



Modelação numérica de juntas adesivas sujeitas ao impacto por modelos de dano coesivo

MANUEL FERNANDES TORRES DIAS ARNAUD

novembro de 2020

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE JUNTAS ADESIVAS SUJEITAS AO IMPACTO POR MODELOS DE DANO COESIVO

Manuel Fernandes Torres Dias Arnaud

1130497

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



MODELAÇÃO NUMÉRICA DE JUNTAS ADESIVAS SUJEITAS AO IMPACTO POR MODELOS DE DANO COESIVO

Manuel Fernandes Torres Dias Arnaud

1130497

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.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Mestre/Especialista José Carlos Vieira de Sá

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 Hugo Queirós de Faria

Professor Adjunto Convidado, ESAN

AGRADECIMENTOS

Uma gratificação em especial ao meu orientador Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela oportunidade facultada, por toda disponibilidade e por todo o apoio prestado para a concretização deste relatório.

Aos meus pais, ao meu padrinho, pelo auxílio e principalmente pelo incentivo ao longo de todo o percurso académico. Um especial agradecimento ao meu pai, pois esta tese é dedicada a ele visto que, o seu estado não se encontra estável, e o maior desejo era olhar para mim com diploma na mão.

Também agradeço todo o apoio e paciência da minha namorada por ser um incentivo para cumprir este objetivo.

Por último, e não menos importante, ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela instrução e conhecimento transmitidos necessários para a realização desta dissertação.

PALAVRAS CHAVE

Junta de sobreposição dupla, Adesivos estruturais, Junta adesiva, Método de Elementos Finitos, Impacto, Ensaios experimentais.

RESUMO

Ao longo da evolução tecnológica e devido à necessidade de várias indústrias, as ligações adesivas têm sido cada vez mais utilizadas. Este aumento da procura deve-se às vantagens significativas que as juntas adesivas apresentam em relação aos métodos convencionais tais como soldadura, ligações rebitadas e aparafusadas. As ligações adesivas permitem a redução de concentrações de tensões, redução de peso e maior facilidade de fabrico. Devido à utilização crescente destas juntas, é necessária a existência de ferramentas que tornem possível a previsão da resistência dessas mesmas ligações com um grau de precisão elevado. Neste domínio o Método de Elementos Finitos (MEF) é capaz de prever o comportamento da junta. Por outro lado, em muitos casos reais, as juntas adesivas são sujeitas a cargas dinâmicas, como por exemplo impacto, pelo que se torna relevante a existência e validação de técnicas numéricas de previsão de resistência nestas condições de carregamento.

Nesta tese é apresentado um estudo experimental e numérico pelo MEF de juntas de sobreposição simples, fabricadas com um adesivo frágil e rígido (Araldite® AV138) e outro de elevada flexibilidade e ductilidade (Sikaforce® 7752). Para a construção das juntas foram considerados aderentes de compósito, denominado por plástico reforçado a fibra de carbono (PRFC). Foram consideradas juntas adesivas com diferentes comprimentos de sobreposição, submetidas a esforços de impacto, de modo a avaliar o seu desempenho. No estudo experimental, utilizou-se uma máquina de *drop-test* para submeter os provetes fabricados ao ensaio de impacto a uma energia cinética de impacto pré-estabelecida. A análise numérica foi baseada no MEF e em modelos de dano coesivo (MDC) e permitiu obter a distribuição de tensões na camada adesiva, a resistência da junta e a energia absorvida. Com a comparação dos valores numéricos aos obtidos experimentalmente é possível validar os estudos numéricos para este tipo de solicitações dinâmicas. Para este caso de estudo a técnica de MDC foi validada de forma positiva para o cálculo da resistência de juntas adesivas ao impacto. Além disto, verificou-se a influência do adesivo em estudo e do comprimento de sobreposição.

KEYWORDS

Double-lap joint, Structural adhesive, Adhesive joint, Finite Element Method, Impact, Experimental tests.

ABSTRACT

Throughout the technological evolution and due to the need of several industries, adhesive connections have been increasingly used. This increase in demand is due to the significant advantages that adhesive joints have over conventional methods such as welding, riveted and screwed connections. Adhesive connections allow the reduction of stress concentrations, weight reduction and greater ease of manufacture. Due to the increasing use of these joints, it is necessary to have tools that make it possible to predict the resistance of those same connections with a high degree of precision. In this domain the Finite Element Method (FEM) is able to predict the behaviour of the joint. On the other hand, in many real cases, adhesive joints are subjected to dynamic loads, such as impact, for which reason the existence and validation of numerical strength forecasting techniques in these loading conditions becomes relevant.

This thesis presents an experimental and numerical study by the FEM of simple overlapping joints, manufactured with a brittle and rigid adhesive (Araldite® AV138) and another with high flexibility and ductility (Sikaforce® 7752). For the construction of the joints, composite adhesives were considered, known as carbon fiber reinforced plastic (CFRP). Adhesive joints with different lengths of overlap were considered, subjected to impact efforts, in order to evaluate their performance. In the experimental study, a drop-test machine was used to subject the manufactured specimens to the impact test to a pre-established impact kinetic energy. The numerical analysis was based on the FEM and cohesive damage models (CDM) and allowed to obtain the distribution of stresses in the adhesive layer, the resistance of the joint and the absorbed energy. By comparing the numerical values to those obtained experimentally, it is possible to validate the numerical studies for this type of dynamic loads. For this case study, the CDM technique was positively validated to calculate the resistance of adhesive joints to impact. In addition, the influence of the adhesive under study and the overlap length was verified.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

CFRP	<i>Carbon-fiber reinforced polymer</i>
COH2D3	<i>4-node two-dimensional cohesive element</i>
CPE4R	<i>4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration hourglass control</i>
FEM	<i>Finite Element Method</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MEF	Método dos Elementos Finitos
PEEQ	<i>Equivalent plastic strain</i>
PRFC	Plástico reforçado a fibra de carbono
RF	<i>Reaction forces and moments</i>
S	<i>Stress componentes and invariants</i>
SEDG	<i>Scalar stiffness degradation</i>
U	<i>Translations and rotations</i>
V	<i>Translational and rotational velocities</i>

Lista de Unidades

g	gramas
kN	KiloNewton
mm	Milímetros
MPa	MegaPascal
N	Newton

Lista de Símbolos

σ	Resistência coesiva à tração
B	Largura da junta
E	Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
L_0	Comprimento do adesivo
L_T	Comprimento dos substratos base entre limites de encastramento
$P_{máx}$	Força máxima resistente da junta
R	Raio de curvatura dos substratos em L
t_A	Espessura do adesivo

t_n	Componente de tensão normal
t_p	Espessura do aderente base
t_s	Componente de tensão de corte
ν	Coefficiente de Poisson
δ	Deslocamento associado à solicitação de tração da junta
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação principal máxima
$\epsilon_{m\acute{a}x0}$	Deformação máxima de um material à tração
γ_f	Deformação de rotura ao corte
ϵ_n	Componente de deformação normal
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Disciplinas envolvidas na "ciência" da adesão (adaptado de [1]).....	7
Figura 2 - Junta adesiva e suas regiões [2]	10
Figura 3 - Aplicação de adesivos nos carros modernos [4]	12
Figura 4 - Estrutura principal da cauda do Boeing 777, onde são aplicados adesivos [4]	13
Figura 5 - Tipos de juntas utilizadas em navios e barcos [4]	13
Figura 6 - Exemplo de aplicação de juntas adesivas [1]	14
Figura 7 - Vista explodida de um satélite - vários casos de aplicação de juntas adesivas [1].....	15
Figura 8 - Exemplo de aplicação de adesivo [5].....	15
Figura 9 - Tipos de carregamento a) tração, b) compressão, c) corte, d) clivagem, e) arrancamento [2] .	16
Figura 10 - Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial e sob carregamento não axial (adaptado [1])	16
Figura 11- Distribuição da tensão numa junta adesiva quando sujeita a corte (adaptado de [1])	17
Figura 12 - Distribuição de tensões numa junta adesiva quando sujeita a clivagem ou arrancamento (adaptado de [1])	18
Figura 13 - Distribuição de tensões numa junta sujeita a arrancamento (adaptado de [1]).....	18
Figura 14 - Rotura coesiva [2].....	19
Figura 15- Rotura adesiva [2]	19
Figura 16- Rotura pelo aderente [2]	19
Figura 17- Rotura mista [2].....	20
Figura 18 - Tipos de junta [1].....	20
Figura 19 - Juntas de sobreposição [1]	21
Figura 20 - Juntas com tira [1]	21
Figura 21 - Junta com tira [2].....	22
Figura 22 - Método de diminuir as forças de arrancamento [2]	22
Figura 23 - Soluções para diminuir a clivagem de juntas reforçadas [2]	22
Figura 24 - Juntas para varões (a) e tubos (b) [1]	23
Figura 25 - Juntas em T [2]	23
Figura 26 - Juntas de canto [2]	24

