



Análise experimental e numérica de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla solicitadas ao impacto

LUÍS MIGUEL CARDOSO PERES

novembro de 2020

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE JUNTAS ADESIVAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES E DUPLA SOLICITADAS AO IMPACTO

Luís Miguel Cardoso Peres

1150875

2019/2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DE JUNTAS ADESIVAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES E DUPLA SOLICITADAS AO IMPACTO

Luís Miguel Cardoso Peres

1150875

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 de Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação de Eduardo André de Sousa Marques, José Joaquim da Mota Machado e Lucas Filipe Martins da Silva.

2019/2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Carlos Ramos Gomes Pinto Ferreira

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Investigador, FEUP

José Joaquim da Mota Machado

Investigador, FEUP

Lucas Filipe Martins da Silva

Professor Catedrático, FEUP

Arguente

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador, FEUP

AGRADECIMENTOS

Agradeço, em primeiro lugar, ao ISEP por me proporcionar as ferramentas necessárias para a obtenção do grau de Mestre, pelo acompanhamento e pelo ensino ao longo destes 5 anos.

Ao meu orientador, Dr. Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo apoio, dedicação e disponibilidade demonstrados ao longo da elaboração da dissertação.

Ao INEGI, pela disponibilidade do laboratório de Processos Avançados de Ligação, onde foram efetuados os ensaios das juntas.

Aos meus pais, ao meu irmão e à minha irmã, pelo apoio, força e incentivo transmitidos durante todo o percurso.

PALAVRAS CHAVE

Previsão de resistência, Método de Elementos Finitos, Junta de sobreposição simples, Junta de sobreposição dupla, Ensaios de impacto, Modelos de dano coesivo, *Drop test*.

RESUMO

A utilização de ligações adesivas no âmbito das construções mecânicas tem vindo a aumentar significativamente ao longo da mais recente evolução industrial. O desempenho de uma junta adesiva varia consoante a sua configuração e parâmetros geométricos. Para avaliar o desempenho e a resistência deste tipo de ligação em função das propriedades do adesivo, são normalmente utilizadas metodologias numéricas baseadas no Método de Elementos Finitos (MEF). Em aplicações reais, muitas vezes as juntas adesivas são sujeitas a carregamentos dinâmicos, mais especificamente de impacto. No entanto, estes carregamentos ainda não se encontram suficientemente documentados na literatura, o que leva à necessidade do seu estudo e da validação de técnicas que consigam prever o comportamento das juntas a este tipo de carregamento.

A presente dissertação avalia o efeito do comprimento de sobreposição na resistência de juntas de sobreposição simples (JSS) e juntas de sobreposição dupla (JSD), quando solicitadas ao impacto, através de ensaios experimentais e de modelos de dano coesivo (MDC). As juntas foram submetidas a um *drop test* e validadas através do modelo numérico, pela análise de tensões e de dano, prevendo a resistência das juntas em função do comprimento de sobreposição. De forma a avaliar o contributo das propriedades do adesivo, foram testados dois tipos de adesivo diferentes, o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752, mantendo constantes os aderentes de compósito, o pré-impregnado Seal® Texipreg HS 160 RM.

Concluiu-se que o aumento do comprimento de sobreposição proporciona o aumento da resistência das juntas, principalmente nas que possuem um adesivo mais flexível, o Sikaforce® 7752, uma vez que este tipo de adesivo impede concentrações de tensões significativas e, sendo um adesivo dúctil, tem a capacidade de absorver os picos de tensão. Por outro lado, o adesivo Araldite® AV138, sendo mais rígido, concentra mais tensões nas juntas, impedindo um aumento significativo da resistência das mesmas com o aumento do comprimento de sobreposição. Verificou-se, ainda, que os MDC são capazes de prever a resistência das juntas ao impacto com boa precisão.

KEYWORDS

Strength prediction, Finite Element Method, Single-lap joint, Double-lap joint, Impact tests, Cohesive zone models, Drop test.

ABSTRACT

The use of adhesive joints in the field of mechanical constructions has been significantly increasing over the most recent industrial evolution. The performance of an adhesive joint varies depending on its configuration and geometrical parameters. To evaluate the performance and strength of this type of joint as a function of the adhesive properties, numerical methodologies based on the Finite Element Method (FEM) are normally used. In real applications, adhesive joints are often subjected to dynamic loading, more specifically impact. However, these loads are not yet sufficiently documented in the literature, which leads to the need for their study and the validation of techniques that can predict the behaviour of the joints for this type of loading.

The present thesis evaluates the effect of the overlap length on the strength of single-lap joints (SLJ) and double-lap joints (DLJ), when impact loaded, through experimental tests and cohesive zone models (CZM). The joints were subjected to a drop test and validated through the numerical model, by the analysis of stresses and damage, predicting the joints' strength as a function of the overlap length. In order to evaluate the contribution of the adhesive properties, two different types of adhesive were tested, Araldite® AV138 and Sikaforce® 7752, keeping constant the composite adherends, the pre-impregnated Seal® Texipreg HS 160 RM.

It was concluded that the increase in the overlap length increases the joint strength, especially in those with a more flexible adhesive, Sikaforce® 7752, since this type of adhesive prevents significant stress concentrations and, being a ductile adhesive, has the ability to absorb peak stresses. On the other hand, the adhesive Araldite® AV138, being stiffer, concentrates more stresses in the joints, preventing a significant strength improvement with the increase in the overlap length. It was also found that the CZM are able to predict the impact joints' strength with good precision.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

| | |
|------|--|
| 2D | Duas dimensões |
| 3D | Três dimensões |
| CFRP | <i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i> |
| DCB | <i>Double Cantilever Beam</i> |
| JSD | Juntas de sobreposição dupla |
| JSS | Juntas de sobreposição simples |
| MDC | Modelos do dano coesivo |
| MEF | Método de elementos finitos |
| MEFX | Método de elementos finitos estendido |
| SHPB | <i>Split Hopkinson Pressure Bar</i> |
| TAST | <i>Thick Adherend Shear Test</i> |
| TDCB | <i>Tapered Double Cantilever Beam</i> |
| TFFV | Técnica do fecho de fenda virtual |

Lista de Símbolos

| | |
|-----------|---------------------------------------|
| E | Módulo de Elasticidade |
| G | Módulo de Corte |
| G_c | Taxa crítica de libertação de energia |
| G_{Ic} | Tenacidade à tração |
| G_{IIc} | Tenacidade ao corte |

| | |
|-------------------|---|
| L_0 | Comprimento de sobreposição |
| $P_{m\acute{a}x}$ | Carga máxima |
| t_n | Tensão coesiva  tração |
| t_n^0 | Resistência coesiva  tração |
| t_s | Tensão coesiva ao corte |
| t_s^0 | Resistência coesiva ao corte |
| γ_f | Deformação de rotura ao corte |
| δ_n | Deslocamento em tração |
| δ_{rot} | Deslocamento de rotura |
| δ_s | Deslocamento em corte |
| ϵ_f | Deformação de rotura  tração |
| ρ | Massa volmica |
| σ_f | Tensão de rotura  tração |
| σ_y | Tensão de cedência  tração |
| σ_y | Tensão de arrancamento |
| τ_f | Tensão de rotura ao corte |
| τ_{med} | Tensão média de corte |
| τ_{xy} | Tensão de corte |
| τ_y | Tensão de cedência ao corte |
| δ_n^0 | Deslocamento de tração correspondente a $P_{m\acute{a}x}$ |
| δ_s^0 | Deslocamento de corte correspondente a $P_{m\acute{a}x}$ |
| ν | Coefficiente de Poisson |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Tratamentos superficiais para ligações adesivas (adaptado de [3])..... | 7 |
| Figura 2 -Esquema representativo da localização da interfase e da interface numa ligação adesiva [4] | 8 |
| Figura 3 – Exemplos de camadas fracas [5]..... | 10 |
| Figura 4 - Exemplo de locais onde podem ser aplicadas juntas adesivas na estrutura de um automóvel [9] | 12 |
| Figura 5 - Exemplos de aplicações de juntas adesivas num automóvel [8]..... | 12 |
| Figura 6 - Exemplos de ligações adesivas na indústria aeronáutica e aeroespacial [10] | 13 |
| Figura 7 - Tipos de esforços em juntas adesivas (adaptado de [11]) | 14 |
| Figura 8 – Principais modos de rotura previstos pela Norma ASTM D 5573 - 99 (adaptado de [4]) | 15 |
| Figura 9 - Configurações possíveis mais comuns em juntas adesivas [7]..... | 16 |
| Figura 10 - Geometria do provete maciço a utilizar segundo a norma ISO 527-2 [15]..... | 18 |
| Figura 11 - Ensaio de tração de um provete maciço colocado nas amarras da máquina [16] | 18 |
| Figura 12 - Exemplo de uma <i>butt joint</i> (elaboração própria) | 18 |
| Figura 13 - Ensaio Iosipescu (aplicação de cargas assimétricas num provete com dois entalhes em V) [14] | 19 |
| Figura 14 - Ensaio Arcan (adaptado de [14])..... | 20 |
| Figura 15 - Disposição dos substratos para um ensaio TAST [14]..... | 20 |
| Figura 16 - Modos de rotura [15] | 23 |
| Figura 17 - Provete DCB e provete TDCB, a) e b), respetivamente, segundo a norma ASTM (adaptado de [14])..... | 23 |
| Figura 18 - Ensaio de impacto em blocos ASTM [1]..... | 24 |
| Figura 19 - Ensaio SHPB [14] | 25 |
| Figura 20 - Provete do <i>Wedge Peel Impact Test</i> - [19]..... | 25 |
| Figura 21 - Ensaio <i>Wedge Peel Impact Test</i> [20] | 26 |
| Figura 22 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [41]) .. | 30 |
| Figura 23 – Modelo coesivo triangular [36, 53]..... | 31 |
| Figura 24 – Geometria do provete DCB [66] | 33 |

| | |
|---|----|
| Figura 25 – Geometria do provete ENF [66] | 34 |
| Figura 26 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [82] | 36 |
| Figura 27 - Modelos de Voigt de 3 (a) e 5 elementos (b) adaptados por Sato e Ikegami (adaptado de[84]) | 37 |
| Figura 28 - Dimensões da JSS | 41 |
| Figura 29 - Dimensões da JSD..... | 42 |
| Figura 30 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [89] | 44 |
| Figura 31 - Adesivo Araldite® AV138 [91] | 45 |
| Figura 32 - Adesivo Sikaforce® 7752 [91]..... | 46 |
| Figura 33 - Curvas σ - ε relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [94]..... | 46 |
| Figura 34 - Aplicação de calor nas camadas com uma pistola de ar quente | 49 |
| Figura 35 - Prensa de pratos quentes utilizada para prensar as placas | 49 |
| Figura 36 - Ciclo térmico programado para a cura das placas..... | 50 |
| Figura 37 - Processo de lixagem e limpeza dos substratos | 51 |
| Figura 38 - Provete de uma JSD finalizado | 51 |
| Figura 39 - Provete preparado para ensaio..... | 52 |
| Figura 40 - Laboratório de Processos Avançados de Ligação do INEGI..... | 52 |
| Figura 41 - Máquina de <i>drop weight</i> | 53 |
| Figura 42 - Configuração dos parâmetros para o <i>drop test</i> no <i>software</i> da máquina | 54 |
| Figura 43 - Provete colocado na máquina de <i>drop weight</i> | 54 |
| Figura 44 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm | 55 |
| Figura 45 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm | 55 |
| Figura 46 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm | 56 |
| Figura 47 – Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ correspondentes às JSS com o adesivo AV138..... | 56 |
| Figura 48 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm | 57 |
| Figura 49 - Curvas P - δ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mm | 58 |
| Figura 50 - Curvas P - δ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm | 58 |
| Figura 51 - Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ correspondentes às JSS com o adesivo 7752..... | 59 |
| Figura 52 - Esboço de uma JSS com $L_0=12,5$ mm..... | 61 |

| | |
|--|----|
| Figura 53 - Condições fronteira aplicadas no modelo de uma JSS | 62 |
| Figura 54 - Velocidade aplicada na massa da junta na direção 1 (V1) | 62 |
| Figura 55 - Condições de simetria aplicadas no modelo de uma JSD | 62 |
| Figura 56 - Malha de elementos quadriláteros constituinte de uma JSS..... | 63 |
| Figura 57 – Lei triangular do modelo de dano coesivo (adaptado de [96]) | 63 |
| Figura 58 - Determinação das propriedades do aderente no <i>software</i> Abaqus® | 65 |
| Figura 59 - Determinação das propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 no <i>software</i> Abaqus® | 65 |
| Figura 60 - Determinação das propriedades elásticas do adesivo Araldite® AV138 no <i>software</i> Abaqus® | 66 |
| Figura 61 - Determinação das propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752 no <i>software</i> Abaqus® | 66 |
| Figura 62 - Determinação das propriedades elásticas do adesivo Sikaforce® 7752 no <i>software</i> Abaqus® | 67 |
| Figura 63 - Malha refinada do modelo de uma JSS | 67 |
| Figura 64 - Esboço da geometria e dimensões dos modelos de simulação de JSS e JSD (adaptado de [99]) | 68 |
| Figura 65 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSS | 68 |
| Figura 66 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSS | 69 |
| Figura 67 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSS..... | 70 |
| Figura 68 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSS.... | 71 |
| Figura 69 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD..... | 72 |
| Figura 70 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD | 73 |
| Figura 71 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD | 73 |
| Figura 72 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD... .. | 74 |
| Figura 73 - Curvas P - δ de JSS com o adesivo AV138 em função de L_0 | 76 |
| Figura 74 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ de JSS com o adesivo AV138 em função de L_0 | 77 |
| Figura 75 - Curvas P - δ de JSS com o adesivo 7752 em função de L_0 | 78 |
| Figura 76 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ de JSS com o adesivo 7752 em função de L_0 | 78 |
| Figura 77 - Curvas P - δ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0 | 79 |
| Figura 78 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0 | 80 |
| Figura 79 - Curvas P - δ de JSD com o adesivo 7752 em função de L_0 | 81 |

| | |
|--|----|
| Figura 80 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0 | 82 |
| Figura 81 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm | 83 |
| Figura 82 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm | 84 |
| Figura 83 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm | 84 |
| Figura 84 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo AV138 ... | 85 |
| Figura 85 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm | 86 |
| Figura 86 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mm | 86 |
| Figura 87 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm | 87 |
| Figura 88 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo 7752..... | 88 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|---|----|
| Tabela 1 - Tipos de adesivos estruturais e suas aplicações [5, 7] | 11 |
| Tabela 2 - Exemplos de ensaios de arrancamento [7] | 22 |
| Tabela 3 - Resumo dos parâmetros utilizados na geometria das juntas (dimensões em mm) | 42 |
| Tabela 4 – Propriedades elásticas do <i>carbon fiber reinforced polymer</i> (CFRP) [88] | 43 |
| Tabela 5 - Propriedades interlaminares do CFRP [88] | 43 |
| Tabela 6 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [89, 90] | 44 |
| Tabela 7 - Propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 [92, 93]..... | 45 |
| Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [94] | 47 |
| Tabela 9 - Propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752 | 48 |
| Tabela 10 – Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo AV138 | 57 |
| Tabela 11 - Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo 7752 | 60 |
| Tabela 12 - Valores máximos de concentração de tensões | 75 |
| Tabela 13 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSS com o adesivo AV138 | 77 |
| Tabela 14 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSS com o adesivo 7752..... | 79 |
| Tabela 15 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSD com o adesivo AV138..... | 80 |
| Tabela 16 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSD com o adesivo 7752 | 82 |
| Tabela 17 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo AV138 | 85 |
| Tabela 18 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo 7752..... | 88 |

ÍNDICE

| | | |
|-----------|--|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.1 | Contextualização | 3 |
| 1.2 | Objetivos..... | 3 |
| 1.3 | Estrutura do relatório | 3 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 7 |
| 2.1 | Ligações adesivas | 7 |
| 2.1.1 | Caracterização e aplicações | 10 |
| 2.1.2 | Tipos de esforços em juntas adesivas..... | 13 |
| 2.1.3 | Modos possíveis de rotura..... | 15 |
| 2.1.4 | Configurações possíveis de junta | 16 |
| 2.2 | Ensaio de juntas adesivas | 17 |
| 2.2.1 | Ensaio estáticos | 17 |
| 2.2.1.1 | Ensaio de tração | 17 |
| 2.2.1.2 | Ensaio de compressão | 19 |
| 2.2.1.3 | Ensaio de corte..... | 19 |
| 2.2.1.4 | Ensaio de arrancamento | 21 |
| 2.2.1.5 | Ensaio de caracterização à fratura..... | 23 |
| 2.2.2 | Ensaio dinâmicos e de impacto | 24 |
| 2.3 | Previsão de resistência de juntas adesivas | 26 |
| 2.3.1 | Previsão para solicitações estáticas | 27 |
| 2.3.1.1 | Métodos analíticos..... | 27 |
| 2.3.1.2 | Métodos numéricos | 27 |
| 2.3.1.2.1 | Mecânica dos meios contínuos | 28 |
| 2.3.1.2.2 | Mecânica da fratura..... | 28 |

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 2.3.1.2.3 | MDC..... | 29 |
| 2.3.1.2.4 | Mecânica do dano | 34 |
| 2.3.1.2.5 | MEFX..... | 35 |
| 2.3.2 | Previsão para solicitações dinâmicas | 36 |
| 2.3.2.1 | Métodos analíticos..... | 36 |
| 2.3.2.1.1 | Modelo de Voigt/Maxwell | 36 |
| 2.3.2.1.2 | Modelo de Cowper-Symonds..... | 37 |
| 2.3.2.1.3 | Modelo de Johnson-Cook | 37 |
| 2.3.2.1.4 | Modelos de sobretensão | 37 |
| 2.3.2.2 | Métodos numéricos | 38 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 41 |
| 3.1 | Trabalho experimental | 41 |
| 3.1.1 | Geometria e dimensões das juntas | 41 |
| 3.1.2 | Materiais utilizados | 42 |
| 3.1.2.1 | Aderentes..... | 42 |
| 3.1.2.2 | Adesivos | 43 |
| 3.1.2.2.1 | Araldite® AV138 | 43 |
| 3.1.2.2.2 | Sikaforce® 7752 | 45 |
| 3.1.3 | Fabrico das juntas | 48 |
| 3.1.3.1 | Fabrico das placas | 48 |
| 3.1.3.2 | Cura das placas | 49 |
| 3.1.3.3 | Corte das placas..... | 50 |
| 3.1.3.4 | Preparação superficial e colagem dos provetes..... | 50 |
| 3.1.4 | Ensaio das juntas..... | 52 |
| 3.1.5 | Resultados obtidos e discussão..... | 55 |
| 3.2 | Trabalho numérico | 60 |
| 3.2.1 | Condições da análise numérica..... | 60 |
| 3.2.2 | Modelos de dano coesivo..... | 63 |
| 3.2.3 | Determinação das propriedades dos materiais | 64 |

| | | |
|---------|---|----|
| 3.2.4 | Estudo do efeito do comprimento de sobreposição | 67 |
| 3.2.4.1 | Distribuição de tensões | 68 |
| 3.2.4.2 | Previsão da resistência | 76 |
| 3.2.4.3 | Comparação dos ensaios experimentais com o modelo numérico..... | 83 |
| 4 | CONCLUSÕES..... | 91 |
| 5 | BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO..... | 95 |

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Estrutura do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As juntas adesivas não são uma técnica recente de ligação dos materiais. No entanto, temos assistido, nos últimos 80 anos, a uma evolução progressiva no que diz respeito à utilização deste tipo de juntas em diversas estruturas [1], opondo-se às ligações mecânicas mais usuais como as aparafusadas ou mesmo as soldadas, devido às diversas vantagens em relação às mesmas, como a distribuição mais uniforme das tensões na área colada, a redução ou eliminação da concentração de tensões, a possibilidade de juntar materiais dissimilares, entre outras utilidades que tornam as juntas adesivas uma excelente alternativa.

Ao mesmo tempo, esta evolução contribui para que o estudo de ligações adesivas seja cada vez mais aprofundado, de forma a conhecer bem o comportamento da junta em qualquer tipo de sollicitação.

Apesar disso, quanto à sollicitação destas juntas ao impacto, não é, ainda, completamente conhecido o seu comportamento. Este trabalho surge com o objetivo de tentar melhorar essa área, aprofundando o estudo deste tipo de sollicitações, tendo por base uma análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF), baseada em ensaios práticos de juntas de sobreposição simples (JSS) e dupla (JSD) ao impacto, com algumas variáveis.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se estudar numérica e experimentalmente juntas adesivas de sobreposição simples e dupla com substratos de compósito, considerando diferentes comprimentos de sobreposição (L_0). Numericamente, pretende-se utilizar o MEF para realizar uma análise de tensões detalhada que permita explicar os comportamentos observados nas juntas, e também modelos de dano coesivos para a previsão da resistência das juntas.

1.3 Estrutura do relatório

De forma a promover ao leitor uma correta interpretação da dissertação, esta foi estruturada em 4 capítulos distintos.

O capítulo 1 destina-se a uma breve contextualização do tema, à descrição dos objetivos estabelecidos inicialmente e à explicação de como estará estruturada a dissertação.

O capítulo 2 tem o objetivo de enquadrar teoricamente o leitor, de forma a conhecer os conceitos que possibilitam o estudo em questão. A revisão bibliográfica inicia-se com uma explicação geral acerca das ligações adesivas (em que consistem, como podem ser classificadas e onde são aplicadas). De seguida são retratadas as possíveis configurações geométricas de uma junta adesiva, focando naquelas que serão estudadas, as JSS e JSD. Posteriormente, serão explicados alguns ensaios de vários tipos que podem ser efetuados em ligações adesivas e, finalmente, será retratada a previsão de resistência, tanto para solicitações estáticas como dinâmicas, dando a conhecer alguns dos métodos numéricos e analíticos que permitem prever o comportamento de uma junta adesiva.

No capítulo 3 inicia-se o desenvolvimento da dissertação, onde são separados o trabalho experimental e o trabalho numérico. No trabalho experimental será retratado todo o processo desde a preparação dos provetes até aos ensaios experimentais. No trabalho numérico, elaborado no *software* Abaqus®, será efetuado a validação do trabalho experimental através da análise de tensões e da previsão de resistência para cada um dos casos em estudo.

O quarto capítulo finaliza a estrutura da dissertação com conclusões acerca de todo o trabalho efetuado, onde será avaliado o cumprimento dos objetivos traçados inicialmente, e propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Ensaio de juntas adesivas
- 2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O seguinte capítulo destina-se à revisão bibliográfica, onde serão abordados e aprofundados os assuntos que dizem respeito ao tema da dissertação. Serão apresentadas as ligações adesivas, os ensaios e a previsão da resistência.

2.1 Ligações adesivas

Denomina-se por ligação adesiva uma junção onde é aplicado um material adesivo na superfície de dois ou mais materiais, os aderentes ou substratos. Um adesivo, por sua vez, é definido como sendo um material, que, quando aplicado na superfície dos materiais, permite juntá-los, resistindo à separação dos mesmos [2]. Esta junção depende de forma diretamente proporcional com a molhagem das superfícies, isto é, quanto maior for a capacidade de um líquido se espalhar na superfície, melhor será a qualidade da ligação adesiva. Para incrementar essa capacidade, é quase sempre necessário realizar uma preparação de superfície, eliminando o efeito de contaminantes presentes nos materiais que prejudicam a adesão entre o adesivo e o substrato, aumentando a energia livre de superfície [1]. Na Figura 1 estão presentes diferentes tipos de tratamento que podem ser efetuados para uma boa preparação de superfície.



Figura 1 - Tratamentos superficiais para ligações adesivas (adaptado de [3])

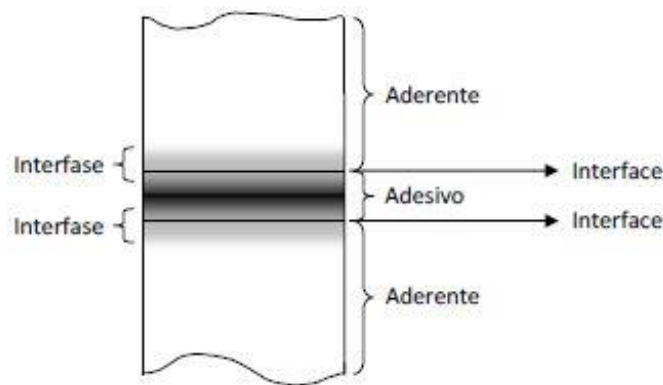


Figura 2 -Esquema representativo da localização da interfase e da interface numa ligação adesiva [4]

Na ligação adesiva, caracteriza-se por interface a camada limite entre o adesivo e o aderente. Esta camada está contida na interface, que corresponde à região de contacto entre o adesivo e o aderente, que se estende desde um ponto no aderente onde as propriedades locais se começam a alterar desde as propriedades *bulk* do aderente até um ponto no adesivo onde as propriedades locais igualam as propriedades *bulk* do adesivo. Na Figura 2 é possível localizar a interface e visualizar o fenómeno da interfase.

A ligação adesiva depende de vários fatores:

As forças de ligação dividem-se em ligações químicas primárias, ligações secundárias ou de Van der Waals e ligações de hidrogénio.

Dentro das químicas primárias, estas distribuem-se em ligações iónicas, covalentes e metálicas, da mais forte para a mais fraca em termos de energia de ligação [5].

Quanto às ligações de Van der Waals, elas são bem mais fracas comparativamente às químicas primárias e dividem-se em ligações entre dipolos não permanentes (forças de London), ligações entre dipolos permanentes e não permanentes (forças de Debye) e ligações entre dipolos permanentes (forças de Keesom). As forças de London ou forças de dispersão são as mais fortes quando comparadas com as restantes ligações de Van der Waals. Apesar de serem as ligações mais fracas, as ligações secundárias são as mais importantes em termos de adesão, devido à sua origem e às suas características [5].

As ligações de hidrogénio têm propriedades intermédias entre as químicas primárias e as secundárias ou de Van der Waals, dependem das propriedades únicas do hidrogénio e são ligações dipolo - dipolo especiais, uma vez que são mais fortes. Estas ligações baseiam-se na formação de pontes de hidrogénio entre átomos muito eletronegativos [5].

A superfície, sendo um dos intervenientes da ligação, influencia a mesma tendo em conta a sua rugosidade e a sua preparação. Quanto maior for a rugosidade de uma superfície, mais difícil se torna a adesão da mesma. A preparação superficial pode

diminuir esse parâmetro, bem como tornar a superfície mais limpa, aumentando a molhagem [5].

A mudança de fase e a forma como é exercida, isto é, o adesivo começa por ser aplicado no estado líquido, passando posteriormente ao estado sólido, concluindo a ligação. Esta mudança pode acontecer de três formas distintas:

- por perda de solvente;
- por reação química;
- por solidificação do material fundido.

A mudança de fase mais usual e que permite a obtenção de melhores características é a solidificação por reação química [5].

O contacto interfacial, onde a molhagem, que por sua vez depende do ângulo de contacto, da energia livre de superfície e da tensão de superfície, é um fator predominante que influencia diretamente a adesão. O ângulo de contacto pode ser definido como o ângulo entre o plano tangente a uma gota do líquido e o plano contendo a superfície onde o líquido se encontra depositado. Este pode variar entre 0° (molhagem completa) a 180° (molhagem tão fraca que o líquido forma uma gota esférica). A energia livre de superfície e a tensão de superfície dependem de material para material e determinam a facilidade com que um líquido se espalha na sua superfície. A facilidade é tanto maior quanto maior for o valor da energia livre de superfície, bem como o de tensão de superfície, já que estes valores são iguais, apenas diferindo nas unidades de medida [5].

Os pontos fracos determinam a fragilidade da ligação. Estes pontos ocorrem sobretudo devido a três fatores distintos:

- a existência de uma camada fraca (*Weak Boundary Layer*), representada na Figura 3, que pode ocorrer tanto no substrato como no adesivo, devido às impurezas do próprio material ou mesmo do meio ambiente, que é caracterizada como sendo uma camada superficial que apresenta baixa coesão e fraca ligação à superfície do material. A dificultar a adesão dos componentes;
- a concentração de tensões, que desgasta o material, prejudicando a ligação adesiva;
- a irregularidade da superfície, que por sua vez causa concentração de tensões e a propagação de fenda no material.

A ligação adesiva obedece, então, ao fenómeno da adesão. Existem diversas teorias que tentam explicar este fenómeno. Entre elas destacam-se:

- a teoria mecânica, que defende que o aumento de rugosidade pode ser benéfico para a adesão, na medida em que aumenta a área de contacto, promove o encravamento mecânico do adesivo. A própria superfície, sendo rugosa, cria uma barreira à

propagação de fenda e, ao induzir a rugosidade na superfície, também se procede à remoção de camadas indesejáveis [6].

- a teoria da adsorção, que explica o mecanismo da adesão através dos contactos intermoleculares e interatômicos. Assim, esta é a teoria mais aceite para perceber os fenómenos interfaciais. As forças de interligação podem ser físicas ou químicas, contribuindo para uma adsorção física ou fisissorção, ou para uma adsorção química ou quimissorção, respetivamente. No entanto, a adsorção física contribui para a resistência de todas as juntas adesivas estruturais e é o mecanismo de adesão mais importante [6].

- a teoria da difusão, que apenas explica fenómenos de adesão em materiais poliméricos, sendo, por isso, uma teoria um pouco restrita. Esta defende que a extremidade de uma cadeia de uma molécula de um polímero de uma superfície difunde na estrutura de uma segunda superfície formando uma ligação através da interface, devido à sua mobilidade molecular e ao facto de serem materiais miscíveis [6].

- a teoria eletrostática, que explica a adesão através da transferência de carga do material eletropositivo para o eletronegativo, ou seja, implica que hajam transferência de eletrões entre duas superfícies. No entanto, esta é uma teoria controversa, uma vez que a troca de eletrões pode não ser a causa, mas sim o efeito de uma ligação adesiva [6].

