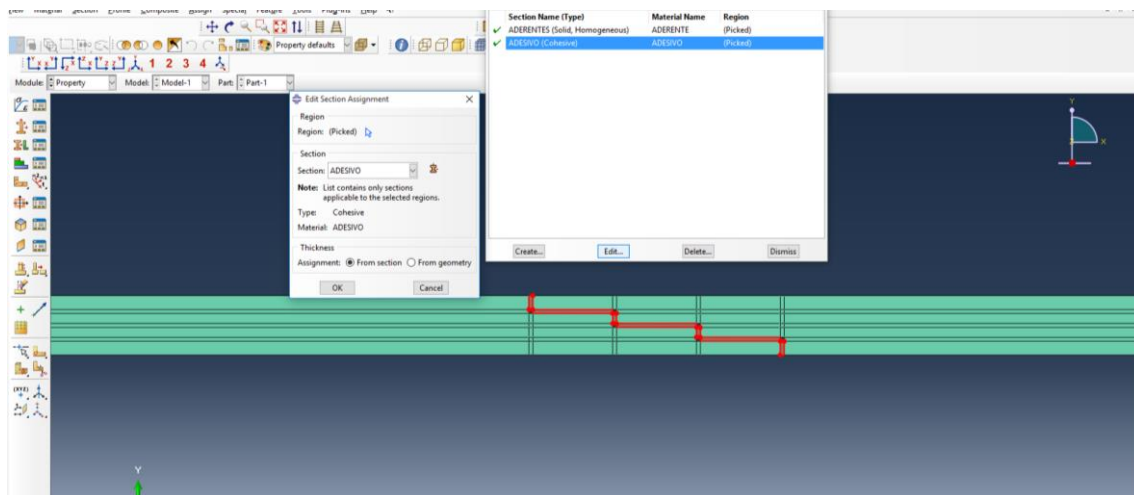


Figura 101 – Imagem do *software* ABAQUS® referente à atribuição das propriedades do adesivo às partições do modelo numérico.

- Módulo “*Assembly*”: este módulo serve para juntar as diferentes partes de um conjunto, através do “*instance part*”.
- Módulo “*Load*”: neste módulo são introduzidas as condições fronteira. Na Figura 102 está representada a condição de encastramento de um dos aderentes enquanto na Figura 103 está definida a condição de deslocamento do outro aderente da junta.



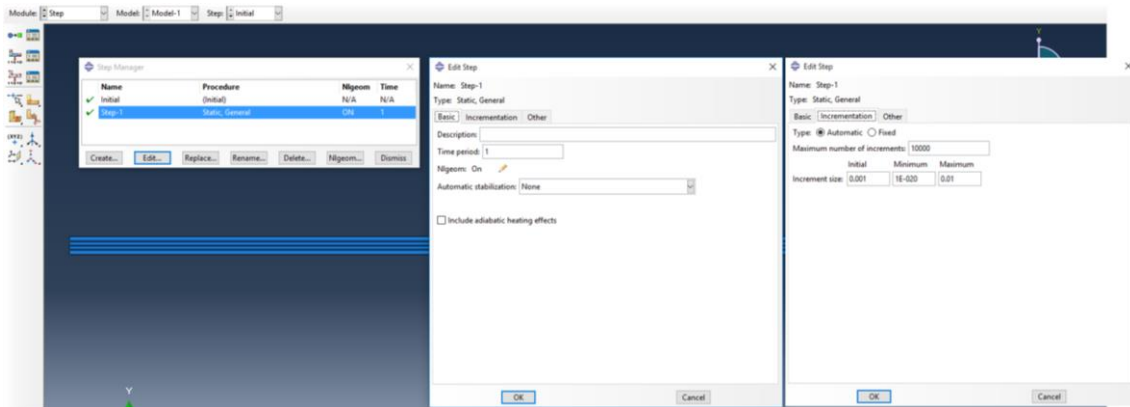


Figura 104 – Imagem do *software* ABAQUS® referente à definição dos parâmetros de incrementação.

- Módulo “*Mesh*”: neste módulo é feita a discretização da malha. Inicialmente começa-se por definir o tipo de elemento de malha com o qual se discretiza cada componente da junta. Na Figura 105 mostra-se como foi definido o tipo de elemento de malha dos aderentes.

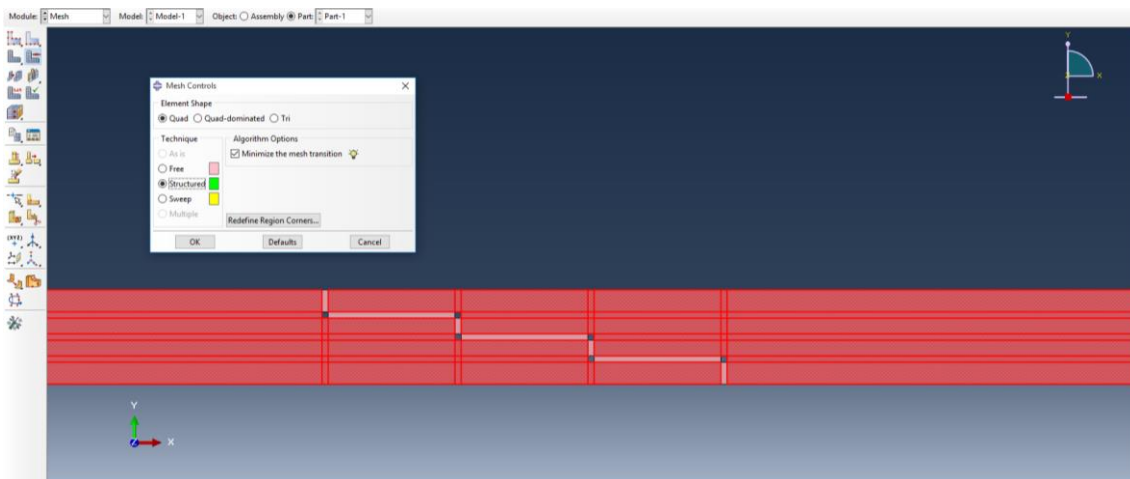


Figura 105 – Imagem do *software* ABAQUS® referente à definição do elemento de malha dos aderentes.

Na Figura 106 procede-se igualmente à atribuição do tipo de elemento de malha à camada adesiva. Para a análise das tensões, considerou-se uma malha bastante mais refinada para conseguir capturar os grandes gradientes de tensões ao longo da região de colagem da junta. Neste caso, o tamanho dos elementos na zona do adesivo foi de  $0,02 \times 0,02 \text{ mm}^2$ . Por outro lado, para os modelos de propagação de dano por MDC considerou-se um tamanho de elementos na zona do adesivo de  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ . Em ambos os casos, é considerado um refinamento crescente de malha através do *bias ratio*. De modo a concretizar a operação de refinamento e a garantir o sentido de refinamento pretendido, foi dada uma orientação ao *bias ratio* para cada conjunto de arestas de refinamento. Desta forma, no comprimento livre dos substratos (que não

estabelecem contacto com o adesivo), o refinamento foi atribuído no sentido da zona de ligação, como demonstrado na Figura 107.

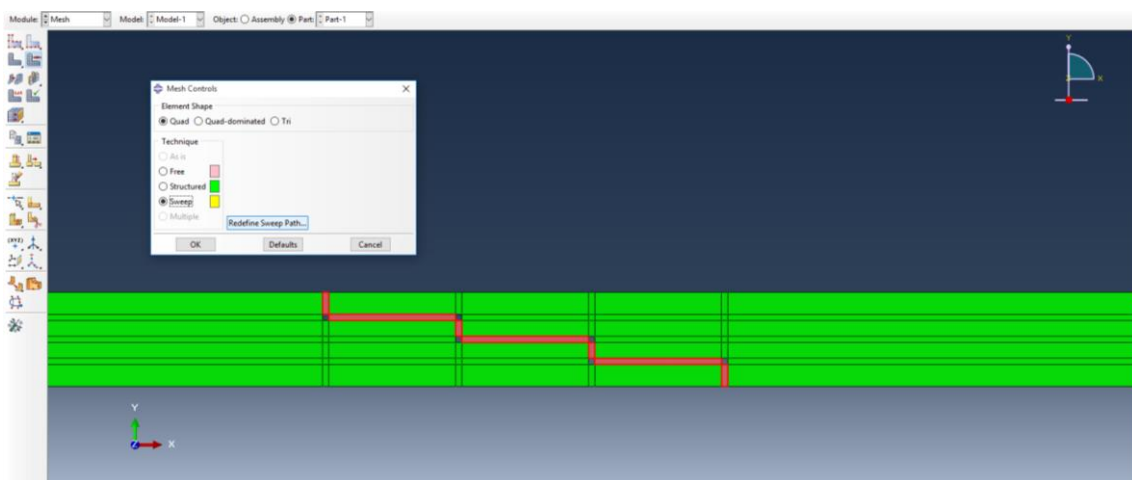


Figura 106 – Imagem do software ABAQUS® referente à definição do elemento de malha do adesivo.

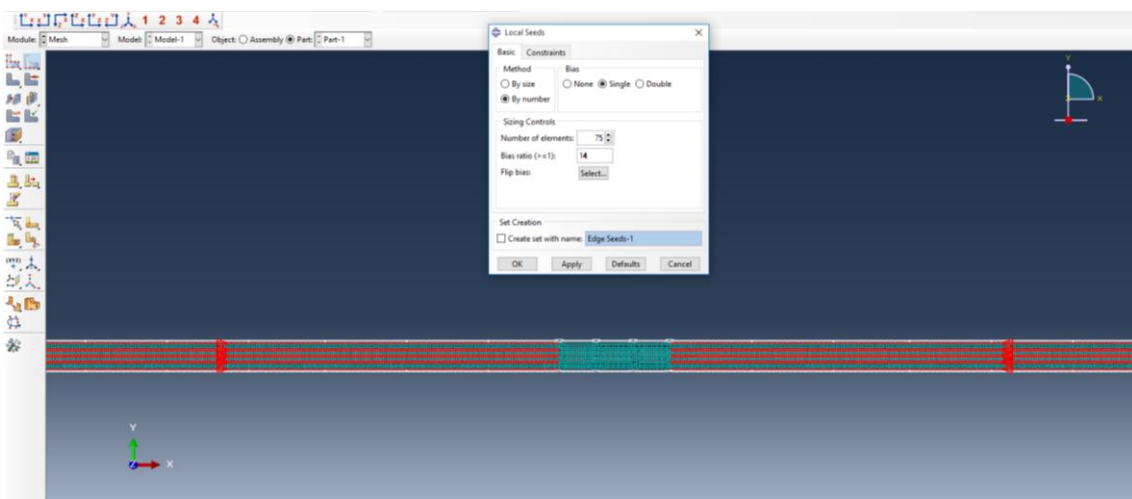


Figura 107 – Imagem do software ABAQUS® referente à definição do *bias ratio* da junta.

Pelo refinamento da malha verificamos conforme se mostra na Figura 108, que ao aproximar da região de colagem as *seeds*, que são sementes que o ABAQUS® considera para construção da malha, são cada vez mais densas, em resultado do *bias ratio* definido.

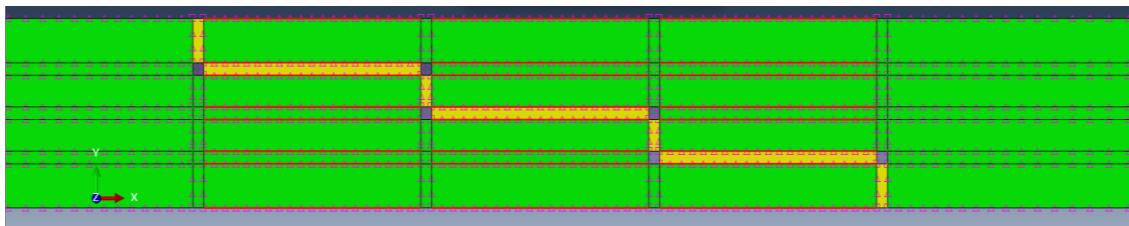


Figura 108 – Pormenor do refinamento da malha imposto pelo *bias ratio*.

Na Figura 109 mostra-se o aspeto final da junta com a malha implementada no estudo, onde é bem patente que na região de ligação a malha é mais densa comparativamente com as zonas vizinhas.

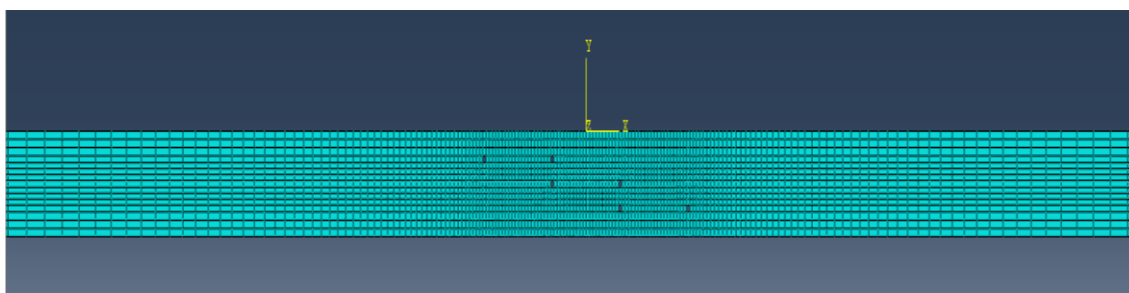


Figura 109 – Pormenor do aspeto da malha do modelo numérico.

- Módulo “*Job*”: neste módulo são realizados os testes dos modelos. Para o modelo de análise de resistência, os testes decorrem até ao fim do deslocamento imposto, de maneira que a rotura total da estrutura seja atingida. Quanto ao modelo de análise de tensões apenas é necessário um incremento de análise, uma vez que se pretende extrair as tensões no domínio elástico do carregamento.
- Módulo “*Visualization*”: este módulo permite acompanhar o comportamento da estrutura quando solicitada a determinadas condições e permite retirar os valores das forças e tensões.

### 3.2.2 Modelo de dano coesivo

Como anteriormente referido, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [70].

#### 3.2.2.1 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais

precisos [71]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [72], linear parabólico [73], exponencial [74], polinomial [75] e trapezoidal [76]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [38]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 110, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

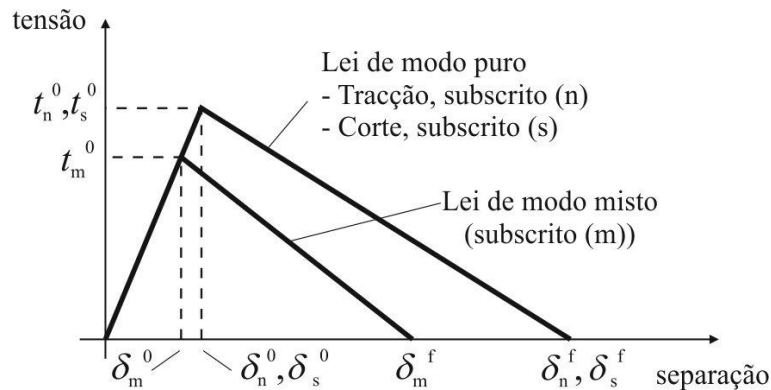


Figura 110 – Lei triangular do MDC [77].

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores de tensão são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões energéticas para combinar a tensão e corte [78]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de tração e outra de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $\mathbf{K}_{\text{COH}}$ , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte nos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \boldsymbol{\varepsilon}, \quad (1)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [79]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$k_{nn} = E, \quad k_{ss} = G, \quad k_{ns} = 0, \quad (2)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Com a inclusão destes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [78]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (3)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [80]. Quando  $t_m^0$  é atingido (Figura 110), pela igualdade da equação anterior, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos ( $\delta_m^f$  na Figura 110) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (4)$$

### 3.2.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tração [81, 82]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [83-85]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

#### 3.2.2.2.1 Araldite® AV138

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [86]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente ao mais indicado, e foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de tração e de corte (*thick-adherend shear test* (TAST)), respetivamente, para a definição de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos

de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (JSS com  $L_0=20$  mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais, até obter valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de  $E$  e  $G$  foram também determinados experimentalmente com ensaios de tração e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido [87] concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 13 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [87].

Tabela 13 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com  $t_A$  de 0,2 mm [87].

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IC}$ [N/mm]	$G_{IIC}$ [N/mm]
4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38

### 3.2.2.2.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior [86] por um método inverso para a determinação de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Num estudo anterior [88], é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  através de ensaios *Double-cantilever beam* (DCB) e *End-notched flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de  $G_{IC}$  ou  $G_{IIC}$  é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  é então definido pela utilização de um procedimento de ajuste entre as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 14 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto [88]. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [89] e ensaios TAST, respetivamente [90].

Tabela 14 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com  $t_A$  de 0,2 mm [88].

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
1850	650	21,63	17,9	0,43	4,7

### 3.2.2.2.3 Sikaforce® 7752

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo distinto. Para a determinação da lei coesiva ao corte, seguiu-se um método inverso, correspondente à determinação do valor de  $G_{IIc}$  por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de  $t_s^0$  [64]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de  $t_s^0$  e  $G_{IIc}$  obtidos na referência [64], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de  $G_{Ic}$  foi obtido por ensaios de fratura DCB [91], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de  $t_n^0$  foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [92]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular da solitação à tração, o valor de  $t_n^0$  não tem influência digna de registo para variações de  $t_n^0$  até 25% do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [92], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de  $E$  e  $G$  foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [69]. A Tabela 15 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com  $t_A=0,2$  mm [64].

$E$ [MPa]	$G$ [MPa]	$t_n^0$ [MPa]	$t_s^0$ [MPa]	$G_{Ic}$ [N/mm]	$G_{IIc}$ [N/mm]
1890	727	28,60	20	1,18	8,72

### 3.2.3 Análise de tensões na junta

Neste capítulo são apresentadas as tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  ao longo do adesivo. Estes gráficos são representados da seguinte forma:

- Os valores do eixo das abcissas representam  $x/L_0$  (Figura 56). Desta forma, os gráficos apresentados são traçados entre  $0 \leq L_0 \leq 1$ ;
- No eixo das ordenadas estão representadas as tensões ao longo do plano médio do adesivo. Foram estudadas tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  normalizadas ( $\sigma_y/\tau_{méd}$  e  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ , respetivamente), onde  $\tau_{méd}$  representa a média de  $\tau_{xy}$  ao longo da camada do adesivo para cada valor de  $L_0$ .

Na Figura 111 é apresentado o esquema da junta, com a apresentação da posição normalizada ao longo de  $L_0$ .