Figura 27 - Provete de tração de acordo com EN ISO 527-2 a) provete longo, b) provete reduzido (dimensões em mm)	25
Figura 28 - Montagem para teste de tração [3]	25
Figura 29 – Dimensões do provete para ensaios à compressão segundo a norma ASTM D 695 [7].....	26
Figura 30 - Ensaio losipescu para (a) provetes maciços (b) junta adesiva (adaptado de [1]).....	26
Figura 31 - Exemplo de provete do ensaio Arcan [1]	27
Figura 32 - Ensaio de impacto com blocos paralelismo a) afastado do adesivo b) próximo do adesivo (elaboração própria)	27
Figura 33 – Método de ensaio SHPB com ar comprimido (a) compressão (b) tração [3]	28
Figura 34 - <i>Setup</i> da máquina de ensaio de queda do peso [8]	28
Figura 35 – 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 [23]) ..	31
Figura 36 – Modelo coesivo triangular [35, 37].....	33
Figura 37 - Geometria do provete DCB [47]	35
Figura 38 – Geometria do provete ENF [50].....	35
Figura 39 – 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) [64]	37
Figura 40 - Modo aplicação da carga à amostra [65]	39
Figura 41 - Efeito da espessura na resistência da junta adesiva[65]	40
Figura 42 – Resultados das amostras em condições quase-estáticas	42
Figura 43 - Resultados das amostras em função da temperatura.....	43
Figura 44 - Resultados das amostras de substratos dissimilares em função da temperatura	43
Figura 45 - Representação das alterações aplicadas nas juntas adesivas [68].....	45
Figura 46 - Força máxima (P_m), deslocamento máximo (δP_m) - comparação dos resultados entre os diferentes aderentes ligados com o adesivo AV138, DP8005 e XNR6852 [69].....	46
Figura 47 - Propagação da carga nos provetes [67]	47
Figura 48 - Valores de energia absorvido em função da taxa de deformação e temperatura de ensaio para provetes fabricado com AL.15 + PRFC [67]	48
Figura 49 - Valores de energia absorvido em função da taxa de deformação e temperatura de ensaio para provetes fabricado com AL.2.0 + PRFC [67]	48
Figura 50 - Valores de energia absorvido em função da taxa de deformação e temperatura de ensaio para provetes fabricado com AL 1.5 + AL 2.0 [67]	48

Figura 51 - Máquina DWIT [70]	50
Figura 52 - Resistência à tração das diferentes proporções no fabrico do adesivo [70]	50
Figura 53 - Carga de rotura para as diferentes espessuras de adesivo [70].....	51
Figura 54- Geometria dos provetes utilizados, JSS [71]	55
Figura 55- Curvas σ - ϵ dos provetes maciço do adesivo Araldite® AV138 [74]	57
Figura 56 - Ciclo térmico aplicado	60
Figura 57 - Antes e depois da limpeza com o auxílio de uma lixa	60
Figura 58 - Provette alinhado e com os grampos de pressão.....	61
Figura 59 - Fio de pesca calibrado com 0,2 mm de diâmetro	61
Figura 60 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSS) para o Araldite® AV138, com $L_o=12,5$ mm (a), $L_o=25$ mm (b), $L_o=50$ mm (c)	63
Figura 61 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSS) para o SikaForce® 7752, com $L_o=12,5$ mm (a), $L_o=25$ mm (b), $L_o=50$ mm (c)	64
Figura 62 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os adesivos testados em função de L_o	65
Figura 63 - Representação da secção do peso	66
Figura 64 – Secções e materiais atribuídos no modelo 2D.....	66
Figura 65 – Controlo de malha no modelo de validação.....	67
Figura 66 - Exemplo de malha obtida com diferentes comprimentos de elementos para a análise de resistência	67
Figura 67 - Exemplo de malha obtida com diferentes comprimentos de nós para a análise de tensões ..	67
Figura 68 – Diferente refinamento utilizado na malha	68
Figura 69 - Condições fronteira e solicitações aplicadas [77].....	69
Figura 70 - Lei triangular do modelo de dano coesivo	70
Figura 71- Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138.....	73
Figura 72 - Distribuição de tensões τ_y com o adesivo AV138	74
Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo SikaForce® 7752	75
Figura 74 - Distribuição de tensões τ_y com o adesivo SikaForce® 7752.....	75
Figura 75 – Curva P - δ com o adesivo AV138 em função de L_o	76
Figura 76 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de L_o	77
Figura 77- Curva P - δ com o adesivo SikaForce® em função de L_o	78
Figura 78 - Valores máximos obtidos com o adesivo SikaForce® 7752 em função de L_o	79

Figura 79 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos na previsão numérica par ao adesivo AV 138 em função de L_0	80
Figura 80 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos na previsão numérica par ao adesivo SikaForce® 7752 em função de L_0	81

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação de características dos diferentes tipos de ligação	8
Tabela 2 - Artigos que abordam análise experimental	38
Tabela 3 - Resultados dos ensaios em condições de tração	41
Tabela 4 - Resultados das amostras em condições de flexão	41
Tabela 5 - Artigo que abordam ensaios numéricos	44
Tabela 6 - Dimensões das JSS	56
Tabela 7 - Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP [72]	56
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138, em condições estáticas [74, 75]	58
Tabela 9 - Propriedade do adesivo SikaForce® 7752, em condições estáticas [76]	59
Tabela 10 - $P_{máx}$ e aumento percentual em função de L_0	65
Tabela 11 - Quantidade total de elementos de malha do modelo	68
Tabela 12 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [80]	72
Tabela 13 – Propriedades obtidas por método inverso	72
Tabela 14 – Efeito de L_0 na carga máxima para o adesivo AV138	77
Tabela 15 - Energia absorvida com o adesivo AV138	78
Tabela 16 - Energia absorvida com o adesivo SikaForce® 7752	79

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do relatório.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	10
2.1.2	Etapas do processo de ligação.....	11
2.1.3	Aplicações das juntas adesivas	12
2.1.3.1	Indústria automóvel.....	12
2.1.3.2	Indústria aeronáutica.....	12
2.1.3.3	Indústria naval	13
2.1.3.4	Indústria aeroespacial.....	13
2.1.3.5	Indústria de calçado.....	15
2.1.4	Tipos de esforços em juntas adesivas	15
2.1.4.1	Tração	16
2.1.4.2	Compressão	17
2.1.4.3	Corte	17
2.1.4.4	Clivagem e arrancamento.....	17
2.1.5	Modos possíveis de rotura	18
2.1.6	Configurações possíveis de junta	20
2.1.6.1	Sobreposição simples	20
2.1.6.2	Juntas com tira (strap joint).....	21
2.1.6.3	Juntas de reforço	21
2.1.6.4	Juntas cilíndricas	22

2.1.6.5	Juntas em T	23
2.1.6.6	Juntas de canto	23
2.2	Ensaio de juntas adesivas.....	24
2.2.1	Ensaio estático	24
2.2.1.1	Propriedades à tração.....	24
2.2.1.2	Propriedades à compressão.....	25
2.2.1.3	Propriedades ao corte	26
2.2.2	Ensaio dinâmico e de impacto.....	27
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	28
2.3.1	Mecânica dos meios contínuos	29
2.3.2	Mecânica da fratura	30
2.3.3	Modelos de dano coesivo.....	31
2.3.3.1	Tipos de leis coesivas	32
2.3.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	33
2.3.4	Mecânica do dano	35
2.3.5	Método dos Elementos Finitos Extendido	36
2.4	Comportamento de juntas adesivas ao impacto	37
2.4.1	Avaliação experimental	38
2.4.2	Previsão por métodos numéricos.....	44
3	DESENVOLVIMENTO	55
3.1	Trabalho experimental.....	55
3.1.1	Geometria e dimensões das juntas	55
3.1.2	Materiais utilizados	56
3.1.2.1	Aderentes.....	56
3.1.2.2	Adesivos	56
	Araldite® AV138	57
3.1.2.2.1	SikaForce® 7752	58
3.1.3	Fabrico das juntas.....	59
3.1.4	Ensaio das juntas	61

3.1.5	Resultados obtidos e discussão	62
3.1.5.1.1	AV138	62
3.1.5.1.2	SikaForce® 7752	63
3.1.6	Comparação de resultados	64
3.2	Trabalho numérico	65
3.2.1	Condições da análise numérica	65
3.2.2	Modelos de dano coesivo	70
3.2.3	Determinação das propriedades dos materiais	71
3.2.4	Estudo de JSS	72
3.2.4.1	Distribuição de tensões	72
3.2.4.1.1	Araldite AV138	72
3.2.4.1.2	SikaForce® 7752	74
3.2.4.2	Previsão da resistência	76
3.2.4.2.1	Araldite AV138	76
3.2.4.2.2	SikaForce® 7752	78
3.2.4.3	Estudo numérico vs. experimental	80
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	85
5	REFERÊNCIAS	89

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O crescimento industrial tem levado a uma maior procura de ligações adesivas, principalmente na área da aeronáutica, automóvel e naval, devido às suas potencialidades. As ligações adesivas, comparadas com ligações mecânicas convencionais, apresentam inúmeras vantagens, tais como baixo peso, maior resistência, fiabilidade, melhor comportamento à fadiga, facilidade de união entre materiais diferentes, resistência à corrosão e acima de tudo a hipótese de automatização do processo e distribuição mais uniforme das tensões. No entanto, a utilização de adesivos implica alguns inconvenientes, impedem a desmontagem e a baixa resistência ao arrancamento.

Tal como os materiais metálicos, os polímeros apresentam uma gama vasta de propriedades, sendo as mais importantes para o método de seleção para a junta a rigidez e resistência. Portanto, os adesivos diversificam-se desde rígidos e muitos resistentes até dúcteis de baixa resistência, e também com a possibilidade de serem adesivos com elevada resistência e rigidez intermédia. É exemplo de adesivo frágil e rígido o Araldite® AV138, adesivo de elevada resistência, flexibilidade e ductilidade o SikaForce® 7752. Também, e não menos importante a tenacidade é uma propriedade bastante importante na seleção do adesivo, principalmente em juntas que estarão sujeitas a cargas de impacto. Além do tipo de adesivos, a resistência de uma ligação depende de vários fatores, como a sua geometria, comprimento de sobreposição, a espessura dos aderentes e a espessura da camada de adesivo.