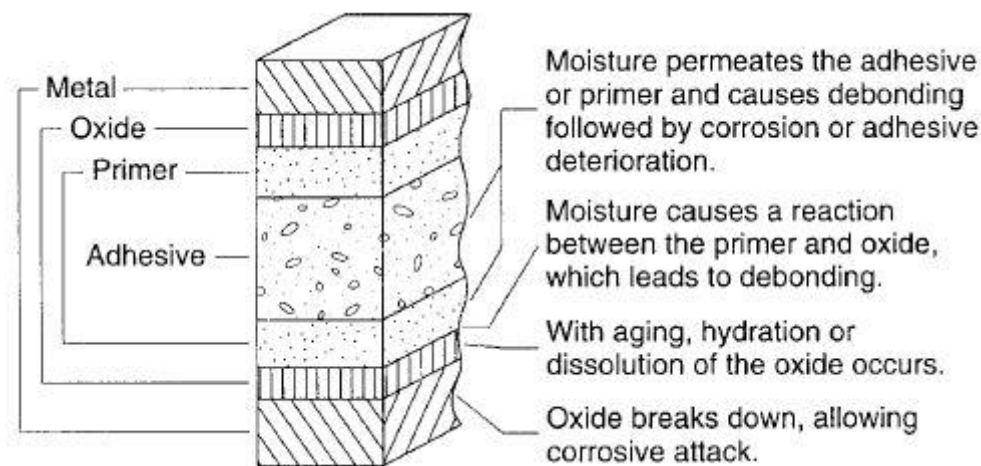


Figura 3 – Exemplos de camadas fracas [5]

2.1.1 Caracterização e aplicações

Para caracterizar a ligação de adesivos, importa saber o tipo de adesivo que a constitui. Existem vários tipos, sendo que importa salientar o adesivo estrutural, uma vez que será o tipo de adesivo utilizado nas JSS e JSD que serão testadas experimentalmente. Um adesivo estrutural destaca-se pela sua elevada resistência ao corte, de 7 MPa ou

superior. Dentro dos adesivos estruturais, têm relevância cinco famílias distintas: epóxicos, fenólicos, poliuretanos, poliimidás e acrílicos. Dependendo da aplicação do adesivo, cada uma das famílias referidas pode ser a mais indicada, como se pode observar na Tabela 1.

Tabela 1 - Tipos de adesivos estruturais e suas aplicações [5, 7]

| Adesivo estrutural | Características | Aplicações |
|---------------------------|--|---|
| Epóxicos | Possuem boa resistência mecânica e química, baixa contração, permitem ligações muito fortes e são compatíveis com a maior parte dos materiais. | São utilizados em diversas aplicações, nomeadamente nas indústrias automóvel e aeronáutica. |
| Fenólicos | Possuem boa resistência a elevadas temperaturas e agentes ambientais, boa resistência mecânica, baixa resistência ao impacto e elevada fragilidade. | São bastante utilizados em aplicações relacionadas com a madeira, tendo também elevada afinidade para a ligação de metais. |
| Poliuretanos | Podem apresentar uma resistência corte na ordem dos 20 MPa, boa resistência ao arrancamento, impacto e fadiga, boa tenacidade e bom comportamento a baixas temperaturas. | Utilizados em diversas aplicações e predominantemente indicados para ligações entre plásticos de difícil adesão. |
| Poliimidás | Excelente comportamento a temperaturas elevadas, podem ser utilizadas no estado líquido e sob a forma de filme. | Utilizados em aplicações complexas e usualmente a altas temperaturas. Necessitam de tempos de cura muito morosos e elevadas pressões, pelo que são aplicados em situações muito particulares, como na indústria aeroespacial. |
| Acrílicos | Embora se possam dividir em anaeróbicos, cianoacrilatos ou acrílicos modificados, as subfamílias possuem características comuns como elevada resistência ao corte, mau comportamento a baixas temperaturas e baixa resistência a esforços de arrancamento. | Predominantemente utilizados em plásticos ou metais, embora sejam utilizados também como aditivo, oferecendo melhorias na resistência ao corte. |

Relativamente às aplicações gerais dos adesivos ou ligações adesivas, estes materiais têm vindo a aumentar progressivamente e possuem um papel importante nas estruturas atuais, principalmente nas mais complexas, como é o caso da indústria automóvel, aeronáutica ou mesmo aeroespacial. Nas indústrias naval e civil, bem como na agricultura, também se recorre à utilização das ligações adesivas, muito devido à sua resistência estrutural.

Os adesivos sintéticos e, principalmente, os estruturais vieram reforçar os progressos das estruturas na busca de mais leveza, maior possibilidade de combinação de materiais e melhor aspeto visual [1].

Na indústria automóvel, atualmente, torna-se impossível pensar na conceção de um veículo sem o uso de adesivos na sua estrutura. Numa altura em que se pretende a maior redução de peso possível, bem como acabamentos superficiais pormenorizados, sem perder resistência mecânica, a utilização de ligações adesivas nas estruturas automotivas é uma obrigação. Na Figura 4 e Figura 5 apresentam-se algumas aplicações dos adesivos em estruturas de automóveis [8].

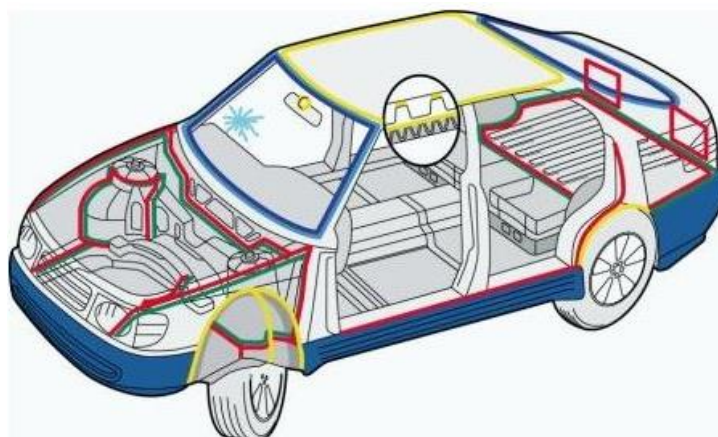


Figura 4 - Exemplo de locais onde podem ser aplicadas juntas adesivas na estrutura de um automóvel [9]

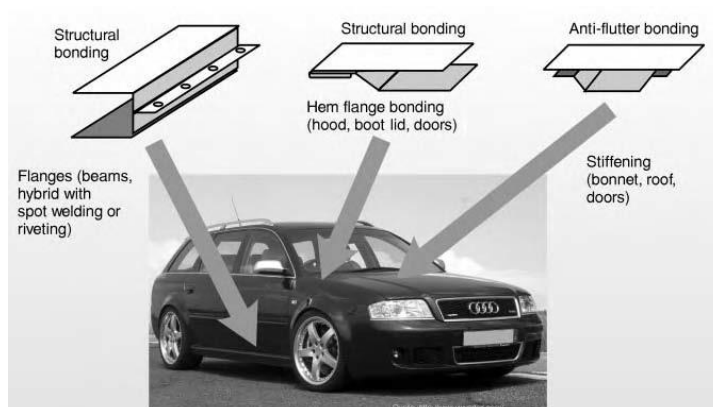


Figura 5 - Exemplos de aplicações de juntas adesivas num automóvel [8]

Nas indústrias aeronáutica e aeroespacial, a necessidade da utilização de ligações adesivas surge pela mesma razão. Evidentemente, a redução de peso num avião, por exemplo, é um fator muito importante, que quando combinado com a aerodinâmica, se traduz numa vantagem relevante. Por outro lado, a redução do peso da estrutura contribui para um menor consumo de combustível, contribuindo para melhorias tanto económicas como ambientais. A atividade a grandes temperaturas influencia em grande parte a utilização de adesivos, principalmente das poliimidas [1, 10].

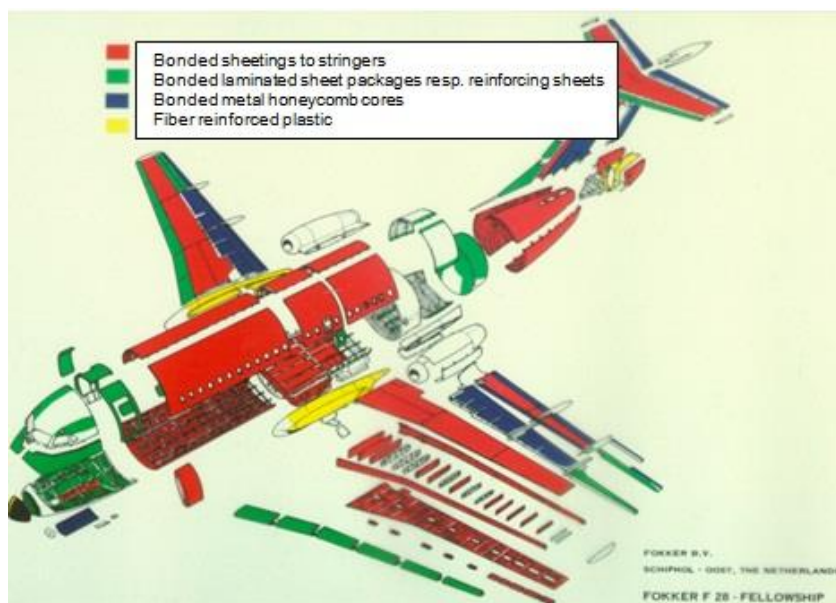


Figura 6 - Exemplos de ligações adesivas na indústria aeronáutica e aeroespacial [10]

Na área da construção civil, as ligações adesivas são muito utilizadas no fabrico de painéis *sandwich*, contribuindo para estruturas resistentes e bastante leves, que permitem um bom isolamento do interior do edifício.

2.1.2 Tipos de esforços em juntas adesivas

Em qualquer tipo de estrutura é importante perceber a que tipo de esforços ela pode estar sujeita, de forma a interpretar corretamente a concentração de tensões para determinar a resistência máxima da estrutura. Nas juntas adesivas podem ser identificados cinco tipos distintos de esforços básicos, representados na Figura 7, aos quais estas podem estar submetidas: esforços de tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento. De notar que as ligações adesivas se comportam melhor quando sujeitas apenas a esforço de corte, devido à sua resistência. Por outro lado, os esforços de clivagem e arrancamento são os mais prejudiciais para as juntas, uma vez que resultam numa combinação de esforços e numa maior concentração de tensões.

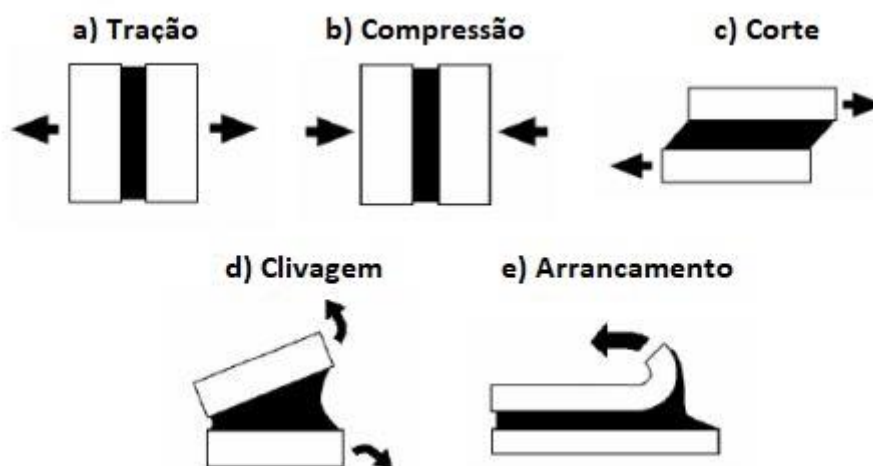


Figura 7 - Tipos de esforços em juntas adesivas (adaptado de [11])

Cada tipo de esforço tem uma ocorrência distinta e depende da forma como são aplicadas as forças:

- O esforço de tração implica que sejam aplicadas forças perpendicularmente ao plano de colagem, mas em direções opostas. É um dos piores tipos de esforços, uma vez que, embora a tensão seja praticamente uniforme ao longo da área de sobreposição, nas suas extremidades surgem esforços de arrancamento e clivagem.
- Como o próprio nome indica, no esforço de compressão as forças comprimem um substrato na direção do outro, contraindo o adesivo e aplicando tensões uniformes ao longo de toda a área de sobreposição. A junta adesiva resiste bem a este tipo de esforço, daí ser possível aplicar pouca quantidade de adesivo nestas ocasiões.
- O esforço de corte é o tipo preferencial na utilização de uma ligação adesiva, uma vez que a resistência ao corte é uma das maiores vantagens deste tipo de juntas. As tensões distribuem-se de forma parabólica, sendo inferiores no centro da área de sobreposição e atingindo o seu máximo nas extremidades da mesma. É possível calcular as tensões obtidas dividindo simplesmente a força pela área de sobreposição. Assim, quanto maior for esta área, menores serão as tensões aplicadas.
- Clivagem é um tipo de esforço que deve ser evitado ao máximo nas juntas adesivas e consiste na aplicação de forças trativas na extremidade da área de sobreposição. Isto implica que haja forte concentração de tensões nessa zona, levando à separação dos substratos.
- É bastante semelhante ao esforço de clivagem, embora no caso do arrancamento, pelo menos um dos substratos possui propriedades dúcteis, que contribui para a deformação excessiva do material e uma concentração de tensões elevadas na extremidade da zona de sobreposição.

2.1.3 Modos possíveis de rotura

Para conhecer bem uma junta e poder caracterizá-la de forma clara, deve ser identificado o seu modo de rotura. A norma ASTM D 5573 – 99 prevê alguns tipos de rotura, dos quais se destacam quatro principais, representados na Figura 8 [12]:

Rotura adesiva;

Rotura mista;

Rotura do substrato;

Rotura mista.

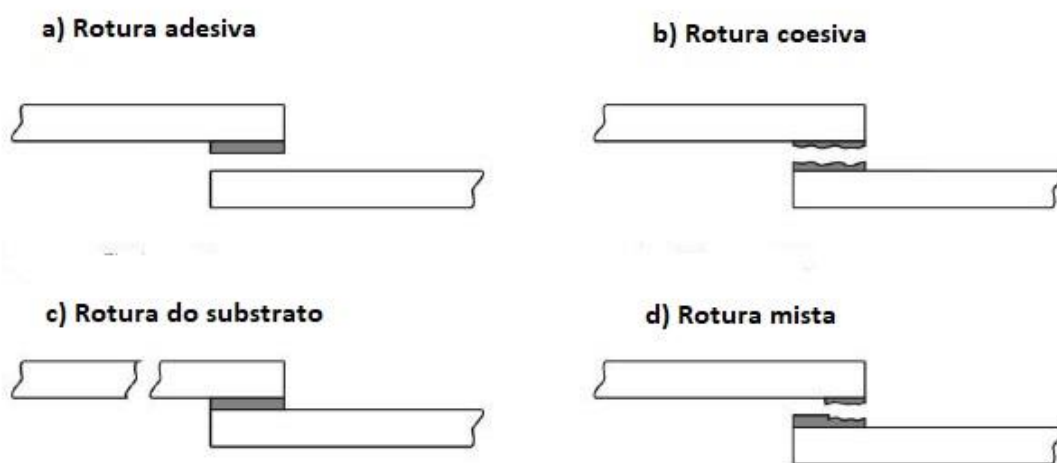


Figura 8 – Principais modos de rotura previstos pela Norma ASTM D 5573 - 99 (adaptado de [4])

O modo a) de rotura adesiva dá-se na interface entre o adesivo e o aderente e revela, normalmente, que houve previamente uma má preparação de superfície, daí não existir adesivo na superfície do substrato após a rotura. No entanto, esta rotura é muitas vezes, na verdade, uma rotura coesiva, revelada por uma observação mais rigorosa da superfície do substrato após rotura, onde é possível identificar uma fina camada de adesivo.

O modo b) de rotura coesiva ocorre quando a rotura da ligação acontece completamente no adesivo. Este modo de rotura é indicativo de que a resistência da ligação é mais forte que a resistência do próprio adesivo. Assim, este é um dos modos de rotura preferenciais, uma vez que está a ser utilizada toda a resistência dos componentes da junta.

Assim como na rotura coesiva, a ocorrência do modo c) de rotura do substrato indica que houve aproveitamento de toda a resistência dos materiais da junta. Porém, desta vez a rotura dá-se no substrato. É o outro modo preferencial de rotura, já que a resistência da ligação se revela superior à resistência do próprio substrato.

O modo d) de rotura mista possui características mistas entre uma rotura adesiva e uma rotura coesiva. Ocorre nomeadamente quando as resistências da ligação e do próprio adesivo são muito semelhantes.

2.1.4 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem ser configuradas de diversas formas, tendo em consideração um estudo prévio acerca da geometria dos componentes, das propriedades dos materiais e, sobretudo, do tipo de esforço a que estarão sujeitas. Na Figura 9 estão presentes as configurações mais comuns estabelecidas numa junta adesiva.

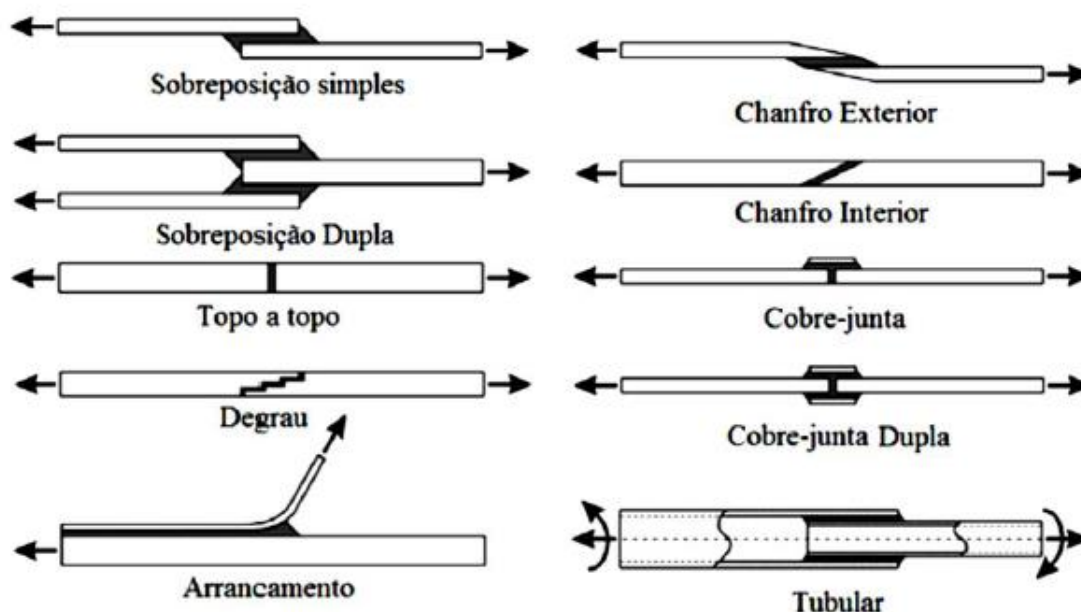


Figura 9 - Configurações possíveis mais comuns em juntas adesivas [7]

A configuração que se apresenta mais relevante em termos de aplicações industriais é a sobreposição simples. A sua utilização é bastante usual devido ao seu fácil fabrico e à previsibilidade do seu desempenho, uma vez que é um tipo de junta bem estudado. No entanto, como se pode observar pela sua representação na Figura 9, os substratos não se apresentam ao mesmo nível, o que provoca o aparecimento de efeitos de flexão e diminui, conseqüentemente, a resistência da junta [4, 13].

A sobreposição dupla surge, precisamente, para colmatar esta falha. Adicionando mais um substrato e uma área de sobreposição, a configuração oferece mais resistência, diminuindo os efeitos da flexão. No entanto, o seu tempo de fabrico é mais moroso.

A utilização de uma junta de chanfro interior, contribui para uma maior área de sobreposição, o que intensifica a resistência ao corte na secção do adesivo.

A junta de ligação topo a topo consiste na aplicação de adesivo entre dois substratos sujeitos a forças de tração simétricas. Neste caso, o adesivo não oferece grande

resistência, mas se os substratos forem maquinados de forma a apresentarem chanfros inferiores, o adesivo passará a estar sujeito a um esforço de corte, oferecendo maior resistência. Outra forma, um pouco mais dispendiosa, de melhorar o comportamento do adesivo numa junta topo a topo, é maquinar os substratos em forma de degraus, criando mais áreas de sobreposição sujeitas a esforços de corte. Adicionando cobre juntas, simples ou duplas, também é possível aumentar a área de sobreposição e melhorar a resistência da junta adesiva.

A junta de arrancamento consiste numa ligação em que o adesivo está sujeito a esforços de arrancamento. Já a junta tubular, surge para que se possam unir dois componentes tubulares, colando a secção exterior de um tubo na secção interior de outro. O adesivo estará, maioritariamente, sujeito a esforços de corte e a junta oferece bastante resistência.

2.2 Ensaio de juntas adesivas

De forma a poder prever com mais exatidão e conhecer ao pormenor o comportamento e a resistência das ligações adesivas a diferentes tipos de solicitações (corte, tração, compressão, impacto, entre outras), realizam-se ensaios de diversos tipos. Estes dividem-se em ensaios estáticos e ensaios dinâmicos. No entanto, um ensaio estático é, na realidade, um ensaio quási-estático, onde o provete é solicitado com cargas graduais, a velocidades muito reduzidas e baixa taxa de deformação. Já os ensaios dinâmicos ou de impacto caracterizam-se pela aplicação de esforços instantâneos, com velocidade e taxa de deformação elevadas.

2.2.1 Ensaios estáticos

2.2.1.1 Ensaios de tração

Ensaio de tração em provetes maciços de adesivo

Os ensaios de tração em provetes maciços de adesivo permitem determinar propriedades como a tensão de rotura, a tensão de cedência, o módulo de elasticidade, o coeficiente de Poisson e a deformação de rotura. Este ensaio consiste na aplicação de uma carga longitudinal no provete até provocar a sua rotura. O ensaio é usualmente efetuado de acordo com a norma ISO 527-2, que indica a geometria e as dimensões dos provetes a ensaiar, como se pode observar na Figura 10. Existem provetes mais longos, para ensaios em adesivos mais rígidos, e provetes curtos, no caso de adesivos menos rígidos. O ensaio pode ser efetuado em qualquer máquina de tração universal, como a da Figura 11, e pode ser avaliado através de curvas tração-deformação e da sua leitura [14].

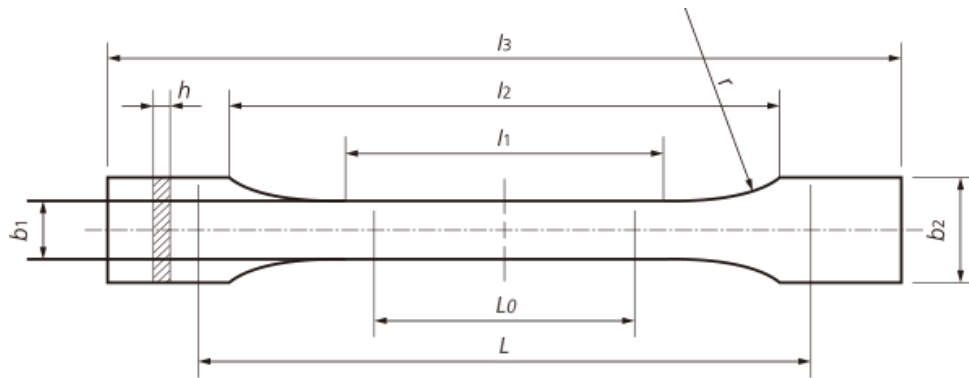


Figura 10 - Geometria do provete maciço a utilizar segundo a norma ISO 527-2 [15]

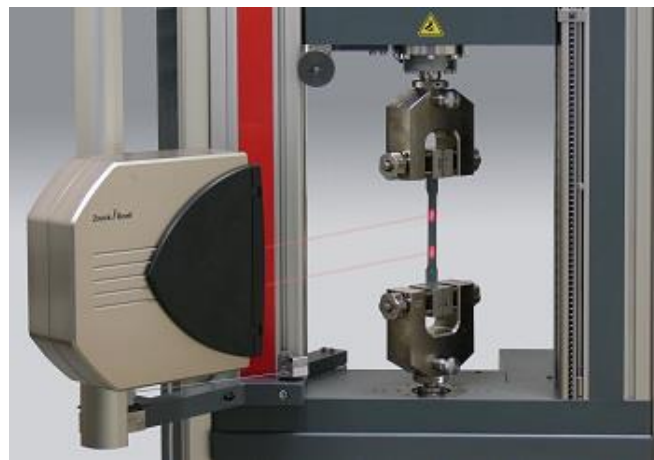


Figura 11 - Ensaio de tração de um provete maciço colocado nas amarras da máquina [16]

Ensaio de tração em juntas de topo a topo

Outro ensaio de tração comum é o ensaio em juntas topo a topo, também conhecido como *butt joint*. Neste tipo de ensaio, os provetes são tracionados até que os substratos se separem. Ocorre apenas rotura do adesivo, podendo-se reutilizar os restantes materiais, o que é uma grande vantagem em relação aos provetes maciços. Os substratos são usualmente cilíndricos e ligados através de uma camada de adesivo e são aplicadas nas extremidades tensões axiais simétricas e perpendiculares ao plano de colagem. Na Figura 12 é possível visualizar um exemplo de uma junta topo a topo, onde a camada de adesivo está representada a verde. O ensaio avalia não só as propriedades do adesivo, mas também da própria junta [14].

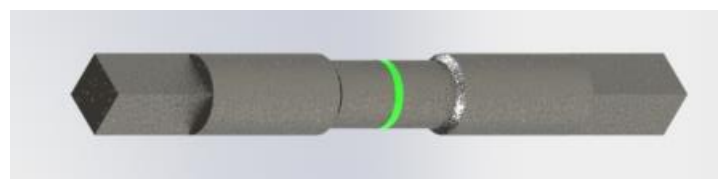


Figura 12 - Exemplo de uma *butt joint* (elaboração própria)

2.2.1.2 Ensaios de compressão

Os ensaios de compressão não são muito usuais em ligações adesivas, uma vez que também não é comum este tipo de aplicação necessitar da presença de um adesivo para suportar os esforços. Ainda assim, existem alguns ensaios que se podem efetuar para determinar as propriedades de compressão do adesivo e a sua tensão de cedência à compressão.

2.2.1.3 Ensaios de corte

Uma vez que é o tipo de esforço a que melhor se sujeita uma ligação adesiva, a abundância e complexidade de ensaios de corte acompanha essa importância. Estes são os mais usuais e permitem determinar a tensão de corte da junta ou do próprio adesivo.

Ensaio de corte em JSS

O ensaio mais comum para caracterizar uma junta adesiva é o ensaio de tração em JSS, onde é aplicado um esforço de tração paralelo ao plano de colagem nas extremidades dos substratos, até ocorrer a rotura do provete, provocando, maioritariamente, esforços de corte na área de colagem. O ensaio é usualmente efetuado segundo as normas ASTM D 1002, ISO 4587 ou equivalentes, permite obter a tensão de corte aparente (τ) e possui a vantagem de poder ser realizado em máquinas convencionais [14].

Ensaio Iosipescu ou *V-notched beam shear method*

O ensaio Iosipescu é um método usualmente aplicado em materiais compósitos, não deixando, por isso, de poder ser utilizado em adesivos ou ligações adesivas. Este método executa-se, atualmente, de acordo com a norma ASTM D 5379 e consiste em aplicar cargas de compressão assimétricas em quatro pontos distintos, provocando no centro do provete uma zona de momento nulo e uma sollicitação de corte puro (Figura 13). É um ensaio que permite obter a tensão de corte (τ) e o módulo de corte (G). Os provetes têm forma de uma pequena viga com dois entalhes em V simétricos em relação ao centro [14].

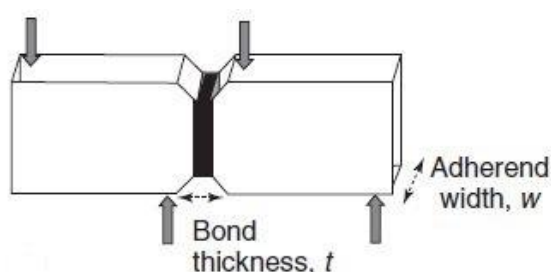


Figura 13 - Ensaio Iosipescu (aplicação de cargas assimétricas num provete com dois entalhes em V) [14]

Ensaio Arcan ou *Notched plate shear method*

Este ensaio também é conhecido como borboleta, devido à forma dos seus provetes. Estes possuem dois entalhes simétricos com abertura de 90° e são fixados em quatro pontos, também simétricos. É um ensaio normalmente utilizado em provetes maciços de adesivo, embora também possa ensaiar provetes de junta, de forma a determinar as suas características e os parâmetros τ e G . São aplicadas duas forças simétricas que afastam os mordentes um do outro e provoca tensões de cisalhamento (Figura 14). As tensões obtidas neste ensaio são bastante uniformes ao longo de todo o provete [14].

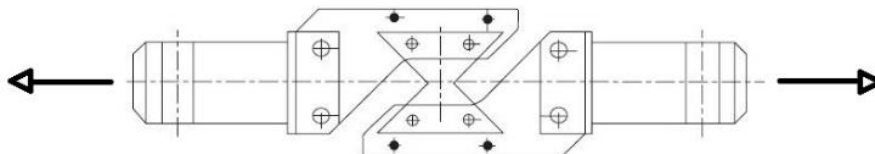


Figura 14 - Ensaio Arcan (adaptado de [14])

Ensaio *Thick Adherend Shear Test (TAST)*

O TAST avalia a resistência ao corte do adesivo, permitindo obter os valores de τ e G , e é caracterizado por utilizar provetes de simples e fácil fabrico e por poder ser executado em máquinas simples e convencionais. Os substratos têm forma simples, com um degrau onde se situa a área de sobreposição, e devem ser de um material rígido, normalmente de aço, para que o adesivo seja solicitado a corte puro. As dimensões do provete são determinadas pela norma ISO 11003-2 e o ensaio consiste em aplicar cargas simétricas de forma a separar os substratos (Figura 15) [14].

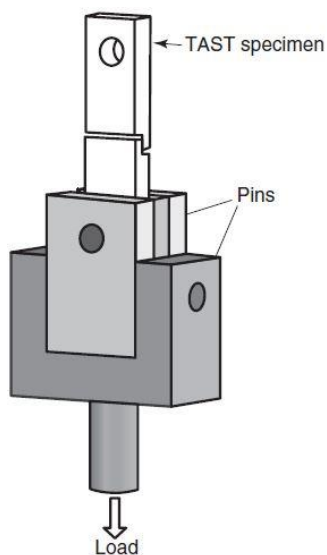


Figura 15 - Disposição dos substratos para um ensaio TAST [14]

Ensaio de junta topo a topo em torção ou *Napkin-ring test*

Este ensaio utiliza uma junta semelhante à utilizada no ensaio de tração em juntas topo a topo. Porém, desta vez os provetes são solicitados a um momento torsor, que é transferido para o adesivo provocando um estado de corte puro. Também permite obter os parâmetros τ e G .