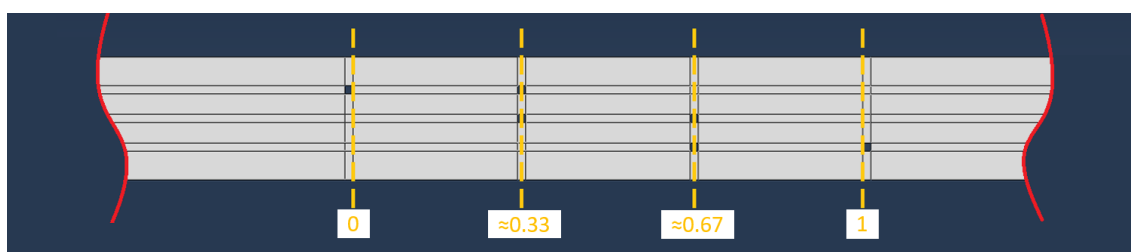


Figura 111 – Esquema representativo da normalização de  $L_0$  da junta em degrau.

A distribuição de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  que se desenvolvem no plano médio da espessura do adesivo são alvo de um estudo detalhado que tem com objetivo a obtenção de elementos para análise posterior dos resultados de  $P_{máx}$ , uma vez que estado de tensão que se verifica na camada adesiva desempenha um papel preponderante no processo de fratura. De salientar que o estudo das tensões é realizado no estágio inicial de carregamento, ou seja, correspondente ao domínio elástico dos aderentes e do adesivo.

### 3.2.3.1 Tensões de arrancamento

O estudo das tensões  $\sigma_y$  para os 3 adesivos consiste no estudo de  $\sigma_y/\tau_{méd}$  ao longo de  $x/L_0$ , em função dos valores de  $L_0$  testados. Da Figura 112 à Figura 114 são apresentados gráficos referentes às tensões  $\sigma_y$  obtidas através do estudo numérico, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

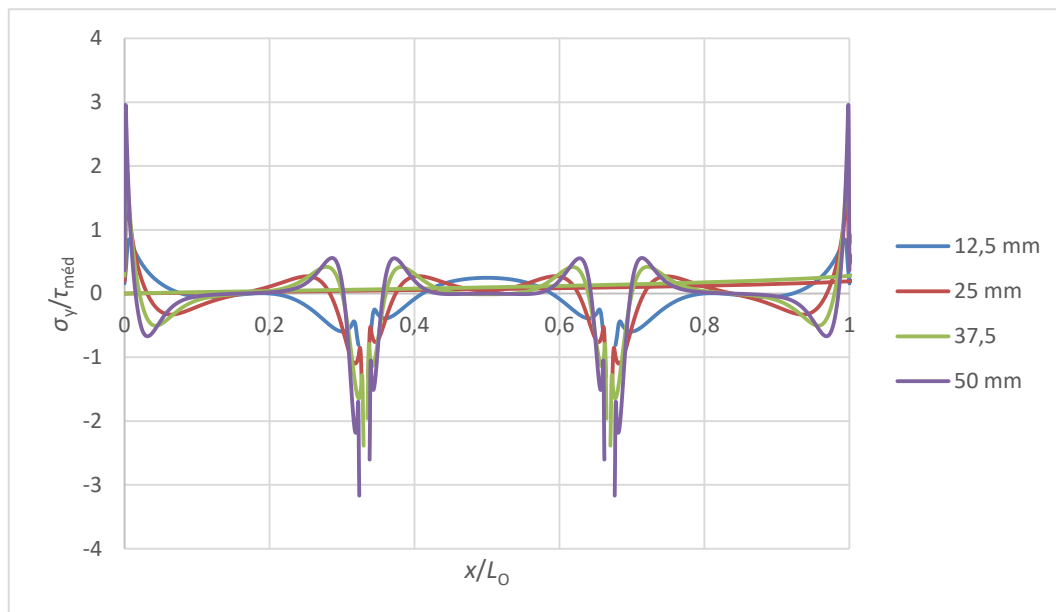


Figura 112 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de  $L_0$ .

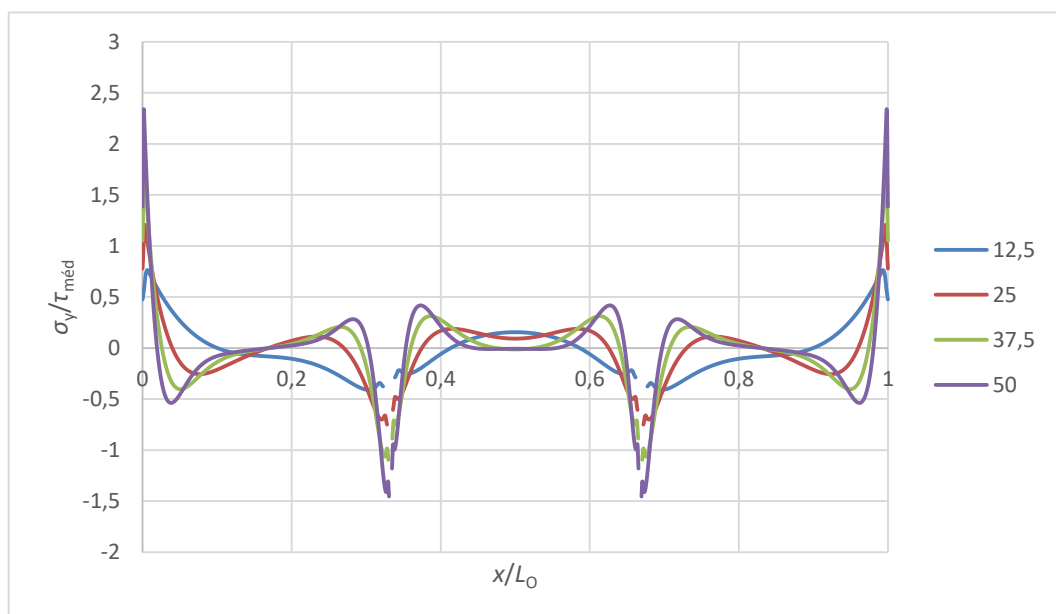


Figura 113 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de  $L_0$ .

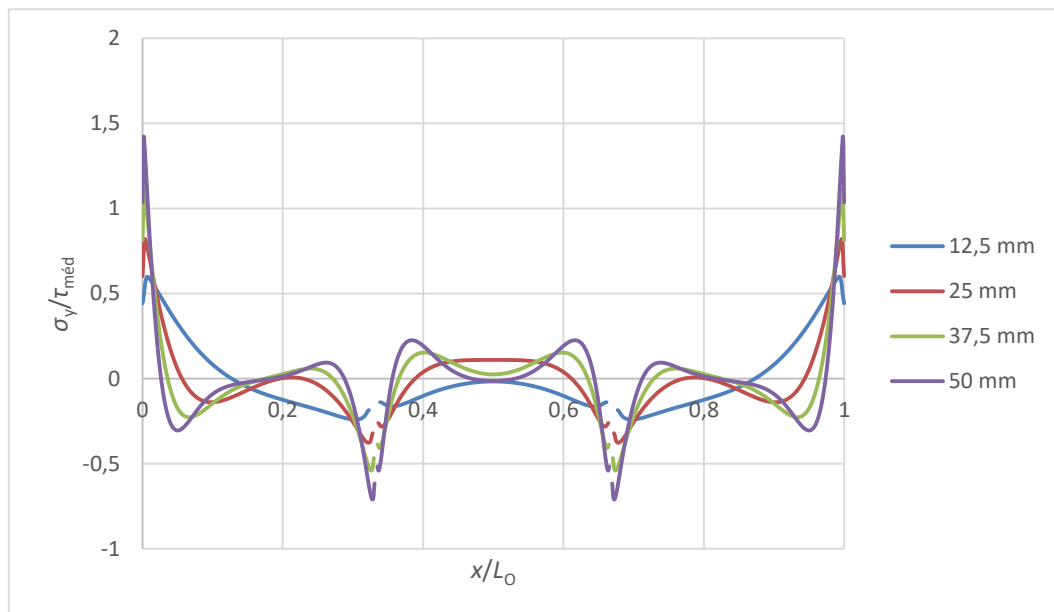


Figura 114 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de  $L_0$ .

Numa análise preliminar da distribuição de tensões  $\sigma_y$  verifica-se que, independentemente de  $L_0$ , a tensão  $\sigma_y$  é bastante inferior à tensão de  $\tau_{méd}$ , com exceção das extremidades dos degraus e nas transições internas de degrau. Os picos de tensão  $\sigma_y$  verificam-se nas posições  $x/L_0=0$  e 1 (nas extremidades da ligação), e nas transições de degrau (posições  $x/L_0 \approx 0,33$  e  $0,67$ ), embora os picos de tensão aqui registados sejam de carácter compressivo. De acordo com análise das tensões de arrancamento verifica-se que, a par da variação interna de tensões provocadas pela transição de degraus, os picos de tensão que se desenvolvem nas extremidades de  $L_0$ , em analogia ao fenómeno que ocorre nas JSS, origina um momento fletor que promove o arrancamento das extremidades da junta [25, 93], acompanhado de fenómenos de compressão da região central de sobreposição. Relativamente ao perfil gráfico da distribuição da tensão  $\sigma_y$ , verifica-se que os picos (tração e compressão) aumentam progressivamente com  $L_0$ . Esta tendência é típica das juntas adesivas, conforme se pode verificar por diversos estudos desenvolvidos [94], onde muitas das vezes este comportamento afeta a linearidade do aumento da resistência das juntas com o aumento do  $L_0$ , em particular nos casos em que se utilizam adesivos frágeis.

### 3.2.3.2 Tensões de corte

Neste subcapítulo, da Figura 115 à Figura 117, são apresentados os gráficos referentes à distribuição tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  para os três adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente) em função de  $L_0$ .

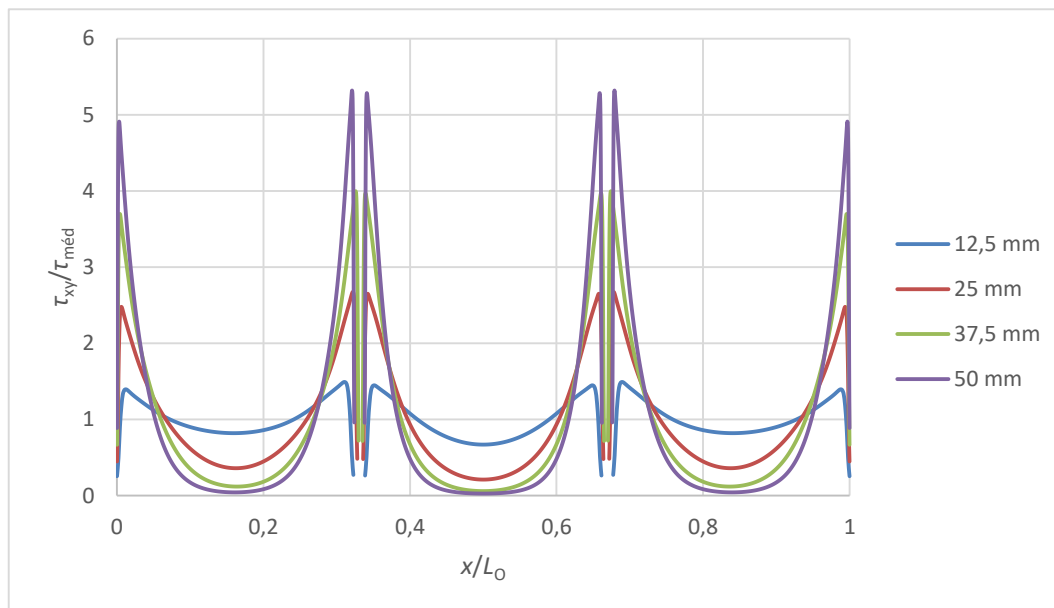


Figura 115 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de  $L_0$ .

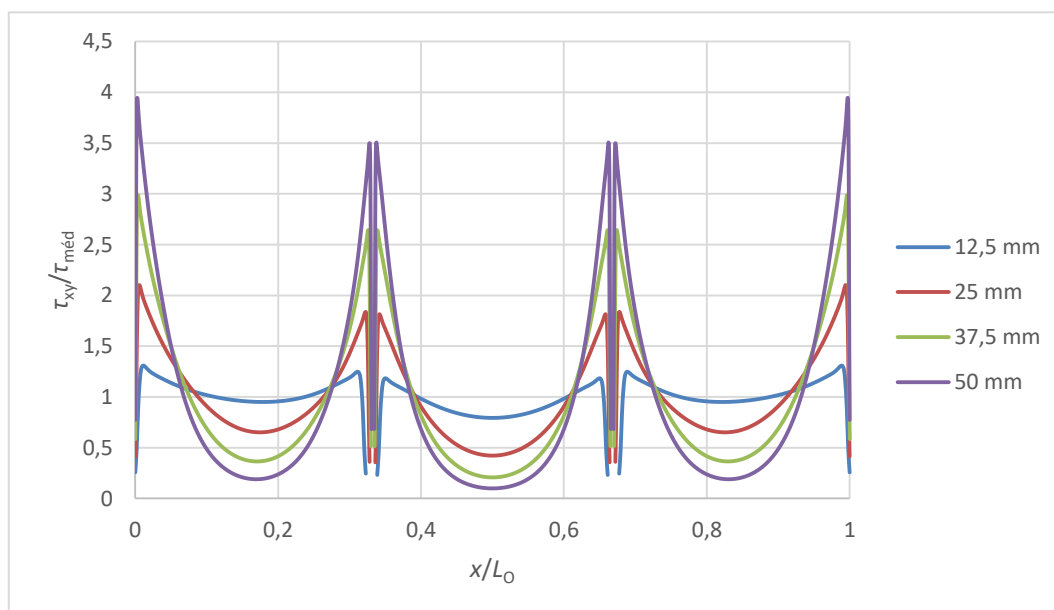


Figura 116 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de  $L_0$ .

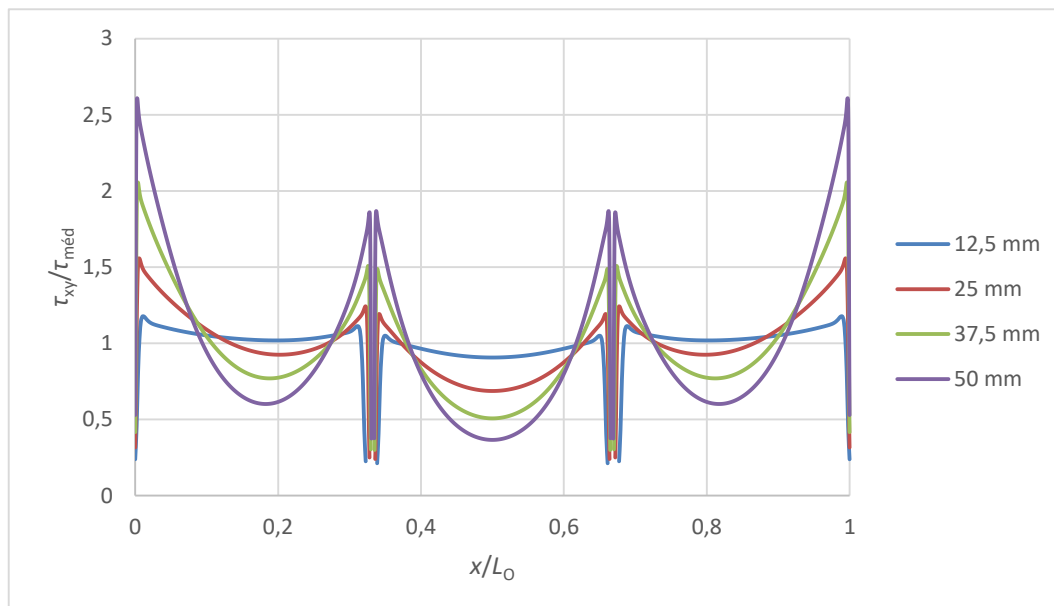


Figura 117 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de  $L_0$ .

No que respeita à distribuição de tensões  $\tau_{xy}$ , verifica-se a existência de uma grande variação no valor dos picos de tensão nas extremidades de  $L_0$  e nas transições entre degraus. No entanto, dentro dos patamares de sobreposição a evolução da tensão de corte é análoga à variação verificada nas JSS, ou seja, parte central pouco solicitada e picos de tensão nas extremidades de sobreposição [95]. Esta distribuição característica das tensões  $\tau_{xy}$  deve-se a fenómenos relacionados com a variação da deformação axial dos aderentes ao longo de  $L_0$  (esta é cada vez menor na direção da redução da espessura do aderente). Assim, dois aderentes em sobreposição, com comportamentos opostos no que respeita à deformação, originam picos de tensões  $\tau_{xy}$  em ambas as extremidades de sobreposição. De verificar que a magnitude de tensões  $\tau_{xy}$  é ligeiramente superior nas extremidades de  $L_0$ , comparativamente aos picos verificados nas transições de degrau, embora esta variação não seja muito significativa [62]. Ao analisar a evolução das tensões  $\tau_{xy}$  em função de  $L_0$ , é evidente que os picos de tensão aumentam progressivamente com este parâmetro, devido ao crescente gradiente de deformação axial dos aderentes. A alteração do perfil de tensões  $\tau_{xy}$ , provocado pelo aumento do  $L_0$ , pode afetar substancialmente o desempenho das ligações adesivas, especialmente se o adesivo for frágil. Neste caso, a rotura da ligação ocorre quando é alcançada a tensão de rotura do adesivo. Geralmente, o processo de rotura desencadeia-se nas extremidades de sobreposição da camada adesiva. Este tipo de fenómeno não é tão crítico quando se utiliza adesivos dúcteis, uma vez que este tipo de adesivo é passível de sofrer plastificação, ou seja, quando a tensão de pico é atingida verifica-se que a carga transmitida continua a aumentar até se atingir o limite de ductilidade do adesivo [96].

### 3.2.3.3 *Discussão de resultados*

Pela análise dos resultados numéricos das tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ , conclui-se que os valores de  $P_{\text{máx}}$  das juntas não devem aumentar na mesma proporção do aumento do  $L_0$ , especialmente quando se considera um adesivo frágil na construção da junta, uma vez que as tensões de pico  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  aumentam com  $L_0$ . Pela análise global dos gráficos correspondentes à distribuição de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  apresentadas nas figuras das secções 3.2.3.1 e 3.2.3.2 respetivamente, é possível constatar que, independentemente do perfil gráfico da distribuição de tensões, é bem claro que o aumento da rigidez do adesivo provoca o aumento dos picos de tensão normalizada, especialmente nas extremidades dos degraus. Perante esta evidência, verifica-se que o estudo de tensões desenvolvido se encontra em concordância com trabalhos anteriormente realizados no âmbito do estudo de juntas adesivas em degrau. De salientar os trabalhos realizados por Ichikawa et al. [62] e Akpınar [63], onde se constatou que o processo global de deformação da junta é regido pela deformação dos aderentes, onde os adesivos de maior rigidez apresentam picos de tensão mais elevados. A resistência das juntas adesivas encontra-se condicionada pelos picos de tensão que se verificam na camada adesiva. Pelo conhecimento adquirido ao longo dos anos é comprovado que os adesivos de cariz frágil são especialmente suscetíveis aos efeitos dos picos, uma vez que estes não têm capacidade para os acomodar [70]. No que respeita à análise da distribuição de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  em função de  $L_0$ , apresentadas nos gráficos da Figura 112 à Figura 117, é possível constatar que as principais diferenças respeitantes às tensões de pico verificadas para os adesivos em análise vêm de encontro ao anteriormente referido, no que respeita à influência da rigidez do adesivo.