A procura crescente deste método de ligação, despertou também a criação e melhoria de ferramentas essenciais para a previsão da resistência das juntas. O método de Elementos Finitos (MEF), é uma ferramenta comum neste âmbito, confere rapidez na análise da resistência e na seleção do adesivo ideal a ser aplicado, dependendo das solicitações, ambiente e outros fatores a que a junta irá ser submetida.

1.2 Objetivos

O objetivo dominante na presente dissertação é o estudo da influência do comprimento de sobreposição (12,5 mm, 25 mm e 50 mm) numa junta de

sobreposição simples (JSS). Também será analisado o comportamento da junta com os diferentes adesivos utilizados, Araldite AV138® e SikaForce® 7752. Por último, e não menos importante, será estudado o efeito da geometria das JSS.

Para tal, dividiu-se o estudo em duas partes. A parte numérica consistiu em realizar uma simulação numérica com o auxílio do *software* disponível, o Abaqus®, para cada alteração introduzida. As alterações introduzidas nas simulações serão: o tipo de adesivo e o comprimento de sobreposição. Com a análise numérica, é possível estudar a resistência da junta, a distribuição das tensões de corte e arrancamento, e também, o deslocamento após rotura.

Por outro lado, e após o fabrico dos provetes necessários, estes serão submetidos ao teste de impacto no Laboratório de Ensaios Mecânicos da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, para validar por comparação direta os resultados obtidos através dos ensaios numéricos. Por meio deste balanço irá ser possível aferir qual o adesivo mais adequado em função do comprimento de sobreposição.

1.3 Organização do relatório

De modo a auxiliar a observação e interpretação dos resultados obtidos nesta dissertação, esta encontra-se dividida em quatro capítulos:

No 1º capítulo é efetuada a contextualização do trabalho, a descrição dos objetivos e exposto o método de organização do trabalho.

No 2º capítulo é realizada uma pesquisa e revisão bibliográfica sobre matérias pertinentes que se relacionam com os adesivos e juntas de sobreposição simples. Entre as matérias abordadas, destacam-se a história e a crescente procura dos adesivos, as suas vantagens e desvantagens e as suas principais aplicações. Este capítulo termina com a descrição de alguns métodos numéricos e experimentais de previsão da resistência de juntas de sobreposição simples quando sujeitas a esforços de impacto.

No 3º capítulo é explicado os dois tipos de ensaios realizados. São descritas as condições do ensaio experimental e do ensaio numérico. Para além da descrição dos ensaios, é descrito as propriedades dos materiais utilizados. Após ensaios descritos e efetuados, são apresentados os resultados obtidos, tais como, distribuição de tensões, curvas p-d e carga máxima para os diferentes adesivos e comprimentos de sobreposição.

Por último, no capítulo quatro são apresentadas as conclusões extraídas das observações do trabalho desenvolvido. Com estas conclusões, são referidas sugestões de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Os adesivos são conhecidos e utilizados há vários séculos, contudo o seu uso cresceu significativamente nos últimos 60 anos. Primitivamente, os adesivos eram naturais, baseados em caseína, um material polimérico derivado do leite, contudo eram bastante intolerantes a ambientes húmidos. Devido à sua procura, os adesivos evoluíram para responderem às necessidades sentidas, e assim, fragilidades como a anterior foram ultrapassadas, tornando-se preferível o uso de adesivos sintéticos. Portanto, com a crescente evolução da procura dos adesivos, outras indústrias e ciências foram investigando e introduzindo novas perspetivas de fabricação e utilização dos adesivos, (Figura 1).



Figura 1 - Disciplinas envolvidas na "ciência" da adesão (adaptado de [1])

As indústrias que mais contribuíram para a evolução deste processo de ligação foram a aeronáutica e naval, sendo atualmente um método aplicado com frequência noutras indústrias. É um processo alternativo às ligações convencionais, como aparafusadas, rebitadas, brasagem e soldadura, pois proporciona vantagens significativas, como é possível observar na

Tabela 1.

Tabela 1 - Comparação de características dos diferentes tipos de ligação

	Soldadura	Brasagem	Ligação Mecânica	Ligação adesiva
Permanência	Junta permanente	Geralmente permanente	Permitem desmontagem	Permanentes
Distribuição de tensão	Cria tensões internas na estrutura		Ponto de altas tensões junto da ligação	Boa distribuição de tensões pela superfície (exceto no arrancamento e clivagem)
Aparência	Aparência aceitável	Boa aparência	Descontinuidade na superfície Às vezes não aceitável	Sem marca na superfície. Junta quase invisível
Materiais compatíveis	Limitado a grupos e pares de materiais similares	Alguma capacidade de ligar materiais diferentes	Todos os tipos de materiais podem ser ligados	Ideal para a maioria de pares de materiais diferentes
Resistência à temperatura	Resiste a temperaturas muito elevadas	Limitada pelo material de enchimento	Resiste a temperaturas elevadas	Fraca resistência a altas temperaturas
Resistência mecânica	Necessita de tratamento	Bastante resistência à vibração	Pouco resistente à fadiga. Cuidado com o aperto da ligação	Resistente à corrosão e à fadiga Atenção à fluência

Preparação da junta	Pouca ou nenhuma preparação das arestas para chapas espessas	Pré-fluxo às vezes necessário	Preparação do furo e da rosca	Processo de limpeza
Pós-processamento	Tratamento térmico por vezes necessário	Fluxos corrosivos devem ser limpos	Por vezes reaperto	Nem sempre necessário
Equipamento	Equipamento caro, grande consumo energético	Equipamento manual barato.	Relativamente barato e portátil	Alguns adesivos são caros
Consumíveis	Fio, elérodos entre outros	Por vezes caro	Bastante carto	Alguns adesivos são caros
Taxa de produção	Pode ser rápido	Processo automático é rápido	Manual - lento Automatizado - rápido	De segundos a horas de acordo com o tipo de adesivo
Garantia de qualidade	Ensaio não destrutivo	Inspeção difícil	Confiança razoável quando se controla o torque de aperto	Aplicação de ensaios não destrutivos é limitada

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Uma junta adesiva é definida como o conjunto formado pelos aderentes, adesivos, primários (se presentes), interfase e as interfaces, regiões estas que destacadas na Figura 2. Por sua vez, o adesivo um material polimérico que, quando aplicado em superfícies pode ligá-las e resistir à sua separação. O aderente é o material a ser ligado. É de notar, que antes da ligação, o aderente é designado por substrato e que, após a junção, passa ser nomeado como aderente. A região fina que se situa entre o adesivo e o aderente é designada como a interfase. Esta região apresenta características químicas e físicas diferentes da zona de contacto adesivo-aderente e a sua natureza é um fator crítico na correta determinação das propriedades de uma ligação adesiva. A interface, diferente da interfase, é o plano de contacto entre as superfícies de dois materiais. Na interfase podem estar contidas várias interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o aderente. Por último, o primário é a substância que por vezes se utiliza por aplicação direta na superfície dos aderentes com o objetivo de melhorar a adesão ou garantir proteção das respetivas superfícies até ao momento de aplicação do adesivo.

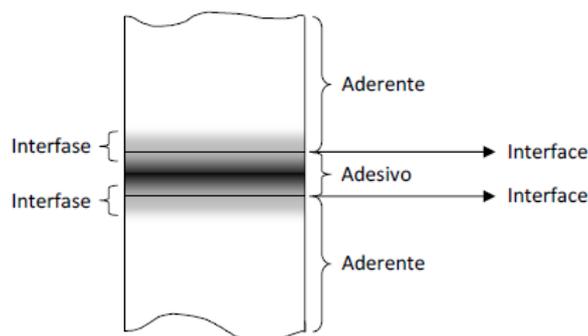


Figura 2 - Junta adesiva e suas regiões [2]

Como referido anteriormente, as juntas adesivas, em relação a outros métodos convencionais de ligação, apresentam bastantes vantagens. Algumas das vantagens que se salientam são [1, 2]:

1. Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada;
2. Amortecimento de vibrações, o que permite que as tensões sejam parcialmente absorvidas;
3. Ligação de materiais diferentes com composição e com coeficientes de expansão distinto;
4. Ligação de chapas eficiente;
5. Método mais conveniente e efetivo, pois é possível ser automatizado;
6. Tornam o projeto mais flexível;
7. Permitem ter estruturas com contornos regulares;
8. Criam contacto contínuo entre as superfícies de ligação;
9. Podem reduzir custos.

Todavia, como qualquer outra situação, este processo também apresenta algumas desvantagens e limitações [1, 2]:

1. É necessário um estudo para evitar forças de arrancamento;
2. É importante utilizar geometrias que evitem tensões localizadas;
3. Apresentam limitada resistência a condições extremas;
4. A ligação não realizada instantaneamente, sendo preciso o uso de ferramentas de fixação;
5. É necessária boa preparação das superfícies;
6. Os adesivos geralmente necessitam de ser curados a altas temperaturas;
7. O controlo de qualidade e de segurança é mais complicado;
8. Dificuldade de aplicação de um critério geral de dimensionamento.

2.1.2 Etapas do processo de ligação

Antes do processo de ligação, convém assegurar algumas características dos adesivos. É de salientar que os adesivos devem possuir algumas características fundamentais para o sucesso da adesão entre o adesivo e aderentes utilizados na junta [1]. As características essenciais são:

- Comportamento líquido, durante a ligação, de modo a garantir uma boa molhagem;
- Formar uma ligação entre superfícies;
- Preencher fendas e cavidades;
- Ter a capacidade de endurecer;
- Transmitir e distribuir cargas aos componentes de uma estrutura.