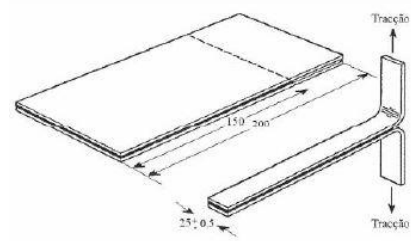
2.2.1.4 Ensaios de arrancamento

Os ensaios de arrancamento são usados para determinar a resistência ao arrancamento e caracterizar a resistência do adesivo em comparação com a preparação de superfície (Tabela 2). O ensaio de arrancamento em junta tipo “T” é o ensaio mais simples e que menos necessita de equipamento específico. Neste ensaio aplica-se uma força trativa em cada um dos substratos, provocando esforços de arrancamento no adesivo. Caracteriza-se por ser utilizado em substratos flexíveis. Para efetuar o mesmo tipo de ensaio entre um substrato rígido e um flexível, existem ensaios como o arrancamento a 180°, onde o substrato flexível é dobrado e puxado de forma a separar a junta. Este ensaio é, juntamente com o de junta tipo “T”, o mais utilizado. Existe, ainda, o ensaio de rolete flutuante, que utiliza material específico, e o ensaio de *climbing* ou *climbing drum test*, que é mais específico e utilizado em estruturas particulares como a *sandwich* [7, 14].

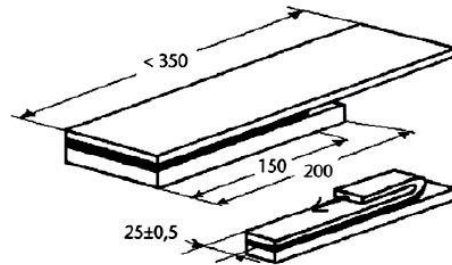
Tabela 2 - Exemplos de ensaios de arrancamento [7]

Ensaio de arrancamento

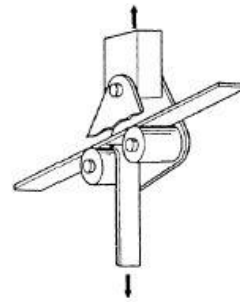
Junta tipo "T" [15]



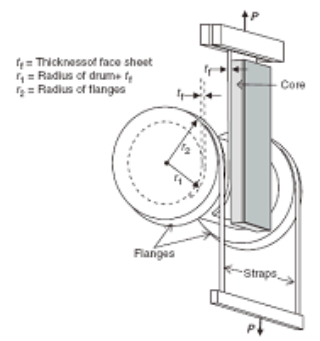
Arrancamento a 180° [15]



Rolete flutuante [15]



Climbing drum test [15]



2.2.1.5 Ensaios de caracterização à fratura

Os ensaios de caracterização à fratura dividem-se pelos diferentes modos de rotura existentes.

Os modos de rotura podem ser três. Na Figura 16 é possível ter uma noção gráfica de como atuam esses modos. O modo I ocorre por abertura da fenda, onde são provocados esforços de arrancamento. O modo II e o modo III ocorrem por corte, diferenciando na direção em que ocorrem. O modo II dá-se na direção da fenda, enquanto o modo III se propaga na direção perpendicular.

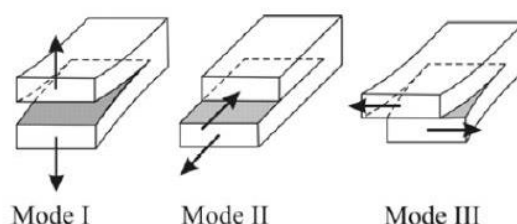


Figura 16 - Modos de rotura [15]

Double Cantilever Beam (DCB) e Tapered Double Cantilever Beam (TDCB)

Ambos os ensaios são utilizados para determinar a resistência à fratura em modo I e permitem obter a taxa crítica de libertação de energia para esse modo (G_{IC}). No ensaio DCB, representado na Figura 17, é possível seguir a norma ASTM D3433 ou a norma ISO 25217, onde o ensaio possui diferenças na forma como é efetuado o carregamento. Os provetes são solicitados com cargas simétricas, criando esforços de arrancamento no adesivo. O ensaio TDCB, também representado na Figura 17, é semelhante e difere apenas no formato dos provetes, que possuem um fabrico um pouco mais complexo, sendo por isso um ensaio mais dispendioso [14].

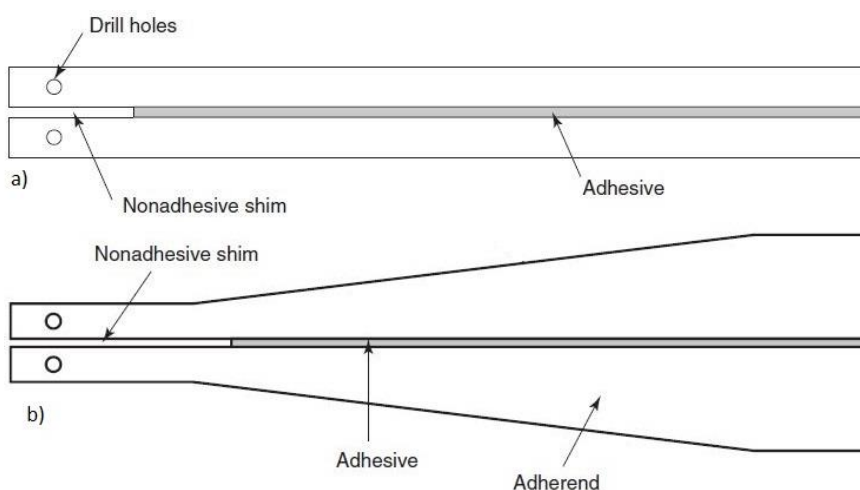


Figura 17 - Provede DCB e provede TDCB, a) e b), respetivamente, segundo a norma ASTM (adaptado de [14])

2.2.2 Ensaios dinâmicos e de impacto

Os testes dinâmicos permitem determinar propriedades como o módulo de elasticidade (E) e o módulo de corte (G) de adesivos estruturais. Existe alguma diversidade no que diz respeito a este tipo de ensaios, porém, importa focar nos mais característicos.

Ensaios com pêndulo (*IZOD e Charpy*)

Estes ensaios são bastante semelhantes e consistem na libertação de um pêndulo a partir de uma determinada altura, que atua pela força da gravidade e vai embater no provete, simplesmente apoiado, provocando a sua fratura. A energia absorvida pelo provete pode ser determinada a partir da diferença entre altura máxima do pêndulo antes e após do embate [17]. Este teste é muito característico dos ensaios de impacto. No entanto, segundo Adams [17], não deve ser utilizado em adesivos e não pode ser utilizado em juntas adesivas.

Ensaio de impacto em blocos ASTM (*ASTM Block Impact Test*)

Outro ensaio com ação de um pêndulo é o ensaio de impacto em blocos, representado na Figura 18. O teste é realizado segundo a norma ASTM D970 e consiste em lançar um pêndulo sobre um dos blocos constituintes de uma junta adesiva. Este ensaio permite obter a energia absorvida da mesma forma que o *Charpy*. No entanto, a forma como o pêndulo embate no bloco é muito inconstante, pelo que é necessário ter muito cuidado com a sua forma e a forma dos blocos [1, 17].

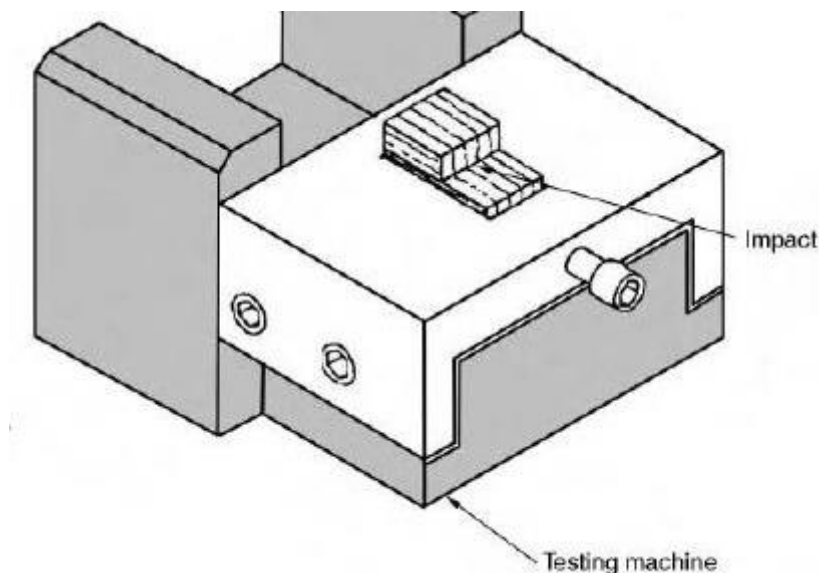


Figura 18 - Ensaio de impacto em blocos ASTM [1]

Barra de Hopkinson

A barra de Hopkinson possui diversas configurações possíveis, de forma a criar as mais variadas condições de esforço. Permite criar diversos tipos de ensaios, como torção, flexão, tração ou compressão. Para testar o comportamento dinâmico de ligações adesivas, a barra de Hopkinson possui uma configuração particular, denominada *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) que consiste em provocar um embate entre um projétil, lançado com ar comprimido, e a barra de *input*, que transmite o impulso ao provete e, posteriormente, à barra de *output* (Figura 19). Através da diferença entre o impulso medido na barra de *input* e na barra de *output*, é possível obter a curva tensão-deformação do material em condições de ensaio dinâmico [14, 18].

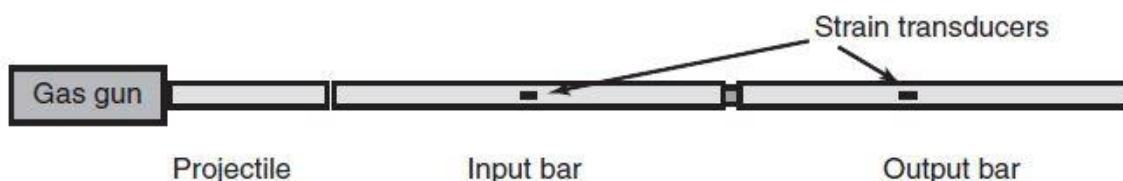


Figura 19 - Ensaio SHPB [14]

Drop Test

O *Drop Test* consiste em libertar um corpo com uma determinada forma e massa sobre a ligação adesiva, provocando a separação dos substratos. Uma variante do ensaio *Drop Test* é o *Wedge Peel Impact Test*, cujo provete se encontra representado na Figura 20, realizado segundo a norma ISO 11343, normalmente a 2m/s, e pode ensaiar vários tipos de junta, dependendo do efeito que se pretende provocar no adesivo. É realizado em máquinas próprias de impacto, como a representada na Figura 21, e é relativamente simples [19].

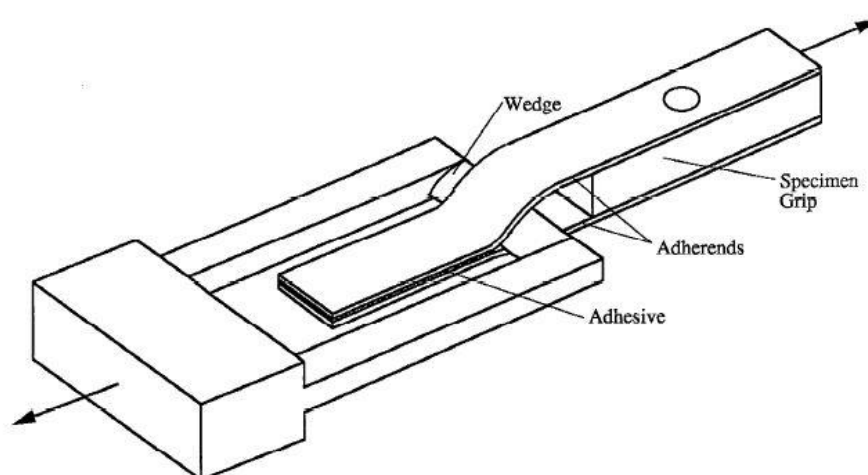


Figura 20 - Provete do *Wedge Peel Impact Test* - [19]



Figura 21 - Ensaio *Wedge Peel Impact Test* [20]

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

A previsão de resistência para qualquer tipo de estrutura é importante para perceber como a mesma deve ser projetada corretamente, sem que esta fique subdimensionada ou sobredimensionada. Na maior parte dos casos, as estruturas são dimensionadas acima do necessário, com fatores de segurança elevados, o que leva ao seu encarecimento e peso elevado.

No caso das juntas adesivas, o sobredimensionamento estaria relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas. Com o desenvolvimento de métodos preditivos fiáveis, é possível dimensionar a ligação de forma eficiente e igualmente eficaz, e saber que esta resistirá aos esforços aplicados nas condições a que estará exposta.

As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos. Os métodos analíticos começaram por ser propostos em 1938, com o modelo analítico de Volkersen [21], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Atualmente, os métodos numéricos são bastante aplicados em ligações adesivas, sobretudo o MEF [22], técnica atual mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas. O MEF foi inicialmente utilizado por Harris e Adams [23], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se, então, à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

2.3.1 Previsão para solicitações estáticas

2.3.1.1 Métodos analíticos

Os métodos analíticos funcionam para juntas adesivas de geometrias simples e a maior parte não considera o comportamento plástico dos materiais. O primeiro trabalho de Volkersen [21] analisa JSS solicitadas à tração, com o adesivo sujeito a esforços de corte. No entanto, foi desprezado o efeito de flexão provocado pelo desnivelamento entre os dois substratos. Ou seja, o método analítico apenas funciona se forem simplificadas as geometrias, os esforços e as condições fronteira, de forma a que seja possível encontrar solução. É um método que oferece respostas rápidas, mas que não representa, na totalidade, o verdadeiro comportamento das juntas adesivas. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes.

Ao longo do tempo, alguns autores foram contribuindo para a evolução desta técnica, como Goland e Reissner [24] em 1944, Szépe [25] em 1966, com a introdução de condições de utilização mais severas, Hart-Smith [26, 27] em 1973 e 1974, Tsai et al. [28] em 1998 ou, mais recentemente, Panigrahi et al. [29] em 2007, onde é introduzida a análise tridimensional.

2.3.1.2 Métodos numéricos

Contudo, os métodos numéricos surgem de forma a obter respostas mais precisas e fidedignas quanto ao verdadeiro comportamento das ligações adesivas, sem ter de aplicar todas as simplificações requeridas pelos métodos analíticos. Para além disso, os métodos numéricos permitem estudar e prever também o comportamento dos materiais, considerando a sua plasticidade.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões, quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [4]. Ao longo das últimas décadas, a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por Modelos de Dano Coesivo (MDC). Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza

funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é uma técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, ou tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [21], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [30] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [29]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [23], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, este ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.3.1.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos não considera descontinuidades na estrutura e no seu material, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da

estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fendas pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [7]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [31] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [32]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [33] e por Rice [34] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [35], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação.

No entanto, este método tem algumas limitações quando existe combinação de modos diferentes de rotura, como é o caso das juntas adesivas, onde a propagação de fendas depende tanto do adesivo, como do aderente, e pode ocorrer o modo misto de rotura (I+II) [4]. Para além disso, é necessário que o modelo já possua uma fenda inicial imposta pelo utilizador.

2.3.1.2.3 MDC

Os MDC apoiam-se nas bases da mecânica contínua e da mecânica da fratura, combinando as duas metodologias, de forma a oferecer respostas quanto à previsão de resistência de juntas adesivas [13, 36].

O conceito de MDC teve início com os estudos de Barenblatt [37] e Dugdale [38], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC permitem analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A

implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [39]. Este método possui, então, a grande vantagem de poder analisar a propagação do dano provocado por uma carga estática aplicada na zona coesiva da fenda e nas imediações, combinando a mecânica contínua com a mecânica da fratura [40].

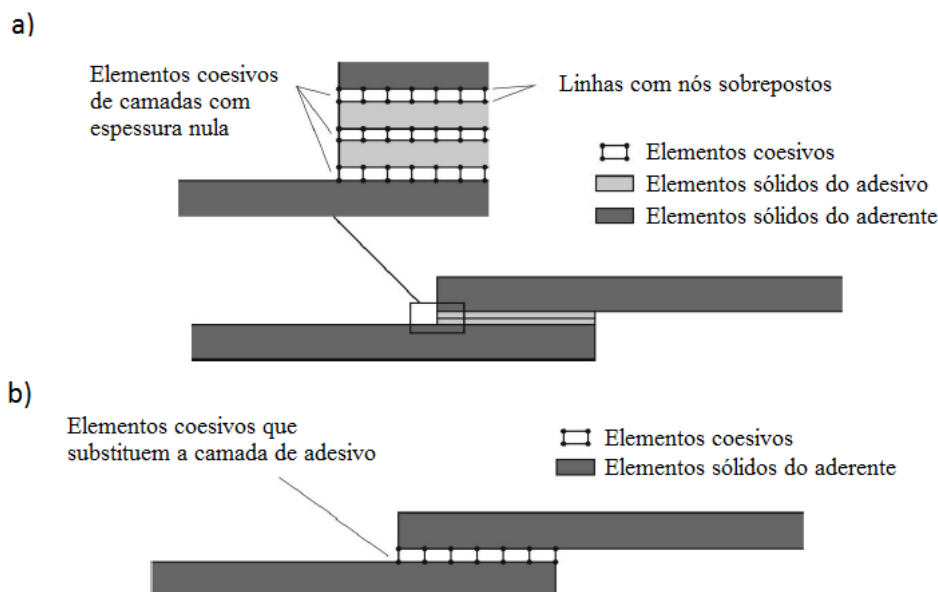


Figura 22 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [41])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [42]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 22), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [43], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [44].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação de leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações

lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [45]. Este modelo está implementado em *software*, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D, apresenta uma componente adicional de corte [46].

A evolução dos MDC deve-se à boa resposta do método em situações de propagação de dano em modo de rotura misto (I+II), combinando a situação de corte com tração, no que diz respeito à sua previsão em termos de resistência da estrutura [40].

A propagação de dano é evidenciada com a evolução da fenda e a diminuição da rigidez da estrutura de forma gradual.

2.3.1.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [47], triangular [48], exponencial [49], polinomial [50] e trapezoidal [44]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [51].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [52]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [53] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 23).

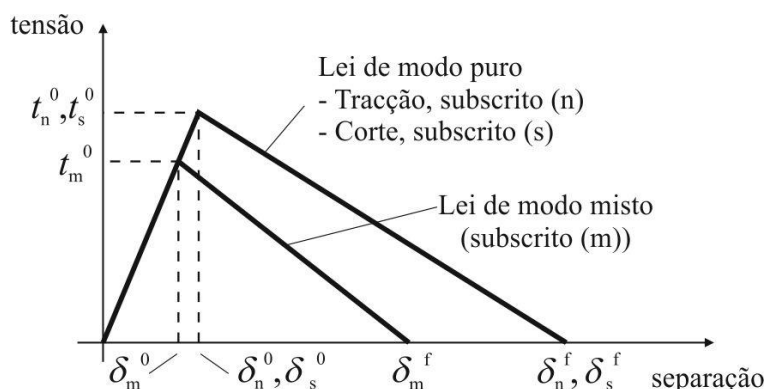


Figura 23 – Modelo coesivo triangular [36, 53]

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [54].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [55] e modo II [56].

2.3.1.2.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [57]. Têm sido publicados vários estudos sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [58], alguns parâmetros, como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimam os MDC em modo puro através de ensaios DCB, *End-Notched Flexure* (ENF) e JSS, alcançando bons resultados [44, 59].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto, este método é particularmente crítico devido aos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [60]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [61]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [62]. Por outro lado, o método direto define a forma exata das leis coesivas, na medida em que este método calcula o MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [60], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só

possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- J [63]. Rice [34] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do método de integral- J , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [64]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [56]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [65], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 24. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (1), em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}} \quad (1)$$

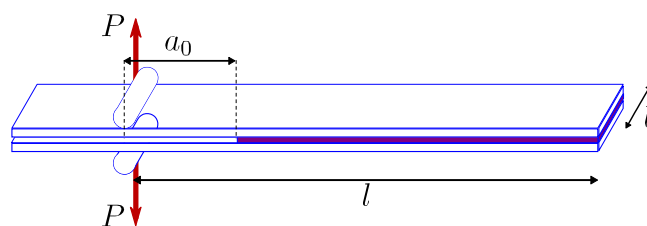


Figura 24 – Geometria do provete DCB [66]

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 25). A sollicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja

estável, é necessário que a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2l$) [67]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{Ic} por esta medição [68].

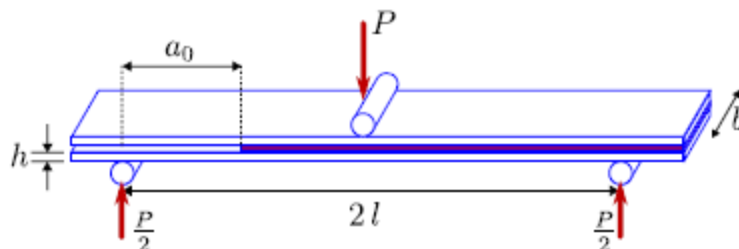


Figura 25 – Geometria do provete ENF [66]

2.3.1.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [69] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [70] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [39].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro cavidades [71]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [72] ou do número de ciclos para análises de fadiga [73, 74]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [75].

Hua et al. [76] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este

parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que possibilitou obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [77] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.3.1.2.5 MEFX

O MEFX é uma evolução recente do MEF que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [78]. Belytschko e Black [79], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [80]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas as funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis

tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [81].

Campilho et al. [82] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de JSS e JSD, coladas com um adesivo dúctil, onde se compararam resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 26). Neste estudo, os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

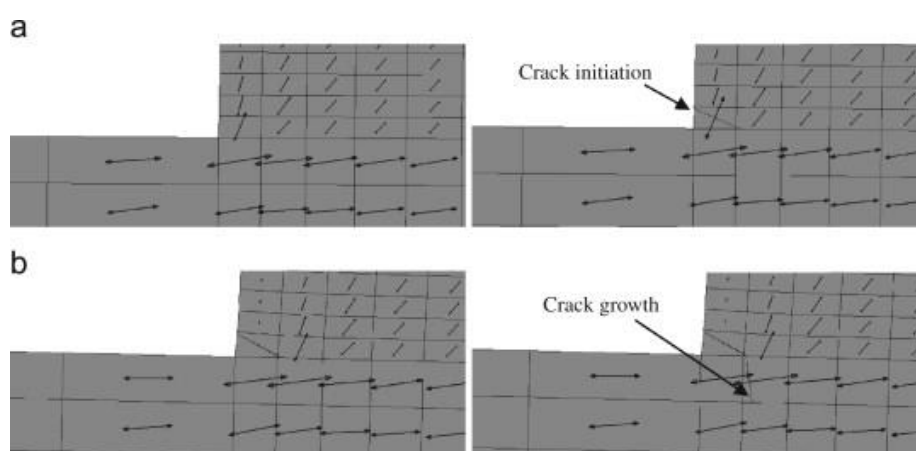


Figura 26 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [82]

2.3.2 Previsão para solicitações dinâmicas

2.3.2.1 Métodos analíticos

Os métodos de análise para solicitações dinâmicas ou de impacto diferem dos mencionados para solicitações estáticas, uma vez que têm de ser tidos em conta as deformações viscoelástica e viscoplástica. Tal como nos MDC, existe uma dependência direta da taxa de deformação.

De seguida, apresentam-se alguns dos métodos considerados relevantes para a previsão de resistência em solicitações de impacto.

2.3.2.1.1 Modelo de Voigt/Maxwell

Este modelo contabiliza a deformação elástica apresentada por uma estrutura quando solicitada a situações de impacto. Usualmente, para este modelo de análise, os parâmetros são determinados experimentalmente, com o objetivo de prever o comportamento dinâmico do material em estudo [83].

Sato e Ikegami [84], num estudo acerca das propriedades viscoelásticas de um determinado adesivo estrutural, tentaram determinar a sua tensão dinâmica, utilizando como base a modelação de Voigt de três e cinco elementos (Figura 27). Neste estudo, os autores concluíram que o modelo de cinco elementos descrevia o limite estrutural do adesivo, utilizando, desde então, esse modelo para otimizar juntas adesivas [83].

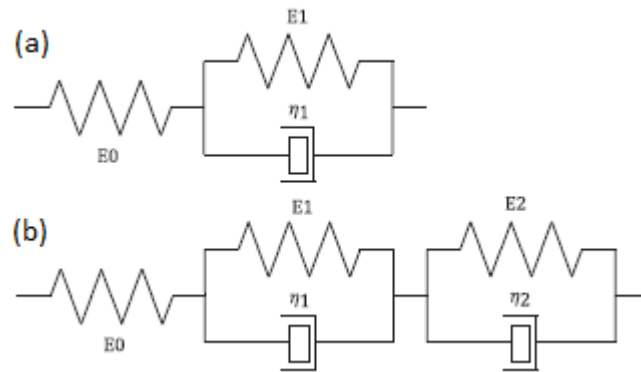


Figura 27 - Modelos de Voigt de 3 (a) e 5 elementos (b) adaptados por Sato e Ikegami (adaptado de [84])

2.3.2.1.2 Modelo de Cowper-Symonds

O modelo proposto por Cowper e Symonds [85] consiste na utilização de conceitos elastoplásticos e é, geralmente, utilizado na previsão da dependência da taxa de deformação dos materiais.

Goglio et al. [18] analisaram a influência da taxa de deformação de um adesivo epóxico, através de ensaios SHPB, validando os resultados para as taxas de deformação mais elevadas, com base no modelo de Cowper-Symonds. No entanto, a formulação resultante não é capaz de analisar casos de pequenas taxas de deformação [83].

2.3.2.1.3 Modelo de Johnson-Cook

Ao contrário dos modelos Voigt/Maxwell e Cowper-Symonds, considerados modelos de natureza viscoelástica, o modelo de Johnson-Cook [86] consiste num modelo viscoplástico, que permite relacionar a deformação após rotura com a taxa de deformação do material [83].

2.3.2.1.4 Modelos de sobretensão

Os modelos de sobretensão focam-se em avaliar a estrutura num estado de tensão elevado, que pode ultrapassar o limite de cedência do material, através de estágios de carga elevada aplicada, seguidos de períodos de relaxamento, de forma a avaliar a taxa de deformação [83].

2.3.2.2 *Métodos numéricos*

O estudo da previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas a solicitações de impacto com base em análises numéricas apoia-se nos métodos utilizados para solicitações estáticas, sobretudo no MEF. A juntar aos modelos prévios, a análise de juntas adesivas ao impacto exige a adição de modelos dinâmicos, que tenham em conta alguns fatores como o efeito da inércia e a taxa de deformação da estrutura [83].

Podem ser combinados diferentes modelos como os MDC e a mecânica da fratura ou dos meios contínuos [83]. Carlberger e Stigh [87], com o auxílio da modelação em elementos finitos, validaram este método combinado para solicitações dinâmicas.

Normalmente, os modelos estáticos podem ser adaptados para situações de impacto, alterando as propriedades dos materiais constituintes.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

No presente capítulo será apresentado o trabalho experimental efetuado, onde foram ensaiadas JSS com vários L_0 e com dois materiais adesivos distintos. Posteriormente, os valores retirados experimentalmente serão comparados com os valores obtidos numericamente. Adicionalmente, foi efetuado o estudo numérico de JSD nas mesmas circunstâncias.

3.1.1 Geometria e dimensões das juntas

As juntas ensaiadas têm dois tipos de geometria diferentes: JSS e JSD. Para cada uma das geometrias existem três L_0 distintos: 12,5, 25 e 50 mm.

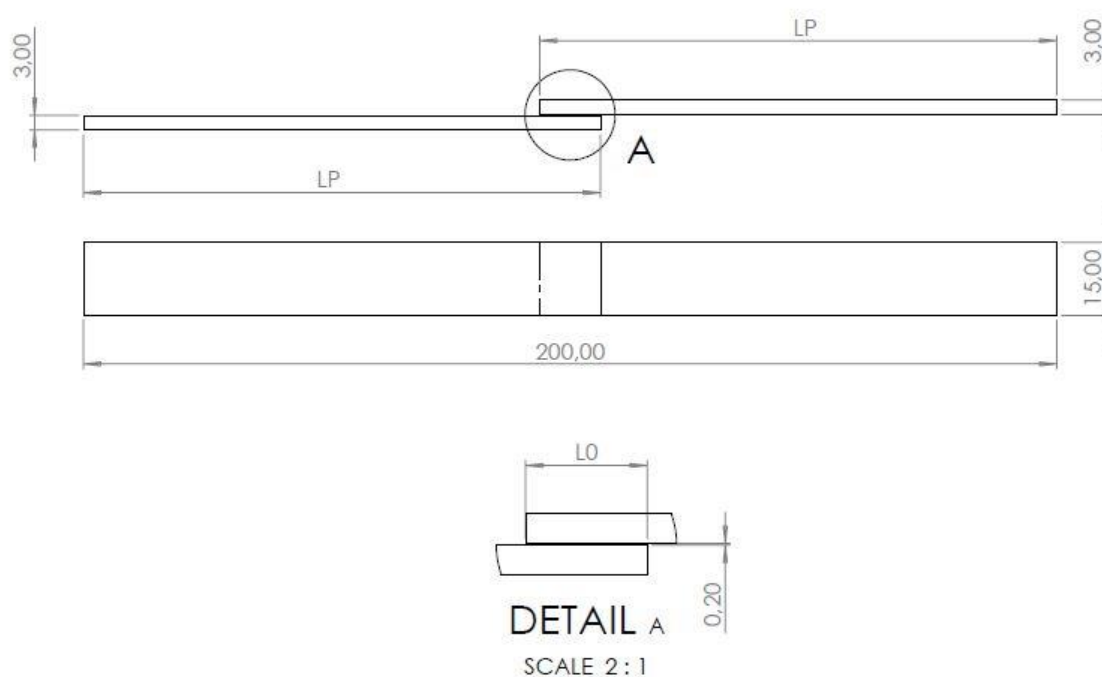


Figura 28 - Dimensões da JSS

Na JSS (Figura 28) os substratos possuem o mesmo comprimento (LP), a mesma espessura (TP) e a mesma profundidade (B).

Já na JSD (Figura 29) mantêm-se os parâmetros LP e B, mas a TP difere entre os substratos superior e inferior e o substrato intermédio. Neste caso, o substrato central possui o dobro da espessura dos substratos extremos.