### 3.2.4 *Estudo da variável de dano*

Este subcapítulo descreve o estudo da variável do dano (SDEG) dos elementos coesivos do adesivo. A partir do estudo da variável SDEG, é possível compreender o fenómeno de degradação do adesivo nas diversas fases do carregamento, graças aos MDC implementados na técnica EF. Assim, o estudo apresentado tem como objetivo descrever a extensão do dano ao longo do adesivo em diversas fases de carregamento das juntas. Um valor de SDEG=0 indica que o elemento coesivo ainda não sofreu degradação e SDEG=1 indica que o elemento coesivo se encontra em degradação máxima, ou seja, rotura. Um valor de SDEG entre estes dois limites significa que o elemento coesivo está em processo de degradação. São analisados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Para cada adesivo usado nas juntas são analisadas as 4 geometrias de junta ( $L_0=12,5; 25; 37,5$  e  $50$  mm). O estudo da variável de dano SDEG é realizado com o sentido de avaliar a propagação do dano e explicar as variações de resistência registadas numericamente e experimentalmente.

### 3.2.4.1 Dano correspondente a $P_{m\acute{a}x}$

Neste estudo apresenta-se a variável de dano SDEG no instante em que se atinge  $P_{m\acute{a}x}$  nas juntas. Desta forma, a Figura 118, Figura 119 e Figura 120 mostra o estado de dano na camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

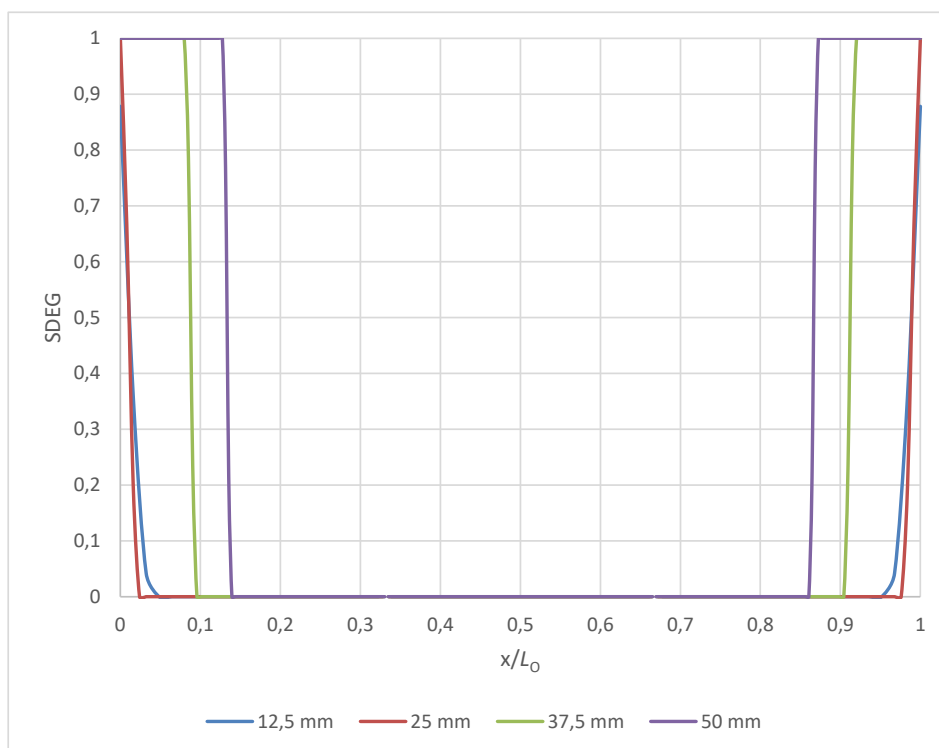


Figura 118 – Estado da variável de dano SDEG no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para o adesivo Araldite® AV138.

Pela análise gráfica, pode-se concluir que o adesivo Araldite® AV138 tem uma transição abrupta entre estados dos elementos coesivos, ou seja, verifica-se uma transição repentina de elemento não danificado a danificado. Este comportamento exibido pelo adesivo Araldite® AV138 está relacionado com a sua falta de capacidade de plastificação. Com o aumento progressivo da ductilidade dos adesivos, a evolução do dano torna-se cada vez mais suave, uma vez que neste caso a camada adesiva sofre deformações plásticas significativas antes de ocorrer a rotura completa. Este comportamento é particularmente evidente nas curvas relativas ao adesivo Sikaforce® 7752. Perante as diferenças de comportamento dos adesivos em relação à transição de estados de dano, verifica-se igualmente que, quando se atinge  $P_{m\acute{a}x}$ , nas juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 (maior rigidez), apenas é registado dano nos degraus periféricos.

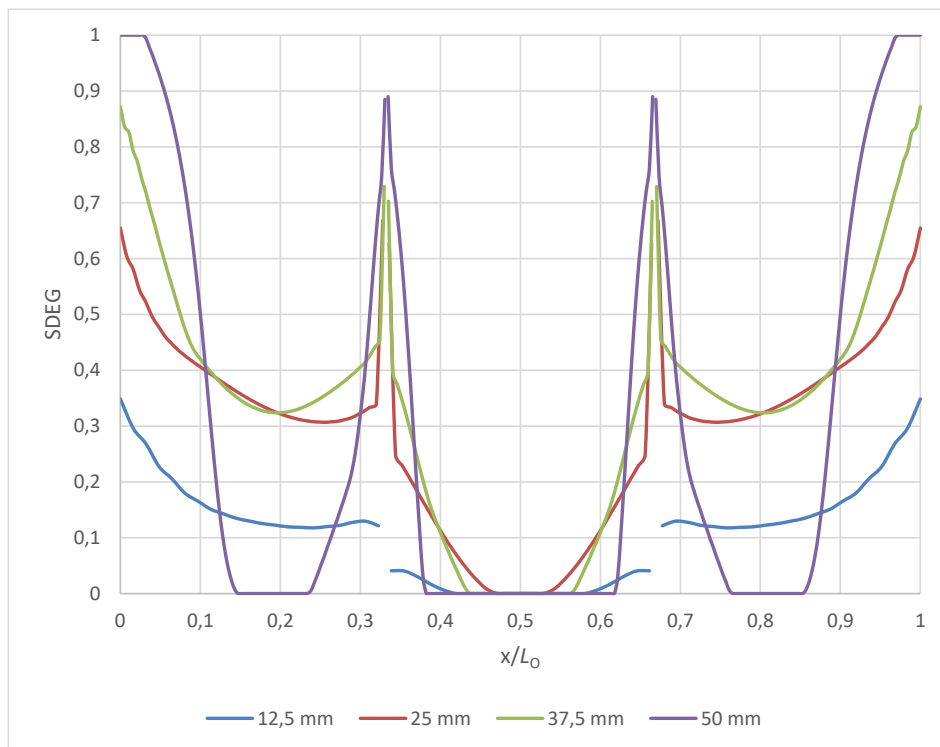


Figura 119 – Estado da variável de dano SDEG no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para o adesivo Araldite® 2015.

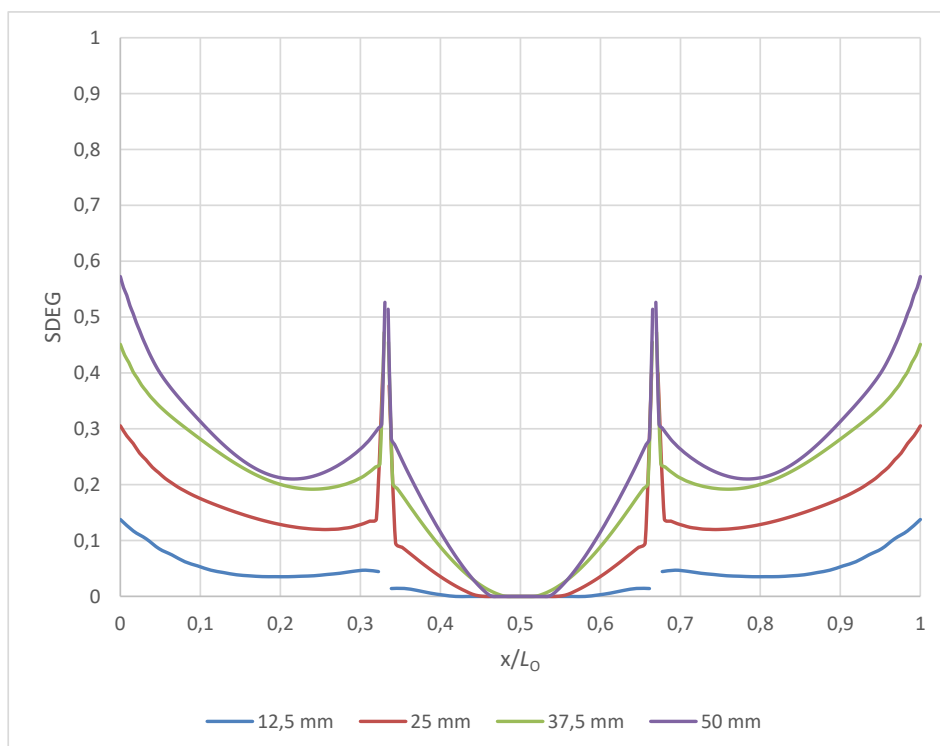


Figura 120 – Estado da variável de dano SDEG no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para o adesivo Sikaforce® 7752.

No entanto, no que respeita aos adesivos dúcteis, verifica-se que todos os degraus ao longo do comprimento de sobreposição registam dano, embora com maior preponderância nos degraus exteriores.

Em relação ao estudo realizado, é possível comprovar que os adesivos dúcteis permitem uma maior extensão de dano o que, em termos de valores de  $P_{m\acute{a}x}$ , se deve traduzir num melhor desempenho, uma vez que uma maior porção do comprimento colado contribui para a resistência da junta [97]. Para todos os adesivos, o dano inicia-se nas extremidades de  $L_0$ , o que se encontra de acordo com a localização dos picos de tensão  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  anteriormente determinados e discutidos.

O aumento de  $L_0$  promove uma maior extensão de dano, especialmente para o interior da região de colagem, devido ao aumento combinado das tensões de arrancamento e do efeito da deformação diferencial dos aderentes. Isso está relacionado com a degradação provocada pelo estado de tensão quando se atinge o valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , que se reflete em relações  $P_{m\acute{a}x}/L_0$  gradualmente menores à medida que  $L_0$  aumenta. No entanto, a redução de desempenho das juntas adesivas em degrau com o aumento do valor de  $L_0$  é muito menos acentuada relativamente à redução exibida pelas JSS [98], uma vez que a configuração em degrau consegue distribuir as cargas mais uniformemente ao longo do comprimento de colagem devido à redução de  $t_p$ , que por sua vez provoca um aumento dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  para valores  $L_0$  equivalentes.

#### *3.2.4.2 Evolução do dano com o carregamento*

Nos gráficos referentes à evolução do dano são apresentadas as curvas SDEG para diferentes rácios de  $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$  [%], onde  $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$  é o deslocamento verificado quando se atinge o valor de  $P_{m\acute{a}x}$ . Da Figura 121 à Figura 124 representam-se os gráficos relativos à evolução da variável SDEG para vários instantes do carregamento das juntas adesivas coladas com adesivo Araldite® AV138, em função dos valores de  $L_0$  em estudo.

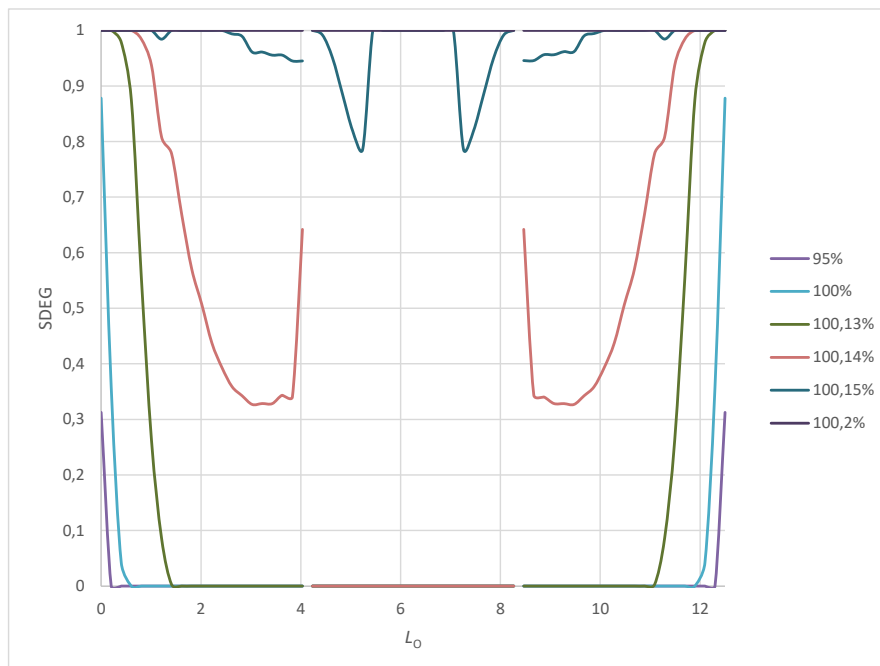


Figura 121 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm.

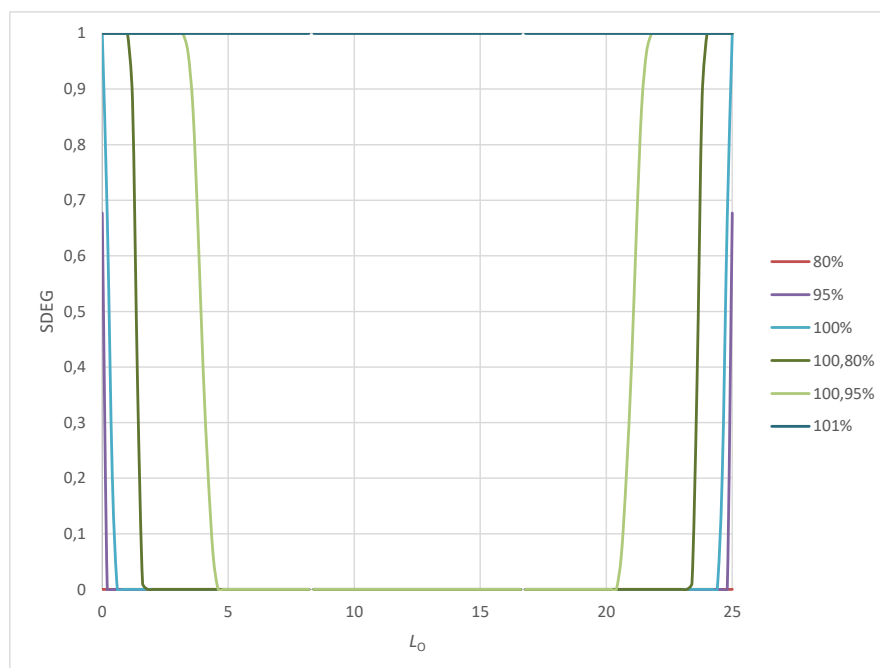


Figura 122 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e  $L_0=25$  mm.

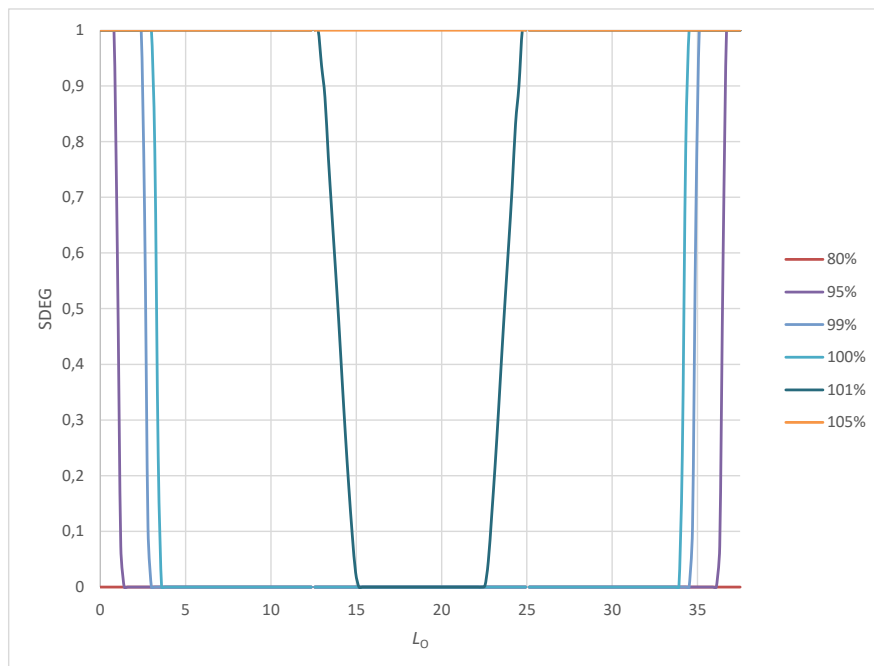


Figura 123 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e  $L_0=37,5$  mm.

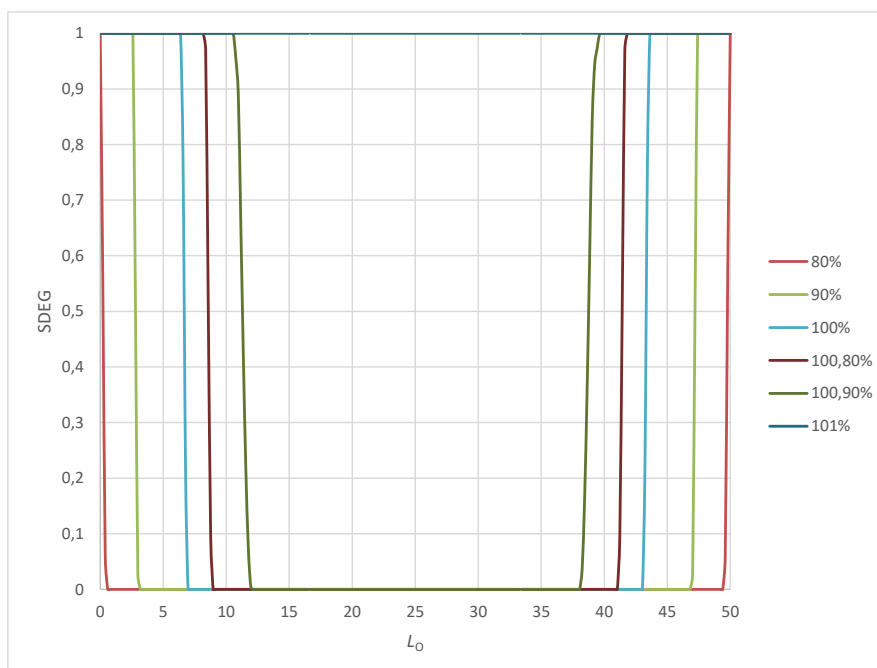


Figura 124 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® AV138 e  $L_0=50$  mm.