Para se obter uma junta adesiva de boa qualidade e com resistência suficiente para garantir segurança é necessário considerar alguns aspetos no processo de fabrico. Estas etapas são [2, 3]:

1. **A seleção do adesivo** deve seguir um conjunto de critérios definidos pela aplicação pretendida. Como já salientado, os parâmetros mais significativos são a resistência mecânica, a temperatura de serviço, o meio ambiente e o método de aplicação;
2. **O projeto da junta** deve ter em consideração as propriedades do adesivo para garantir que o nível tensão instalada não exceda a resistência mecânica do adesivo;
3. **A preparação da superfície** deve ser realizada consoante o tipo de adesivo e aderente, para assegurar uma boa adesão inicial e, posteriormente, em serviço;
4. **O fabrico da junta** envolve a aplicação do adesivo sobre os aderentes a ligar sob determinadas condições de temperatura e pressão. Uma vez que o adesivo é aplicado no estado líquido, é necessário garantir a boa fixação dos aderentes;
5. **No controlo do processo** deve-se realizar ensaios destrutivos e não destrutivos ao longo do tempo para verificar que a junta é adequada às tensões impostas.

2.1.3 Aplicações das juntas adesivas

Este método de ligação, com salientado previamente, é uma tecnologia que abrange diversas indústrias, como a automóvel, aeronáutica, naval, construção, têxtil, moveis, aeroespacial, entre outras.

2.1.3.1 Indústria automóvel

O uso de adesivos nesta indústria começou há décadas com a colagem de para-brisas. Posteriormente, os adesivos eram aproveitados para preencher falhas de nas soldaduras de modo a prevenir a corrosão. Com o aumento da resistência dos adesivos, a sua utilização aumentou na estrutura dos automóveis, o que possibilitou a melhoria da rigidez à torção. Este ramo procura estruturas cada vez mais leves, e para tal, combina materiais, como aços de elevada rigidez, estruturas *sandwich* e plásticos reforçados a fibras de carbono (PRFC), o que propicia a utilização de adesivos estruturais. A utilização de adesivos num automóvel tem como consequência [4]:

- Processos robustos e seguros;
- Construções leves;
- Construções resistentes em caso de acidente;
- Melhor design de superfícies;
- Design modular.



Figura 3 - Aplicação de adesivos nos carros modernos [4]

2.1.3.2 Indústria aeronáutica

A indústria aeronáutica permitiu desenvolver substancialmente as ligações adesivas. As aeronaves contêm muitos locais onde são aplicadas juntas adesivas, é exemplo disso a aeronave Boeing 777. Na Figura 4 são representados os locais onde são utilizados adesivos.

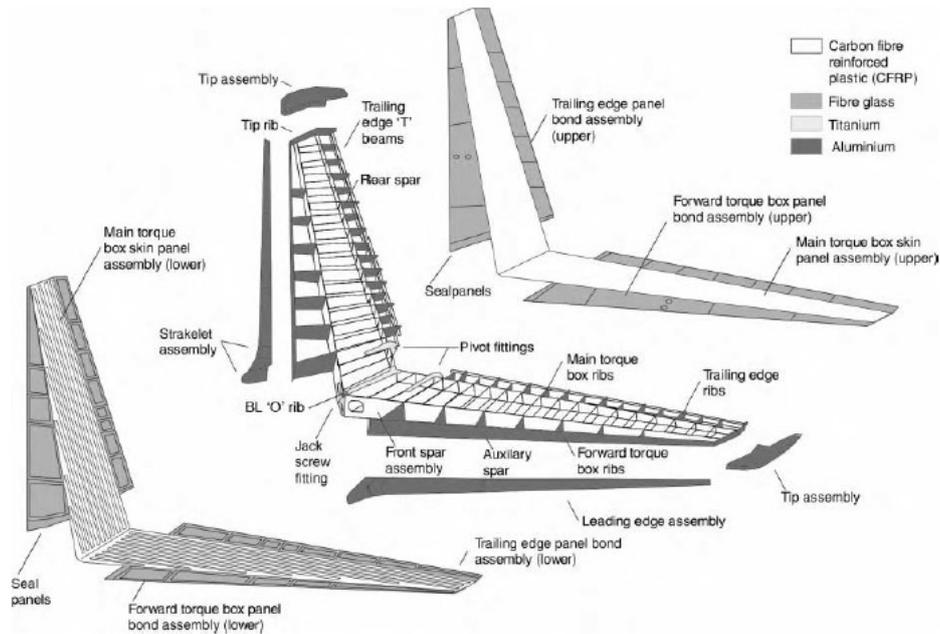


Figura 4 - Estrutura principal da cauda do Boeing 777, onde são aplicados adesivos [4]

2.1.3.3 Indústria naval

Os adesivos nesta indústria, além de funcionarem como método de ligação em estruturas críticas, também funcionam como vedantes em estruturas secundárias. Na indústria naval são cada vez mais utilizados plásticos e compósitos devido ao seu baixo peso, à sua resistência à corrosão e à sua facilidade de processamento. Neste caso, é necessário ter em conta a resistência dos adesivos ao meio marinho, que é particularmente severo.

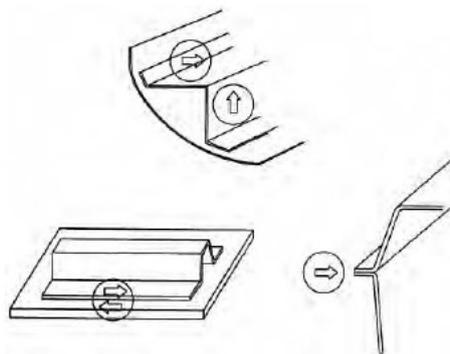


Figura 5 - Tipos de juntas utilizadas em navios e barcos [4]

2.1.3.4 Indústria aeroespacial

Na indústria aeroespacial, existe dois tipos de estruturas, estruturas para naves e estruturas para satélites. Assim, para a escolha do adesivo é necessária atenção às

cargas, que estas estruturas irão estar sujeitas, que para além de serem bastante elevadas também são distintas. Em ambos dos casos a utilização de juntas adesivas é bastante controlada e analisada, pois qualquer rutura levará à danificação das secções mecânicas, e que por sua vez poderá levar à perda da missão em questão.

Em certos casos, as juntas adesivas são dimensionadas tendo em conta os gradientes térmicos e expansões térmicas, sendo as cargas mecânicas suportadas por outros elementos (Figura 6).

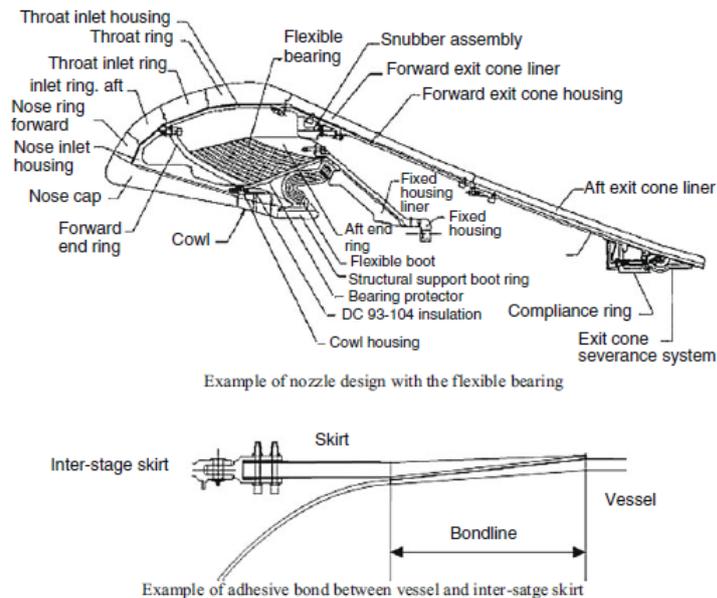


Figura 6 - Exemplo de aplicação de juntas adesivas [1]

De modo a reduzir a carga e por sua vez custos acrescidos, os engenheiros valorizam o uso de materiais compósitos e de juntas adesivas. Podem ser escolhidas soluções de ligação adesiva para montar dois painéis compósitos e para uma junção entre um anel de alumínio e uma estrutura de compósito. Uma solução alternativa de projetar estruturas de compósito para serem resistentes à encurvadura é reforçar a parte estrutural com reforços, conforme usado na fuselagem de aeronaves. Por outro lado, os satélites também têm como principal requisito o menor peso possível (Figura 7). Todas estas estruturas são feitas de materiais compósitos, o que conferem baixo peso, rigidez e estabilidade térmica. Assim, juntas com o auxílio de elementos mecânicos são utilizadas apenas para secções que necessitam de movimentos e de serem substituídos no futuro (componentes eletrónicos e componentes mecânicos) [1]. No geral, a utilização de juntas adesivas na indústria aeroespacial é utilizada de modo a:

- Para economizar peso;
- Para montar facilmente pequenas peças;
- Para não degradar estruturas compostas;
- Para melhorar o amortecimento de vibração;
- Para lidar com o requisito de aperto;

- Para evitar o efeito de acoplamento eletroquímico;
- Para ligar diferentes tipos de materiais que têm diferentes coeficientes de expansão [1].