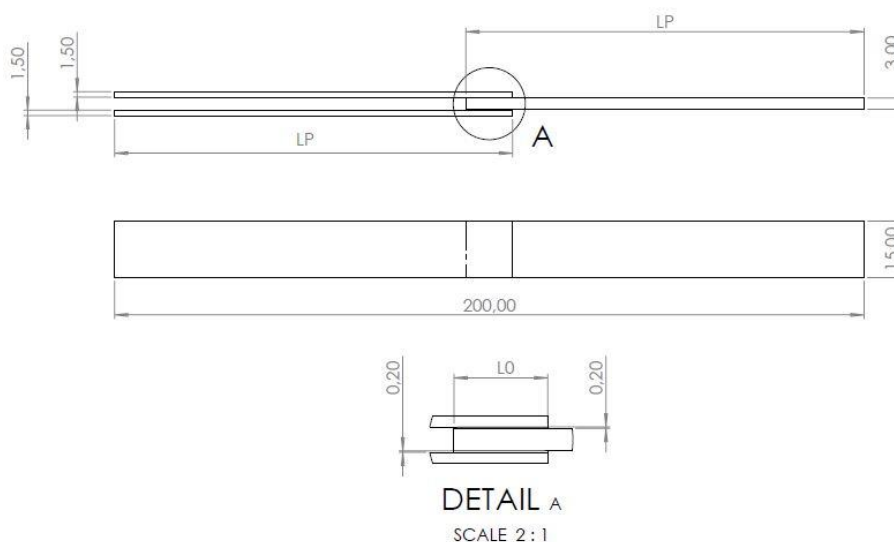


Figura 29 - Dimensões da JSD

Na Tabela 3 apresentam-se os parâmetros por geometria de junta utilizados no trabalho experimental.

Tabela 3 - Resumo dos parâmetros utilizados na geometria das juntas (dimensões em mm)

| Geometria de junta | Comprimento de sobreposição (L_0) | Espessura do adesivo (TA) | Espessura do substrato (TP) | Largura da junta (B) | Comprimento total da junta (LT) |
|--------------------|---------------------------------------|---------------------------|-----------------------------|----------------------|---------------------------------|
| JSS | 12,5/25/50 | 0,2 | 3 | 15 | 200 |
| JSD | 12,5/25/50 | 0,2 | 1,5/3 | 15 | 200 |

3.1.2 Materiais utilizados

3.1.2.1 Aderentes

Como aderente, foi escolhido um material de elevada rigidez, o pré-impregnado da marca Seal®, Texipreg HS 160 RM, constituído por fibras de carbono reforçadas com resina epóxida (Tabela 4). A modelação foi feita considerando um empilhamento unidirecional, com as fibras orientadas longitudinalmente no sentido do carregamento.

Tabela 4 – Propriedades elásticas do *carbon fiber reinforced polymer* (CFRP) [88]

| Compósito | | Texipreg HS 160 RM | | | |
|-------------|--------------------|--------------------|-------|----------------|------|
| E_1 [MPa] | $1,09 \times 10^5$ | ν_{12} | 0,342 | G_{12} [MPa] | 4315 |
| E_2 [MPa] | 8819 | ν_{13} | 0,342 | G_{13} [MPa] | 4315 |
| E_3 [MPa] | 8819 | ν_{23} | 0,380 | G_{23} [MPa] | 3200 |

As propriedades coesivas interlaminares do CFRP podem ser consultadas na Tabela 5, que representa valores correspondentes às propriedades a 2 m/s. Embora a velocidade de ensaio seja ligeiramente inferior (1,75 m/s), a reduzida diferença não influencia o resultado. Pela indisponibilidade de propriedades da camada intralaminar, serão utilizadas as mesmas propriedades da camada interlaminar. Isto significa que, em situações reais, seria necessária uma perfeita homogeneização da resina no interior das fibras. Com estes pressupostos, é possível realizar ensaios contabilizando apenas as propriedades das fibras. Mantendo estas propriedades, pode ser feita a introdução de uma camada interlaminar em cada um dos aderentes ou, para além das suposições de modelação anteriores, adicionar ainda uma camada intralaminar em ambos os aderentes.

Tabela 5 - Propriedades interlaminares do CFRP [88]

| Compósito | Camada interlaminar |
|--------------------------------|---------------------|
| E [MPa] | 108000 |
| G [MPa] | 4315 |
| t_n [MPa] | 40 |
| t_s [MPa] | 35 |
| G_{Ic} [N/mm ²] | 0,39 |
| G_{IIc} [N/mm ²] | 0,82 |
| ρ [g/cm ³] | 1,227 |

3.1.2.2 Adesivos

3.1.2.2.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138 (Figura 31), fabricado pela empresa suíça Huntsman Advanced Materials, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de

elevada resistência (Figura 30 e Tabela 6), e é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [89].

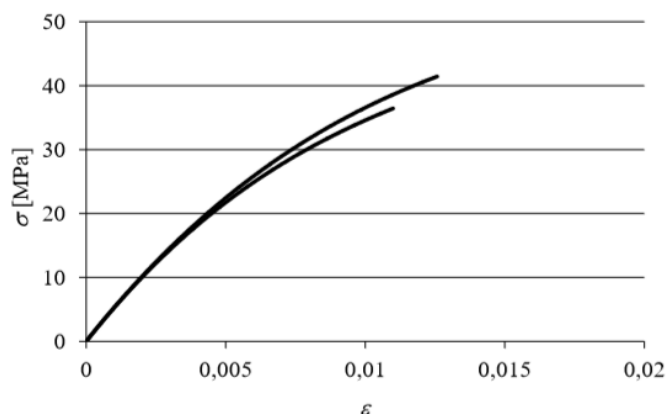


Figura 30 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [89]

Tabela 6 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [89, 90]

| Propriedades | Araldite® AV138 |
|---|-------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | $4,89 \pm 0,81$ |
| Coefficiente de Poisson, ν^b | 0,35 |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | $36,49 \pm 2,47$ |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | $39,45 \pm 3,18$ |
| Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%] | $1,21 \pm 0,10$ |
| Módulo de elasticidade transversal, G [GPa] | $1,56 \pm 0,01$ |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | $25,1 \pm 0,33$ |
| Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa] | $30,2 \pm 0,40$ |
| Deformação de rotura ao corte, γ_f [%] | $7,8 \pm 0,7$ |
| Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm] | 0,20 ^a |
| Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm] | 0,38 ^a |

^a Valores estimados na referência [90]
^b Valores do fabricante

Este adesivo de base epóxico, termoendurecível, é composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 31). 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 [91].



Figura 31 - Adesivo Araldite® AV138 [91]

No entanto, tratando-se de um ensaio de impacto, importa, para além de conhecer as propriedades estáticas do adesivo, definir as propriedades dinâmicas do mesmo. As propriedades a diferentes velocidades de ensaio foram determinadas por Silva [92] e podem ser consultadas na Tabela 7. As propriedades a 1 mm/min e 100 mm/min foram determinadas através de resultados experimentais. Os resultados a 105000 mm/min (equivalente a 1,75 m/s) resultam de extrapolação logarítmica [93] a partir das propriedades a menor velocidade de ensaio.

Tabela 7 - Propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 [92, 93]

| Adesivo | Velocidade (mm/min) | σ_f (MPa) | τ_f (Mpa) | G_{IC} (N/mm) | G_{IIC} (N/mm) |
|-----------------|---------------------|------------------|----------------|-----------------|------------------|
| Araldite® AV138 | 1 | 41 | 30,2 | 0,35 | 4,9 |
| | 100 | 49,1 | 36,2 | - | - |
| | 105000 | 70,2 | 51,7 | 0,35 | 4,9 |

3.1.2.2.2 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 32). A sua resina polioliol com cargas e endurecedor de base

isocianato possui uma baixa emissão de gases e perdas voláteis, e oferece uma boa resistência a altas temperaturas [91].



Figura 32 - Adesivo Sikaforce® 7752 [91]

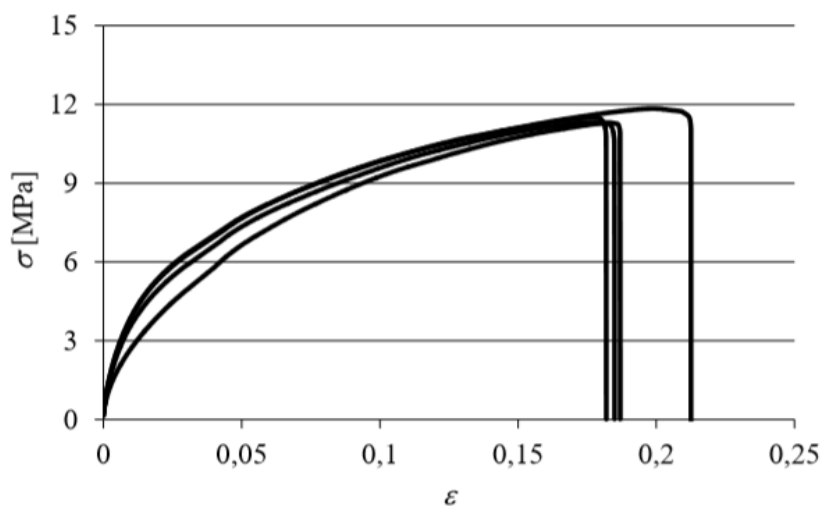


Figura 33 - Curvas σ - ϵ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [94]

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 σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 33 [94]. Na Tabela 8 são indicados os principais valores das propriedades mecânicas e de fratura do mesmo.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [94]

| Propriedades | Sikaforce® 7752 |
|---|------------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | $0,49 \pm 0,09$ |
| Coefficiente de Poisson, ν^a | 0,30 |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | $3,24 \pm 0,48$ |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | $11,48 \pm 0,25$ |
| Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%] | $19,18 \pm 1,40$ |
| Módulo de elasticidade transversal, G [GPa] | $0,19 \pm 0,01$ |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | $5,16 \pm 1,14$ |
| Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa] | $10,17 \pm 0,64$ |
| Deformação de rotura ao corte, γ_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] | $5,41 \pm 0,47$ |

^a Valores do fabricante

De acordo com as propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas onde é utilizado este adesivo seja elevada, uma vez que é um material que combina uma boa resistência com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são permitidas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência.

As propriedades dinâmicas do adesivo, para uma velocidade de 1,75 m/s, foram determinadas a partir dos ensaios experimentais, de forma a que os modelos numéricos se aproximassem dos resultados obtidos experimentalmente. Na Tabela 9 podem ser consultados os valores obtidos para as propriedades dinâmicas.

Tabela 9 - Propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752

| Adesivo | Velocidade (mm/min) | σ_f (MPa) | τ_f (Mpa) | G_{IC} (N/mm) | G_{IIC} (N/mm) |
|--------------------|------------------------|---------------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Sikaforce® 7752 | 105000 | 29,874 | 26,442 | 1,18 | 2,705 |

3.1.3 Fabrico das juntas

O fabrico das juntas divide-se em quatro passos distintos:

- Fabrico das placas;
- Cura das placas;
- Corte das placas;
- Preparação superficial e colagem dos provetes.

3.1.3.1 Fabrico das placas

Para um correto fabrico das placas de pré-impregnado da marca Seal®, Texipreg HS 160 RM, constituído por fibras de carbono reforçadas com resina epóxida, a utilizar como aderente, é necessário realizar o seguinte procedimento:

1. Cortar as folhas do pré impregnado de carbono, após prévio dimensionamento das mesmas (300×300 mm²), tendo em conta que o empilhamento será totalmente realizado com as camadas a 0°. Desta forma, foi necessário cortar 20 camadas por placa, com o intuito de, após sobreposição, a placa ter uma espessura de 3 mm.
2. De seguida, é efetuada a sobreposição das camadas, de forma a respeitar o empilhamento total das camadas a 0°, ou seja, com as fibras todas voltadas na mesma direção e paralelas à parede lateral da folha. Durante o empilhamento, as camadas são aquecidas com uma pistola de ar quente (Figura 34), desencadeando o processo de ativação da resina, para facilitar a colagem das camadas. Ao mesmo tempo, é aplicada pressão, a partir do interior para as extremidades, com a ajuda de uma espátula, para ajudar ao posicionamento de camada a camada. Esta pressão é efetuada sobre uma película, que é posteriormente removida após colagem das camadas.
3. Concluída a colagem das 20 camadas, a película de proteção permanece apenas nas extremidades, onde servirá o efeito para proteger a placa no seu contacto com as placas do molde. Este é constituído por duas tampas de alumínio de igual dimensão e por uma moldura de aço com 3 mm de altura e com área interna igual à área das placas de compósito, de forma a envolvê-la

perfeitamente. Para compensar a altura das películas de proteção das placas, colocam-se dois espaçadores de alumínio (um de cada lado).

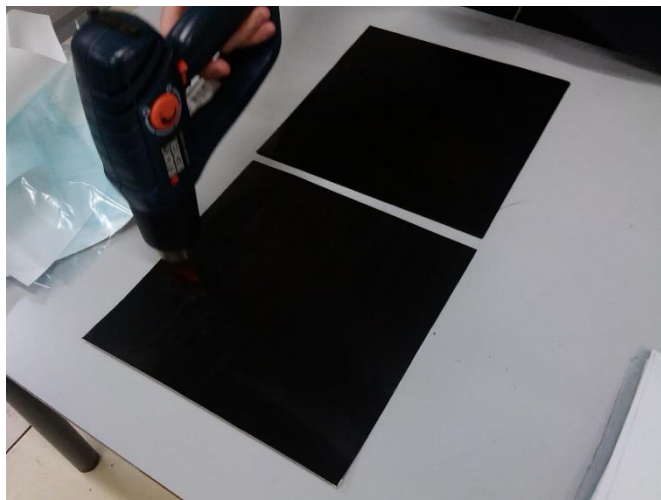


Figura 34 - Aplicação de calor nas camadas com uma pistola de ar quente

3.1.3.2 Cura das placas

Finalizado o empilhamento, é iniciado o processo de cura. Este é efetuado numa prensa de pratos quentes (Figura 35), onde as placas são submetidas a um ciclo térmico previamente programado (Figura 36). Este ciclo controla a pressão e a temperatura às quais as placas estão sujeitas, contribuindo para a diminuição da viscosidade da resina epóxida e para a sua difusão uniforme ao longo de toda a área da placa. A prensa exerce uma pressão constante de 30 bar no molde e a cura dá-se a uma temperatura de, aproximadamente, 130°C. Após o processo de cura estar completo, as placas são retiradas da prensa e permanecem em arrefecimento até à completa solidificação da resina.



Figura 35 - Prensa de pratos quentes utilizada para prensar as placas

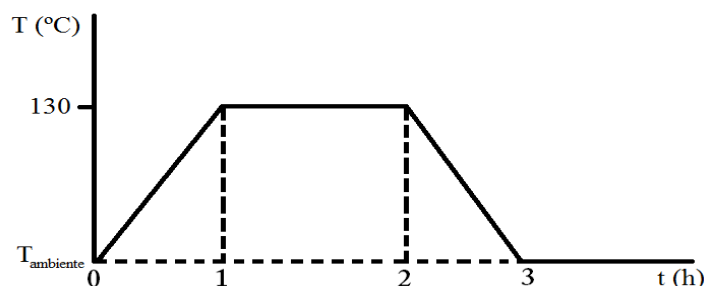


Figura 36 - Ciclo térmico programado para a cura das placas

3.1.3.3 Corte das placas

Findo o ciclo térmico, a placa é retirada do molde, já com as propriedades mecânicas pretendidas, remove-se as películas de proteção, são marcadas nas placas as dimensões dos provetes e procede-se, então, ao corte das mesmas numa máquina de corte. A máquina é constituída por um disco de corte diamantado e um sistema de pulverização de água, que evita a suspensão de partículas nocivas.

Foram cortados substratos de dimensões 280×15 mm² (substratos superiores) e 200×15 mm² (substratos inferiores).

Os substratos foram cortados com alguma folga para que, posteriormente, através de lixagem, sejam garantidas as dimensões pretendidas para o provete em questão e para que apresentem melhor qualidade de acabamento.

3.1.3.4 Preparação superficial e colagem dos provetes

A preparação da superfície dos substratos faz-se a partir do tratamento por lixagem (Figura 37), de forma a limpar a superfície de impurezas que prejudiquem a colagem e contribuindo para o aumento da molhagem do material, com o objetivo de promover uma ligação forte entre o adesivo e o substrato. Foi utilizada uma lixa de grão P60 como agente de limpeza superficial. Após a lixagem, utiliza-se acetona para limpar resíduos provenientes do processo de lixagem e eliminar outros agentes externos que possam existir durante o processo de fabrico.

Com os aderentes devidamente preparados, é feita a colagem dos provetes, aplicando, entre cada dois aderentes, uma camada de 0,2 mm de adesivo. De forma a garantir a altura pretendida de adesivo entre os substratos, coloca-se fio de nylon com o mesmo diâmetro num dos aderentes, para, após a sobreposição e posterior solidificação do adesivo, a sua camada tenha 0,2 mm e esteja espalhada por toda a zona de sobreposição. Esta, por sua vez, é efetuada com a ajuda de gabaritos, espaçadores e grampos, que pressionam os substratos em todo o estágio de cura, de forma a cumprir todas as dimensões pretendidas. Depois de colocar o adesivo num dos aderentes, o

outro é colocado por cima com o efeito de báscula para eliminar possíveis aprisionamentos de bolhas de ar ou poros.

Paralelamente ao processo de sobreposio dos substratos são colados, da mesma forma, calços ou *tabs* nas extremidades das juntas, que permitem, posteriormente, a fixao do provete nas amarras.

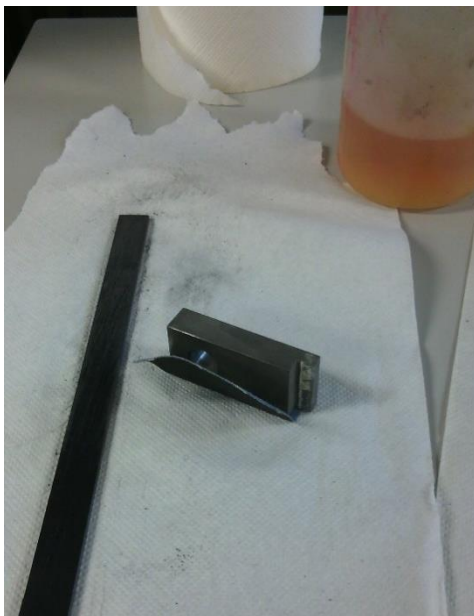


Figura 37 - Processo de lixagem e limpeza dos substratos

Após concluído todo o processo, o provete apresenta a sua forma final (Figura 38). Já em fase de ensaio, as suas extremidades serão devidamente preparadas para a fixao nas amarras, que permitem a colocao do provete na máquina.



Figura 38 - Provete de uma JSD finalizado

3.1.4 Ensaio das juntas

Previamente à realização do ensaio é necessário preparar as juntas para o mesmo. Como os provetes são fixados em amarras, são furados nas extremidades de forma a permitirem a passagem de um pino M8. Para além da furação, é aconselhada a colagem de *tabs* em aço (placas quadradas que cobrem a largura dos substratos nas extremidades) com cerca de 2 mm de espessura, criando mais resistência, uma vez que no impacto, o aderente de fibra de carbono não possui resistência suficiente e rasga o furo na direção das fibras sem oferecer resistência, invalidando o ensaio (Figura 39).



Figura 39 - Provetes preparados para ensaio

Os ensaios foram realizados no laboratório de Processos Avançados de Ligação (Figura 40) do Instituto de Ciência e Inovação em Engenharia Mecânica e Engenharia Industrial (INEGI).



Figura 40 - Laboratório de Processos Avançados de Ligação do INEGI

A máquina que permitiu os ensaios experimentais das juntas é uma máquina típica de *drop test* (Figura 41). Esta liberta uma bigorna de 30 kg, que por sua vez cai livremente sobre a junta, criando a situação de impacto. A máquina possui um *software* próprio, e é previamente configurada para que o peso embata na junta com a energia pretendida, como se pode observar na Figura 42. Neste caso, foi selecionado um valor de 40 J. Dessa forma, a máquina liberta o peso a uma altura de, aproximadamente, 136 mm (calculada a partir da fórmula da energia potencial) que, tendo em conta a sua massa de 30 kg e a aceleração gravítica, promove o embate na junta com uma libertação de energia cinética equivalente a 40 J.

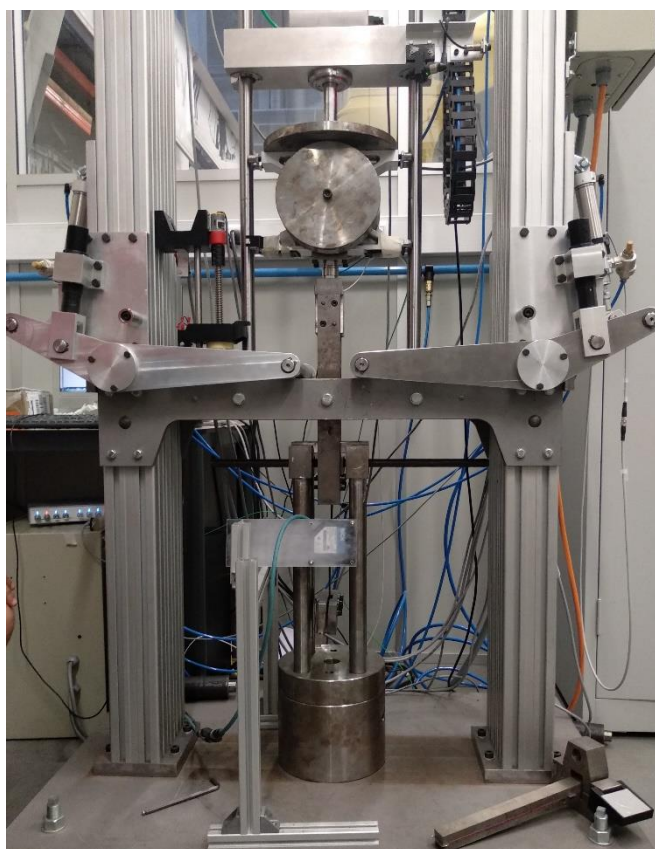


Figura 41 - Máquina de *drop weight*

A junta é fixada pelas suas extremidades em duas amarras, sendo posteriormente colocada na máquina, suportada por um apoio simples na amarra superior, que impede o movimento vertical da junta (Figura 43).

Adjacientemente à máquina do ensaio de queda de peso, é colocado um sensor por feixe laser que permite a leitura do deslocamento do provete. Após calibrado todo o sistema, a máquina está pronta para libertar o peso sobre a junta.

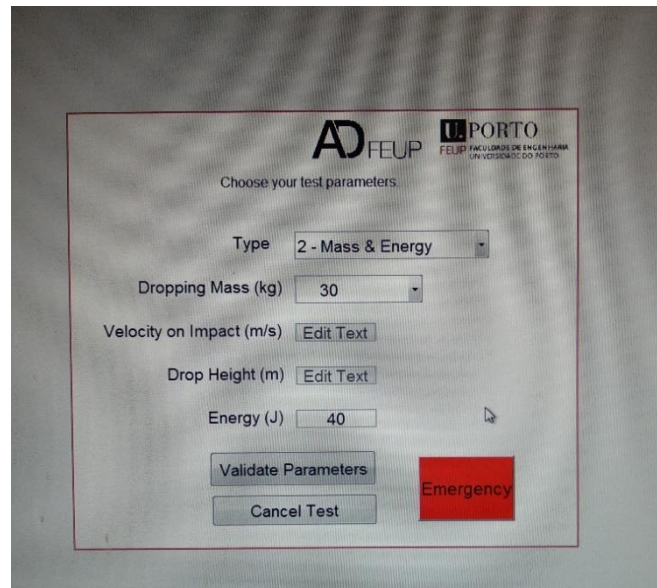


Figura 42 - Configuração dos parâmetros para o *drop test* no *software* da máquina



Figura 43 - Provete colocado na máquina de *drop weight*

3.1.5 Resultados obtidos e discussão

Para cada um dos casos foram testados 5 provetes, ainda que alguns deles tenham resultado em dados inválidos, como será possível observar no decorrer deste capítulo.

Os resultados obtidos nas JSS com o adesivo AV138 para os vários L_0 encontram-se representados na Figura 44, Figura 45 e Figura 46, onde podem ser visualizadas as curvas P - δ correspondentes.

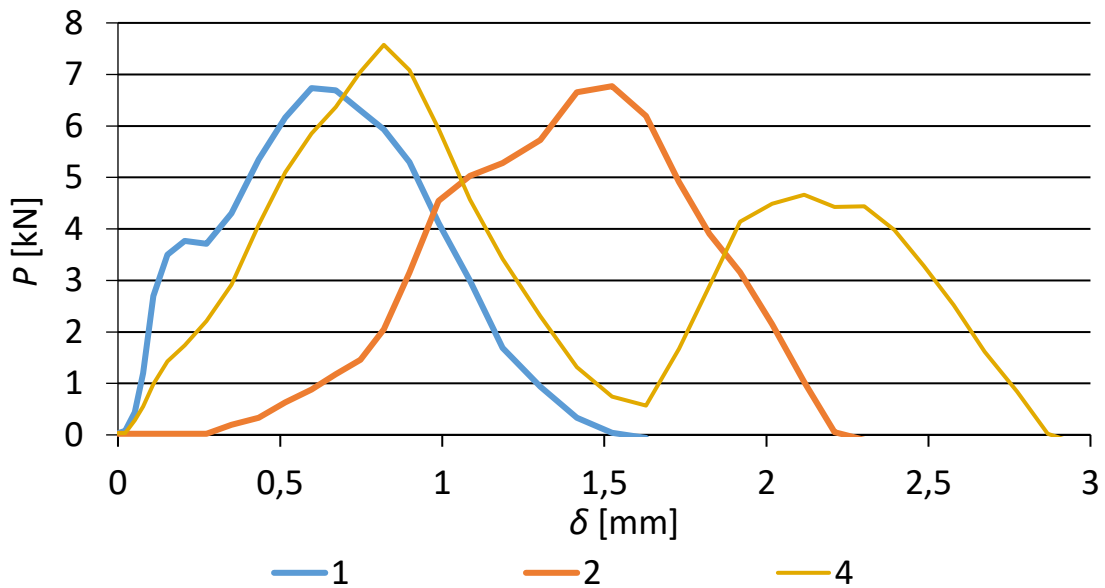


Figura 44 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm

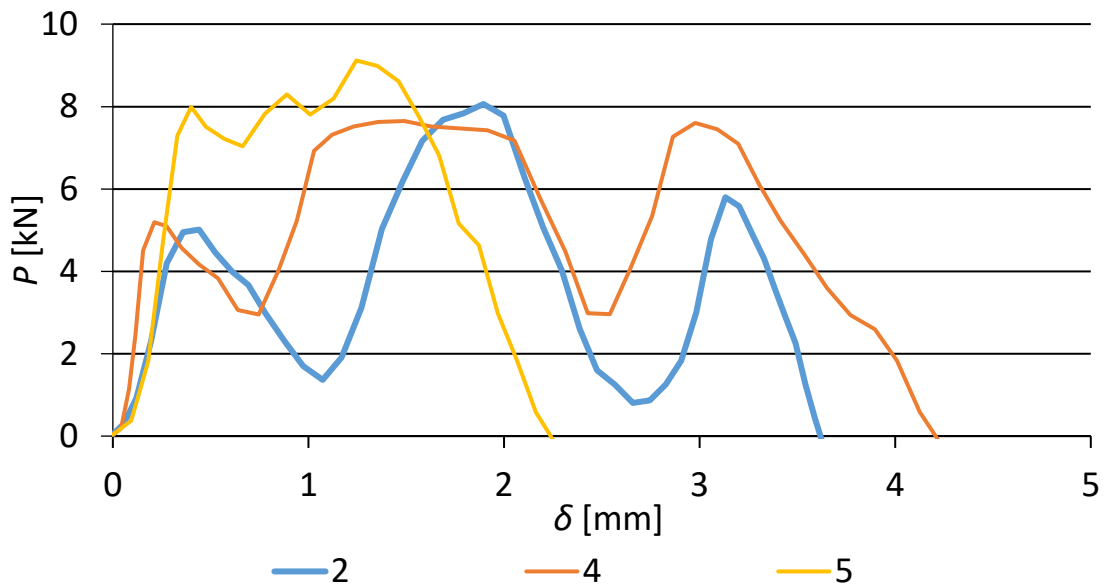


Figura 45 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm

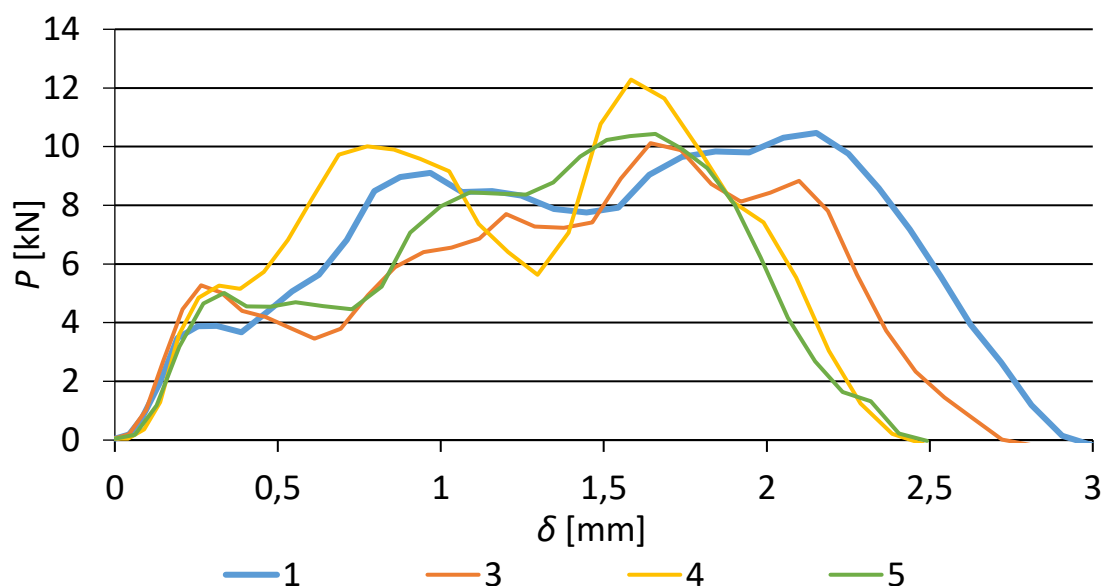


Figura 46 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm

Verifica-se que o aumento de L_0 se traduz num aumento dos valores de carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$), o que significa um aumento da resist\encia das juntas.

A forma como evolui a resist\encia da junta, com o aumento de L_0 , pode ser visualizada na Figura 47.