Da Figura 125 à Figura 128, representam-se os gráficos relativos à evolução da variável SDEG para vários instantes do carregamento (Araldite® 2015).

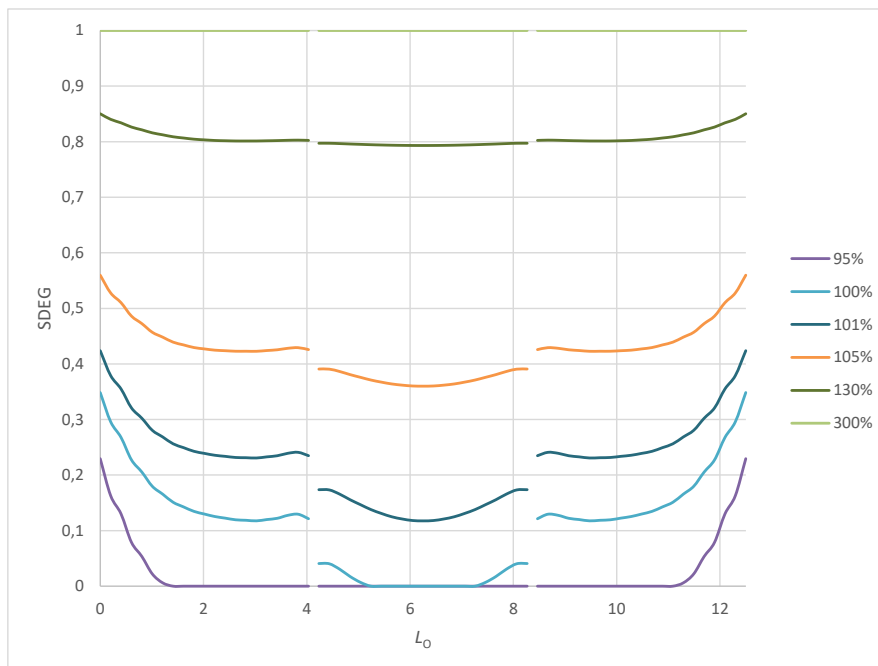


Figura 125 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e  $L_0=12,5$  mm.

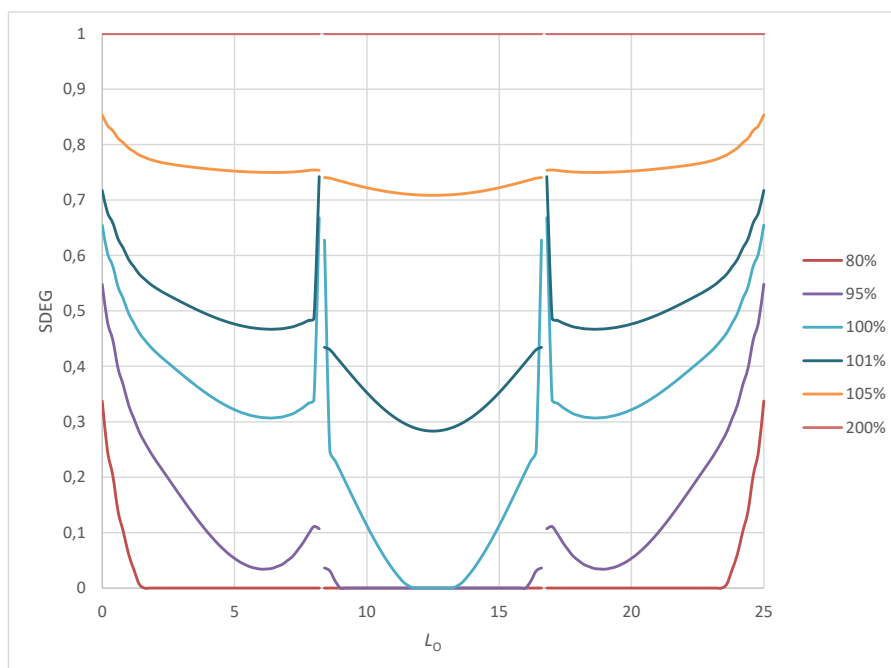


Figura 126 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e  $L_0=25$  mm.

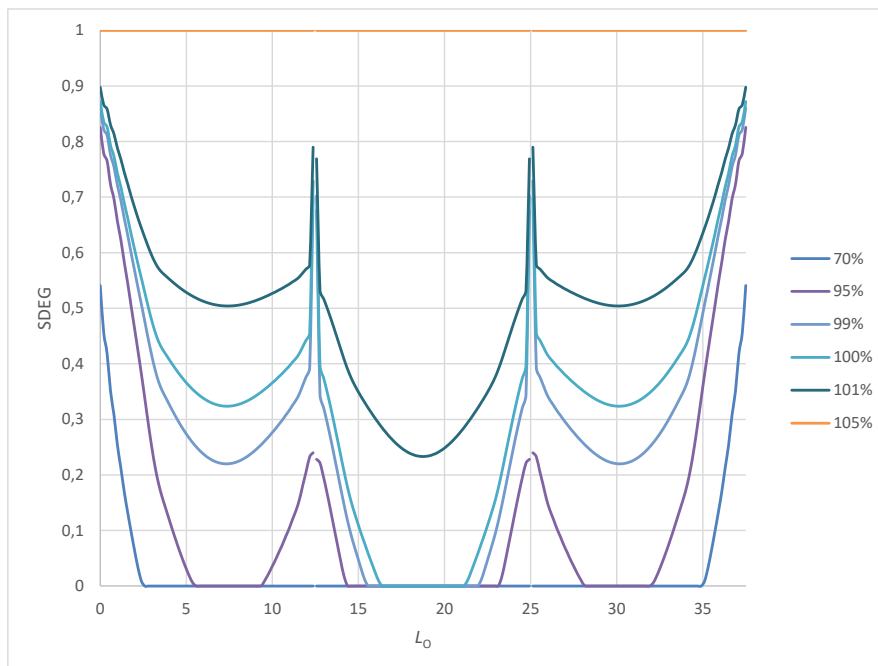


Figura 127 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm.

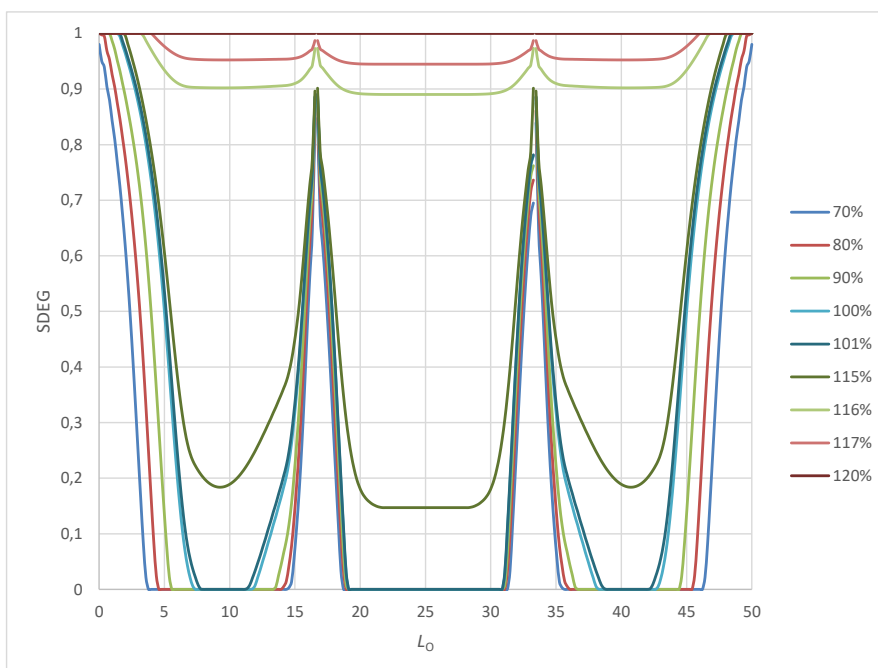


Figura 128 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\text{máx}}$  para juntas adesivas coladas com Araldite® 2015 e  $L_0=50$  mm.

Da Figura 129 à Figura 132, representam-se os gráficos relativos à evolução da variável SDEG para o adesivo Sikaforce® 7752, em função dos valores de  $L_0$  em estudo.

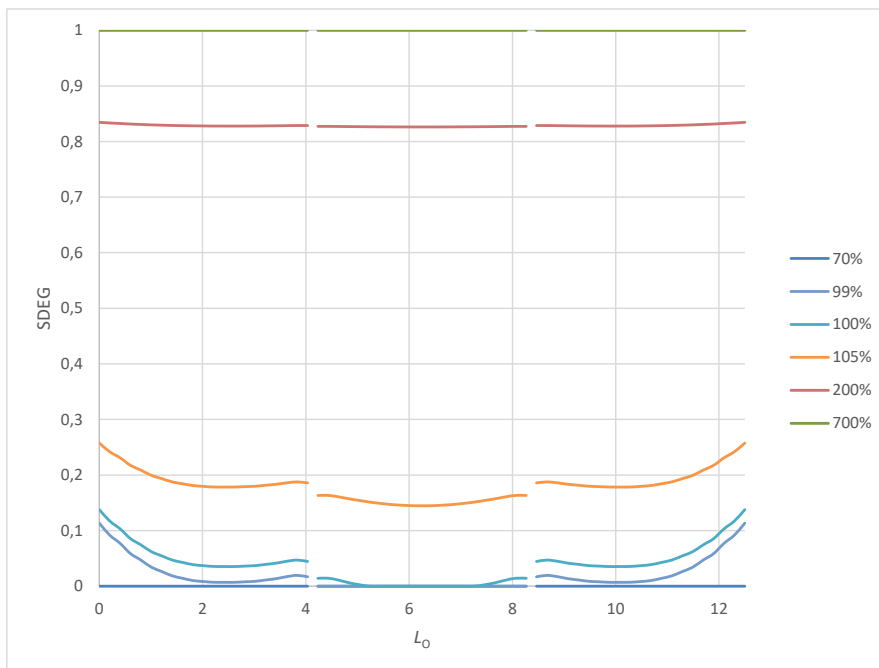


Figura 129 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$  para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e  $L_0=12,5$  mm.

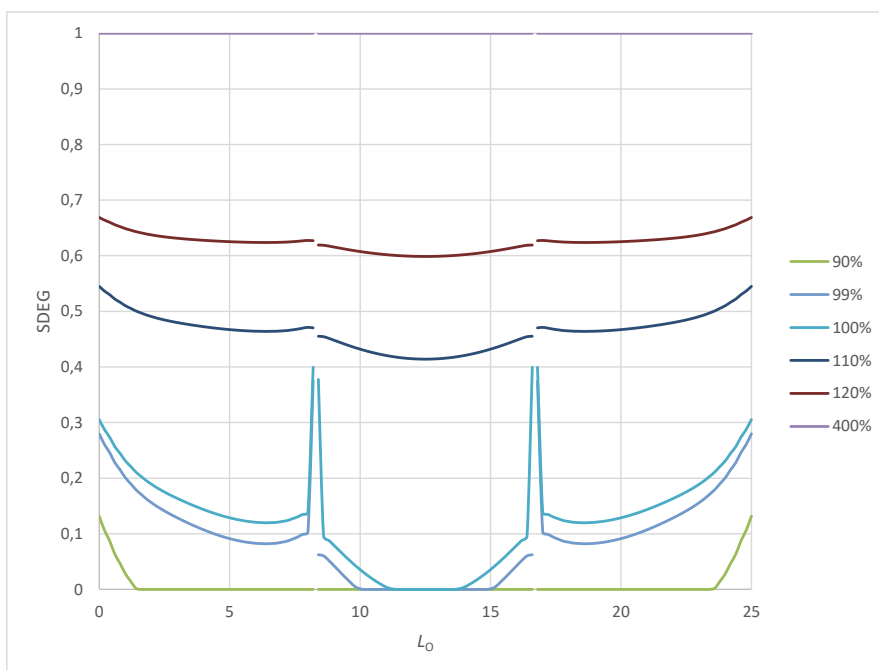


Figura 130 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{m\acute{a}x}$  para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e  $L_0=25$  mm.

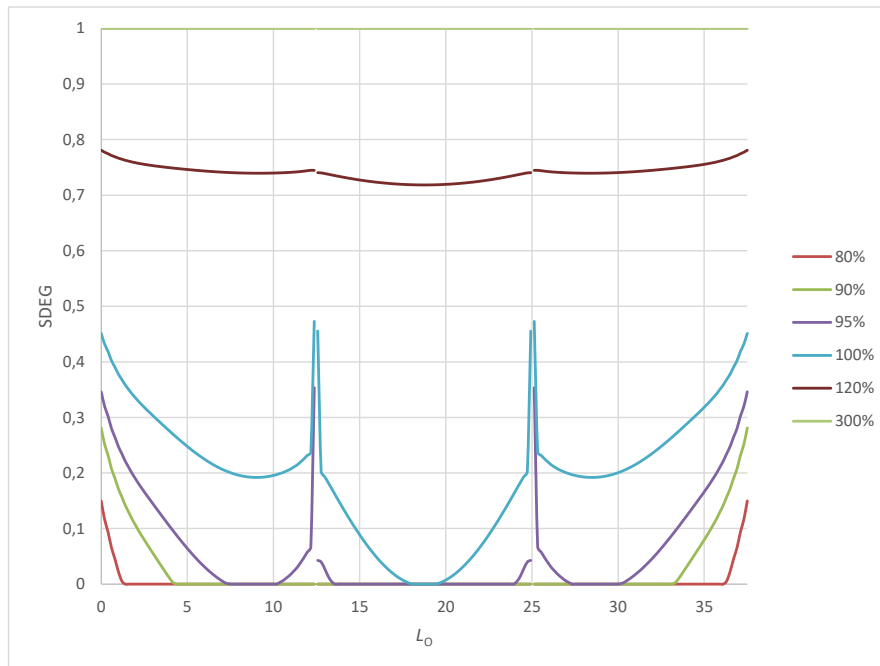


Figura 131 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\max}$  para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e  $L_0=37,5$  mm.

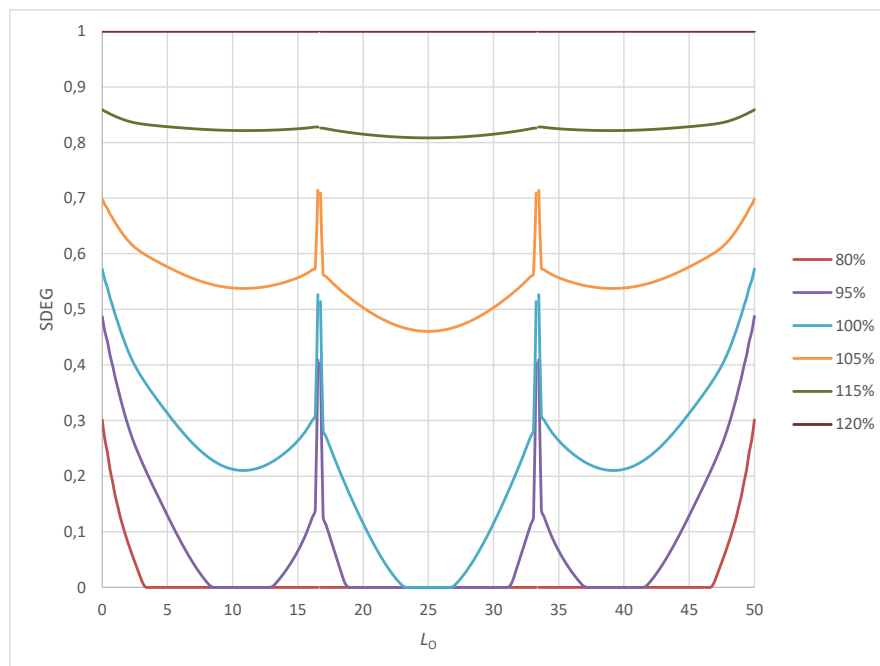


Figura 132 – Evolução da variável de dano SDEG em função de  $\delta/\delta_{\max}$  para juntas adesivas coladas com Sikaforce® 7752 e  $L_0=50$  mm.

Para o adesivo Araldite® AV138, o intervalo entre ausência de dano (SDEG=0) e falha (SDEG=1) é muito curto devido à fragilidade deste adesivo. Independentemente do valor

do  $L_0$ , constatou-se que o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  está apenas associado a uma pequena plastifica das extremidades de sobreposi da junta, o que  indicativo que o aumento dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  com o incremento do  $L_0$  não  muito significativo. Um comportamento semelhante foi encontrado em condies idênticas para JSS no trabalho de Fernandes et al. [98]. Devido às características do adesivo, o valor de  $\delta$  necessário aplicar desde o início do dano até a falha  extremamente curto, indicativo de uma rotura repentina (a separao dos aderentes foi alcançada para  $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100,20\%$  ( $L_0=12,5$  mm) e  $101\%$  ( $L_0=50$  mm)). O aumento da ductilidade do adesivo muda completamente o processo de rotura, uma vez que a variao do dano  muito mais suave para todos os estágios de carregamento. Além disso, em  $P_{m\acute{a}x}$  apenas uma pequena porão de adesivo ainda está na parte elástica do carregamento ( $\approx 19,3\%$  para  $L_0=12,5$  mm e  $7,6\%$  para  $L_0=50$  mm). Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, o dano total corresponde a  $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \approx 300\%$  ( $L_0=12,5$  mm) e  $120\%$  ( $L_0=50$  mm). No caso do Sikaforce® 7752, o dano total corresponde a  $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \approx 700\%$  ( $L_0=12,5$  mm) e  $120\%$  ( $L_0=50$  mm). Este comportamento está geralmente relacionado a uma utilizao muito mais eficiente da resistência do adesivo [98].

### 3.2.5 Modos de rotura experimentais e numéricos

Experimentalmente, foram verificadas roturas coesivas para todas as juntas ensaiadas, o que  indicativo de uma ligao eficiente entre os aderentes e o adesivo. No que se refere aos caminhos de rotura das juntas, estes não foram capturados durante o ensaio experimental das juntas, uma vez que não se encontram disponíveis dispositivos ticos para o seu registo. No entanto, os detalhes da rotura podem facilmente ser determinados e compreendidos através dos modelos numéricos pela análise da evoluo do dano em funo do valor do  $L_0$  e do tipo de adesivo.