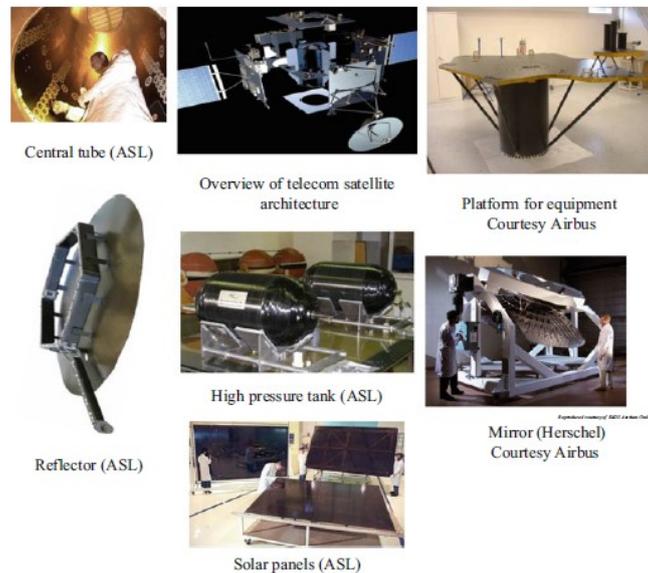


Figura 7 - Vista explodida de um satélite - vários casos de aplicação de juntas adesivas [1]

2.1.3.5 Indústria de calçado

Neste ramo, as ligações adesivas são bastante predominantes, visto que são uma alternativa viável à costura e à utilização de pregos ou grampos. Com o uso dos adesivos, a indústria do calçado garante juntas mais homogêneas e flexíveis e melhor distribuição de cargas ao longo da junta (Figura 8) [5].



Figura 8 - Exemplo de aplicação de adesivo [5]

2.1.4 Tipos de esforços em juntas adesivas

Como em qualquer outro tipo de ligação, é normal encontrar uma distribuição não uniforme numa ligação adesiva. Contudo, neste caso, a distribuição de tensões é a mais favorável. Então, no processo de projeto da junta é importante prever e diminuir

esses gradientes e para tal é necessário conhecer os diferentes modos de carregamento. As ligações adesivas podem estar sujeitas, essencialmente, a cinco tipos de esforços: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento (Figura 9).

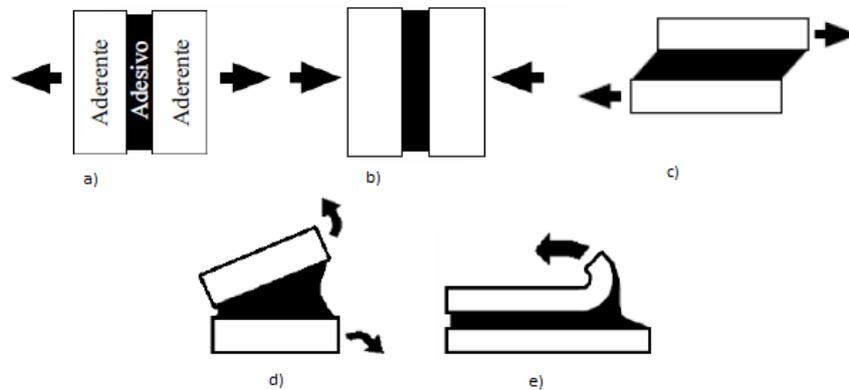


Figura 9 - Tipos de carregamento a) tração, b) compressão, c) corte, d) clivagem, e) arrancamento [2]

2.1.4.1 Tração

As tensões de tração desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano da junta, originando assim tensões distribuídas uniformemente ao longo da área adesiva. Para este género de solicitações, deve-se projetar a junta de modo a ter as superfícies dos aderentes paralelas e forças perpendiculares à superfície de ligação. Assim, para garantir um carregamento axial contínuo as juntas devem ser fabricadas com guias. Todavia, na prática, a espessura de adesivo é difícil de controlar, provocando forças não axiais, como se verifica na Figura 10. Além disto, é necessário garantir que os aderentes utilizados sejam suficientemente rígidos para não originar também tensões não uniformes [1, 2].

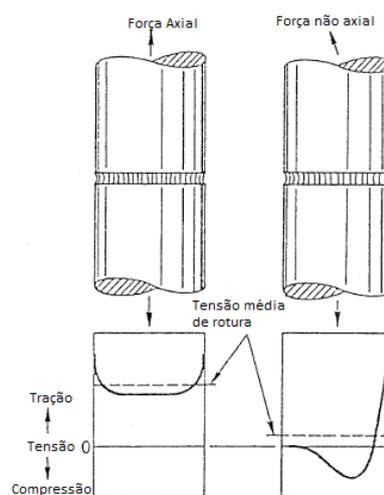


Figura 10 - Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial e sob carregamento não axial (adaptado [1])

2.1.4.2 Compressão

As tensões de compressão são o oposto das tensões de tração. Tal como as tensões de tração, é importante manter as forças alinhadas para garantir que o adesivo permaneça em compressão pura. Uma junta adesiva em compressão raramente rompe, contudo, se a distribuição de tensões não for uniforme, esta poderá ceder [1, 2].

2.1.4.3 Corte

Este género de esforço aparece quando as forças atuantes no plano do adesivo tendem a separar os aderentes. Juntas que dependem da resistência do adesivo ao corte são relativamente fáceis de fabricar e são bastantes usadas. As juntas são mais resistentes quando solicitadas ao corte, pois toda a área de colagem contribui para a resistência da junta e é relativamente fácil garantir o alinhamento dos aderentes. É de notar que a região central pouco contribui para a sustentação da carga, assim a maior parte da tensão está localizada nas extremidades da sobreposição (Figura 11). Portanto, a largura é o fator que mais contribui para a resistência da junta. [1, 2].

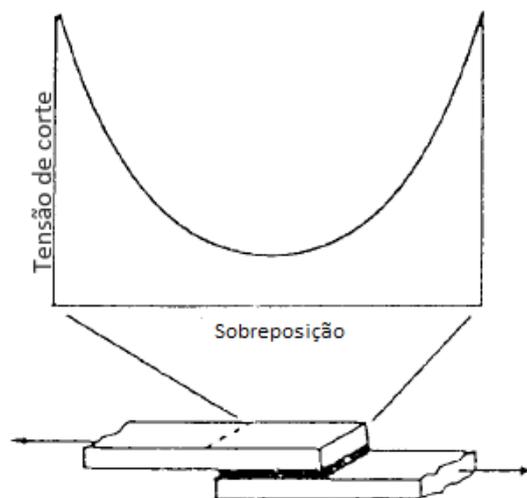


Figura 11- Distribuição da tensão numa junta adesiva quando sujeita a corte (adaptado de [1])

2.1.4.4 Clivagem e arrancamento

Estes tipos de esforços são os mais indesejados, na verdade são o principal inimigo das juntas adesivas. A clivagem é definida como a tensão que é criada quando as forças atuantes na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os aderentes. As tensões de arrancamento são semelhantes às de clivagem, no entanto aplicam-se nos casos em que um ou os dois aderentes são flexíveis. Assim, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento comparado com a clivagem.

As juntas sujeitas a clivagem ou arrancamento oferecem menos resistência em relação a esforços de corte, o que acontece porque as tensões ficam concentradas numa área bastante pequena. De acordo com a Figura 12, toda a tensão está localizada na extremidade da junta, concluindo assim que a restante porção da ligação pouco contribui para a resistência da junta.

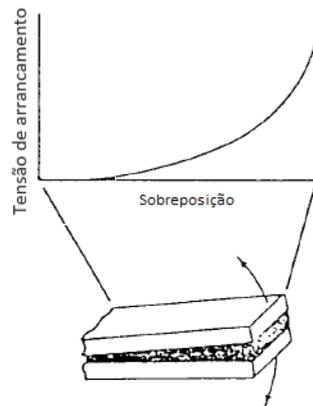


Figura 12 - Distribuição de tensões numa junta adesiva quando sujeita a clivagem ou arrancamento (adaptado de [1])

Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Em contrapartida, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões mais dispersa e permitem uma maior resistência.

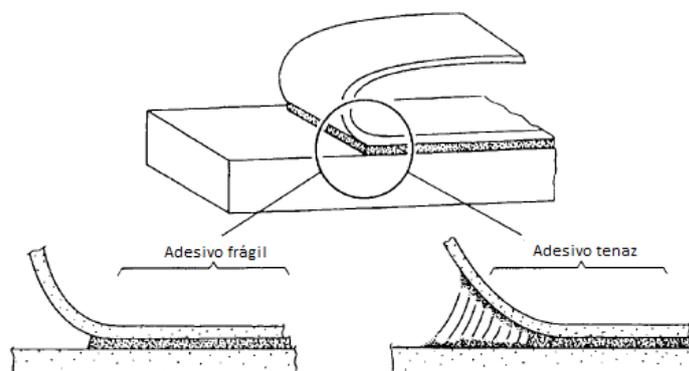


Figura 13 - Distribuição de tensões numa junta sujeita a arrancamento (adaptado de [1])

2.1.5 Modos possíveis de rotura

O principal objetivo de uma junta adesiva eficiente é a transmissão de carga entre dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural quando sujeitas a esforços estáticos e ou dinâmicos e condições ambientais desfavoráveis. De um modo geral, podem-se distinguir quatro modos de rotura diferentes em juntas adesivas: rotura coesiva, rotura adesiva, rotura de um dos aderentes e rotura mista [2].

Rotura coesiva: esta acontece no interior do adesivo, devido à ligação entre o aderente e adesivo ser mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Ambas as superfícies de rotura estão cobertas por adesivo. É de salientar que este tipo de rotura é o desejado, pois não danifica os aderentes e porque se usa a totalidade da resistência do adesivo (Figura 14).

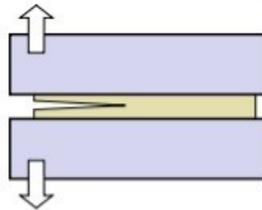


Figura 14 - Rotura coesiva [2]

Rotura adesiva: ocorre entre o substrato e o adesivo, que poderá ser provocado pela incompatibilidade entre o aderente e o adesivo, pelo modo de preparação das superfícies, e ou pela presença de contaminantes. Este género de rotura, visualmente, apresenta uma superfície de um dos aderentes limpa e sem porções de adesivo, ao contrário da outra superfície, que contém todo o adesivo aplicado (Figura 15).