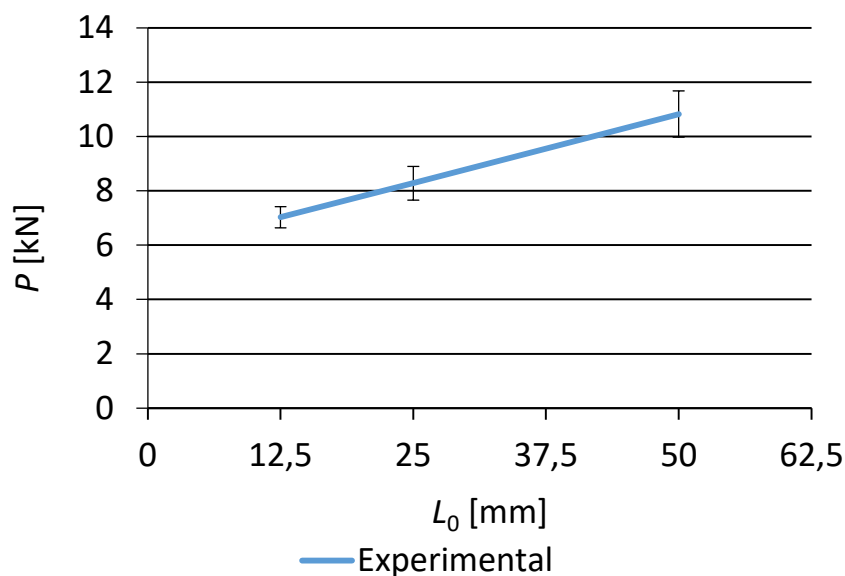


Figura 47 – Valores m\edios de $P_{m\acute{a}x}$ correspondentes \eas JSS com o adesivo AV138

Analisando a Figura 47 pode dizer-se que o aumento de resist\encia n\ao \e um aumento proporcional, embora se possa considerar praticamente linear, uma vez que o declive da reta que une os pontos correspondentes \eas junta com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm \e semelhante ao declive da reta que une os pontos das juntas com $L_0=25$ e $L_0=50$ mm.

A Tabela 10 permite visualizar de uma forma generalizada os valores de $P_{\text{máx}}$ correspondentes a cada um dos L_0 testados. A variação representa a diferença percentual entre a média dos provetes de determinado L_0 e a média dos provetes com $L_0=12,5$ mm.

Tabela 10 – Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo AV138

| $P_{\text{máx}}$ [kN] | | | |
|-----------------------|------|------|-------|
| L_0 [mm] | 12,5 | 25 | 50 |
| 1 | 6,73 | - | 10,47 |
| 2 | 6,77 | 8,06 | - |
| 3 | - | - | 10,11 |
| 4 | 7,58 | 7,65 | 12,28 |
| 5 | - | 9,12 | 10,43 |
| Média | 7,03 | 8,28 | 10,82 |
| Desvio | 0,39 | 0,62 | 0,85 |
| Variação (%) | - | 17,8 | 53,9 |

As curvas P - δ correspondentes às JSS fabricadas com o adesivo 7752 para os vários L_0 podem ser consultadas na Figura 48 Figura 49 e Figura 50.

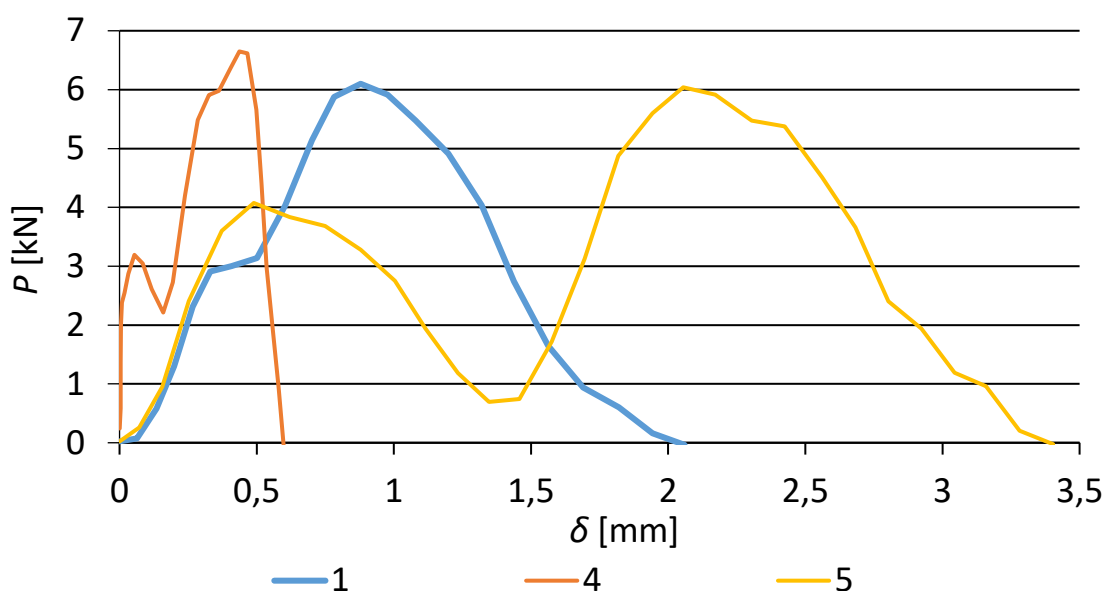
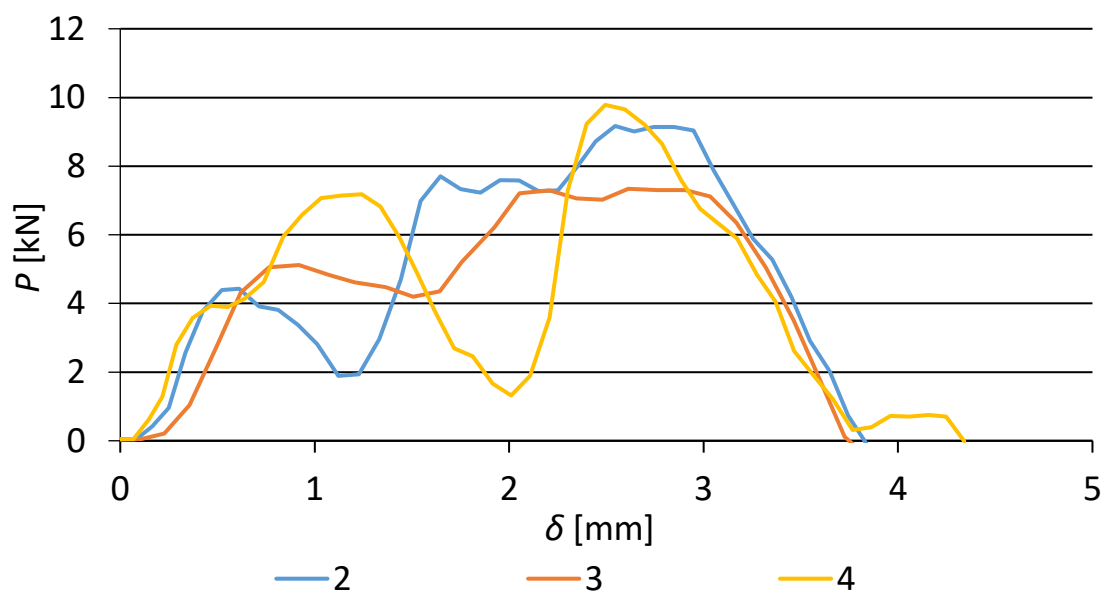
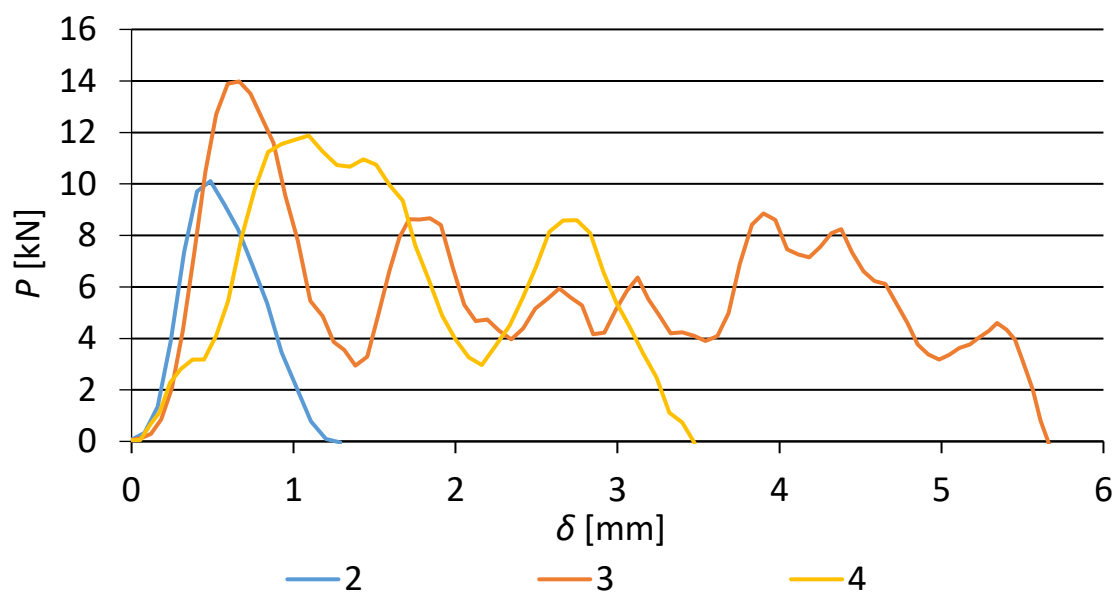


Figura 48 - Curvas P - δ experimentais de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm

Figura 49 - Curvas P - δ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mmFigura 50 - Curvas P - δ experimentais JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm

É notório, uma vez mais, que o aumento de L_0 se reflete num aumento dos valores de $P_{máx}$, contribuindo para o aumento da resistência das juntas.

A evolução da resistência das juntas com o aumento de L_0 pode ser visualizada através da Figura 51.

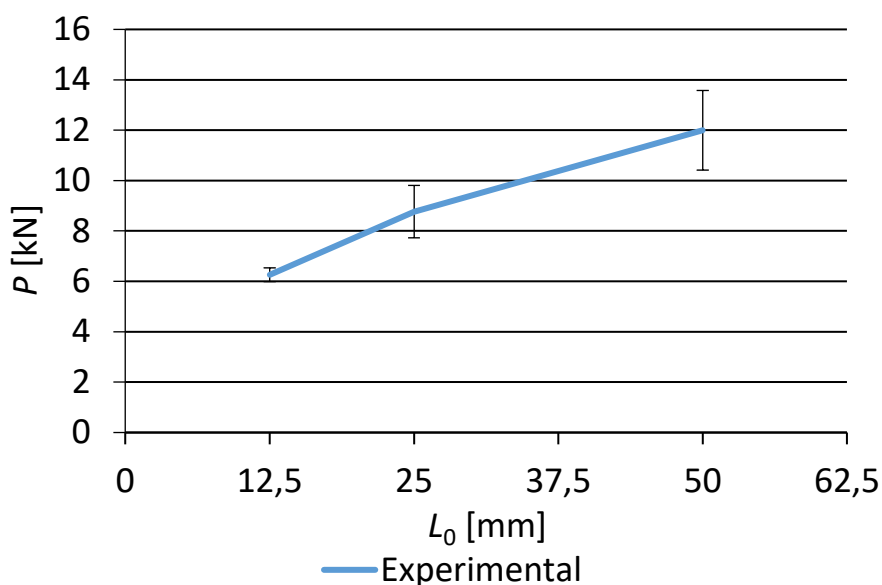


Figura 51 - Valores médios de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com o adesivo 7752

Verifica-se que o aumento não é proporcional, uma vez que, expandindo a reta, a mesma não passa nos pontos de coordenadas (0,0). No entanto, comparando com as JSS fabricadas com o adesivo AV138, evidencia-se maior proporcionalidade, que pode ser justificada pela flexibilidade do adesivo em questão.

A evolução da resistência da junta também é praticamente linear, uma vez que o declive da reta que une os pontos correspondentes à junta com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm é semelhante ao declive da reta que une os pontos das juntas com $L_0=25$ e $L_0=50$ mm, embora neste caso se note uma ligeira diminuição.

A Tabela 11 permite visualizar de uma forma generalizada os valores de $P_{\text{máx}}$ correspondentes a cada um dos L_0 testados. A variação representa a diferença percentual entre a média dos provetes de determinado L_0 e a média dos provetes com $L_0=12,5$ mm.

Comparando os valores da variação percentual nas juntas fabricadas com ambos os adesivos, nota-se que as JSS fabricadas com o adesivo 7752 possuem uma variação percentual bem mais elevada, o que significa que o aumento do L_0 tem mais influência em adesivos flexíveis. Neste tipo de adesivo, contrariamente ao AV138, classificado como um adesivo frágil, a concentração de tensões nas juntas é inferior, para além de que, sendo um adesivo dúctil, tem a capacidade de absorver os picos de tensão que se possam verificar ao longo do L_0 . Por essa razão, o aumento de resistência nas juntas com adesivos dúcteis solicitadas ao impacto é mais significativo do que naquelas fabricadas com um adesivo rígido.

Tabela 11 - Influência de L_0 na resistência de JSS com o adesivo 7752

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [kN] | | |
|--------------|-----------------------|------|-------|
| | 12,5 | 25 | 50 |
| 1 | 6,10 | - | - |
| 2 | - | 9,17 | 10,12 |
| 3 | - | 7,34 | 13,98 |
| 4 | 6,65 | 9,78 | 11,88 |
| 5 | 6,04 | - | - |
| Média | 6,26 | 8,76 | 11,99 |
| Desvio | 0,27 | 1,04 | 1,58 |
| Variação (%) | - | 39,9 | 91,5 |

3.2 Trabalho numérico

Na presente dissertação, foram simuladas JSS e JSD ao impacto com MDC, através de análise pelo MEF. Os modelos, condições da análise numérica e propriedades dos elementos serão descritos ao longo do atual capítulo.

3.2.1 Condições da análise numérica

Como *software* de simulação das juntas pelo MEF foi utilizado o Abaqus®. O modelo foi construído em 2D, uma vez que são juntas de geometria simples e facilita bastante o processo, reduzindo o número de elementos presentes na simulação. As dimensões dos modelos são as referidas no capítulo 3.1.1, para aproximar ao máximo a simulação dos ensaios realizados.

Inicialmente, no módulo *Part* é esboçado o modelo com as dimensões requeridas (Figura 52). Importa salientar que o esboço deve conter todas as áreas da junta, ou seja, isolar a área de adesivo, a zona de substrato sobreposta e uma área na extremidade da junta que irá simular a velocidade de impacto.

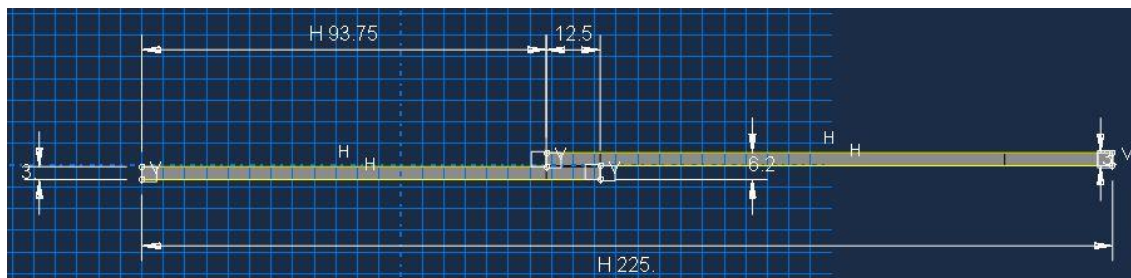


Figura 52 - Esboço de uma JSS com $L_0=12,5$ mm

No módulo *Property* criam-se os materiais constituintes da junta. No caso dos aderentes, em *Material Behaviors*, definem-se a densidade e as propriedades elásticas do tipo *Engineering Constant*. Quanto aos adesivos, cria-se o material tendo em conta a densidade, as propriedades elásticas do tipo *Traction* e, tratando-se de um material coesivo, a propagação de dano *Quads Damage*.

Em *Field Output*, no módulo *Step*, definem-se os parâmetros que permitem efetuar as análises requeridas. Para as análises pretendidas, é suficiente requisitar os parâmetros *CSTRESS*, *SDEG*, *LE*, *PE*, *PEEQ*, *RF*, *S*, *U* e *V* (*contact pressure and frictional shear stresses*, *Scalar stiffness degradation variable*, *logarithmic strain components*, *plastic strain components*, *equivalent plastic strain*, *all components of reaction forces*, *all stress components*, *all physical displacement components* e *all velocity components*, respetivamente). Para definir a curva $P-\delta$ em cada uma das simulações, são necessários os parâmetros *RF*, que determina as forças de reação aplicadas em toda a geometria da junta a qualquer momento, e *U*, que indica o deslocamento. Os restantes parâmetros permitem obter as tensões normais e de corte nas direções x e y .

De forma a apropriar o modelo para uma situação de impacto, é necessário criar uma massa com 25 mm de comprimento, fazendo repartição do substrato, para recriar a carga dinâmica. À massa é atribuído um material semelhante ao aderente, mas com um módulo de elasticidade bastante elevado (10^5 MPa) e uma massa volúmica de $2,322 \times 10^{-5}$ ton/mm³, definida a partir de um valor de energia cinética de 40 J para uma velocidade de solitação de 1,75 m/s.

Para criar as condições de ensaio, no módulo *Load*, em *Create Boundary Condition* definem-se as condições fronteira de cada um dos substratos. Assim, define-se como encastrado o aderente inferior, impedindo o seu movimento em todas as direções (*U1*, *U2* e *U3*, respetivamente, translação em x e y e rotação em torno de z), enquanto o aderente superior é condicionado apenas com apoio simples, bloqueando o seu movimento *U2*, translação em y , na fronteira entre o mesmo e a massa (Figura 53). Ainda no módulo *Load*, em *Predefined Field*, é aplicada uma velocidade de 1750 mm/s na direção 1 (*V1*) à massa (Figura 54). No caso do modelo de uma JSD aplicam-se as mesmas condições de encastramento no aderente inferior e de bloqueio no aderente

superior. No entanto, aplica-se ainda condição de simetria para obter as reações em ambos os aderentes das extremidades (Figura 55).

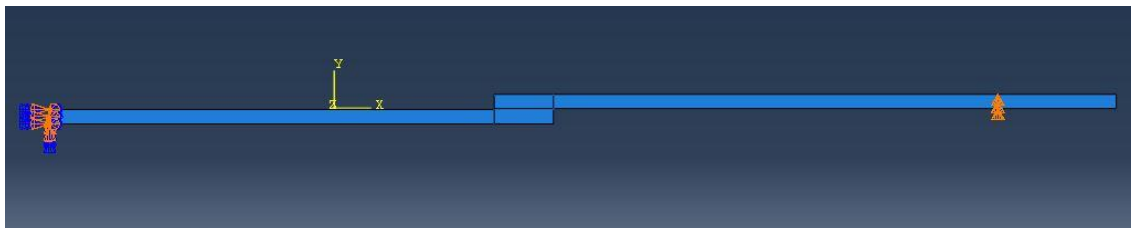


Figura 53 - Condições fronteira aplicadas no modelo de uma JSS

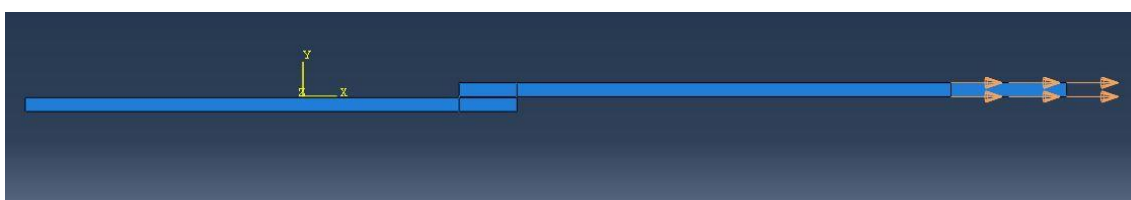


Figura 54 - Velocidade aplicada na massa da junta na direção 1 (V1)



Figura 55 - Condições de simetria aplicadas no modelo de uma JSD

Com o modelo preparado, no módulo *Mesh*, é criada a malha, onde são definidos o tipo de elementos, as suas dimensões e a sua densidade em cada zona da junta. A malha foi definida com elementos quadriláteros e de forma a intensificar o seu número em zonas fronteiriças, como mostra a Figura 56, isto é, nas zonas de interface e nas extremidades da zona de sobreposição, onde existe maior concentração de tensões, existe também maior concentração de elementos, contribuindo para uma análise mais cuidada e fidedigna.

Em relação à atribuição do tipo de elemento, este foi definido com um controlo do tipo *Sweep*, para, posteriormente, definir o adesivo, representado a vermelho na Figura 56, como elemento coesivo do tipo *COH2D4*. Já o aderente e a massa (restantes constituintes da junta), foram definidos com elementos estruturais do tipo *CPE4R*.

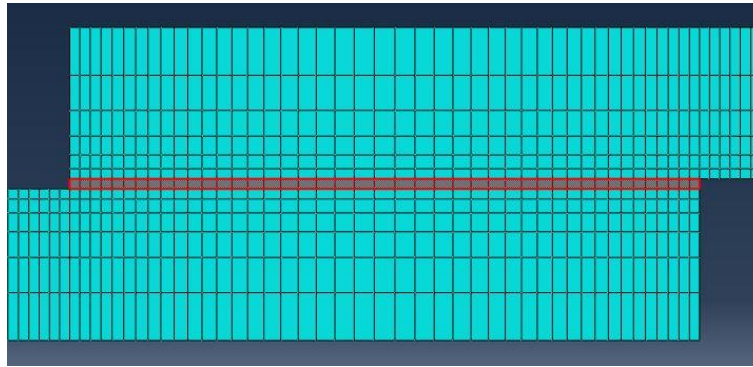


Figura 56 - Malha de elementos quadriláteros constituente de uma JSS

3.2.2 Modelos de dano coesivo

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 [51]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [48], linear parabólico [47], exponencial [49], polinomial [50] e trapezoidal [44]. 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 [95]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 57, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

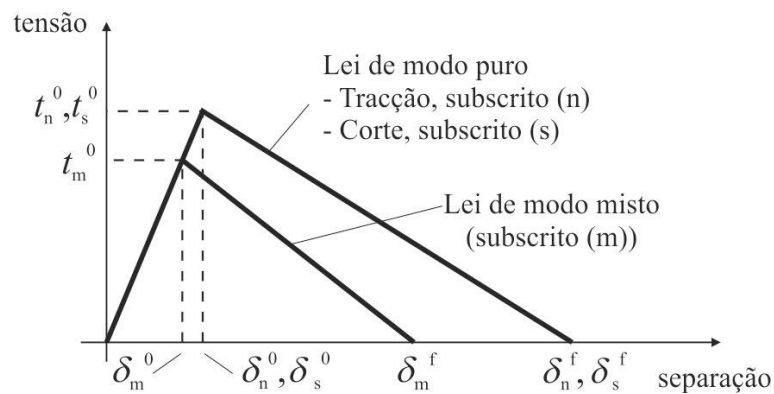


Figura 57 – Lei triangular do modelo de dano coesivo (adaptado de [96])

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 das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [54]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação e de uma deformação de corte que são determinados 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 K_{COH} , a qual relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (2)$$

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 [97]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (3)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [54]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1. \quad (4)$$

$\langle \rangle$ 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 [98]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 57), pela igualdade da equação 5, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 57) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (5)$$

3.2.3 Determinação das propriedades dos materiais

As propriedades dos materiais foram determinadas de acordo com o capítulo 3.1.2, tendo em conta as propriedades dinâmicas dos mesmos.

Relativamente ao aderente, o pré-impregnado da marca Seal®, Texipreg HS 160 RM, as propriedades determinadas no *software* são as mesmas que se encontram descritas na Tabela 4. A forma como foram determinadas encontra-se representada na Figura 58.

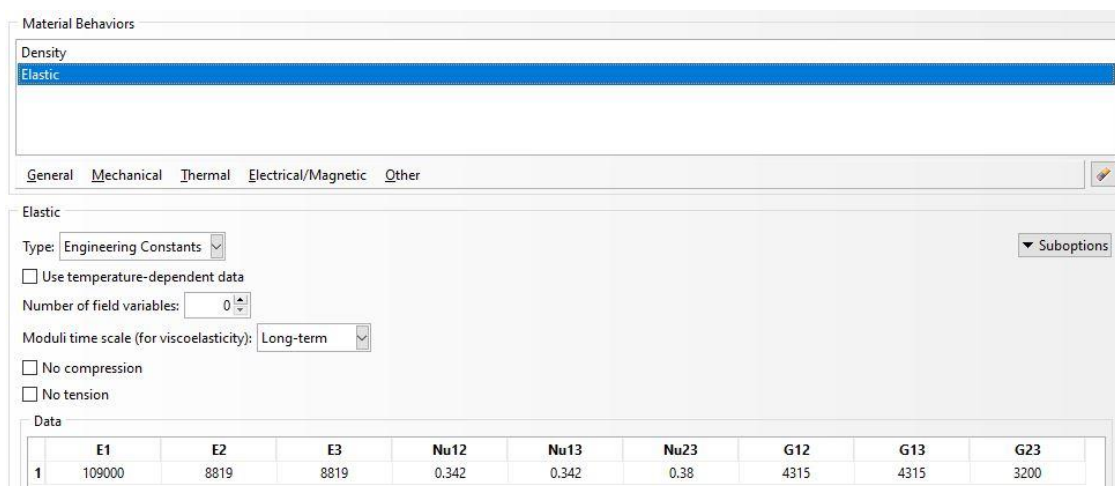


Figura 58 - Determinação das propriedades do aderente no *software* Abaqus®

Na determinação das propriedades do adesivo Araldite® AV138 foram consideradas as propriedades dinâmicas (Figura 59) e as propriedades elásticas do componente (Figura 60), representadas na Tabela 7 e Tabela 6, respetivamente.

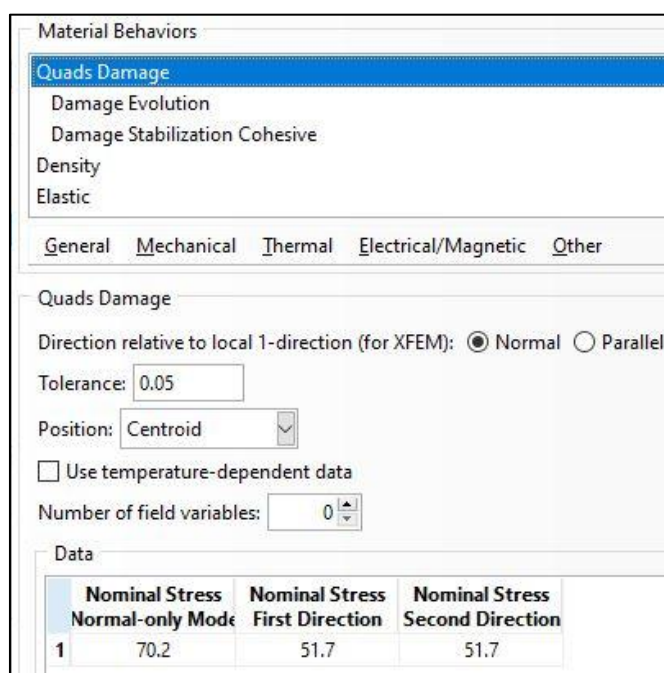


Figura 59 - Determinação das propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138 no *software* Abaqus®

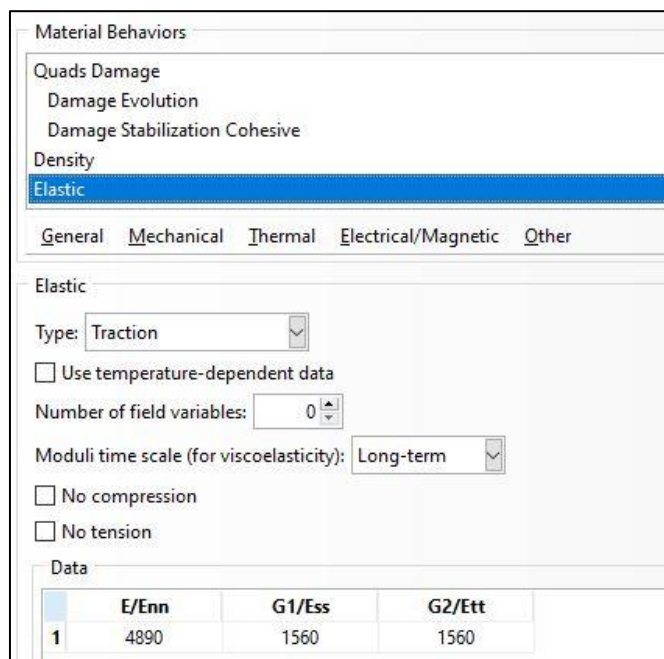


Figura 60 - Determinação das propriedades elásticas do adesivo Araldite® AV138 no *software* Abaqus®

No caso do adesivo Sikaforce® 7752, as suas propriedades em situações dinâmicas (Figura 61) foram determinadas com base nos ensaios experimentais, de forma a que os modelos numéricos se aproximassem dos resultados dos testes. Essas propriedades podem ser consultadas na Tabela 9. Em relação às propriedades elásticas (Figura 62), caracterizou-se o material com base nas propriedades representadas na Tabela 8.