Os caminhos de rotura descritos de seguida têm como base a nomenclatura apresentada na Figura 133, onde se indicam os diferentes locais de ocorrência de dano na camada adesiva. Na Tabela 16 apresentam-se os caminhos tpicos de rotura e a respetiva deformao plástica máxima dos aderentes em termos percentuais e a sua localizao (se aplicável) para o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  das juntas analisadas através dos MDC.

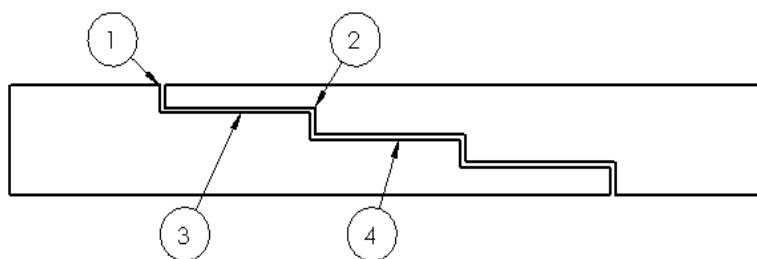


Figura 133 – Esquema referente  identificao e localizao das regiões de rotura.

Tabela 16 – Tabela resumo dos modos de rotura numéricos.

	12,5	25	37,5	50
<b>AV138</b>				
Caminho de rotura	1-2-3-4	1-2-3-4	1-2-3-4	1-2-3-4
Deformação plástica [%]	1-[0,047] 2-[0,14]	1-[0,46] 2-[1,68]	1-[0,65] 2-[2,64]	1-[0,72] 2-[3,80]
<b>2015</b>				
Caminho de rotura	1-2-3-4	1-2-3-4	1-2-3-4	1-2-3-Plast
Deformação plástica [%]		1-[0,88]	1-[3,90]	2-[0,83]
<b>7752</b>				
Caminho de rotura	1-2-[3 e 4]	1-2-[3 e 4]	1-2-[3 e 4]	1-2-[3 e 4]
Deformação plástica [%]			1-[0,43]	1-[0,27] 2-[1,36]

Para o Araldite® AV138, independentemente de  $L_0$ , o caminho de rotura é sempre igual. Na verdade, a rotura do adesivo Araldite® AV138 começa a desenvolver-se nas transições de degrau, iniciando-se nas transições externas (1) e seguindo-se as transições internas (2), o que está de acordo com a análise de tensões e da evolução da variável de dano, uma vez que nestas regiões desenvolvem-se elevados picos de tensão que são preponderantes no processo de rotura. Posteriormente, o dano desenvolve-se nas regiões externas de sobreposição (3), seguindo-se a região interna (4).

Pelos resultados numéricos, verifica-se que a deformação plástica aumenta progressivamente com o aumento de  $L_0$ . De facto, para  $L_0=12,5$  mm regista-se uma deformação plástica de 0,047 e 0,14% nas regiões (1) e (2), respetivamente, enquanto para  $L_0=50$  mm foram registadas deformações plásticas de 0,72 e 3,80% nas regiões (1) e (2), respetivamente. Na Figura 134 mostra-se o estado da variável SDEG no instante em que se atinge  $P_{m\acute{a}x}$  da junta com adesivo Araldite® AV138, onde se verifica que o dano já ocorreu nas regiões externas da junta (localizações 1 e 3).

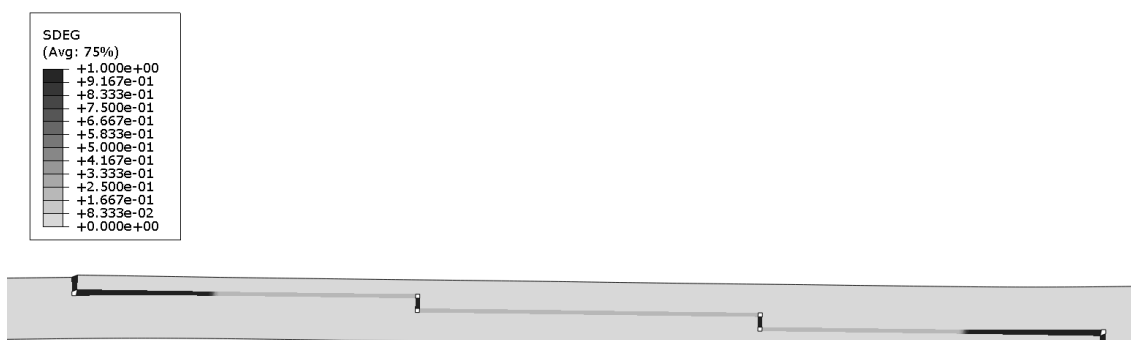


Figura 134 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge  $P_{m\acute{a}x}$  para juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=50$  mm.

Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, o caminho de rotura do adesivo segue a mesma sequência anterior para  $L_0 \leq 37,5$  mm, embora sem plastificação dos aderentes para  $L_0=12,5$  mm. A Figura 135 representa o estado da variável SDEG no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  para  $L_0=12,5$  mm.

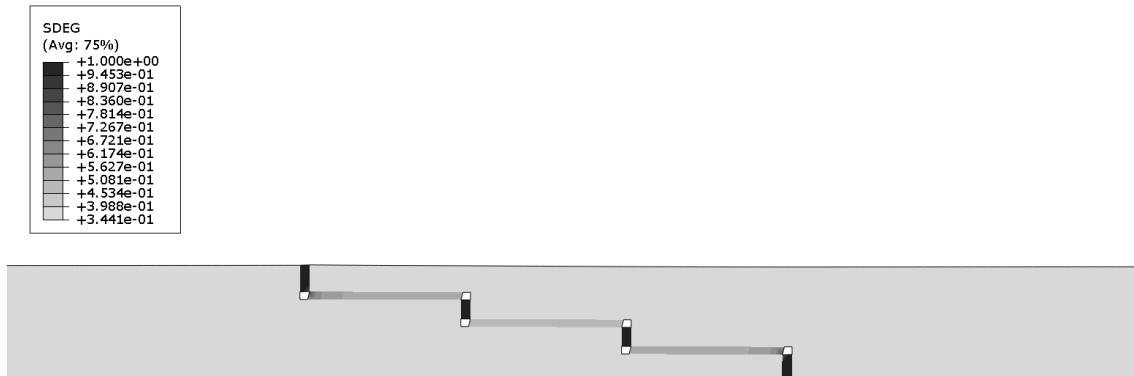


Figura 135 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge  $P_{m\acute{a}x}$  para juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=12,5$  mm.

Para valores de  $L_0=25$  e  $37,5$  mm o processo de rotura do adesivo Araldite® 2015 é idêntico ao do Araldite® AV138, demonstrado na Figura 134. Já para  $L_0=50$  mm o processo de dano desencadeia-se de forma diferente. Neste caso, o dano inicia na região (1), seguido da região (2) e depois propaga-se para a região (3). A Figura 136 representa o processo de dano no instante em que ocorre  $P_{m\acute{a}x}$  para esta configuração de junta, onde se constata que a redução de espessura induzida pela plastificação da junta nas regiões (1) e (2) resulta em rotura na região (2) com o incremento de  $\delta$ .

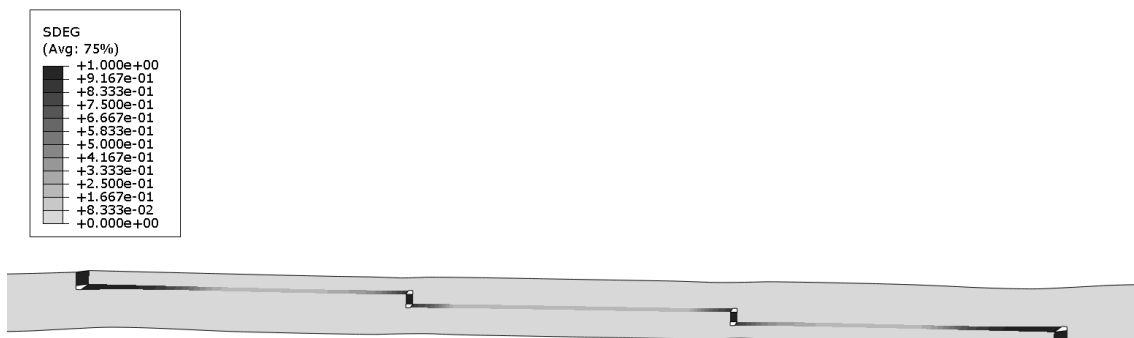


Figura 136 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge  $P_{m\acute{a}x}$  para juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=50$  mm.

Por fim, o comportamento de rotura do adesivo Sikaforce® 7752 apresenta um padrão semelhante entre todos os valores de  $L_0$ , que consiste em dano inicial e rotura na região (1), seguido da região (2), e finalmente com rotura simultânea nas regiões (3) e (4). A

diferença de comportamento deste adesivo, relativamente aos restantes, deve-se à sua maior ductilidade, o que induz um dano generalizado no comprimento de ligação, conforme previsto na secção 3.2.4. Para  $L_0=12,5$  e 25 mm, a deformação plástica é nula. Já para  $L_0=50$  mm, os resultados numéricos evidenciam deformação plástica de 0,27% e 1,36% nas regiões (1) e (2), respetivamente. Na Figura 137 é mostrado o estado da variável de dano do adesivo Sikaforce® 7752 no instante em que ocorre  $P_{m\acute{a}x}$  para  $L_0=12,5$  mm, onde se constata que o dano é idêntico em todas as regiões críticas da junta (porções verticais de adesivo).

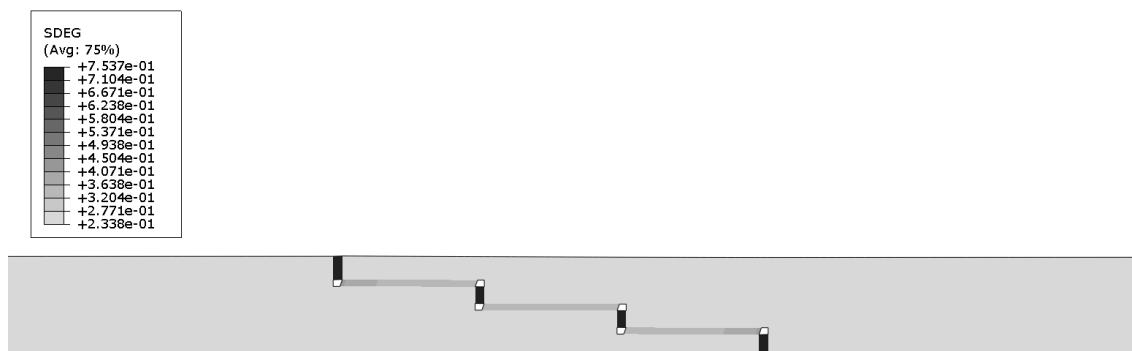


Figura 137 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge  $P_{m\acute{a}x}$  em juntas adesivas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=12,5$  mm.

### 3.2.6 Previsão do comportamento

Neste subcapítulo apresenta-se um estudo com o objetivo de avaliar a capacidade dos MDC em prever a resistência das juntas adesivas estudadas, bem como explicar de forma detalhada os resultados obtidos para os diversos tipos de junta. Apresentam-se inicialmente as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais. De seguida, é efetuada uma comparação dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  experimentais e numéricos por MDC.

Da Figura 138 à Figura 141 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  experimentais e numéricas das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de  $L_0$  de junta definidos. As curvas  $P-\delta$  experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 apresentam um comportamento semelhante durante o regime elástico. A partir da análise da Figura 138 à Figura 141 verifica-se que as curvas  $P-\delta$  das várias juntas experimentais apresentam uma correlação aceitável com a curva  $P-\delta$  numérica no que concerne ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivos valores de deslocamento. Em relação à evolução dos valores de  $P$  ao longo do processo de rotura (após de atingir  $P_{m\acute{a}x}$ ) verifica-se igualmente um bom acordo entre as curvas experimentais e a curva numérica. No que diz respeito aos deslocamentos de rotura, verifica-se que este foi ligeiramente inferior para a curva numérica.

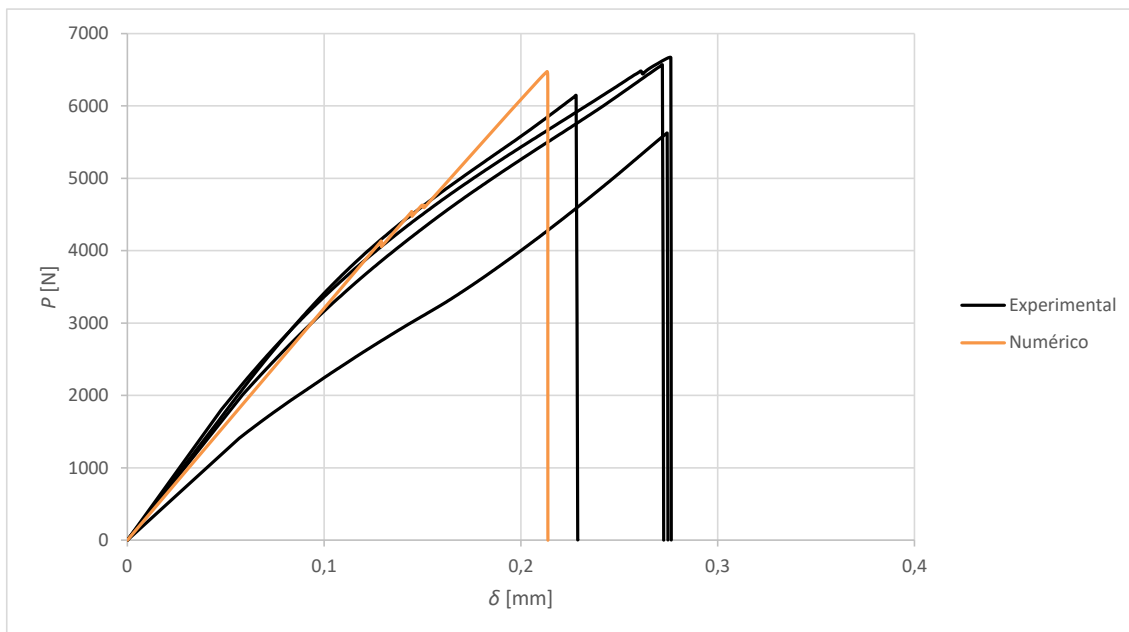


Figura 138 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm.

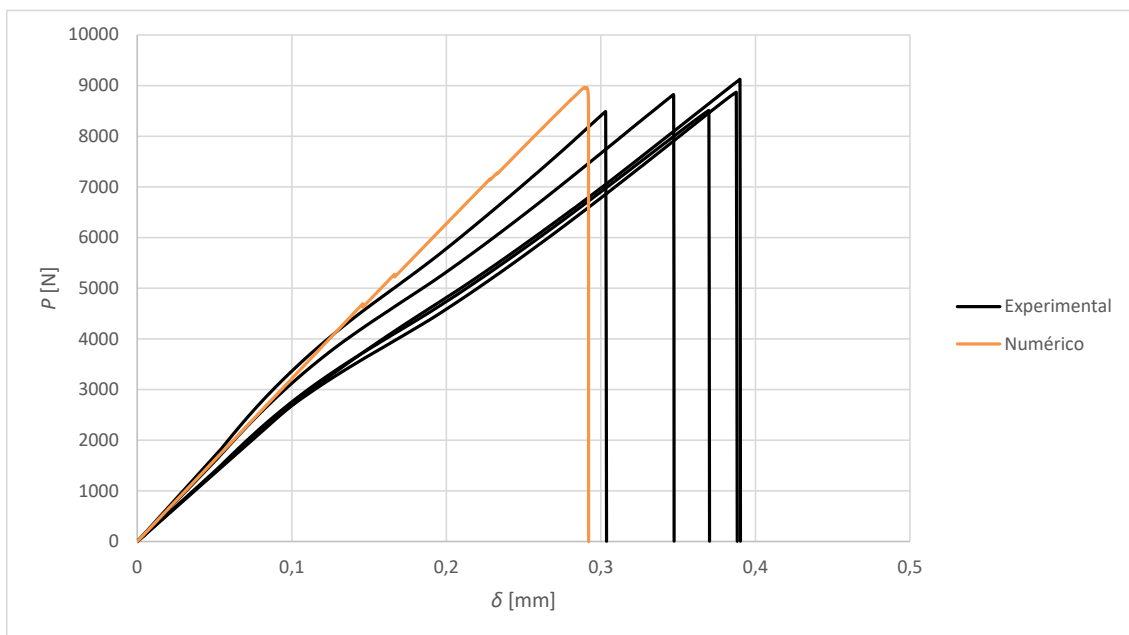


Figura 139 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=25$  mm.

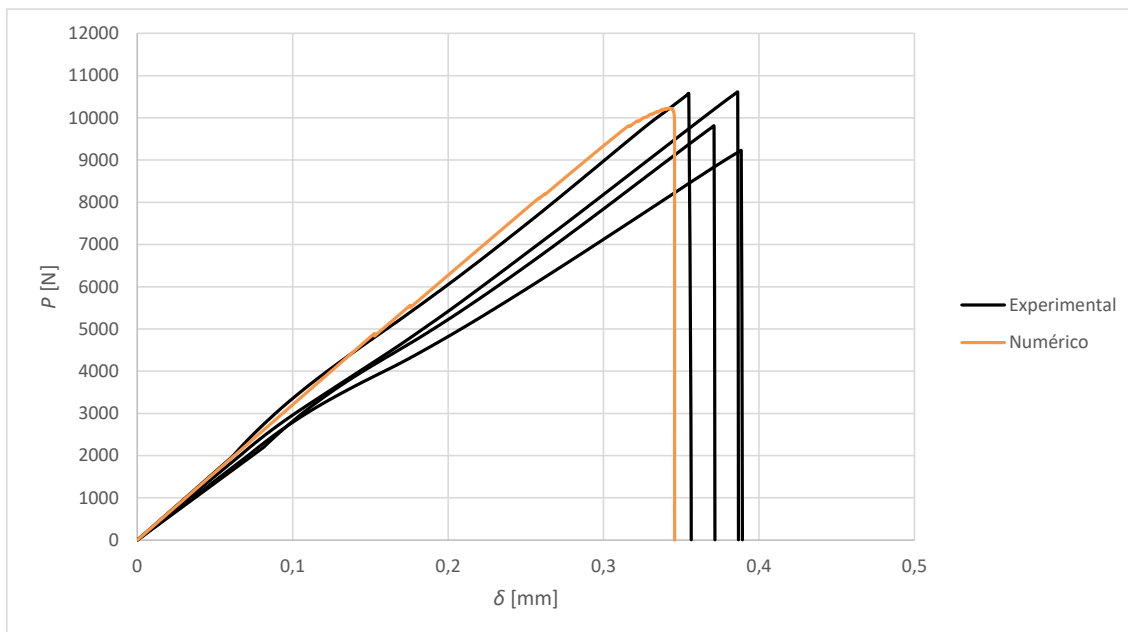


Figura 140 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=37,5$  mm.