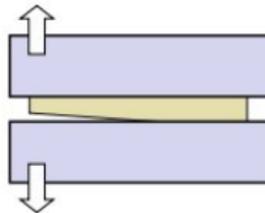


Figura 15- Rotura adesiva [2]

Rotura do aderente: sucede quando a resistência da ligação adesivo é superior à resistência do aderente, o que provoca uma rotura parcial ou total do substrato, mantendo a camada adesiva ileso (Figura 16).

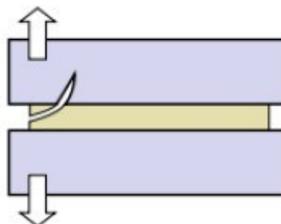


Figura 16- Rotura pelo aderente [2]

Rotura mista: é um tipo de rotura que engloba a rotura adesiva e coesiva. A má limpeza das superfícies, e/ou má homogeneização do adesivo poderão ser causas para este género de falha (Figura 17).

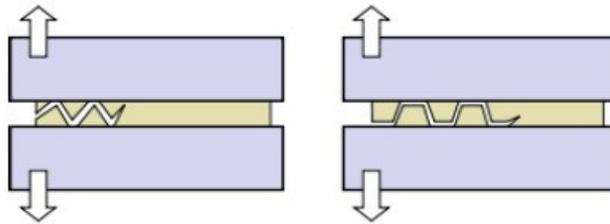


Figura 17- Rotura mista [2]

2.1.6 Configurações possíveis de junta

Existe uma série de configurações possíveis para as juntas adesivas, as quais são escolhidas de modo a garantir um bom compromisso com o material, geometrias, localização de emprego e acima de tudo aos esforços a que estarão sujeitas. Assim, as configurações de juntas mais comuns são apresentadas na imagem abaixo, (Figura 18).

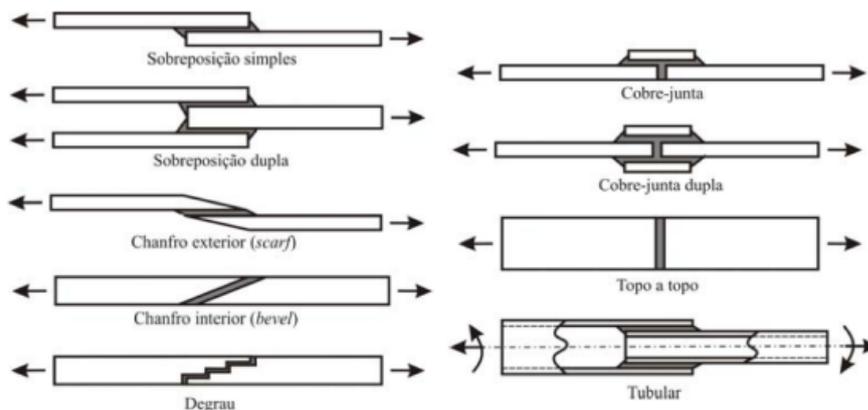


Figura 18 - Tipos de junta [1]

2.1.6.1 Sobreposição simples

As JSS, são as mais usadas e estudadas pois a sua configuração é pouco complexa, o que permite uma fácil fabricação das mesmas. Neste modo, o adesivo apenas é solicitado ao corte, contudo, as forças transmitidas não são colineares, o que origina tensões de arrancamento junto das extremidades de sobreposição. Para reduzir este efeito indesejado, normalmente recorre-se a soluções demonstradas na Figura 19. As juntas com chanfro reduzem significativamente o efeito de tensões concentradas nas extremidades de sobreposição observadas na JSS, como é possível observar na Figura 19. A junta de ressalto (*joggle*) é a solução mais simples para se garantir o alinhamento das forças que anteriormente não eram colineares, e para se obter juntas desta configuração, o aderente é facilmente dobrado. A configuração mais complexa para o fabrico é a junta de sobreposição dupla (JSD), que reduz o momento-fletor.

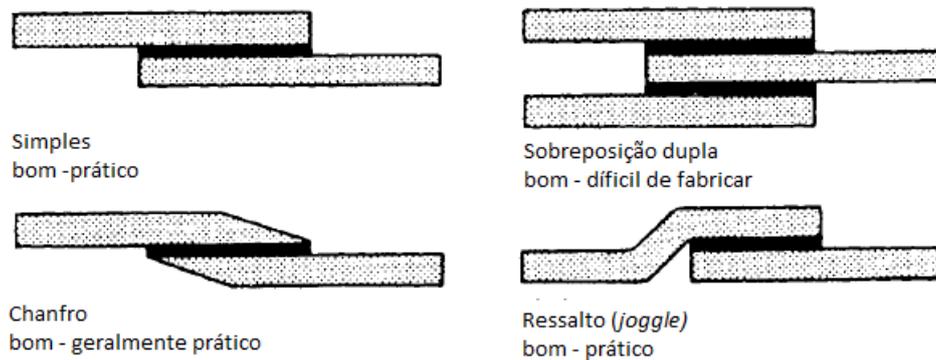


Figura 19 - Juntas de sobreposição [1]

2.1.6.2 Juntas com tira (*strap joint*)

Além de juntas de sobreposição, também existem juntas com tira, apresentado na Figura 20. Estas juntas sofrem igualmente o efeito de arrancamento e para tal há diferentes modos de o minimizar. A junta com duas tiras diminui o momento-fletor sendo a mais desejada. As tiras com chanfro e as juntas macho-fêmea são as mais eficazes, contudo são de difícil fabrico, pois o aderente requer maquinagem [1, 2].

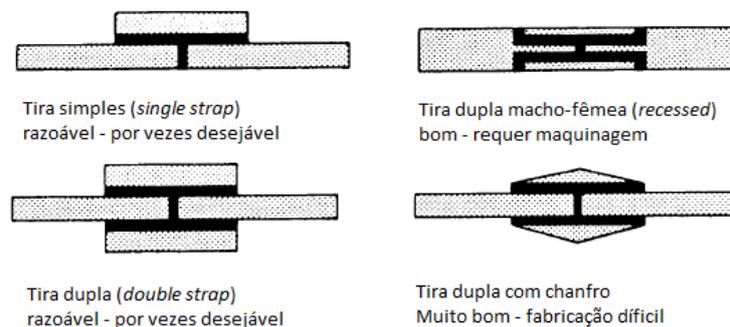


Figura 20 - Juntas com tira [1]

2.1.6.3 Juntas de reforço

O fabrico de juntas por colagem de aderentes finos a componentes espessos propicia tensões de arrancamento significativas, como se pode verificar na Figura 21. Na Figura 22 são apresentadas algumas soluções alternativas para reduzir as forças de arrancamento. É também uma prática usual a colagem de reforços sobre aderentes finos com o objetivo de aumentar a sua rigidez. No entanto, nestes casos, os esforços de flexão podem eventualmente provocar clivagem no adesivo. Então, para minimizar este efeito indesejado, recorre-se a algumas soluções, apresentadas na Figura 23. Nestes casos é possível melhorar a resistência às forças de flexão aumentando a área de colagem, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base [1, 2].



Figura 21 - Junta com tira [2]

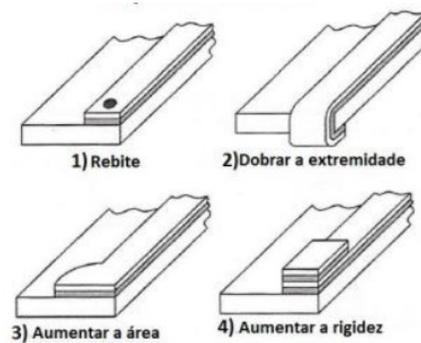


Figura 22 - Método de diminuir as forças de arrancamento [2]

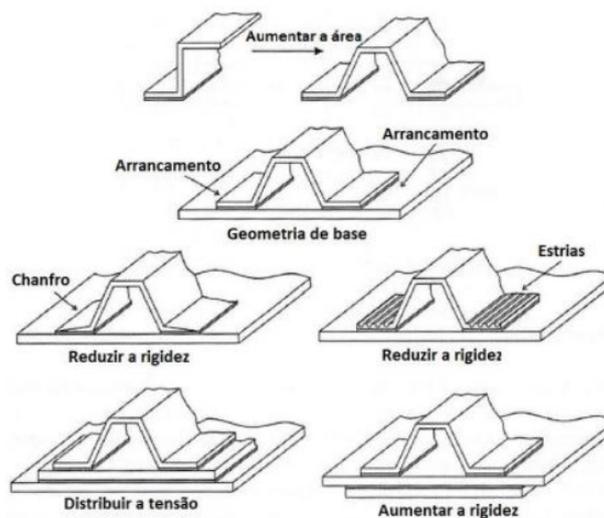


Figura 23 - Soluções para diminuir a clivagem de juntas reforçadas [2]

2.1.6.4 Juntas cilíndricas

A Figura 24 apresenta algumas juntas cilíndricas, que geralmente são utilizadas na colagem de varões e tubos. Estas são mais vantajosas quando comparadas às juntas topo a topo, pois garantem uma maior área resistente e uma diminuição do efeito de arrancamento. Porém, a execução das juntas cilíndricas requer maquinagem, o que irá complicar e encarecer o processo de fabrico [1, 2].