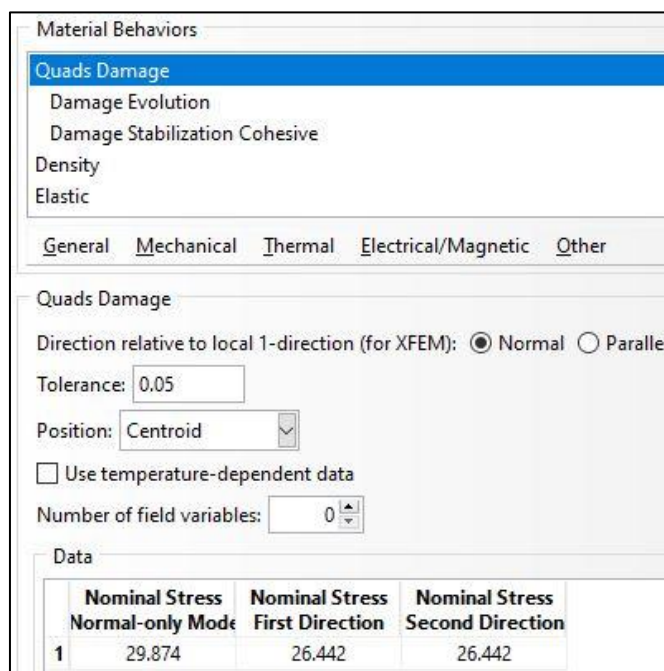


Figura 61 - Determinação das propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752 no *software* Abaqus®

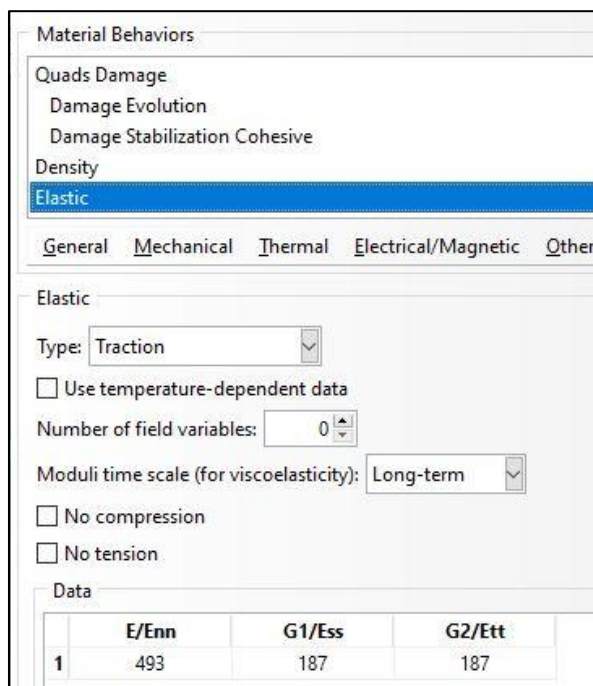


Figura 62 - Determinação das propriedades elásticas do adesivo Sikaforce® 7752 no software Abaqus®

3.2.4 Estudo do efeito do comprimento de sobreposição

Para estudar o efeito do L_0 nas juntas, foram simuladas JSS e JSD variando essa dimensão entre os valores de 12,5, 25 e 50 mm para cada um dos adesivos considerados.

A determinação das tensões que permitem avaliar este comportamento requer um prévio refinamento da malha dos modelos, relativamente aos modelos utilizados para a definição da curva $P-\delta$, de forma a que os gráficos possuam valores mais precisos. Como é possível verificar na Figura 63, a densidade de elementos intensifica na zona do adesivo, representada a vermelho.

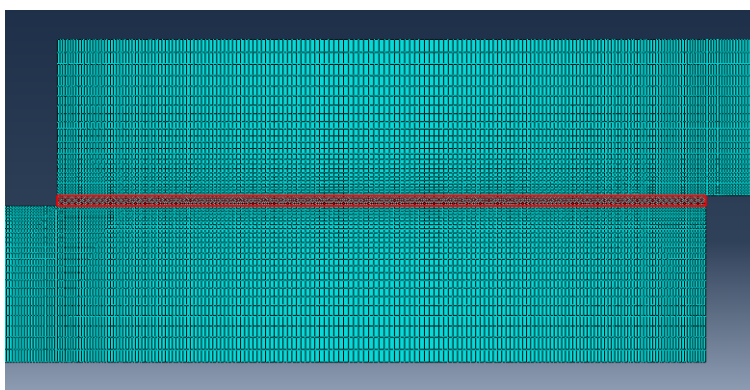


Figura 63 - Malha refinada do modelo de uma JSS

3.2.4.1 Distribuição de tensões

A distribuição de tensões apresentada ao longo da dissertação relaciona o quociente entre o valor de tensão efetiva, tanto de corte (τ_{xy}) como de arrancamento (σ_y), e o valor médio da tensão de corte (τ_{med}) e o quociente entre a coordenada x , representada na Figura 64, e o L_0 da junta em estudo. Desta forma, é possível obter uma curva com valores adimensionais e ter melhor percepção da distribuição e evolução de tensões ao longo de todo o L_0 .

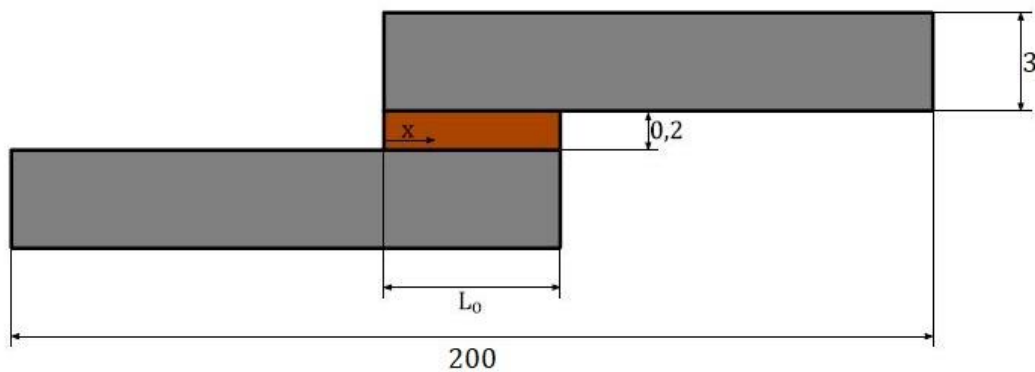


Figura 64 - Esboço da geometria e dimensões dos modelos de simulação de JSS e JSD (adaptado de [99])

Começando por analisar a distribuição de tensões em JSS em função de L_0 , variando este último parâmetro entre 12,5, 25 e 50 mm, com o adesivo Araldite® AV138, é possível observar a distribuição de τ_{xy} ao longo de L_0 , representada na Figura 65.

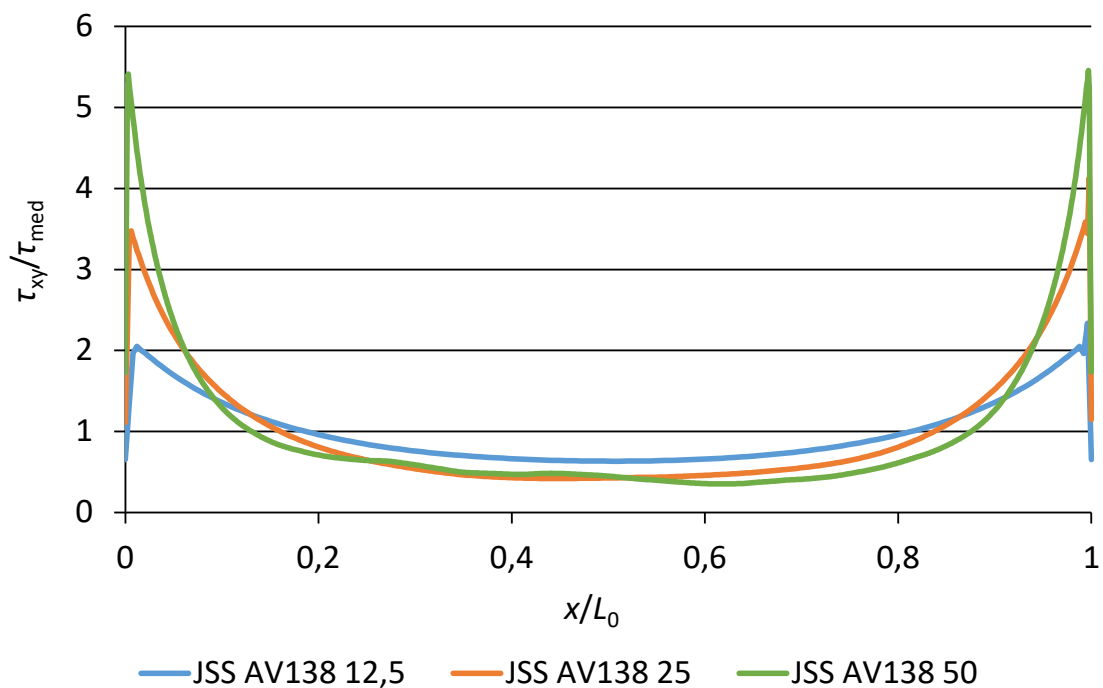


Figura 65 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSS

Verifica-se que os valores máximos de concentração de tensões ocorrem nas extremidades de L_0 e que o valor de τ_{xy} aumenta com o aumento de L_0 , uma vez que é a junta com $L_0=50$ mm que apresenta os valores mais elevados, contrariamente à junta com $L_0=12,5$ mm, que possui concentrações de nível inferior. Porém, importa salientar a simetria verificada neste tipo de junta, relativamente ao centro da junta, onde os picos de tensão nas extremidades estão nivelados, resultado da igualdade na espessura e na geometria dos substratos em ambos os lados.

À semelhança do que acontece com a concentração de tensões, também se verifica o aumento do gradiente de tensões com o aumento da variável L_0 . Isto é, na JSS com $L_0=50$ mm, embora esta seja a que possui o menor valor de τ_{xy} , é, simultaneamente, a junta que apresenta maior concentração de tensões nas extremidades. Já na junta com $L_0=12,5$ mm, o valor de τ_{xy} ao longo de L_0 é mais uniforme, pelo que possui uma flutuação menos acentuada.

Verifica-se, ainda, que o valor de τ_{xy} nunca é nulo ao longo da sobreposição, revelando que toda essa área possui esforços de corte, sendo que nas extremidades este valor é mais significativo.

Relativamente à distribuição de σ_y , representada na Figura 66, verifica-se que se comporta, aproximadamente, da mesma forma do que τ_{xy} .

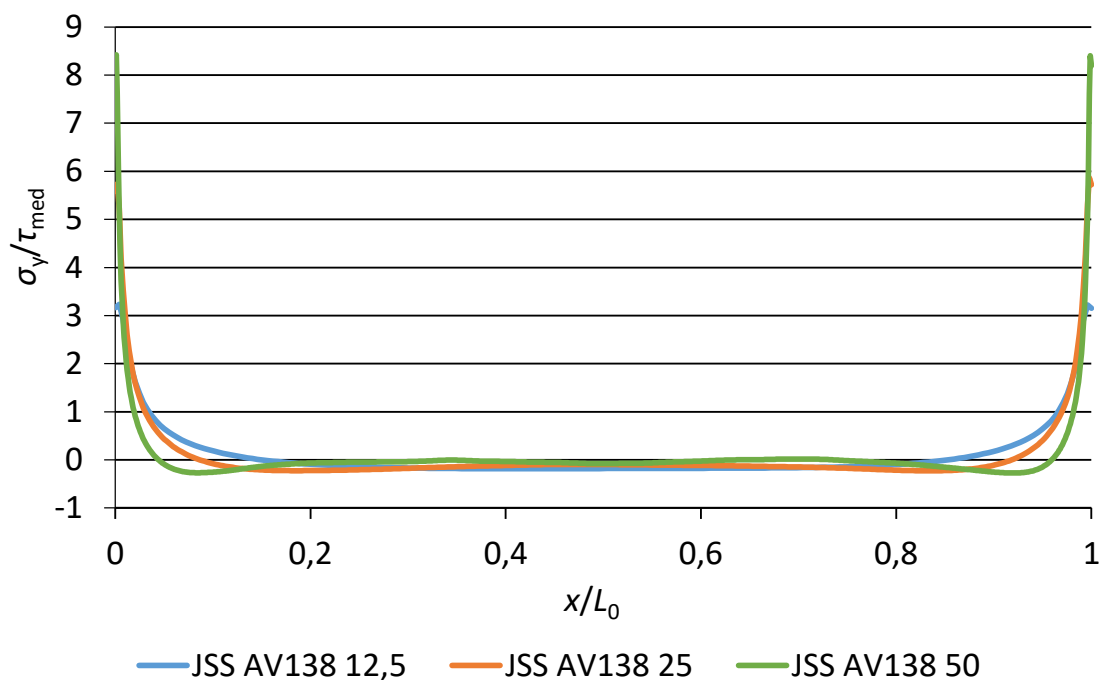


Figura 66 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSS

É notório que os picos de tensão se dão nas extremidades da sobreposição de forma simétrica e que a concentração de tensões nessa zona amplia com o aumento de L_0 ,

sendo, mais uma vez, a junta com $L_0=50$ mm que apresenta o pior desempenho, em oposição à junta com $L_0=12,5$ mm, que, por sua vez, apresenta valores inferiores de σ_y .

Contrariamente ao que acontece em relação a τ_{xy} , este tipo de tensões (σ_y) só é significativo nas extremidades, ao longo de L_0 apresenta valores praticamente nulos, pelo que podem ser desprezados. Embora o comportamento das juntas ao longo de L_0 seja semelhante, nas extremidades, como o valor de σ_y aumenta com o aumento de L_0 , pode-se afirmar que o gradiente de tensões sofre o mesmo efeito.

Relativamente às juntas fabricadas com o adesivo Sikaforce® 7752, encontra-se representada, na Figura 67 e Figura 68, a distribuição de τ_{xy} e σ_y , respetivamente, em função de L_0 .

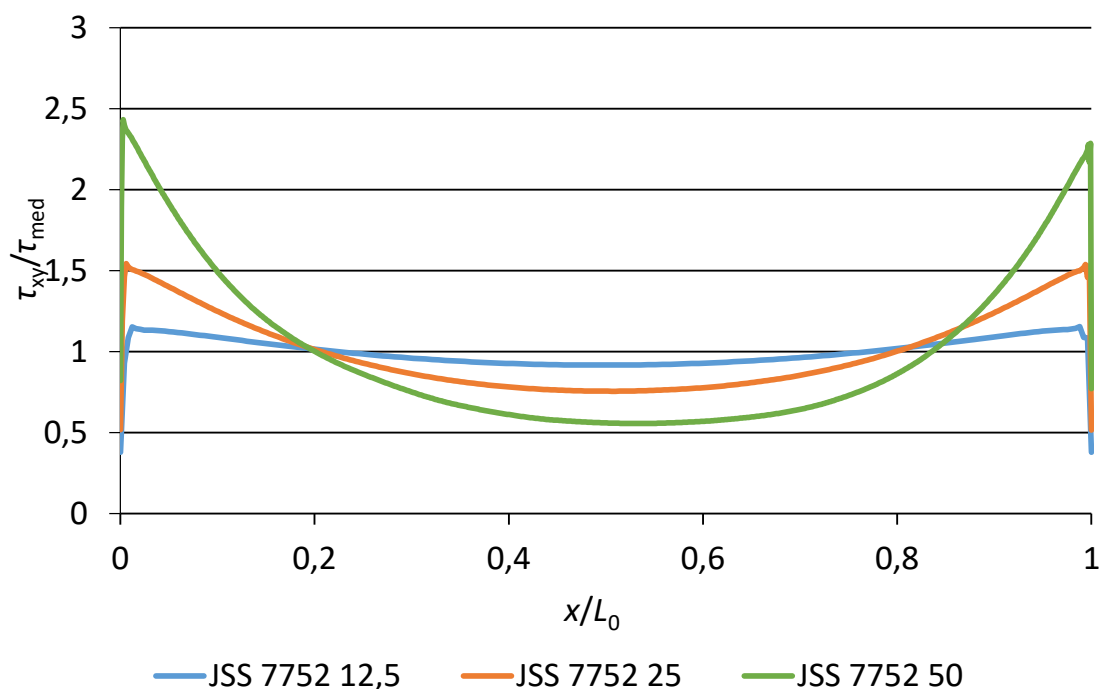


Figura 67 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSS

Na Figura 67 evidencia-se, novamente, que o pico de tensão se encontra nas extremidades da sobreposição. A junta com $L_0=12,5$ mm é a que apresenta menores valores de τ_{xy} , em oposição à junta com $L_0=50$ mm, pelo que se pode afirmar que o aumento da concentração de tensões se dá com o aumento de L_0 . O mesmo acontece com a variação de tensões, uma vez que a junta com $L_0=50$ mm, que apresenta o menor valor de τ_{xy} na zona central de sobreposição, possui o maior pico de tensões nas extremidades. Já nas juntas com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm, o gradiente não é tão acentuado, ainda que na primeira esse aspeto se revele ainda mais uniforme.

Tal como nas juntas com o adesivo AV138, verifica-se que toda a zona de sobreposição se encontra ao corte, uma vez que o valor de τ_{xy} , ainda que reduzido, nunca é nulo, aumentando a sua concentração nas extremidades, como referido anteriormente.

A distribuição de σ_y , representada na Figura 68, segue o mesmo comportamento verificado em cada um dos precedentes casos. O aumento de L_0 contribui para o aumento da concentração e do gradiente de tensões nas JSS.

Em ambos os casos de distribuição de tensão em JSS com o adesivo 7752, verificou-se, aproximadamente, simetria em relação à posição central de sobreposição, pelo que o efeito da situação dinâmica de impacto não se revelou significativo, devido à igualdade de espessura e geometria dos substratos em ambos lados da junta.

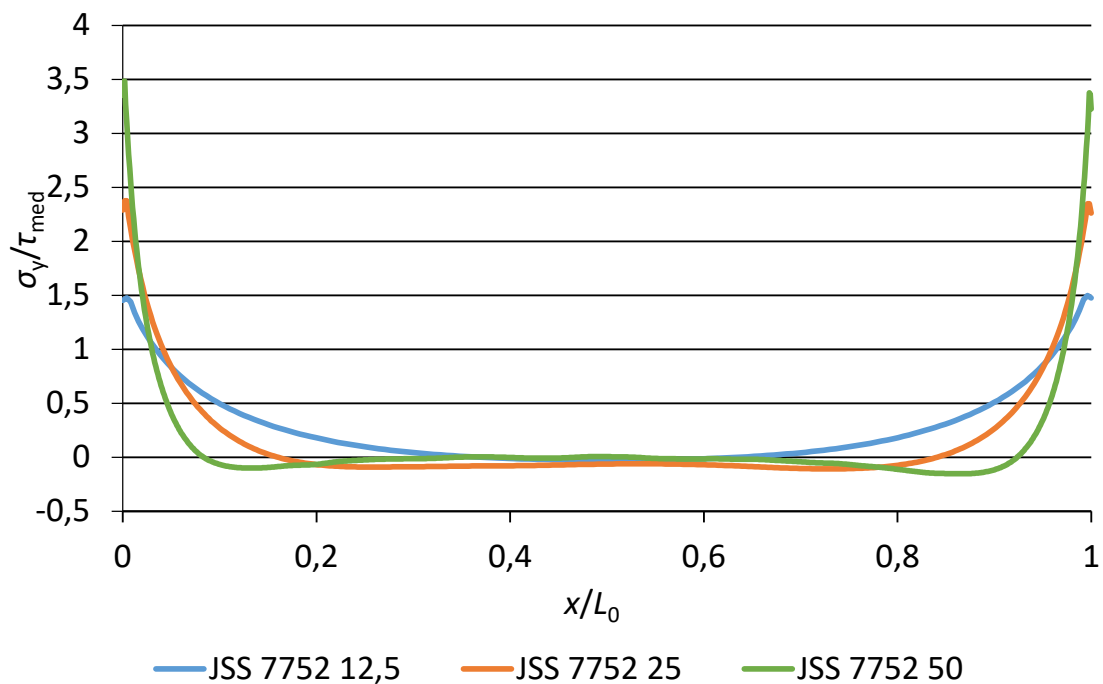


Figura 68 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSS

De seguida, analisando da mesma forma a distribuição tensões em JSD, é possível observar na Figura 69 a distribuição de τ_{xy} ao longo de L_0 com o adesivo Araldite® AV138. Verifica-se semelhança entre as três curvas, com um pico de tensões assimétrico nas extremidades da zona de sobreposição, no entanto, é visível que com o aumento do L_0 , a concentração de tensões nessa zona também aumenta, pelo que se pode referir que a JSD com $L_0=50$ mm, onde se destaca o maior pico numa das extremidades, apresenta um desempenho inferior quando comparada com as restantes. Da mesma forma, é possível afirmar que a JSD que apresenta melhores resultados é a de menor L_0 (12,5 mm). Salienta-se, também, que o gradiente da concentração de tensões aumenta com o aumento de L_0 , uma vez que nas juntas com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm os valores são mais uniformes e os picos de tensão nas extremidades mais nivelados, enquanto na junta com $L_0=50$ mm, embora se registre o valor mínimo de tensão ao longo de L_0 , registam-se os picos mais elevados nas extremidades. Em suma, o valor de τ_{xy}/τ_{med} nunca é nulo ao longo de todo o L_0 , o que

permite afirmar que toda a zona de adesivo está ao corte, ainda que não se registem concentrações de tensão significativas.

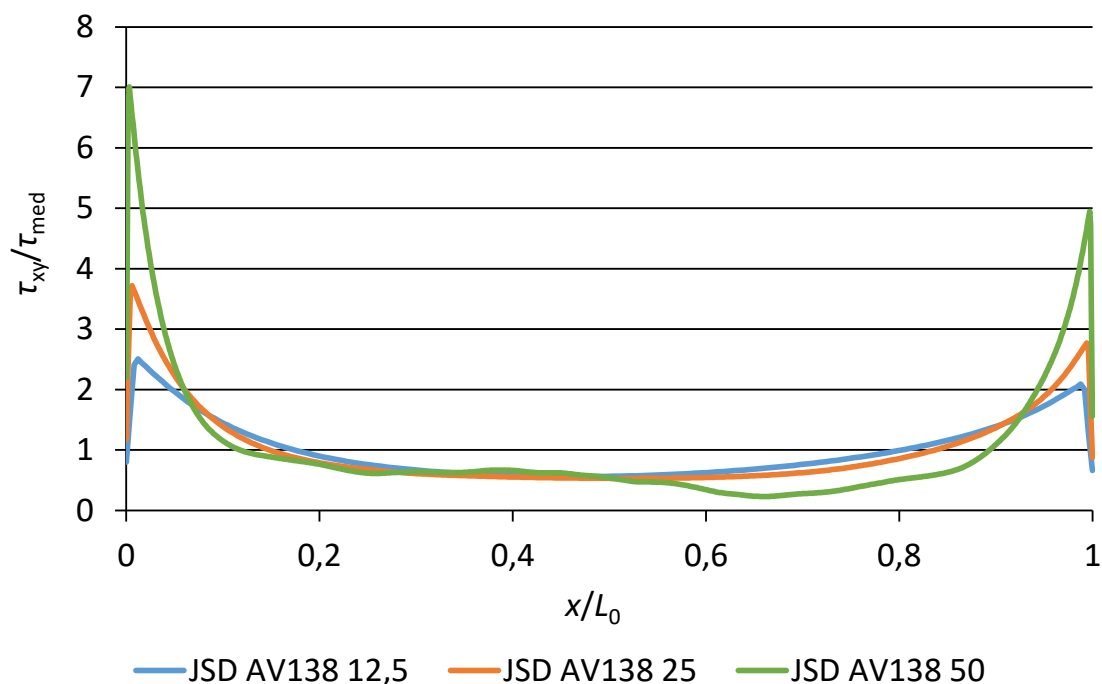


Figura 69 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD

A assimetria dos picos de tensão nas extremidades do L_0 deve-se à propagação de ondas de tensão resultantes da solicitação dinâmica de impacto, contrariamente àquilo que se verifica em ensaios quási-estáticos, onde os picos de tensão, ainda que ocorram nas extremidades, possuem valores nivelados [100, 101].

A Figura 70, por sua vez, representa a distribuição de σ_y ao longo de todo o L_0 numa JSD com o adesivo AV138, onde se verifica, à semelhança da distribuição de τ_{xy} , picos de tensões nas extremidades do adesivo. No entanto, para além do posicionamento da concentração de tensões ser no mesmo local, ao longo de L_0 não se verificam valores significativos de tensão, sendo os mesmos desprezáveis, pelo que se retira que as tensões de arrancamento se verificam, maioritariamente, nas extremidades da junta.

É possível afirmar, uma vez mais, que a junta com $L_0=50$ mm é a que regista pior desempenho. Por oposição, a JSD com $L_0=12,5$ mm é a que apresenta melhor comportamento a esse nível. Por conseguinte, a concentração de σ_y , bem como o seu gradiente, aumentam com o aumento de L_0 .

É notória, ainda, uma ligeira simetria na distribuição de tensões em relação ao centro da junta, à exceção dos valores registados nas extremidades.

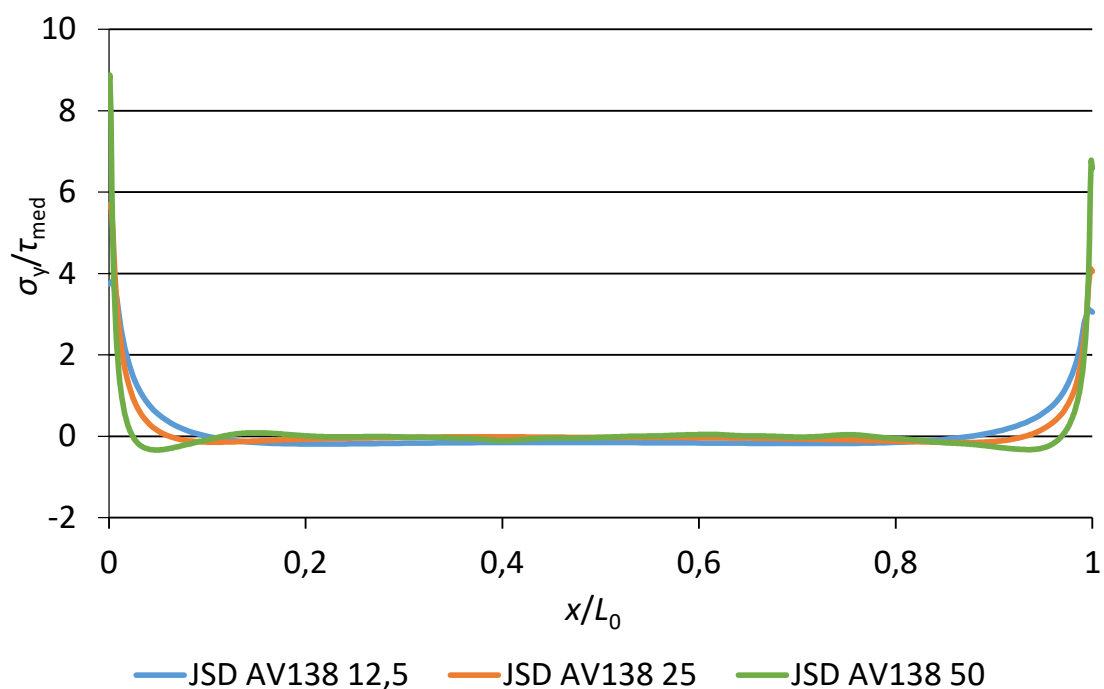


Figura 70 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0 em JSD

Avaliando igualmente a JSD com o adesivo Sikaforce® 7752, a Figura 71 e Figura 72 ilustram as distribuições de τ_{xy} e σ_y , respectivamente, em função de L_0 .

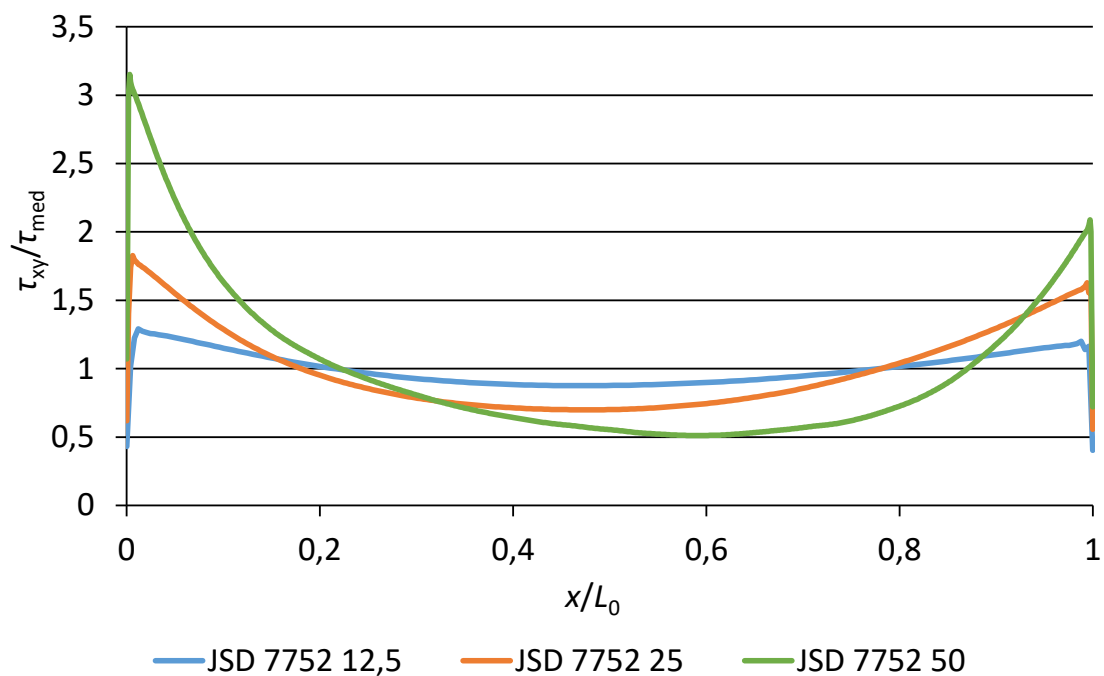


Figura 71 - Distribuição de tensões de corte τ_{xy} com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD

Pode-se verificar que, na distribuição de τ_{xy} , os picos de concentração de tensões se dão nas extremidades de L_0 .

Na JSD com $L_0=50$ mm é onde se regista o pior desempenho, ao contrário da junta com $L_0=12,5$ mm, verificando-se nesta última a distribuição de tensões mais uniforme e de menor valor máximo. Assim, é possível afirmar que, como no caso anterior com o adesivo AV138, a concentração de tensões aumenta com o aumento de L_0 .

Importa destacar, também, o aumento do gradiente de tensões com o aumento de L_0 . Na JSD com $L_0=12,5$ mm os valores de concentração de tensões são relativamente uniformes ao longo de toda a sobreposição, embora se verifiquem picos de tensão nas extremidades. No entanto, verifica-se que as juntas de L_0 superior, embora registem valores de tensão inferiores ao longo do comprimento, apresentam picos mais elevados, revelando, então, o aumento do gradiente de concentração de tensões.

Na Figura 72 repete-se o mesmo comportamento verificado nas juntas com o adesivo AV138. A concentração de tensões, bem como o gradiente das mesmas, aumentam com o aumento de L_0 . A JSD com $L_0=50$ mm é a que apresenta picos de tensão mais elevados, contrariamente ao evidenciado nas juntas com $L_0=12,5$ mm. Os picos de tensão, uma vez mais, situam-se nas extremidades de L_0 .