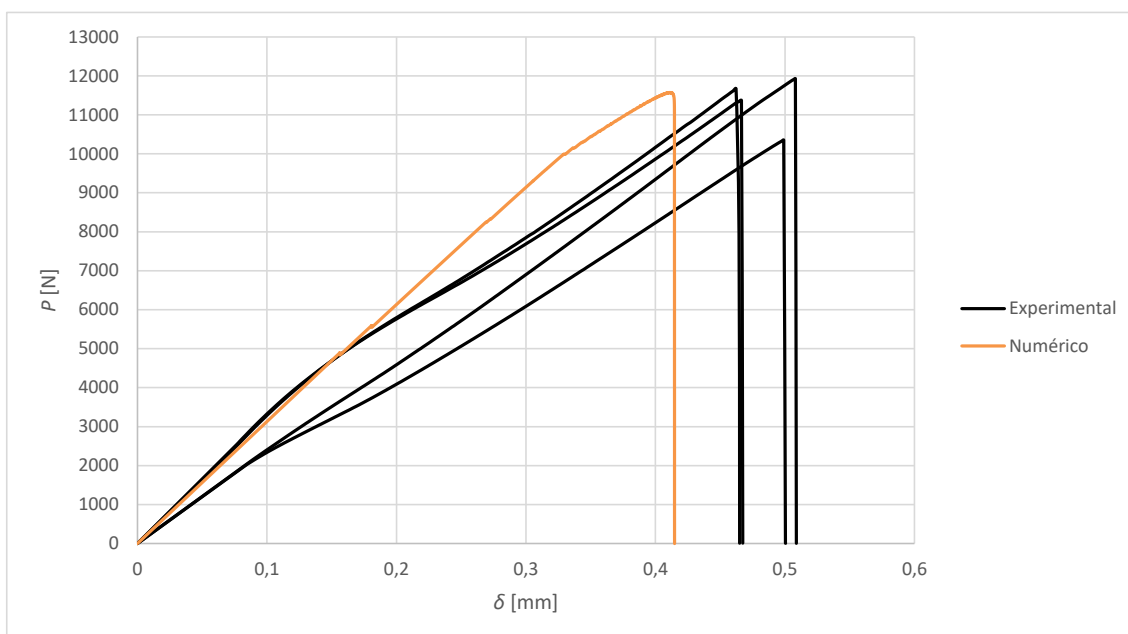


Figura 141 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=50$  mm.

Da Figura 142 à Figura 145 representam-se as curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, para os 4 valores de  $L_0$ .

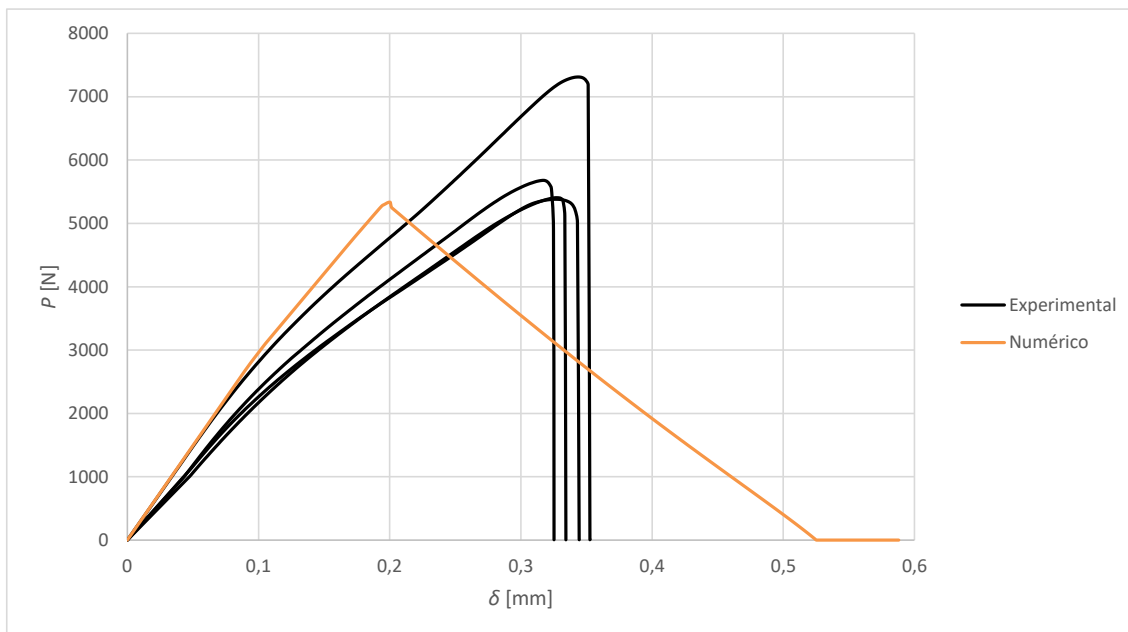


Figura 142 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=12,5$  mm.

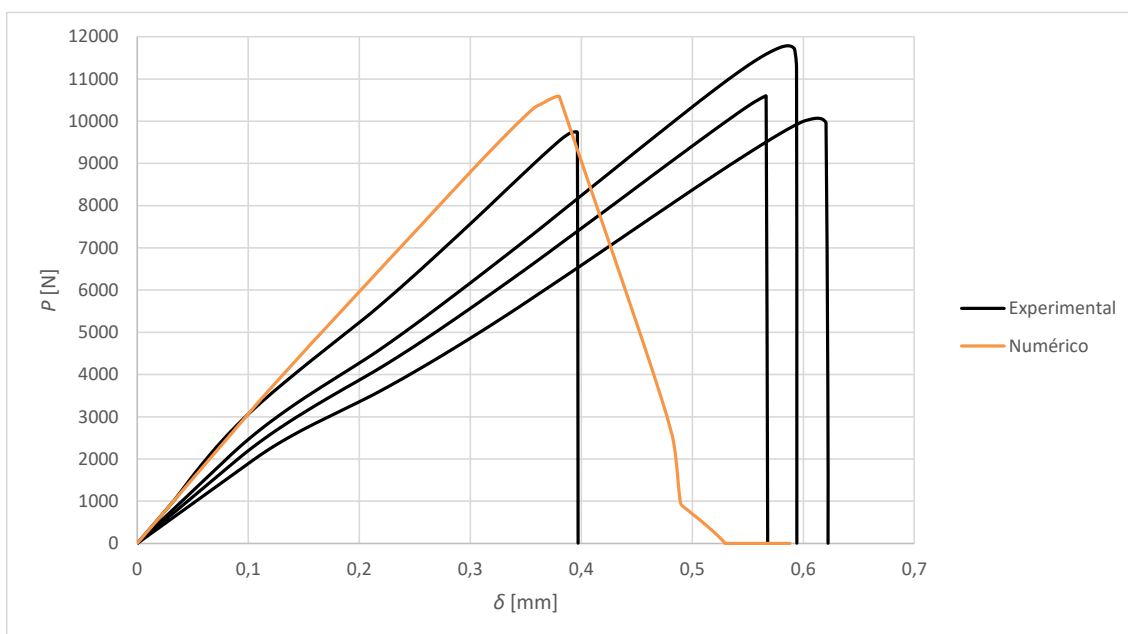


Figura 143 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=25$  mm.

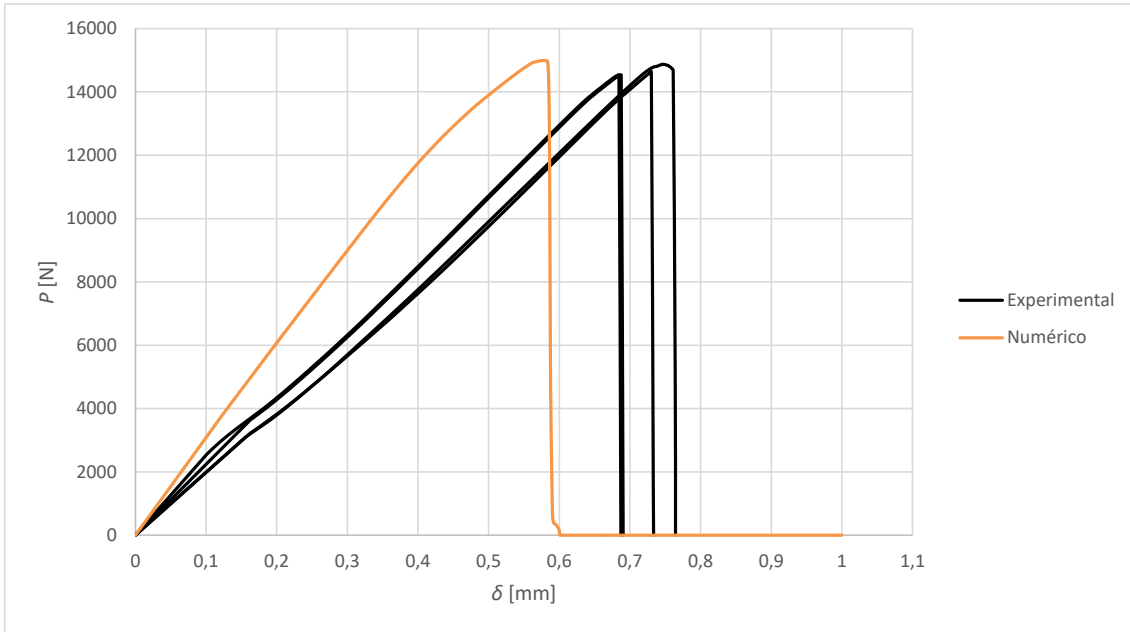


Figura 144 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm.

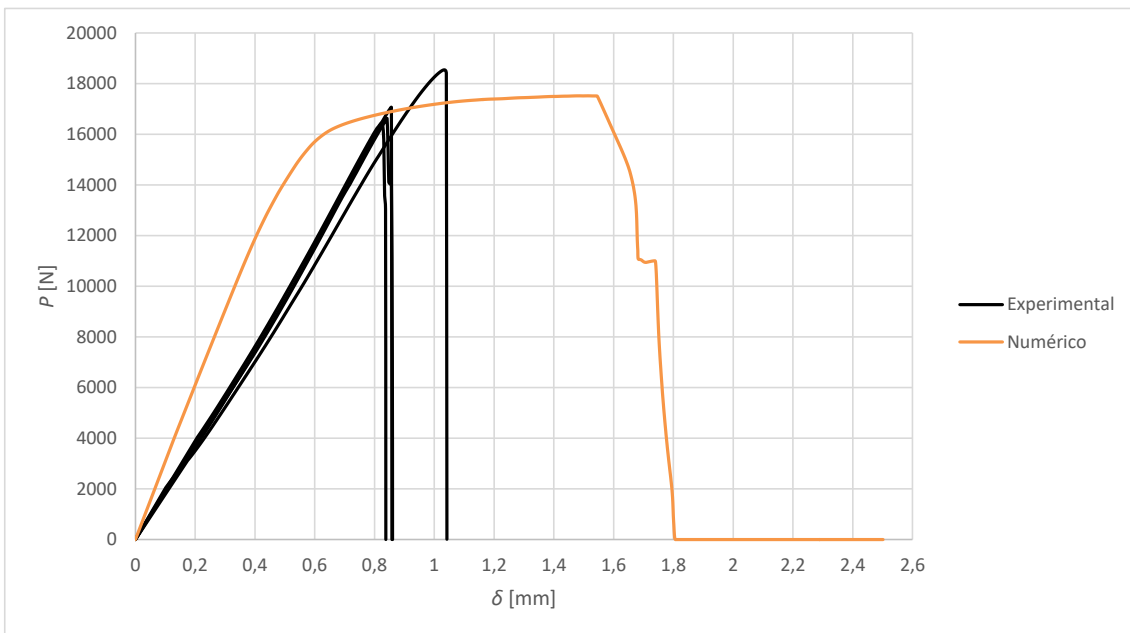


Figura 145 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=50$  mm.

Relativamente às curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, verifica-se que estas apresentam um comportamento elástico semelhante para cada valor de  $L_0$ . Nas juntas com  $L_0=12,5$ ; 25 e 37,5 mm (Figura 142, Figura 143 e Figura 144), verifica-se que as curvas  $P$ - $\delta$  das juntas experimentais apresentam uma boa correlação com a curva  $P$ - $\delta$  numérica no que concerne ao valor de

$P_{m\acute{a}x}$ , embora se verifique que o deslocamento correspondente seja inferior para as curvas numéricas. Em relação ao deslocamento de rotura, verifica-se uma discrepância em termos de valores e comportamento, especialmente na evolução dos valores de  $P$  ao longo do processo de rotura da junta com  $L_0=12,5$  e 25 mm. Já para a junta com  $L_0=37,5$  mm, é obtido um bom acordo no que respeita à evolução dos valores de  $P$  após atingir  $P_{m\acute{a}x}$ . Relativamente à junta com  $L_0=50$  mm (Figura 144), verifica-se um bom ajuste no que concerne ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  alcançado, mas em relação ao deslocamento verifica-se que a curva  $P-\delta$  numérica apresenta um deslocamento bastante superior no instante em que ocorre  $P_{m\acute{a}x}$ . Igualmente, constata-se que as curvas experimentais apresentam um valor inferior no que respeita ao deslocamento de rotura.

Da Figura 146 à Figura 149 apresentam-se as curvas  $P-\delta$  experimentais e numéricas das juntas coladas com adesivo Sikaforce® 7752, para os 4 valores de  $L_0$ .

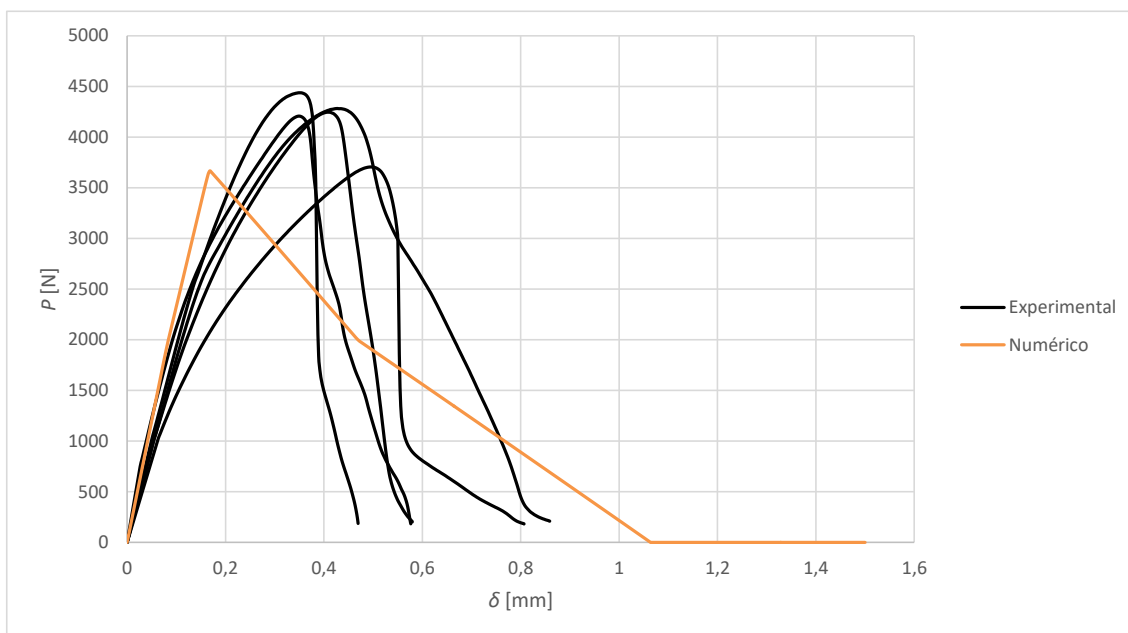


Figura 146 – Curvas  $P-\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=12,5$  mm.

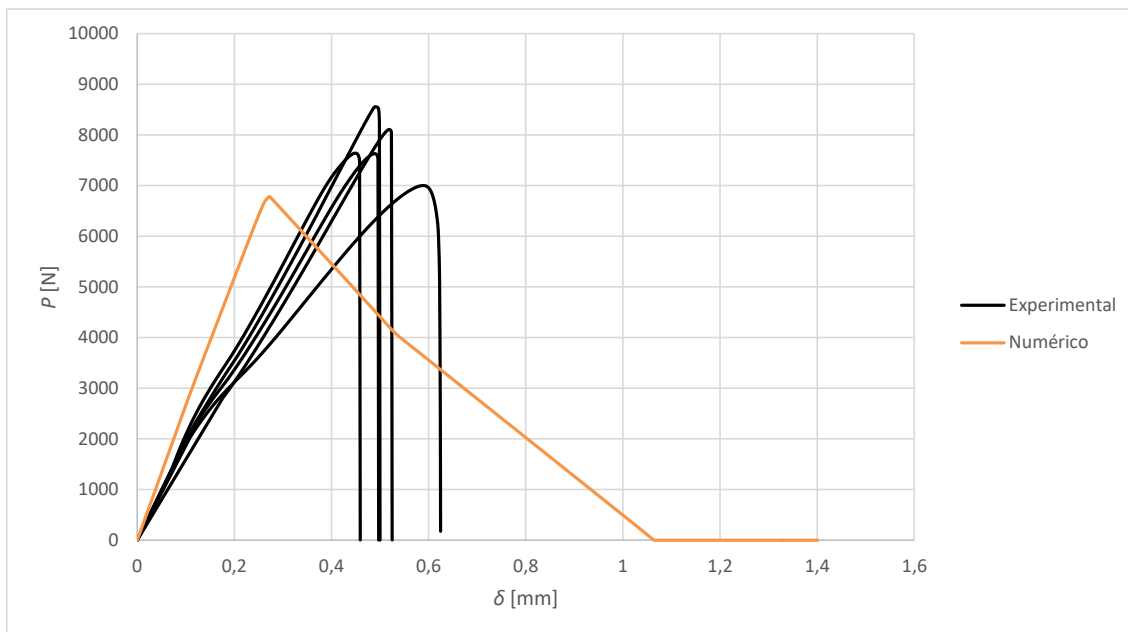


Figura 147 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=25$  mm.