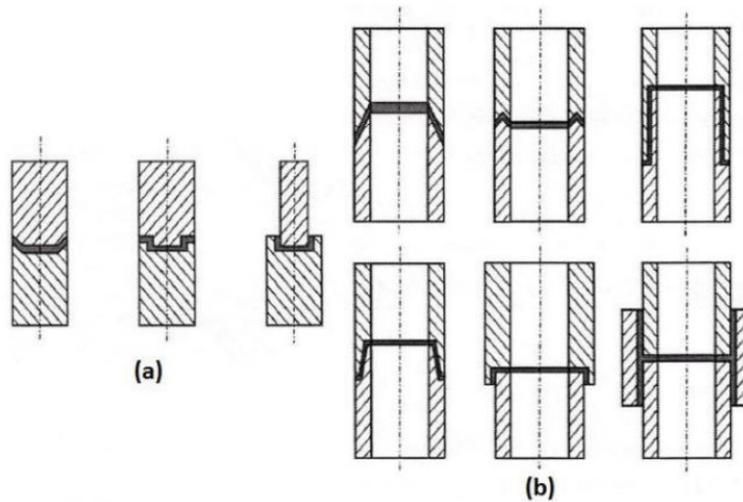


Figura 24 - Juntas para varões (a) e tubos (b) [1]

2.1.6.5 Juntas em T

Este tipo de configuração é caracterizado pela orientação perpendicular dos dois componentes, ou seja, o ângulo entre eles é de 90° . Ainda assim, também se inclui nesta designação juntas cujos aderentes a colar apresentem uma orientação diferente de 90° . Os esforços podem ser no plano da chapa (N) ou transverso (T). As juntas em T, comparadas com as de sobreposição ou tubulares, apresentam uma maior complexidade na sua análise. A Figura 25 apresenta alguns exemplos de juntas.

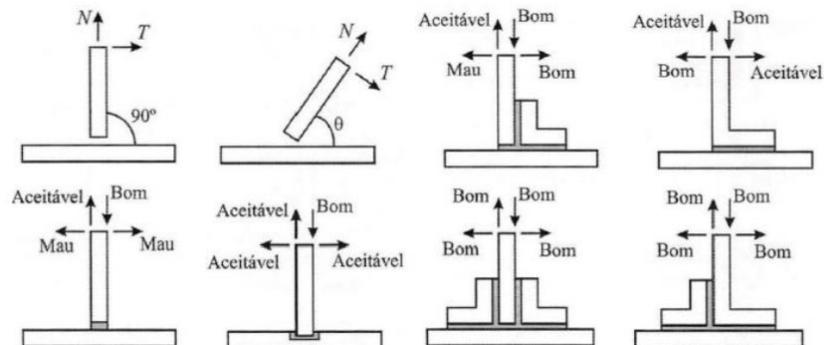


Figura 25 - Juntas em T [2]

2.1.6.6 Juntas de canto

A configuração deste tipo de juntas é semelhante às juntas em T, diferenciando-se apenas na ligação utilizada nas extremidades dos aderentes. Algumas soluções utilizadas de forma a diminuir o efeito de arrancamento no adesivo estão apresentadas na Figura 26 [1, 2].

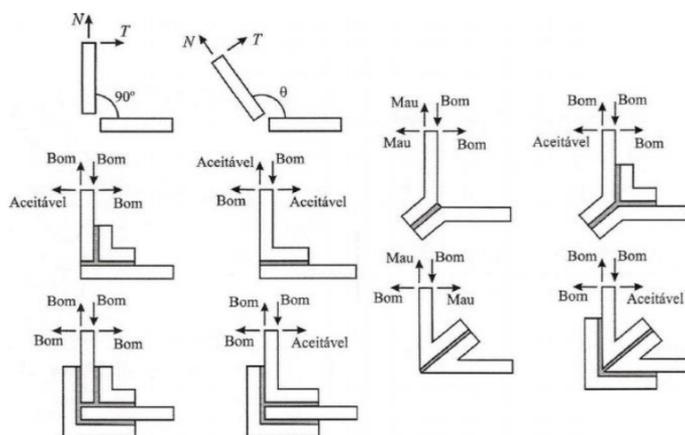


Figura 26 - Juntas de canto [2]

2.2 Ensaio de juntas adesivas

O desempenho de um adesivo, quer na sua forma maciça, quer principalmente quando aplicado numa junta, está dependente de um conjunto de propriedades. Este desempenho poderá ser caracterizado através de diversos ensaios, os quais determinam a resistência à tração ou energia de fratura em modo I ou II. Assim, os ensaios podem ser classificados em duas categorias: estáticos e dinâmicos. Os ensaios estáticos sucedem-se em condições quase-estáticas a baixa taxa de deformação e velocidade. Por outro lado, os ensaios dinâmicos são utilizados para taxas de deformação mais elevadas. Nos capítulos seguintes, 2.2.1 e 2.2.2, é feita uma introdução dos ensaios mais correntes para cada uma das classes.

2.2.1 Ensaios estáticos

2.2.1.1 Propriedades à tração

Um dos tipos mais comuns para determinar as propriedades de resistência dos adesivos é o ensaio de tração num provete maciço. Estes ensaios são realizados de acordo com a norma EN ISO 527-2, em equipamentos de tração convencionais e com provetes com geometrias designadas como “osso de cão”. A maior dificuldade na produção deste tipo de provete é garantir isenção de defeitos, tais como poros ou vazios.

Geralmente, utilizam-se provetes longos para adesivos rígidos, pois a sua deformação será menor. Em alternativa utilizam-se provetes reduzidos para adesivos flexíveis (Figura 27). Assim, após produção do provete e fixação do mesmo, (Figura 28) retira-se ao longo do ensaio a carga e o deslocamento para gerar a curva de tensão-deformação. Por meio da curva de tensão-deformação é possível definir o módulo de

Young e, caso seja registado o deslocamento na direção transversal do provete, também é possível determinar o coeficiente de Poisson [2, 6].

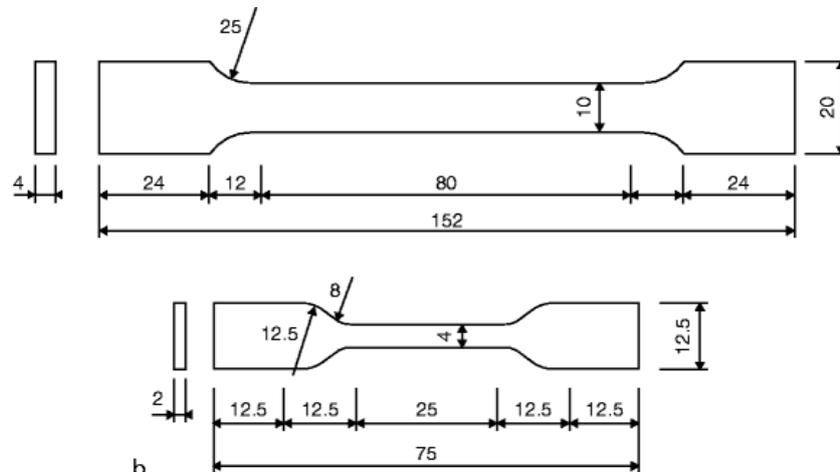


Figura 27 - Provetes de tração de acordo com EN ISO 527-2 a) provete longo, b) provete reduzido (dimensões em mm)

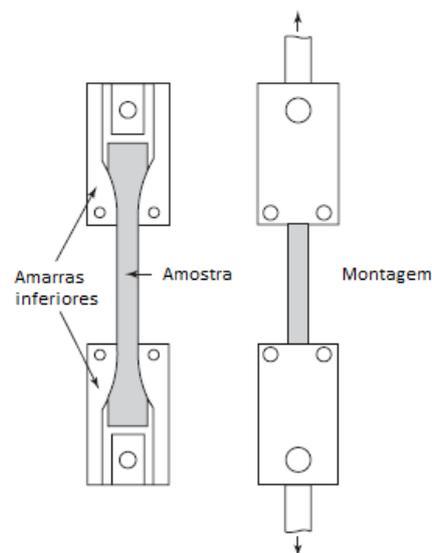


Figura 28 - Montagem para teste de tração [3]

2.2.1.2 Propriedades à compressão

Este género de ensaio é menos usual, visto que estas propriedades podem-se obter a partir do ensaio de tração. Os ensaios à compressão regem-se pelas normas NF T51-101 e ASTM D 695, onde descrevem algumas geometrias possíveis para o ensaio (Figura 29).

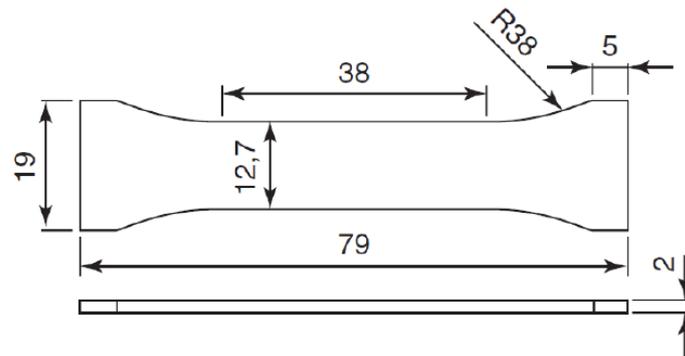


Figura 29 – Dimensões do provete para ensaios à compressão segundo a norma ASTM D 695 [7]

2.2.1.3 Propriedades ao corte

A determinação das propriedades ao corte aplicando momentos torsores é pouco usual porque a aplicação do esforço de corte implica dispositivos e equipamentos de ensaio complexos, ou seja, estão menos disponíveis. Então, para determinar estas propriedades, utilizam-se equipamentos convencionais para a aplicação de esforços de tração e compressão.

O ensaio *Iosipescu V-Notched beam shear method* pode ser realizado em provetes maciços de adesivo ou em junta. Este ensaio é aplicado para se obter propriedades ao corte. O provete utilizado assume a forma retangular com dois entalhes simétricos no centro, conforme ilustra a Figura 30. Esta secção central do provete está sujeita a um esforço de corte, visto que os momentos fletores provenientes dos dois lados se anulam. Através da leitura de carga e deslocamento, é possível obter as tensões de corte e por sua vez o módulo de corte [1, 2].