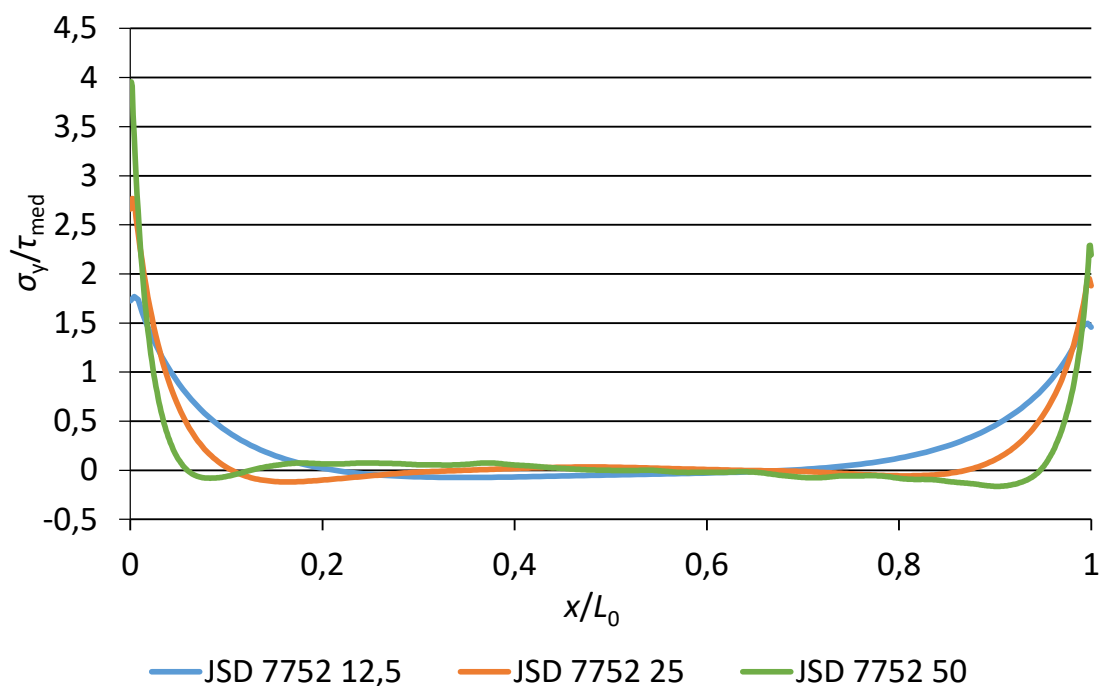


Figura 72 - Distribuição de tensões de arrancamento σ_y com o adesivo 7752 em função de L_0 em JSD

Comparando o comportamento das JSS com as JSD destaca-se, sobretudo, a assimetria em relação ao centro da junta. Nas JSD a concentração de tensões é superior numa das extremidades. A assimetria deve-se ao efeito dinâmico da situação de impacto, apesar de que nas JSS a propagação das ondas de tensão resultantes desse efeito não

influencia de forma significativa a concentração de tensões na junta, devido ao equilíbrio consequente da igualdade geométrica dos substratos. Já na JSD, como os substratos são geométrica e numericamente desiguais, a influência dinâmica faz-se sentir de forma significativa.

No entanto, essa discrepância não influencia significativamente o valor máximo da concentração de tensões, como se poderá observar, posteriormente, na Tabela 12.

Apesar da semelhança no comportamento das juntas com ambos os adesivos, comparando os gráficos, é possível destacar uma diferença nos valores registados das concentrações de tensões.

Verifica-se que, nas juntas com o adesivo AV138, a distribuição de tensões apresenta valores superiores de concentração. Isto acontece devido à ductilidade dos adesivos. Sendo o adesivo Araldite® AV138 mais rígido do que o Sikaforce® 7752, que é um adesivo flexível, a concentração de tensões de uma junta fabricada com o primeiro adesivo será sempre superior, nas mesmas circunstâncias, uma vez que o comportamento dúctil de um material é um fator determinante nesse aspeto. Ao mesmo tempo, nas JSD fabricadas com o 7752, por este adesivo possuir mais flexibilidade, verifica-se maior uniformidade na distribuição de tensões.

Na Tabela 12 é possível visualizar de forma geral os valores de tensão máximos para cada um dos casos, de forma a perspetivar com maior facilidade o efeito de L_0 na resistência das juntas.

Tabela 12 - Valores máximos de concentração de tensões

| Geometria da junta | Adesivo | L_0 (mm) | τ_{xy}/τ_{med} | σ_y/τ_{med} |
|--------------------|-----------------|------------|------------------------|-----------------------|
| JSS | Araldite® AV138 | 12,5 | 2,34 | 3,23 |
| | | 25 | 4,13 | 5,86 |
| | | 50 | 5,46 | 8,42 |
| | Sikaforce® 7752 | 12,5 | 1,15 | 1,50 |
| | | 25 | 1,54 | 2,38 |
| | | 50 | 2,43 | 3,48 |
| JSD | Araldite® AV138 | 12,5 | 2,51 | 3,82 |
| | | 25 | 3,71 | 5,72 |
| | | 50 | 7,00 | 8,88 |
| | Sikaforce® 7752 | 12,5 | 1,29 | 1,77 |
| | | 25 | 1,83 | 2,77 |
| | | 50 | 3,15 | 3,96 |

Analisando os valores da Tabela 12, com base na observação das figuras representantes da distribuição de tensões, pode-se afirmar que o aumento do L_0

influencia negativamente o desempenho das juntas adesivas, uma vez que provoca o aumento da concentração de τ_{xy} e σ_y , nas extremidades de sobreposição.

3.2.4.2 Previsão da resistência

Na Figura 73 encontram-se as curvas $P-\delta$ de JSS com o adesivo Araldite® AV138 em função dos vários L_0 .

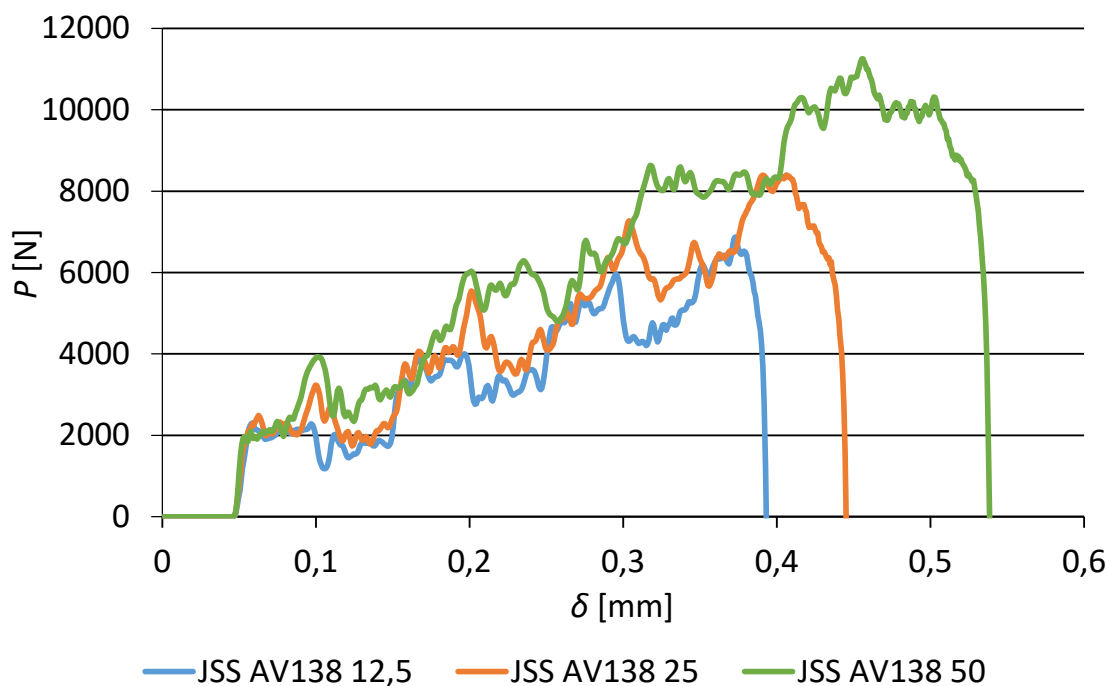


Figura 73 - Curvas $P-\delta$ de JSS com o adesivo AV138 em função de L_0

Verifica-se que tanto a carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) como o deslocamento de rotura (δ_{rot}) aumentam com o aumento de L_0 , o que significa que a resistência da junta é tanto maior, quanto maior for a dimensão de L_0 , como seria expectável, uma vez que o aumento de L_0 resulta num aumento da área de adesivo, contribuindo para um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e de δ_{rot} .

Na Figura 74 encontram-se representados com maior destaque os valores de $P_{m\acute{a}x}$ associados aos vários L_0 nas JSS. Como referido na análise da Figura 73, o aumento de L_0 reflete-se num aumento dos valores de $P_{m\acute{a}x}$.

Contudo, importa salientar a forma como se dá esse aumento. Pela análise da Figura 74, é possível observar um aumento praticamente linear, sendo que o declive entre os pontos de $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm é muito aproximado do declive da segunda metade do gráfico, entre os pontos de $L_0=25$ e $L_0=50$ mm.

O valor de $R^2=0,9997$ indica que os pontos do gráfico estão muito próximos da reta de regressão considerada para o modelo em questão, revelando que o comportamento se enquadra numa função linear.

No entanto, o aumento não é proporcional, uma vez que prolongando a reta, a mesma não posso no ponto de coordenadas (0,0).

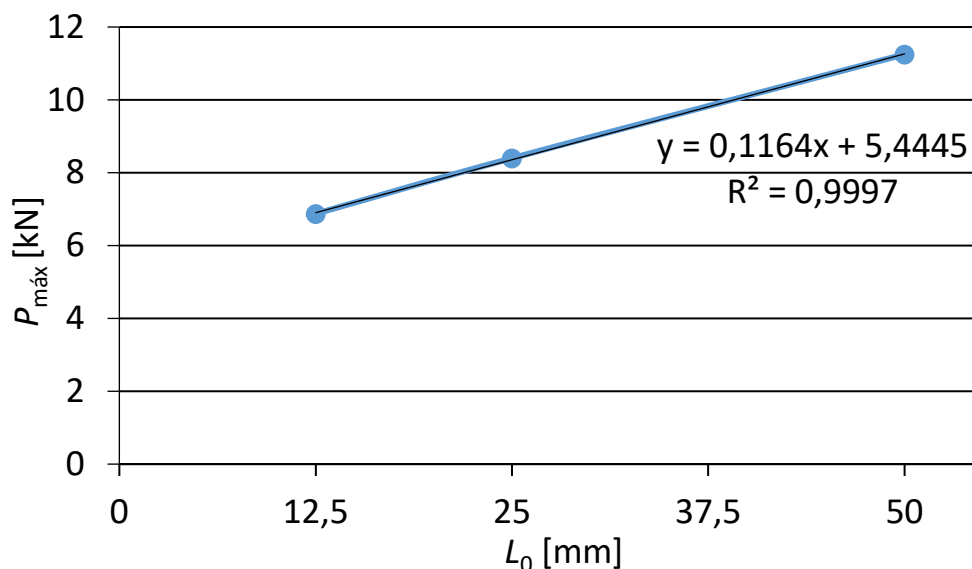


Figura 74 - Valores de $P_{máx}$ de JSS com o adesivo AV138 em função de L_0

A eficácia do aumento de L_0 na resistência da junta pode ser analisada com mais detalhe na Tabela 13, comparando os valores de $P_{máx}$ e a variação percentual deste valor em relação à junta de $L_0=12,5$ mm.

Tabela 13 - Influência de L_0 na $P_{máx}$ em JSS com o adesivo AV138

| L_0 [mm] | $P_{máx}$ [kN] | Varição [%] |
|------------|----------------|-------------|
| 12,5 | 6,87 | - |
| 25 | 8,40 | 22,3 |
| 50 | 11,25 | 63,8 |

Analisando a curva $P-\delta$ de uma JSS com o adesivo Sikaforce® 7752 em função de L_0 (Figura 75), verifica-se que o aumento de L_0 resulta num aumento da resistência da junta, justificada pelo aumento de $P_{máx}$ e δ_{rot} , como seria expectável, pelo mesmo motivo referido na JSS com o adesivo AV138.

No entanto, esse crescimento não se dá de forma completamente linear, como se pode visualizar com mais pormenor na Figura 76.

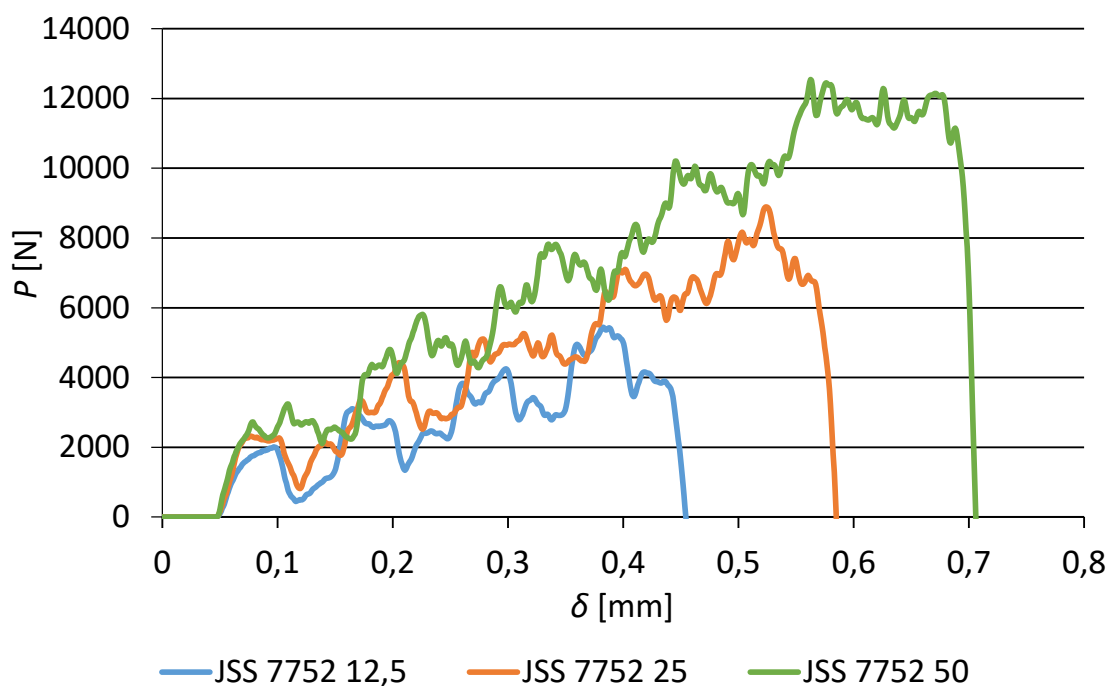


Figura 75 - Curvas P - δ de JSS com o adesivo 7752 em função de L_0

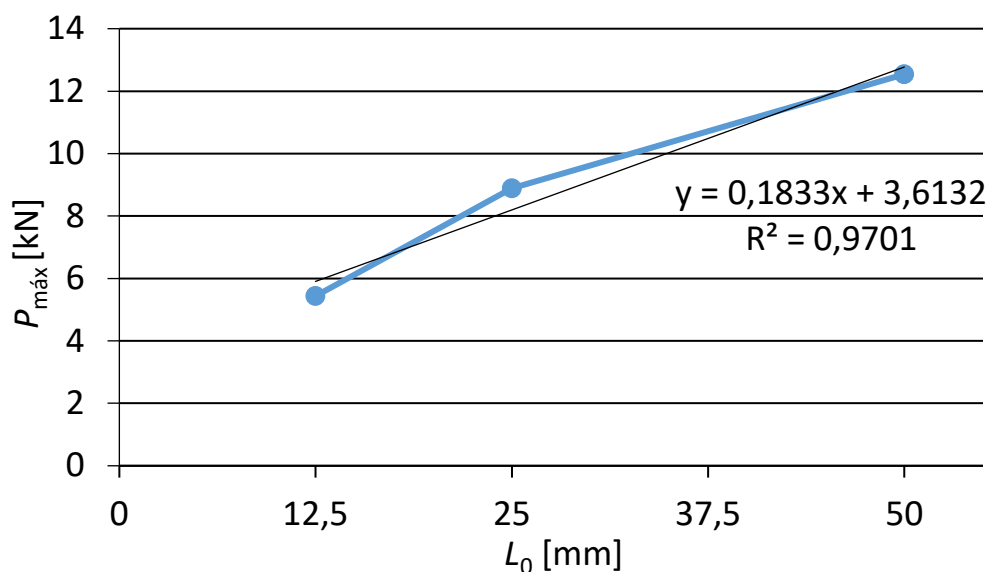


Figura 76 - Valores de $P_{\text{máx}}$ de JSS com o adesivo 7752 em função de L_0

Verifica-se que o declive da reta que une os pontos de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm é mais acentuado do que o declive da reta que une os pontos de $P_{\text{máx}}$ correspondentes às JSS com $L_0=25$ e $L_0=50$ mm. Embora o modelo numérico esteja bastante próximo da reta de regressão linear, o ponto correspondente à JSS com $L_0=25$ mm situa-se um pouco afastado.

A razão pela qual o aumento de $P_{\text{máx}}$ diminui para dimensões de L_0 superiores é a concentração de tensões. O pior desempenho verificado nas juntas com maior L_0 faz com que o aumento de resistência não seja tão acentuado.

A eficácia do aumento de L_0 na resistência da junta pode ser analisada com mais detalhe na Tabela 14, comparando os valores de $P_{\text{máx}}$ e a variação percentual deste valor em relação à junta de $L_0=12,5$ mm.

Tabela 14 - Influência de L_0 na $P_{\text{máx}}$ em JSD com o adesivo 7752

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [kN] | Varição [%] |
|------------|-----------------------|-------------|
| 12,5 | 5,44 | - |
| 25 | 8,89 | 63,4 |
| 50 | 12,55 | 130,7 |

Relativamente à JSD, é esperado que a resistência da junta seja bastante superior, uma vez que a área de adesivo é o dobro, contribuindo para um aumento significativo de $P_{\text{máx}}$ e δ_{rot} .

Na Figura 77 encontram-se as curvas P - δ correspondentes às JSD com o adesivo 7752 em função de L_0 .

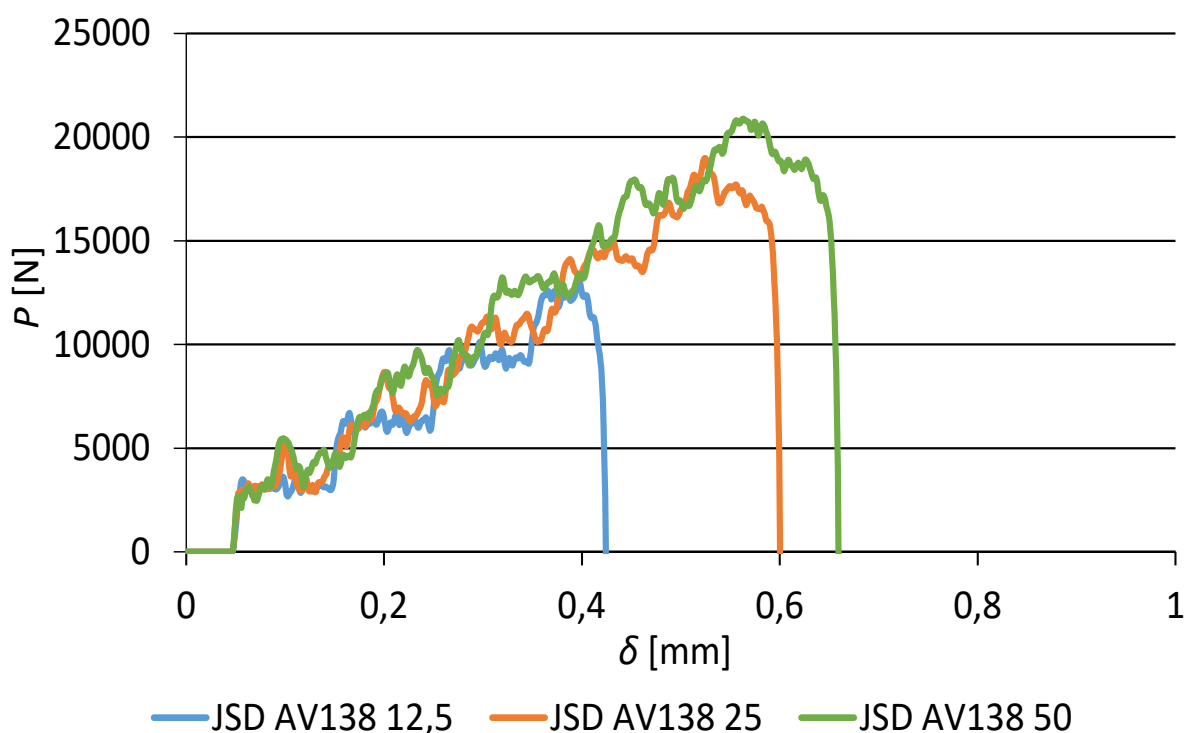


Figura 77 - Curvas P - δ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0

Verifica-se, como esperado, um aumento significativo de resistência relativamente à JSS. Mais uma vez, o aumento de L_0 implica um aumento de $P_{\text{máx}}$ e de δ_{rot} , contribuindo para um aumento de resistência da junta.

Na Figura 78 pode-se visualizar a forma como se dá o aumento do valor de $P_{\text{máx}}$ à medida que o L_0 aumenta.

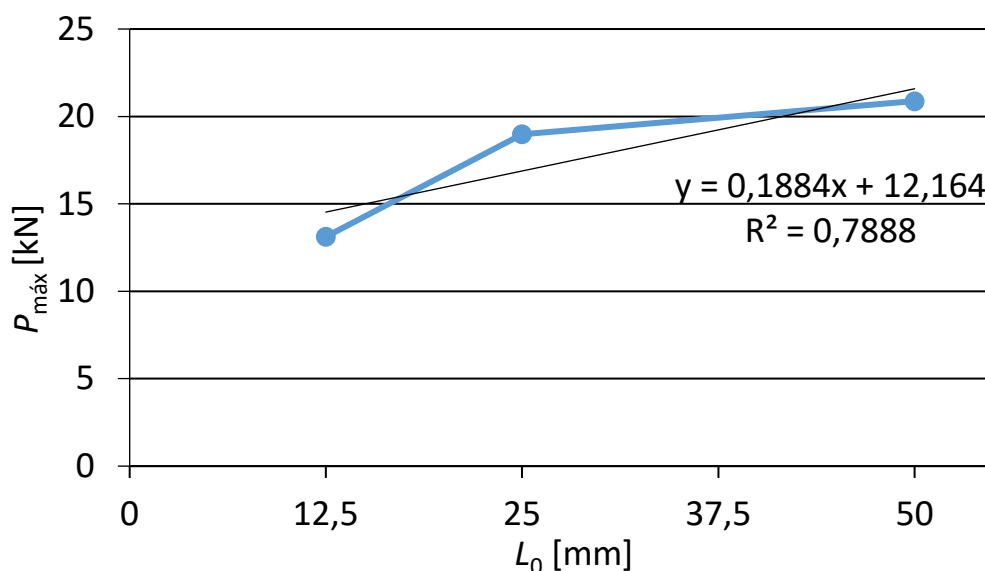


Figura 78 - Valores de $P_{\text{máx}}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0

Pode afirmar-se que o crescimento não se dá de forma linear, como se tinha verificado no caso da JSS com o mesmo adesivo. A redução do declive da reta que une os pontos correspondentes aos vários L_0 consecutivos é justificado pelo aumento da concentração de tensões neste tipo de junta. Como o desempenho das JSD diminui com o aumento de L_0 , o aumento de resistência é cada vez inferior, até que se atinja um patamar ou valor máximo.

Pode-se visualizar o efeito do aumento de L_0 , bem como a sua eficácia, através da leitura dos dados da Tabela 15, que compara os valores de $P_{\text{máx}}$ e a sua variação percentual em relação aos valores correspondentes à JSD com $L_0=12,5$ mm.

Tabela 15 - Influência de L_0 na $P_{\text{máx}}$ em JSD com o adesivo AV138

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [kN] | Varição [%] |
|------------|-----------------------|-------------|
| 12,5 | 13,11 | - |
| 25 | 18,98 | 44,8 |
| 50 | 20,88 | 59,3 |

As curvas P - δ correspondentes às JSD com o adesivo 7752, em função dos vários L_0 considerados, encontram-se representadas na Figura 79.

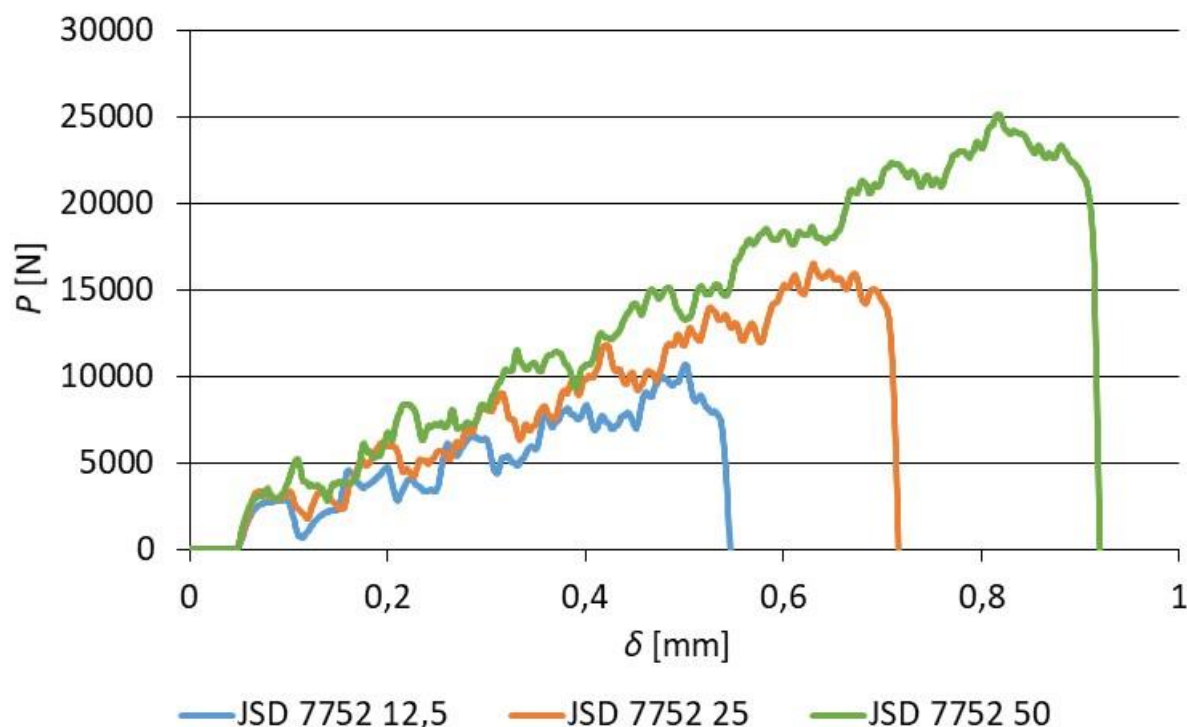


Figura 79 - Curvas P - δ de JSD com o adesivo 7752 em função de L_0

Verifica-se, novamente, um aumento considerável do valor de $P_{\text{máx}}$ quando comparado com as JSS com o mesmo adesivo. O aumento de L_0 traduz-se num aumento da resistência das juntas, aumentando a $P_{\text{máx}}$ e o δ_{rot} .

A Figura 80 mostra de que forma evolui a $P_{\text{máx}}$ em função do aumento de L_0 .

Embora o modelo numérico se aproxime bastante da reta de regressão linear, é perceptível uma diferença no declive das retas que unem os pontos correspondentes às juntas com $L_0=12,5$ e $L_0=25$ mm e as juntas com $L_0=25$ e $L_0=50$ mm. Tal circunstância é justificada, uma vez mais, pelo aumento da concentração de tensões em juntas com L_0 superior. No entanto, neste caso, esse efeito não é considerável.

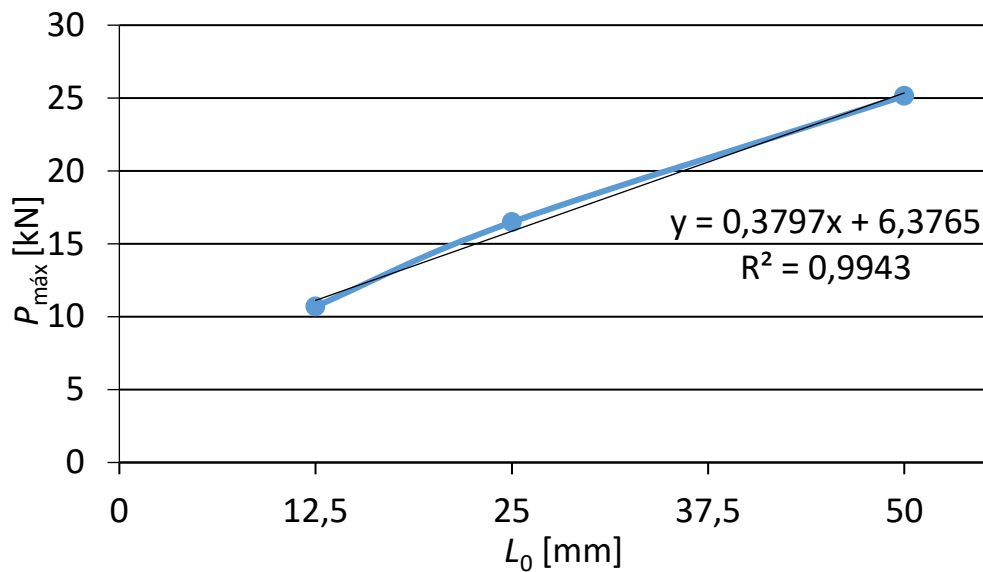


Figura 80 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ de JSD com o adesivo AV138 em função de L_0

A Tabela 16 permite avaliar a eficácia do aumento de L_0 em JSD com o adesivo 7752, comparando os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e a sua variação percentual em relação à junta com $L_0=12,5$ mm.

Tabela 16 - Influência de L_0 na $P_{m\acute{a}x}$ em JSD com o adesivo 7752

| L_0 [mm] | $P_{m\acute{a}x}$ [kN] | Variação [%] |
|------------|------------------------|--------------|
| 12,5 | 10,71 | - |
| 25 | 16,49 | 54,0 |
| 50 | 25,15 | 134,8 |

Comparando os 4 casos, é possível concluir que no adesivo mais dúctil, o Sikaforce® 7752, o efeito do aumento de L_0 na resistência das juntas é mais significativo. Facilmente se verifica que, nas juntas com este adesivo, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ correspondentes a $L_0=50$ mm superam em mais de 100% a $P_{m\acute{a}x}$ correspondente à junta com $L_0=12,5$ mm. Já nas juntas com o adesivo Araldite® AV138, classificado como um adesivo rígido, essa variação não ultrapassa os 65%.