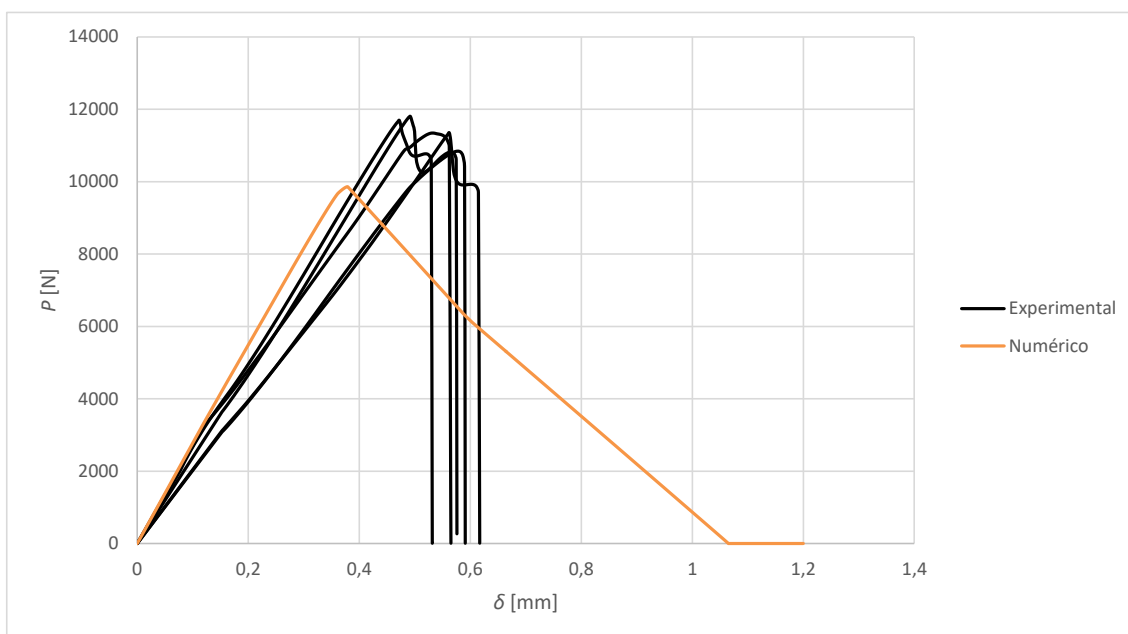


Figura 148 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=37,5$  mm.

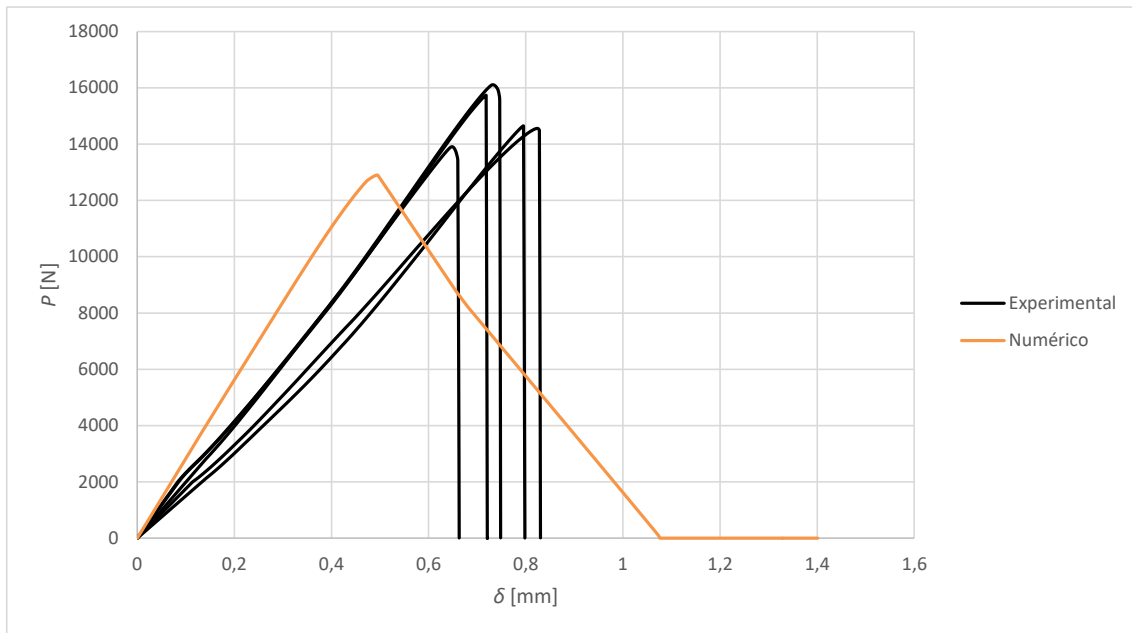


Figura 149 – Curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=50$  mm.

Pela análise das curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se a existência de uma concordância aceitável na fase inicial do carregamento das juntas até se atingir  $P_{m\acute{a}x}$ . Relativamente ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo deslocamento, verifica-se que as curvas numéricas atingem menores valores comparativamente com os resultados obtidos experimentalmente. Relativamente à evolução das curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais ao longo do processo de rotura da junta, verifica-se igualmente divergência de comportamento quer em termos de evolução dos valores de  $P$  quer no que respeita aos deslocamentos de rotura, verificando-se que este foi ligeiramente superior para a curva numérica. Tal facto está relacionado com o MDC aplicado no estudo EF não ser o mais adequado para traduzir o comportamento plástico devido à alta ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752.

De seguida efetua-se uma análise dos resultados de  $P_{m\acute{a}x}$  por adesivo em função de  $L_0$ , onde se pretende avaliar a capacidade do modelo numérico implementado no estudo na determinação dos valores de resistência. Na Figura 150, Figura 151 e Figura 152 mostram-se os gráficos onde estão representados os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos experimentalmente e numericamente pelas juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. No que concerne aos resultados obtidos experimentalmente, os valores apresentados referem-se aos valores médios de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo desvio padrão.

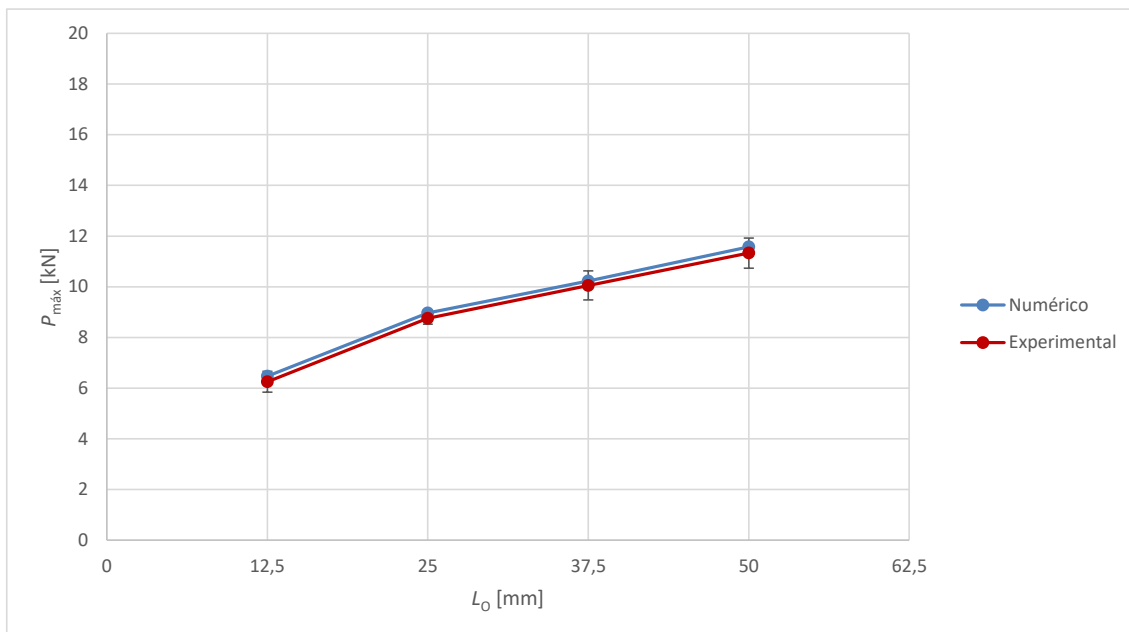


Figura 150 – Valores de  $P_{máx}$  obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 em função do valor de  $L_0$ .

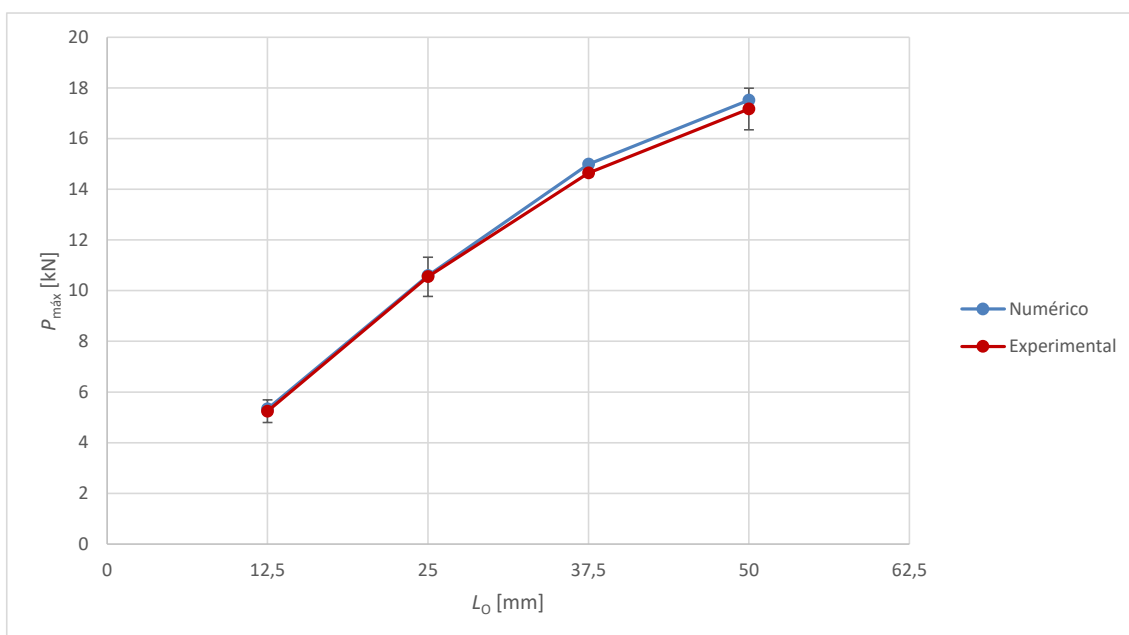


Figura 151 – Valores de  $P_{máx}$  obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com adesivo Araldite® 2015 em função do valor de  $L_0$ .

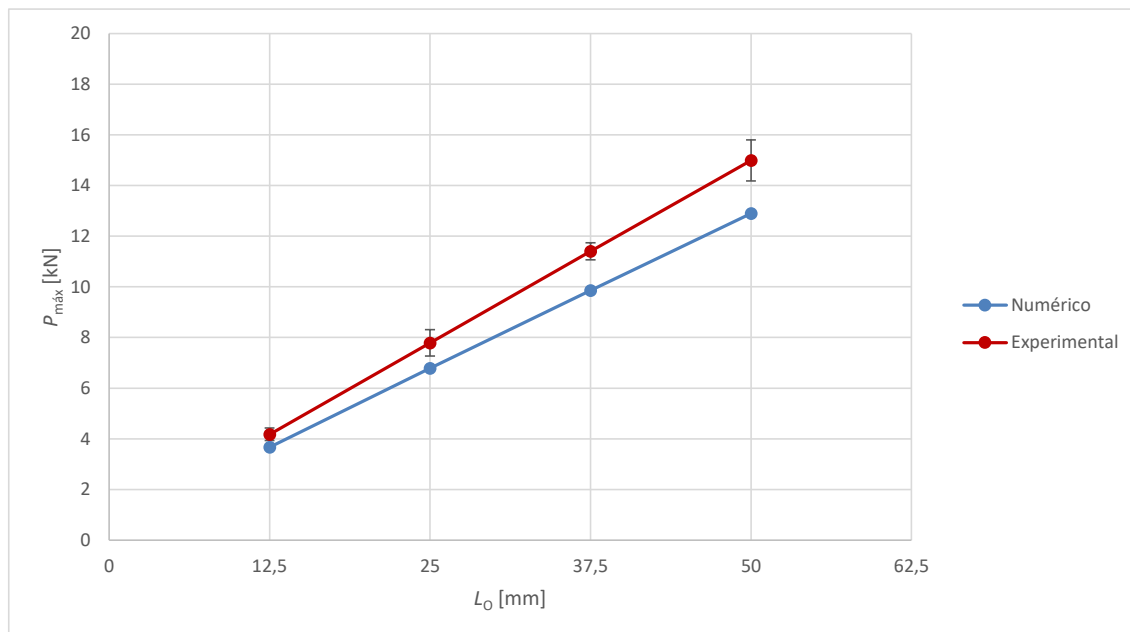


Figura 152 – Valores de  $P_{máx}$  obtidos experimentalmente e numericamente para juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do valor de  $L_0$ .

Pela análise dos resultados, verifica-se a existência de uma boa correlação entre os resultados numéricos e experimentais para os adesivos Araldite® AV138 e 2015. De facto, o máximo desvio percentual dos valores de  $P_{máx}$  determinados para os adesivos Araldite® AV138 e 2015 foram de 3,6% para  $L_0=12,5$  mm e 2,4% para  $L_0=37,5$  mm, respetivamente. Por outro lado, para o adesivo Sikaforce® 7752, os valores de  $P_{máx}$  determinados numericamente foram mais baixos que os experimentais. Em termos de percentagem, o desvio verificado foi de 12,2, 12,9, 13,6 e 13,9% para os valores de  $L_0=12,5$ , 25, 37,5 e 50 mm, respetivamente. A diferença verificada entre resultados numéricos e experimentais deve-se à rotura ocorrer após plastificação significativa, que não é capturada com precisão pelo MDC triangular aplicado no estudo numérico. Na verdade, os MDC implementados na técnica EF subestimam as tensões transmitidas após o início do dano, o que geralmente resulta em valores de  $P_{máx}$  inferiores. Para melhores resultados, uma boa solução passaria pelo uso de MDC trapezoidais na técnica de EF [99] para obtenção de resultados mais precisos. No entanto, no geral, considera-se que se obteve uma previsão bastante satisfatória.

### 3.2.7 Comparação da resistência das juntas em degrau com juntas de sobreposição simples e dupla

Neste capítulo é feita uma análise gráfica comparando os valores de resistência obtidos experimentalmente na presente dissertação, com os valores de resistência da JSS e JSD obtidas nos trabalhos experimentais de Carvalho e Campilho [100, 101].

### 3.2.7.1 Araldite® AV138

Ao observar o gráfico da Figura 153, pode-se verificar que os resultados encontrados colocam as juntas em degrau entre os resultados obtidos com JSS e JSD, ou seja, as juntas em degrau coladas com adesivo Araldite® AV138 apresentam uma resistência superior às JSS e inferior às JSD. Em termos de percentagem, para  $L_0=12,5$  mm a junta em degrau apresenta 15% mais de resistência em relação à JSS e -49% à JSD. Com o aumento de  $L_0$ , a diferença entre as JSS e as juntas em degrau mantem-se com valores próximos (diferença de 21% para  $L_0=50$  mm). Por outro lado, a diferença para a JSD tende a diminuir, e chega a uma redução de 33% para  $L_0=50$  mm. O comportamento superior das juntas em degrau relativamente às JSS é evidente, e ocorre uma vez que as distribuições de tensões das juntas em degrau são mais favoráveis na medida em que há menos gradientes de tensões. Como o adesivo Araldite® AV138 é frágil, a resistência da junta é bastante afetada pelos picos de tensões.

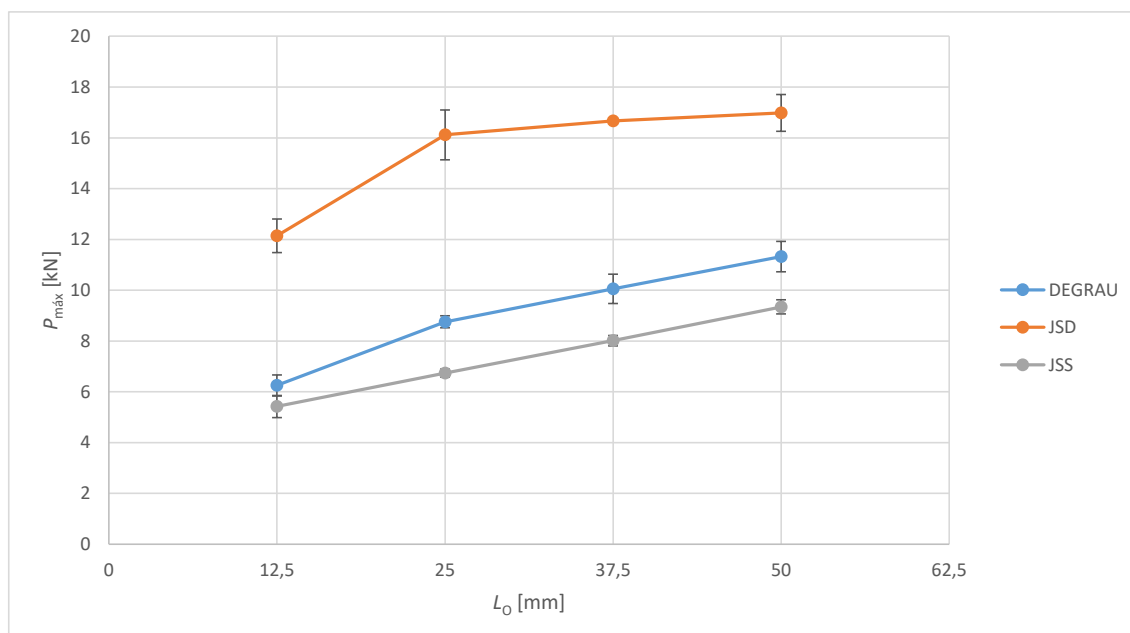


Figura 153 –  $P_{\text{máx}}$  em função de  $L_0$  para o Araldite® AV138: JSS, JSD e juntas em degrau.

### 3.2.7.2 Araldite® 2015

Através da análise do gráfico da Figura 154, verifica-se que, para o adesivo Araldite® 2015, obtém-se um comportamento mais linear em função de  $L_0$  para as JSS e juntas em degrau. No entanto, para este adesivo a diferença entre estas duas configurações de junta não é tão significativa como para o adesivo Araldite® AV138, uma vez que este adesivo, devido à sua ductilidade moderada, não é tão suscetível aos picos de tensões das JSS. A diferença de  $P_{\text{máx}}$  das juntas em degrau para as JSS com  $L_0=12,5$  mm é de apenas 1%, e de -54% para as JSD. À medida que aumenta  $L_0$ , a diferença para a JSD

aumenta gradualmente, e atinge 13% para  $L_0=50$  mm. A comparação com a JSD mostra também um ligeiro aumento desta diferença, que atinge -59% para  $L_0=50$  mm.

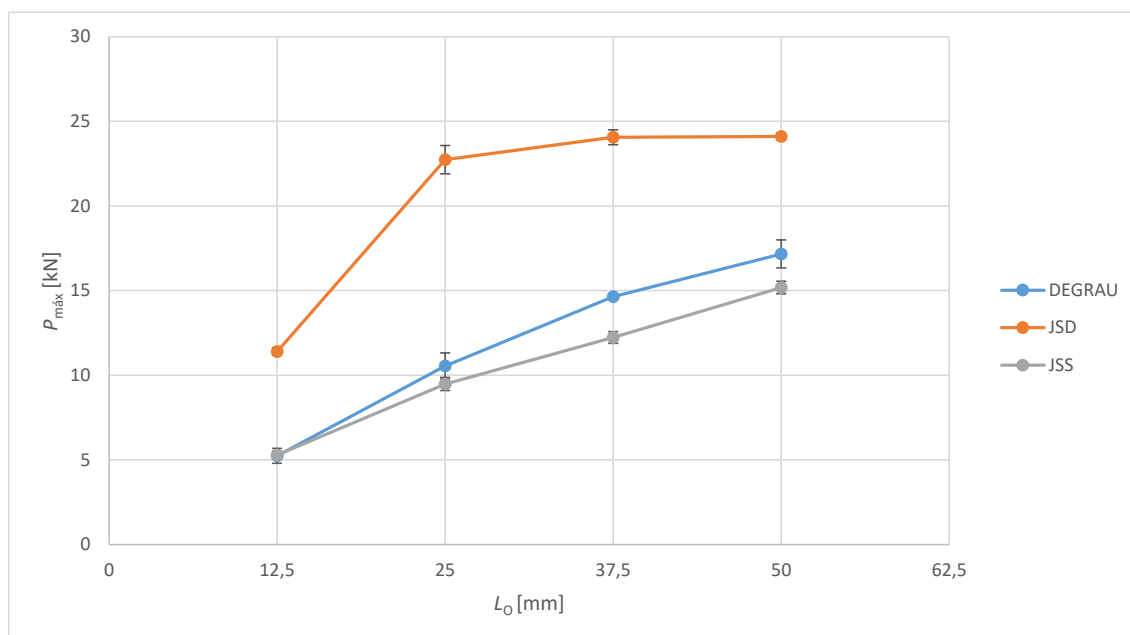


Figura 154 –  $P_{\text{máx}}$  em função de  $L_0$  para o Araldite® 2015: JSS, JSD e juntas em degrau.

### 3.2.7.3 Sikaforce® 7752

Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se que os resultados obtidos são díspares comparativamente com os resultados verificados com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, na medida em que os resultados das juntas em degrau se encontram bastante próximos das JSS, o que se justifica devido à grande ductilidade deste adesivo. Através da análise do gráfico da Figura 155 observa-se que, para  $L_0=12,5$  mm, a diferença de  $P_{\text{máx}}$  é de 15% para as JSS e de -43% para as JSD. Já para  $L_0=50$  mm a diferença é de 4% e -37% para JSS e JSD, respetivamente.

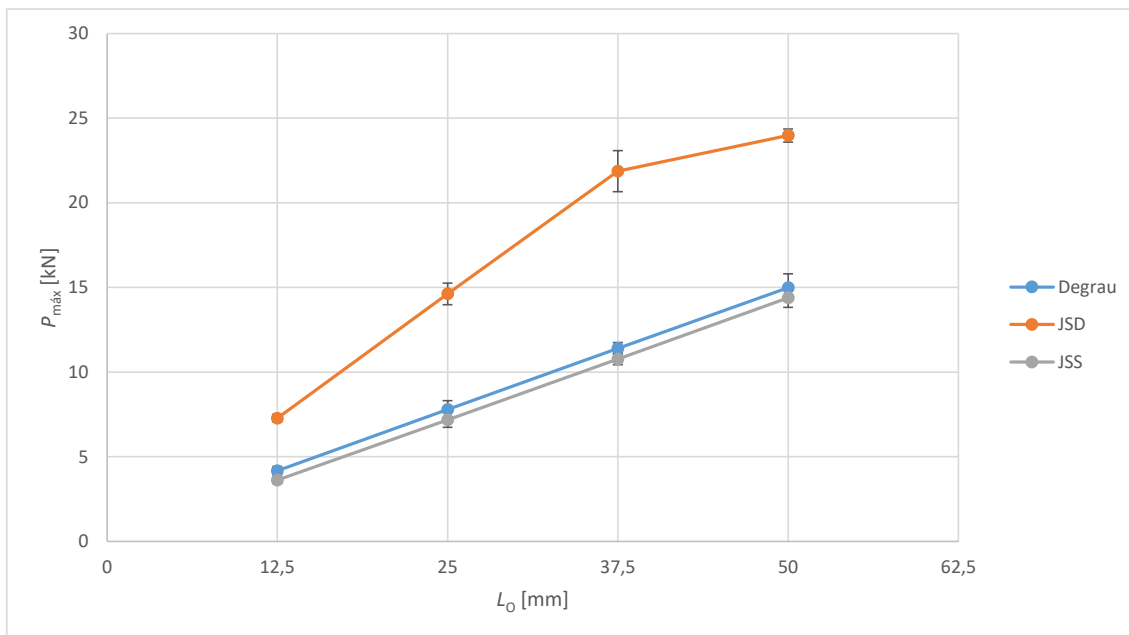


Figura 155 –  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  para o Sikaforce® 7752: JSS, JSD e juntas em degrau.



# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo estudar por análise numérica e experimental o comportamento de ligações adesivas com configuração em degrau solicitadas à tração. O trabalho desenvolvido incidiu no estudo e análise do desempenho desta configuração geométrica, investigando a influência que a variação do valor de  $L_0$  e a ductilidade do adesivo exercem na resistência das juntas.

Numericamente, foi efetuada a análise de tensões, análise de dano e a previsão da resistência das juntas através de estudos EF processados no *software* ABAQUS®, onde os resultados obtidos foram comparados com os resultados experimentais para validação da técnica numérica.

Relativamente à análise das tensões  $\sigma_y$  verifica-se que, independentemente de  $L_0$ , a tensão  $\sigma_y$  é bastante inferior à tensão de  $\tau_{\text{méd}}$ , com exceção do que se verifica nas extremidades de  $L_0$  e nas transições de degrau. Foi nas juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 onde se verificaram os maiores valores de pico, dada a rigidez superior do adesivo. Este adesivo provoca uma tensão  $\sigma_y$  elevada numa área muito pequena da sobreposição, o que é típico de adesivos rígidos. Para o adesivo Araldite® 2015 verificaram-se valores de pico das tensões  $\sigma_y$  inferiores, e ainda mais inferiores no adesivo Sikaforce® 7752 devido à sua menor rigidez, que faz com que este adesivo seja capaz de distribuir as tensões de forma mais gradual por uma área maior de sobreposição.

No que respeita à distribuição de tensões  $\tau_{xy}$ , verifica-se a existência de uma grande variação no valor dos picos de tensão nas extremidades de  $L_0$  e nas transições entre degraus. No entanto, dentro dos patamares de sobreposição a evolução da tensão de corte é análoga à variação verificada nas JSS, ou seja, parte central pouco solicitada e picos de tensão nas extremidades de sobreposição. De verificar que a magnitude de tensões  $\tau_{xy}$  é ligeiramente superior nas extremidades de  $L_0$ , comparativamente aos picos verificados nas transições de degrau, embora esta variação não seja muito significativa. Ao analisar a evolução das tensões  $\tau_{xy}$  em função de  $L_0$ , é evidente que os picos de tensão aumentam progressivamente com este parâmetro, devido ao crescente gradiente de deformação axial dos aderentes. À semelhança do que se verifica com as tensões  $\sigma_y$ , os picos de tensões  $\tau_{xy}$  diminuem com aumento da ductilidade do adesivo.

Através da análise da variável SDEG foi possível compreender melhor o comportamento de rotura dos adesivos em estudo. Pela análise dos resultados obtidos, verificou-se que o processo e modo de rotura do adesivo Araldite® AV138, de cariz frágil, revela uma

transição abrupta de estados de dano, o que contrapõe com o comportamento de transição gradual e suave dos restantes adesivos em análise. Devido a este comportamento, a evolução dos valores de  $P_{\text{máx}}$  com  $L_0$  para o Araldite® AV138 não é tão notório como para os outros dois adesivos em estudo, uma vez que o Araldite® AV138 não permite a plastificação nem a redistribuição das tensões após ser alcançada a sua tensão de rotura. No entanto, este adesivo apresenta melhor eficiência em termos de comportamento para o valor de  $L_0$  mais baixo (12,5 mm) porque, neste caso, o processo de rotura é regido pela resistência do adesivo e não pela sua ductilidade.

Relativamente à validação da técnica EF, os ensaios experimentais permitiram validar os resultados numéricos para 2 dos adesivos em estudo: Araldite® AV138 e 2015. Já com o adesivo Sikaforce® 7752, os valores de resistência estimados numericamente foram inferiores aos obtidos experimentalmente. Tal facto deve-se ao tipo de MDC implementado no estudo não ser o mais apropriado para traduzir com exatidão o comportamento plástico deste adesivo.

Em conclusão, face aos resultados obtidos no estudo realizado é possível afirmar que:

- O aumento da ductilidade do adesivo é responsável por:
  - Diminuição das tensões  $\sigma_y$ , devido ao adesivo ter maior capacidade de distribuição deste tipo de tensões ao longo de  $x/L_0$ ;
  - Obter porções de zona danificada superiores no momento em que se atinge a rotura, uma vez que o aumento de ductilidade do adesivo permite acomodar de forma mais gradual o carregamento imposto o que, em termos de resistência da junta, se revela bastante positivo;
  - Permite a plastificação dos aderentes;
  - Proporciona um aumento de resistência das juntas, tal como foi demonstrado pelos resultados numéricos e experimentais.
  
- O aumento do valor de  $L_0$  é responsável por:
  - Aumento dos picos de tensões  $\sigma_y$ ;
  - Aumento dos picos de tensões  $\tau_{xy}$ ;
  - Beneficiar o desempenho dos adesivos dúcteis.

Como sugestões de trabalhos futuros, referem-se os seguintes:

- Utilização de dois adesivos na zona de colagem;
- Fazer variar o valor de  $L_0$  entre degraus;
- Realização de ensaio de fadiga para este tipo de configuração geométrica;
- Avaliar o desempenho da junta em degrau comparativamente com a junta em *scarf*.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES  
DE INFORMAÇÃO**



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Habenicht, G., *Applied Adhesive Bonding - A practical guide for flawless results*. 2009, Weinheim: Wiley-VCH.
2. Da Silva, L.F.M., A.G. Magalhães, and M.F.S.F. De Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindustria.
3. Carneiro, M.A.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*. 2016, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
4. Adams, R.D., *Adhesive Bonding: Science, Technology, and Applications*. 1st ed. 2005: CRC Press.
5. Da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011: Springer Heidelberg.
6. Wu, S., *Polymer interface and adhesion*. 1st ed. 1982, New York, NY: CRC Press.
7. *DIN EN 923 Adhesives: Terms and definitions*. 2015, British Standards Institution.
8. LOCTITE. *Blog del Adhesivo Industrial*. 2015, Data de acesso Setembro 2017; Available from: <http://blogadhesivoindustrial.com/index.php/montagens/espanol-argentina-en-busca-de-la-adherencia-perdida-parte-1-entender-los-principios-de-curado-y-de-adherencia/?lang=ar>.
9. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
10. Cognard, P., *Handbook of Adhesives and Sealants: Basic Concepts and High Tech Bonding*. Vol. 2. 2006: Elsevier Science Ltd.
11. *Jaguar F-Type*, in *How It's Made: Dream Cars*. 2013, Discovery Communications, LLC.
12. *Lotus Evora* in *How It's Made: Dream Cars*. 2015, Discovery Communications, LLC.
13. *Lamborghini Aventador*, in *How It's Made: Dream Cars*. 2015, Discovery Communications, LLC.
14. Sika. *Ficha técnica do produto Sikaflex295i UV*. 2015, Data de acesso Outubro de 2017; Available from: <http://www.penmarinechandlery.com/products/sikaflex295i-uv>.
15. HOPE'S. *Thermal evolution technology: Simply a superior solution*. 2016, Data de acesso Outubro de 2017; Available from: <http://www.hopeswindows.com/evolution/>.
16. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000: McGraw-Hill.
17. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London.
18. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938(15): p. 41-47.
19. *ASTM D5573: Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. 2012, ASTM International.
20. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013(44): p. 48-56.

21. Da Silva, L.F.M., et al., *Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength*. The Journal of Adhesion, (82): p. 1091-1115.
22. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho. *Design of adhesively-bonded composite joints*. in Vassilopoulos AP. 2015. Kidlington: Woodhead Publishing.
23. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
24. Crocombe, A.D., *Global yielding as a failure criteria for bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1989(9): p. 145-153.
25. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944(66): p. A17-A27.
26. Gleich, D.M., et al., *Analysis and evaluation of bond line thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001(15): p. 1091-1101.
27. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of Strain Analysis 1974(9): p. 185-196.
28. Karachalios, E.F., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherends*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013(43): p. 96-108.
29. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2008, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
30. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*. 2nd ed. 1997: Hanser Publishers.
31. Esteves, J.L.S., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. 1990, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
32. Harris, J.A. and R.D. Adams, *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1984(4): p. 65-78.
33. Sosa, J.L.C. and N. Karapurath, *Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012(72): p. 788-791.
34. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007(26): p. 183-201.
35. Hart-Smith, L.J., *Stress analysis: a continuum mechanics approach*, in *Developments in Adhesives 2*, A.J. Kinloch, Editor. 1981, Applied Science Publishers: London.
36. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. Journal of Thermoplastic Composite Materials 1998. **11**: p. 272-287.
37. Duan, K., X. Hu, and Y.W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004: p. 18:39-53.
38. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006(141): p. 147-161.
39. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**: p. 199-204.
40. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1991(11): p. 213-227.
41. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**: p. 622-636.

42. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004(71): p. 2125-2142.
43. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010(47): p. 2445-2458.
44. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001(110): p. 175-187.
45. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**: p. 1146-1158.
46. Daudeville, L. and P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**: p. 547-555.
47. Voyiadjis, G.Z. and P.I. Kattan, *Damage Mechanics*. 1st ed. 2005, New York: CRC Press Taylor & Francis Group.
48. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. Blackwell Publishing. 2008, New Jersey.
49. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal of Fracture Mechanics, 1999(45): p. 601-620.
50. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999(46): p. 131-150.
51. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
52. Harris, J.A. and R.D. Adams, *Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1984. **4**: p. 65-78.
53. Da Silva, L.F.M. and A. Öchsner, *Modeling of Adhesively Bonded Joints*. 2008: Springer-Verlag Berlin Heidelberg.
54. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal scarf joints*. 1998, University of New Brunswick.
55. Das, M.D.R., E. Madenci, and D.R. Ambur, *Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repairs in composite laminates and sandwich panels*. Journal of Mechanics of Materials and Structures, 2008(3): p. 1641-1658.
56. Ebnesajjad, S., *Adhesives Technology Handbook*. 2nd ed. 2008: William Andrew.
57. Raphael, C., *Variable-adhesive bonded joints*. Appl Polym Symp, 1966(3): p. 99-108.
58. Srinivas, S., *Analysis of bonded joints* 1975, NASA: Hampton.
59. Pires, I., et al., *Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. **23**(3): p. 215-223.
60. Ganesh, V.K., Choo, T. S. , *Modulus Graded Composite Adherends for Single-Lap Bonded Joints*. Journal of Composite Materials, 2002 **36**: p. 1757-1767.
61. Campilho, R.D.S.G., *Repair of Composite and Wood Structures*. 2009, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
62. Ichikawa, k., Y. Shin, and T. Sawa, *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2008: p. 464-470.

63. Akpınar, S., *The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers*. Composites Part B: Engineering, 2014. **67**(December): p. 170-178.
64. Azevedo, J.C.S.A., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Noched Flexure (ENF)*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
65. Campilho, R.D.S.G., et al., *Extended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
66. *ASTM E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2004, ASTM International: West Conshohocken, PA.
67. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
68. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**(0): p. 96-101.
69. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
70. Ribeiro, T.E.A., et al., *Damage analysis of composite-aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Composite Structures, 2016. **136**: p. 25-33.
71. Pinto, A.M.G., et al., *Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. J. Adhes., 2009. **85**: p. 351-376.
72. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. Int. J. Numer. Methods Eng, 2001. **50**: p. 1701-1736.
73. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. Int. J. Fract., 1996. **77**: p. 111-140.
74. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. Int. J. Solids Struct., 2002. **39**: p. 2827-2855.
75. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. J. Thermopl. Compos. Mater., 2002. **15**: p. 429-441.
76. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. Int. J. Solids Struct., 2002. **39**: p. 4367-4383.
77. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, Heidelberg: Springer.
78. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. Int. J. Solids Struct., 2008. **45**: p. 1497-1512.
79. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Compos. Sci. Technol., 2005. **65**: p. 1948-1958.
80. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. Int. J. Adhes. Adhes., 2009. **29**: p. 195-205.
81. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2005, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
82. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*. 2nd ed, ed. 83. 2002: Hanser.

83. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. Int. J. Solids Struct., 2004. **41**: p. 413-434.
84. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. Int. J. Solids Struct., 2007. **44**: p. 530-545.
85. Hogberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Eng. Fract. Mech., 2006. **73**: p. 2541-2556.
86. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. J. Adhes. Sci. Technol., 2011. **25**: p. 2351-2368.
87. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. Int. J. Adhes. Adhes., 2011. **31**: p. 363-372.
88. Moura, M.F.S.F., et al., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. Int. J. Adhes. Adhes., 2008. **28**: p. 419-426.
89. Marques, E.A.S. and L.F.M. Da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. Int. J. Adhes. Adhes., 2008. **84**: p. 917-936.
90. Campilho, R.D.S.G., et al., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs*. Int. J. Adhes. Adhes., 2009. **29**: p. 678-686.
91. Darwish, S.M.H. and A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000(105(3)): p. 221-229.
92. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008(68(10-11)): p. 2224-2230.
93. Zhao, B., et al., *Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints—Variational method*. Int. J. Adhes. Adhes., 2014(49): p. 115-126.
94. Reis, P.N.B., F.J.V. Antunes, and J.A.M. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Composite Structures, 2005. **67**(1): p. 125-133.
95. Mortensen, F. and O.T. Thomsen, *Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates*. Compos. Struct., 1997(38(1-4)): p. 281-294.
96. Nunes, S.L.S., et al., *Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive systems*. J. Adhesion 2016(92): p. 610-634.
97. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999. **19**(2): p. 91-105.
98. Fernandes, T.A.B., et al., *Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimentation and Advanced Techniques for Strength Prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
99. Rocha, R.J.B. and R.D.S.G. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2017: p. In press.
100. Carvalho, U.T.F. and R.D.S.G. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**: p. 41-50.
101. Carvalho, U.T.F. and R.D.S.G. Campilho, *Application of the direct method for cohesive law estimation applied to the strength prediction of double-lap joints*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016. **85**: p. 140-148.