Fazendo a analogia com o que foi verificado no capítulo 3.2.4.1, como a concentração de tensões é superior nas juntas fabricadas com o adesivo AV138, que é um adesivo frágil, faz sentido que o efeito do aumento de L_0 tenha menos impacto no aumento da resistência das juntas. Com o adesivo 7752, sendo um adesivo mais flexível, a distribuição de tensões na área de sobreposição é mais uniforme, pelo que o aumento do L_0 não sofre tanto com o aumento de concentração de tensões na junta, conferindo

mais resistência à mesma. Para além disso, como é um adesivo de comportamento dúctil, é capaz de absorver os picos de tensão com maior facilidade, pelo que o desempenho de uma junta com esse tipo de adesivo será sempre superior, contribuindo para um maior aumento de resistência da junta.

Comparando a geometria das juntas, verifica-se que, para o adesivo AV138, a variação percentual entre as JSD e as JSS é de 90,8%, 126,0% e 85,6% para as juntas com $L_0=12,5$, $L_0=25$ e $L_0=50$ mm, respetivamente.

Relativamente às juntas com o adesivo 7752, a variação percentual entre as JSD e as JSS é de 96,9%, 85,5% e 100,4% para as juntas com $L_0=12,5$, $L_0=25$ e $L_0=50$ mm, respetivamente.

3.2.4.3 Comparação dos ensaios experimentais com o modelo numérico

Neste capítulo será efetuada a comparação entre os ensaios experimentais e o modelo numérico à luz da análise de tensões e de dano. A partir do ensaio experimental foi possível determinar as propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752. Por outro lado, uma vez que já eram conhecidas as propriedades dinâmicas do adesivo Araldite® AV138, validaram-se os resultados obtidos através do modelo numérico.

As curvas $P-\delta$ correspondentes às JSS fabricadas com o adesivo AV138 para os vários L_0 e ao modelo numérico podem ser consultadas na Figura 81, Figura 82 e Figura 83.

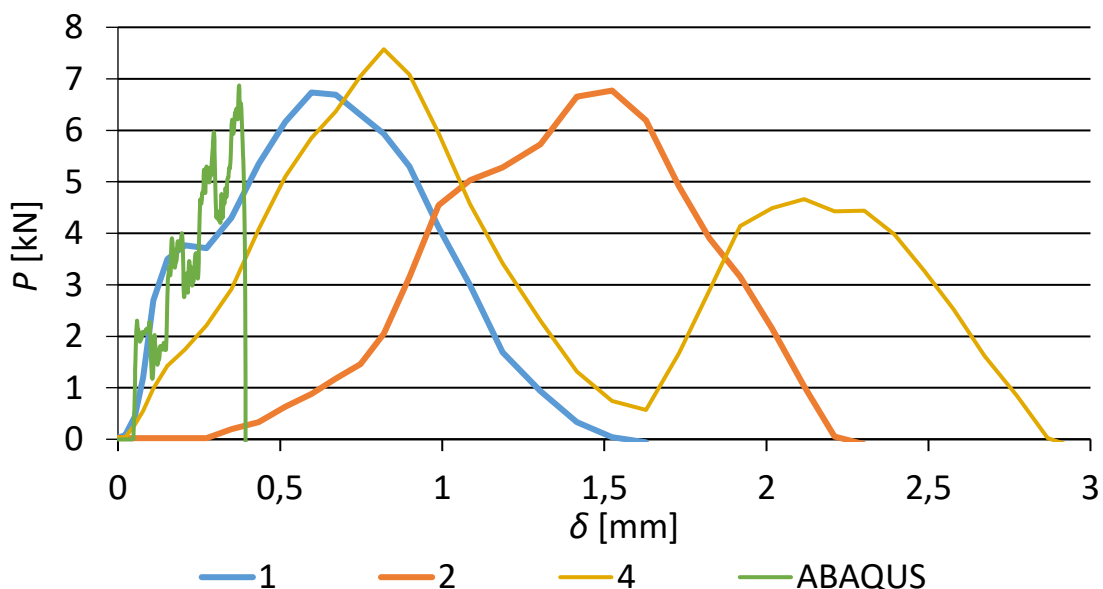


Figura 81 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=12,5$ mm

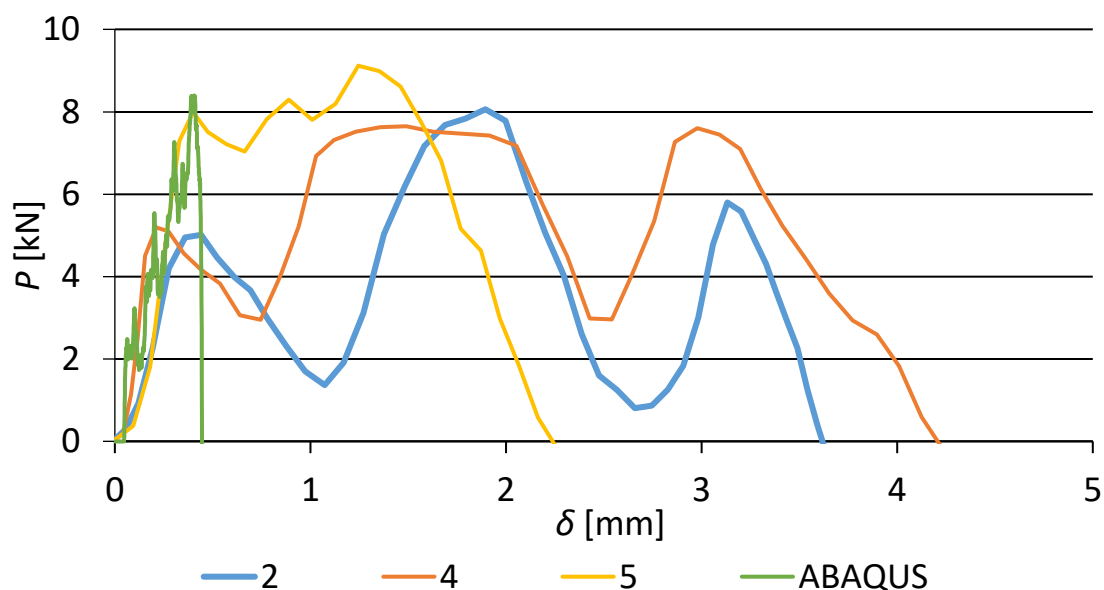


Figura 82 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=25$ mm

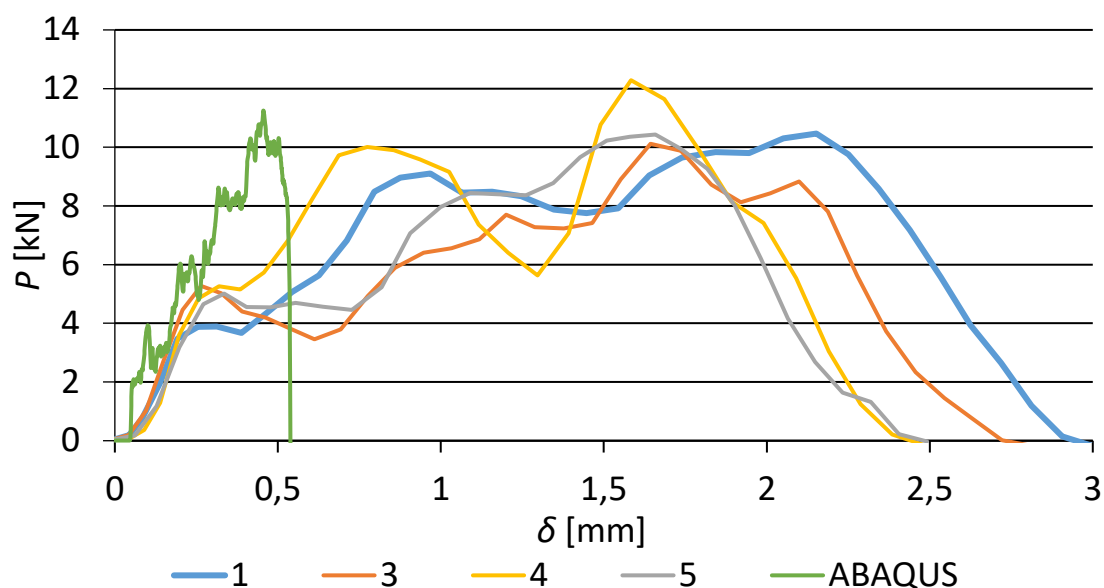


Figura 83 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo AV138 e $L_0=50$ mm

Verifica-se uma grande diferença no δ_{rot} entre os modelos numéricos e os resultados experimentais. No entanto, o resultado experimental do δ_{rot} é influenciado pela técnica de medição utilizada no equipamento do *drop test*. O deslocamento é obtido através da integração dos dados do acelerómetro, o que resulta num afastamento por excesso dos resultados experimentais do δ_{rot} [102]. Relativamente aos valores de $P_{máx}$, os resultados experimentais estão bastante próximos do modelo numérico, pelo que se podem considerar validados, tendo em conta que este modelo foi obtido com base nas propriedades dinâmicas indicadas no capítulo 3.1.2.2.1.

De forma a ter uma perspetiva geral sobre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e uma comparação devida com o modelo numérico, os dados gerais podem ser consultados na Tabela 17.

Tabela 17 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo AV138

| L_0 [mm] | $P_{m\acute{a}x}$ [kN] | | |
|----------------|------------------------|------|-------|
| | 12,5 | 25 | 50 |
| 1 | 6,73 | - | 10,47 |
| 2 | 6,77 | 8,06 | - |
| 3 | - | - | 10,11 |
| 4 | 7,58 | 7,65 | 12,28 |
| 5 | - | 9,12 | 10,43 |
| Média | 7,03 | 8,28 | 10,82 |
| Desvio | 0,39 | 0,62 | 0,85 |
| Numérico | 6,87 | 8,40 | 11,25 |
| Diferena [%] | -2,28 | 1,45 | 3,97 |

Analisando os valores da Tabela 17, verifica-se que a média dos resultados experimentais se encontra muito próxima do valor correspondente ao modelo numérico. A aproximação pode ser visualizada com mais pormenor na Figura 84, que mostra que a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 é muito semelhante.

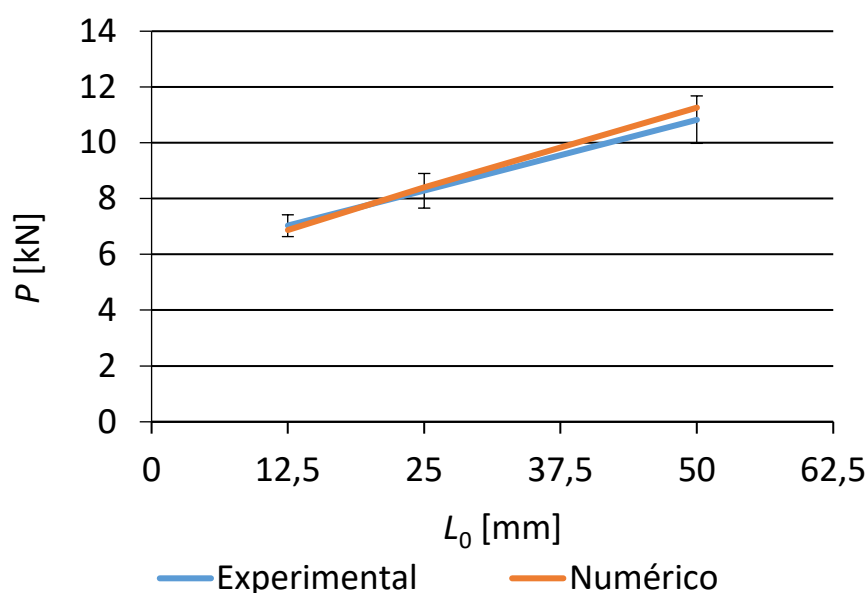


Figura 84 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo AV138

A diferença percentual entre os valores numéricos e os valores experimentais, tendo estes últimos como valores de referência, pode ser analisada na última linha da Tabela 17. O valor negativo deste parâmetro significa que o valor numérico é inferior ao valor experimental. Uma vez que a diferença não excede os 4% em nenhum dos L_0 analisados, pode dizer-se que os MDC têm a capacidade de prever com precisão a resistência das JSS solicitadas ao impacto.

Na Figura 85, Figura 86 e Figura 87 encontram-se representadas as curvas P - δ experimentais e numéricas referentes às JSS fabricadas com o adesivo 7752 para cada um dos L_0 testados.

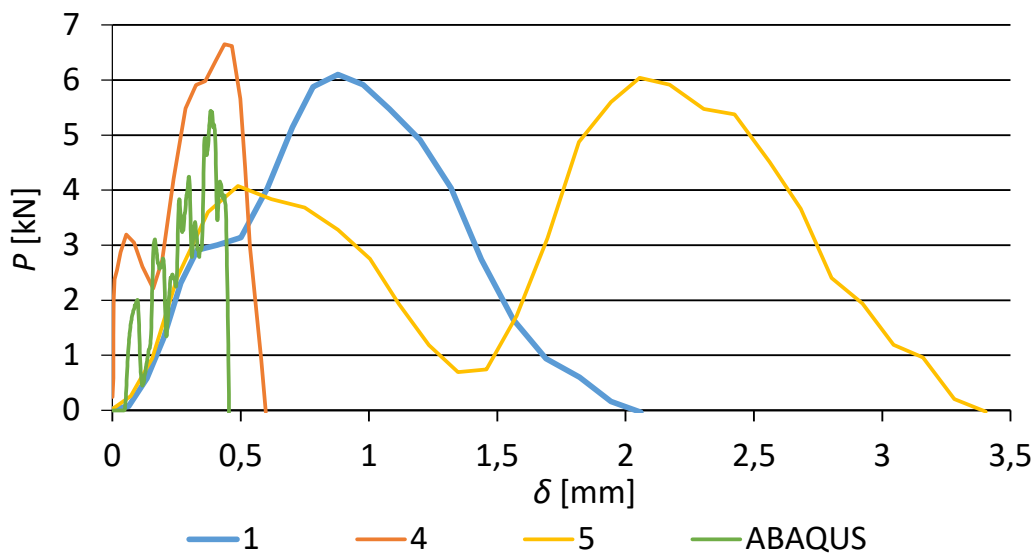


Figura 85 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=12,5$ mm

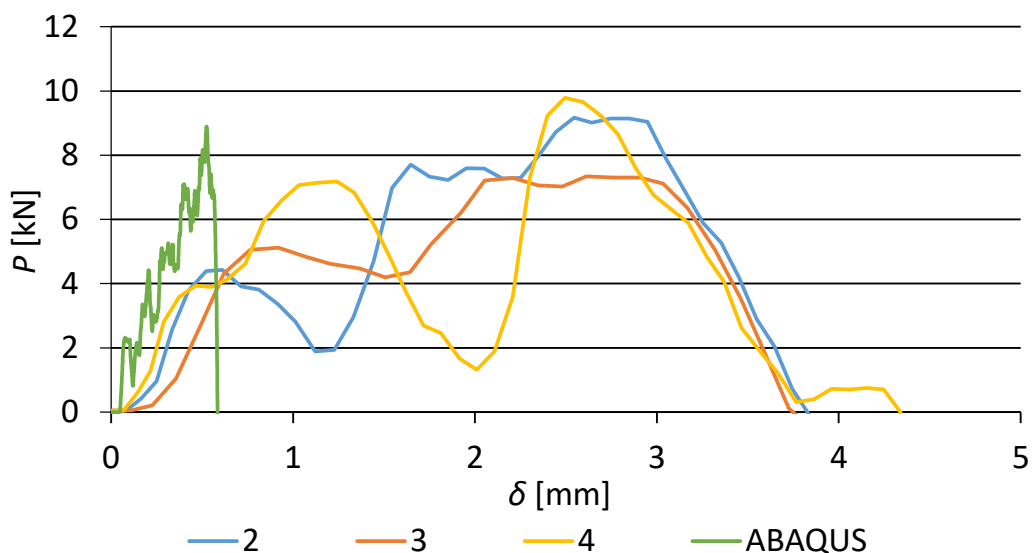


Figura 86 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=25$ mm

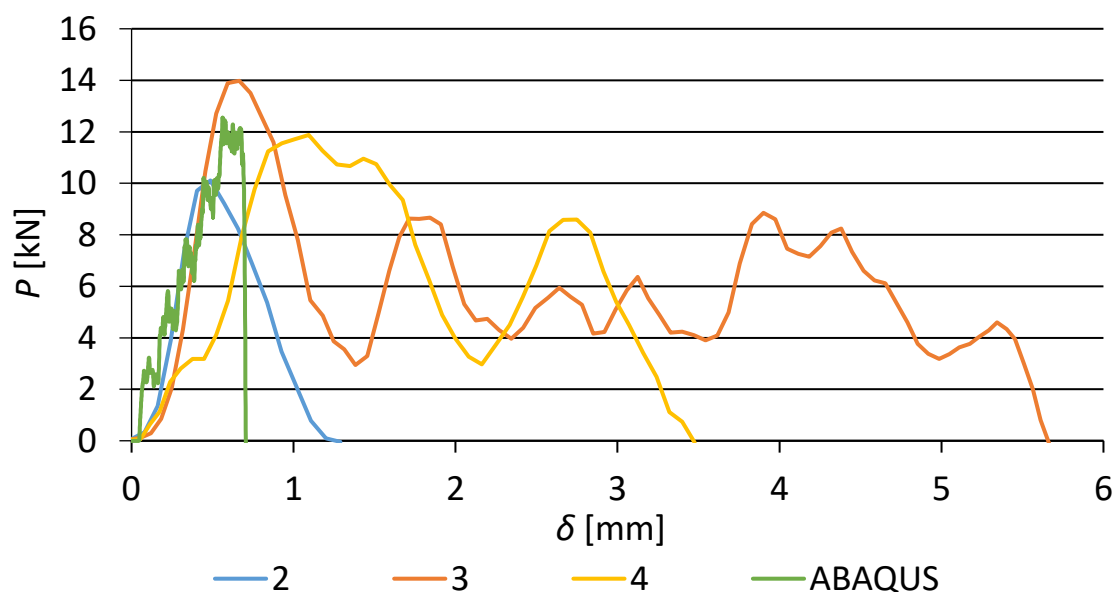


Figura 87 - Curvas P - δ experimentais e numérica de JSS com o adesivo 7752 e $L_0=50$ mm

Pelo mesmo motivo do caso anterior, com o adesivo AV138, o δ_{rot} experimental encontra-se bastante afastado do modelo numérico. Relativamente aos valores de $P_{m\acute{a}x}$, verifica-se que o modelo numérico está bastante próximo dos resultados experimentais, como seria expectável, uma vez que as propriedades dinâmicas do adesivo indicadas no capítulo 3.1.2.2.1 foram baseadas no ensaio de impacto das JSS.

De forma a ter uma perspetiva geral sobre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ e uma comparação devida com o modelo numérico, os dados gerais podem ser consultados na Tabela 18.

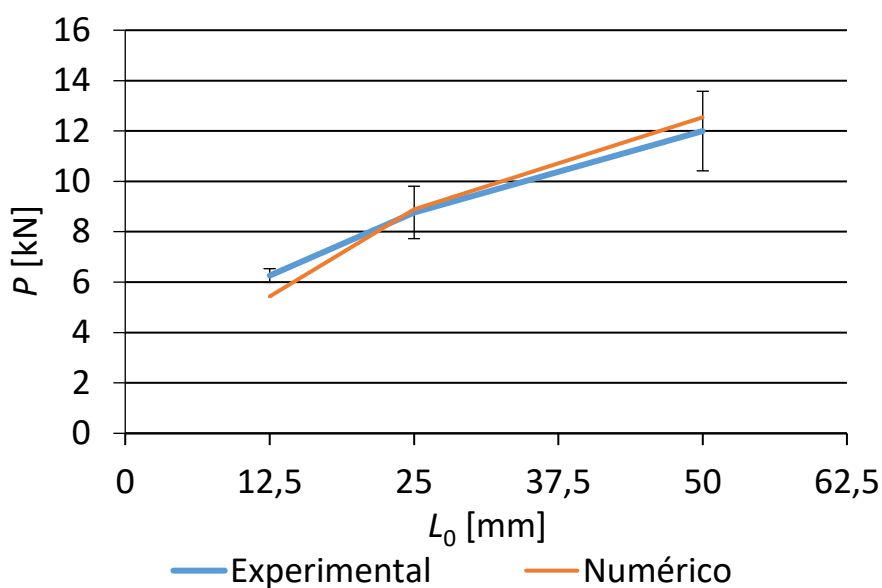
Pela análise da Tabela 18, verifica-se que os dados experimentais se aproximam bastante do modelo numérico, sendo que essa variação nunca ultrapassa o valor do desvio padrão, exceto no caso das JSS com $L_0=12,5$ mm.

A diferença percentual entre o $P_{m\acute{a}x}$ numérico e o $P_{m\acute{a}x}$ experimental apresenta valores superiores aos das JSS fabricadas com o AV138, o que é expectável uma vez que as propriedades dinâmicas do adesivo 7752 foram determinadas no próprio ensaio experimental, enquanto no caso anterior estas já tinham sido validadas noutros trabalhos semelhantes.

A evolução dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos em função do aumento do L_0 pode ser consultada na Figura 88.

Tabela 18 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS fabricadas com o adesivo 7752

| L_0 [mm] | $P_{\text{máx}}$ [kN] | | |
|---------------|-----------------------|------|-------|
| | 12,5 | 25 | 50 |
| 1 | 6,10 | - | - |
| 2 | - | 9,17 | 10,12 |
| 3 | - | 7,34 | 13,98 |
| 4 | 6,65 | 9,78 | 11,88 |
| 5 | 6,04 | - | - |
| Média | 6,26 | 8,76 | 11,99 |
| Desvio | 0,27 | 1,04 | 1,58 |
| Numérico | 5,44 | 8,89 | 12,55 |
| Diferença [%] | -13,10 | 1,48 | 4,67 |

Figura 88 - Comparação dos valores de $P_{\text{máx}}$ experimentais e numérico das JSS com o adesivo 7752

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Efetuada o estudo experimental e numérico conclui-se, então, que o aumento do L_0 se traduz num aumento de resistência das juntas ao impacto, quer sejam JSS ou JSD. No entanto, nem tudo é positivo neste efeito, uma vez que esse mesmo aumento do L_0 contribui para um pior desempenho das juntas, visto que aumenta bastante a concentração de tensões, tanto de corte como de arrancamento, principalmente nas extremidades da área colada.

O aumento de L_0 proporciona o aumento da resistência das juntas, sobretudo nas que possuem um adesivo mais flexível, o Sikaforce® 7752, uma vez que este tipo de adesivo impede concentrações de tensões significativas e, sendo um adesivo dúctil, tem a capacidade de absorver os picos de tensão. Por outro lado, o adesivo Araldite® AV138, sendo mais rígido, concentra mais tensões nas extremidades da ligação adesiva, impedindo um aumento significativo da resistência das mesmas com o aumento de L_0 .

Comparando as JSD e as JSS, conclui-se que as JSD, por terem o dobro da área de sobreposição, possuem valores de $P_{máx}$ muito superiores em relação às primeiras. A variação percentual situa-se entre 85 e 130%, o que revela um aumento considerável da resistência das juntas.

Verificou-se, ainda, que os MDC são capazes de prever a resistência das juntas ao impacto, uma vez que os ensaios experimentais e os modelos numéricos possuem valores semelhantes. Os resultados experimentais das juntas fabricadas com o adesivo Araldite® AV138 foram validados pelo modelo numérico, uma vez que já eram bem conhecidas as propriedades dinâmicas deste adesivo para a velocidade em questão. Relativamente ao Sikaforce® 7752, não eram ainda conhecidas as suas propriedades dinâmicas, pelo que foram determinadas a partir do *drop test*.

Como sugestão de melhoria, para trabalhos futuros, a realização do *drop test* das JSD ajudará a determinar com maior precisão as propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752 e a validar, no caso do adesivo Araldite® AV138, as propriedades anteriormente determinadas noutros trabalhos. Por outro lado, sugere-se também a determinação das propriedades dinâmicas do adesivo Sikaforce® 7752 por ensaios dedicados e respetiva extrapolação logarítmica.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Adams, R., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdão, Holanda: Elsevier.
2. Paddy, J., R. Johnson, and A. Kinloch, *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. 1987, Chapman and Hall: Londres, Inglaterra.
3. Bishopp, J., *Surface pretreatment for structural bonding*, in *Handbook of adhesives and sealants*, P. Cognard, Editor. 2005, Elsevier: Amsterdão, Holanda. p. 163-214.
4. Pinto, A., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
5. Petrie, E., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Amsterdão, Holanda: Elsevier.
6. Da Silva, L., A. Öchsner, and R. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlin, Alemanha: Springer Science & Business Media.
7. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto, Portugal: Publindustria.
8. Dilger, K., *Automobiles*, in *Adhesive Bonding*, R. Adams, Editor. 2005, Elsevier: Amsterdão, Holanda. p. 357-385.
9. adhesives.org. *CONTACT ADHESIVES*. Dezembro 2019]; Available from: <https://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/adhesive-technologies/physically-hardening/organic-solvent-adhesives/contact-adhesives>.
10. Niks, S. *Structural Adhesive Bonding in Aerospace*. 2013 Dezembro 2019]; Available from: <https://www.adhesives.org/resources/knowledge-center/aggregate-single/structural-adhesive-bonding-in-aerospace>.
11. Adams, R. and J. Comyn, *Joining using adhesives*. *Assembly Automation*, 2000. **20**(2): p. 109-117.
12. ASTM, *5573-99. Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints*. Annual book of ASTM standards, 2002. **15**(03).
13. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. *Composites Science Technology*, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
14. Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, and R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
15. Pinto, A.G., *Apontamentos da unidade curricular de Processos de Ligação (PROLI)*. 2019, Porto, Portugal: Instituto Superior de Engenharia do Porto.

16. MATERIALS, A. *Understanding Extensometry During Tensile Testing*. 2012 Dezembro 2019]; Zwick GmbH & Co. KG:[Available from: <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=6052>.
17. Adams, R., *The pendulum impact test for adhesives and adhesive joints*, in *Testing adhesive joints-best practices*, L. da Silva, D. Dillard, B. Blackman, and R. Adams, Editors. 2012, Wiley-VCH: Weinheim, Alemanha. p. 280-283.
18. Goglio, L., L. Peroni, M. Peroni, and M. Rossetto, *High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive*. International journal of adhesion & adhesives, 2008. **28**(7): p. 329-339.
19. Taylor, A., B. Blackman, A. Kinloch, and Y. Wang, *Impact testing of adhesive joints*. MTS Adhesive Project, 1996. **2**.
20. INSTRON. *ISO 11343 Wedge Peel Impact Testing*. 2019 Dezembro 2019]; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=azq8o1l3PjA>.
21. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
22. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
23. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
24. Goland, M., *The stresses in cemented joints*. J. appl. Mech., 1944. **17**: p. 66.
25. Szépe, F.J.E.M., *Strength of adhesive-bonded lap joints with respect to change of temperature and fatigue*. 1966. **6**(5): p. 280-286.
26. Hart-Smith, L.J., *19740005083 Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973.
27. Hart-Smith, L., *19740012451 Analysis and design of advanced composite bounded joints*. 1974.
28. Tsai, M., D. Oplinger, and J. Morton, *Improved theoretical solutions for adhesive lap joints*. International Journal of Solids Structures, 1998. **35**(12): p. 1163-1185.
29. Panigrahi, S. 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 Composites Part B: Engineering, 2007. **26**(2): p. 183-201.
30. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
31. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
32. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
33. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
34. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.

35. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
36. Campilho, R., M. De Moura, and J. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Composites Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
37. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
38. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
39. 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. **18**(1): p. 39-53.
40. Da Silva, L.F.M. and A. Öchsner, *Modeling of adhesively bonded joints*. 2008, Berlin, Alemanha: Springer.
41. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
42. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, and S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
43. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, and C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
44. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
45. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
46. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
47. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
48. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
49. Chandra, N., H. Li, C. Shet, and H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
50. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.

51. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, and A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
52. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
53. de Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques, and P. De Castro, *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
54. 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*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
55. 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.
56. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
57. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
58. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, and J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
59. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
60. Pandya, K.C. and J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
61. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
62. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
63. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
64. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, and K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
65. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.

66. Gustafson, P.A. and A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
67. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
68. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
69. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
70. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, and I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
71. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
72. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
73. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, and S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
74. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, and M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
75. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, and A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
76. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
77. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
78. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
79. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
80. 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**(1): p. 131-150.
81. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.

82. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, and L.F.M.d. Silva, *extended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
83. Machado, J., E. Marques, and L.F. da Silva, *Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2018. **94**(6): p. 421-452.
84. Sato, C. and K. Ikegami, *Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2000. **20**(1): p. 17-25.
85. Cowper, G.R. and P.S. Symonds, *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. 1957, Brown Univ Providence Ri.
86. Johnson, G.R. and W.H. Cook. *A constitutive model and data for metals subjected to large strains, high strain rates and high temperatures*. in *Proceedings of the 7th International Symposium on Ballistics*. 1983. The Netherlands.
87. Carlberger, T. and U. Stigh, *An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint*. Engineering fracture mechanics, 2007. **74**(14): p. 2247-2262.
88. Araújo, H.A.M., J.J.M. Machado, E.A.S. Marques, and L.F.M. da Silva, *Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry*. Composite Structures, 2017. **171**: p. 549-561.
89. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, and L.F. da Silva, *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.
90. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
91. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica do Porto*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
92. Silva, M.R.G., *Impact Of Mixed Adhesive Joints For The Automotive Industry*. 2015, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
93. Zgoul, M., A.J.I.j.o.a. Crocombe, and adhesives, *Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive*. 2004. **24**(4): p. 355-366.
94. 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.
95. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1): p. 147-161.
96. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, and A.M.P. de Jesus, *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
97. 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*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.

98. 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*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
99. Valente, J., *Estudo de alterações geométricas em juntas adesivas solicitadas ao impacto*. 2017, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
100. Nunes, S., R. Campilho, F. Da Silva, C. De Sousa, T. Fernandes, M. Banea, and L.J.T.J.o.A. Da Silva, *Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive systems*. 2016. **92**(7-9): p. 610-634.
101. 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.
102. Valente, J., R. Campilho, E. Marques, J. Machado, and L.J.C.S. da Silva, *Adhesive joint analysis under tensile impact loads by cohesive zone modelling*. 2019. **222**: p. 110894.