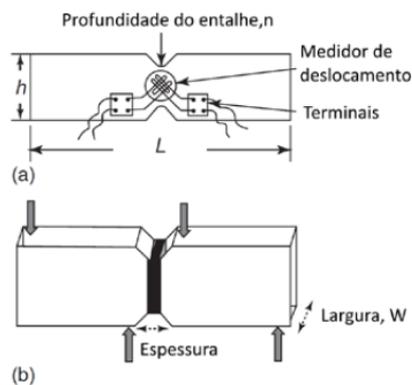


Figura 30 - Ensaio Iosipescu para (a) provetes maciços (b) junta adesiva (adaptado de [1])

Da mesma forma que o ensaio Iosipescu, o ensaio Arcan pode ser utilizado em provetes maciços ou juntas adesivas. A configuração do provete deste ensaio é semelhante a uma borboleta (Figura 31) e, quando comparado com o anterior, apresenta bom desempenho em todos os tipos de adesivo. Por meio deste ensaio

torna-se possível determinar tensões e deformações de corte, em modo II ou modo misto [2].

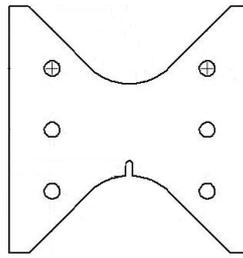


Figura 31 - Exemplo de provete do ensaio Arcan [1]

2.2.2 Ensaios dinâmicos e de impacto

Os ensaios de impacto têm bastante relevância pois os adesivos em geral são bastante sensíveis à velocidade de deformação. Estes ensaios devem seguir as regras descritas na norma ASTM D950 [2]. A norma descreve um ensaio com uma junta adesiva entre dois blocos, sobre o qual é lançado um pêndulo. Através do ensaio a energia absorvida que pode posteriormente ser dividida pela área da camada adesiva – energia de fratura, G_c . Estes tipos de ensaio são raramente utilizados devido às suas dificuldades, tais como o alinhamento dos blocos e também o paralelismo de superfícies. Devido a estas debilidades, os resultados são poucos consistentes.

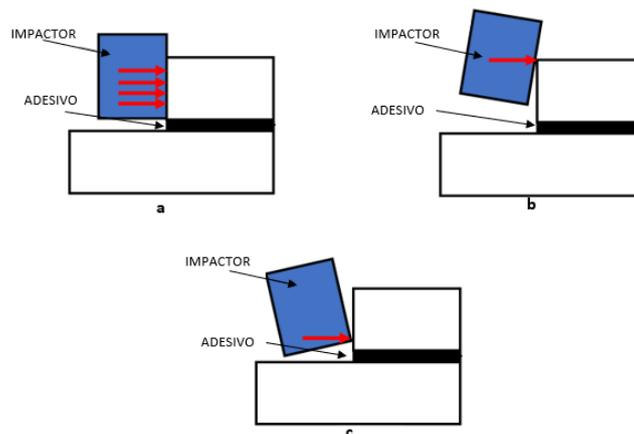


Figura 32 - Ensaio de impacto com blocos paralelismo a) afastado do adesivo b) próximo do adesivo (elaboração própria)

Para além deste tipo de ensaio, na atualidade diversas variantes da técnica da barra de Hopkinson têm sido utilizadas. Este género de ensaio permite diversas configurações, tais que proporcionam a criação de condições de ensaio para compressão, tração, torção e flexão para diferentes materiais, nomeadamente adesivos (22). A técnica mais frequente das variantes é o ensaio Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) (Figura 33). Este ensaio é capaz de provocar taxas de deformação muito elevadas pois utiliza-se ar

comprimido para lançar o projétil. Geralmente, este ensaio é utilizado para a compressão, no entanto, pode ser adaptado para gerar cargas de corte por compressão das barras em juntas de sobreposição [35].

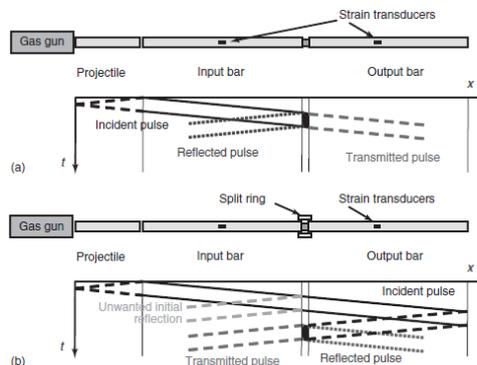


Figura 33 – Método de ensaio SHPB com ar comprimido (a) compressão (b) tração [3]

Não menos importantes, existem alternativas aos ensaios anteriores descritos, os quais consistem na queda de um peso, como é possível verificar na Figura 34. Este género de ensaios permitem a avaliação de juntas topo a topo para ensaios de impacto à tração ou com juntas de sobreposição para esforços de corte.

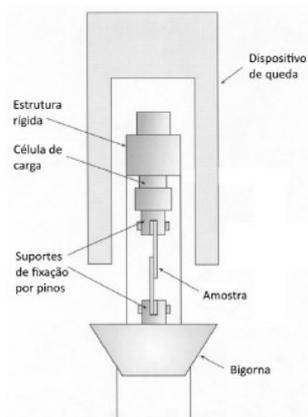


Figura 34 - Setup da máquina de ensaio de queda do peso [8]

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, tudo isto relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas atrás. 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 estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [9], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. 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. O MEF [10] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [11], 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 coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura.

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 [12]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por 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 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, 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 [9], 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. [13] usou 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 [14]. 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 [11], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.3.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, 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, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras 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 [2]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [15] 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 [16]. 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 [17] e por Rice [18] 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 [19], 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 sollicitação.

2.3.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [20] e Dugdale [21], 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 passaram a permitir 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 [22].

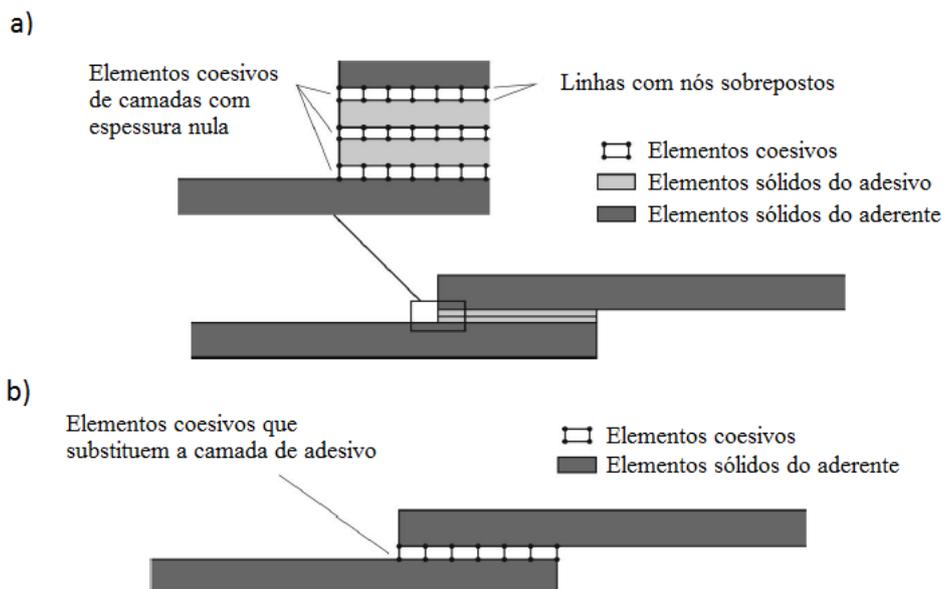


Figura 35 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [23])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [24]. 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 35), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [25], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [26].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenômenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das 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 [27]. Este modelo está implementado em *softwares*, 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 [28].

2.3.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [29], triangular [30], exponencial [31], polinomial [32] e trapezoidal [26]. 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 [33].

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 [34]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [35] 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 36). 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 [36].

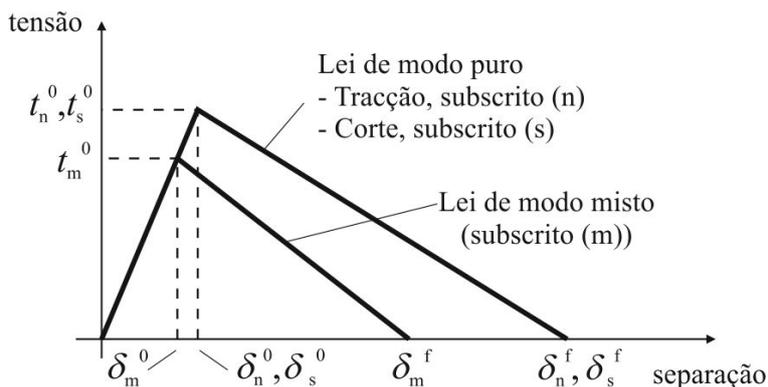


Figura 36 – Modelo coesivo triangular [35, 37]

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 [38] e modo II [39].

2.3.3.2 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 [40]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [41], 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, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados [26, 42].

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 devidos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [43]. 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 [44]. 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 [45]. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [43], 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 [46]. Rice [18] 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 [47]. 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 [39]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [48], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 37. 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.

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

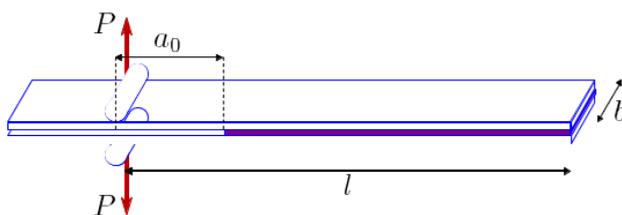


Figura 37 - Geometria do provete DCB [47]

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 38). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2L$) [49]. 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 [6].

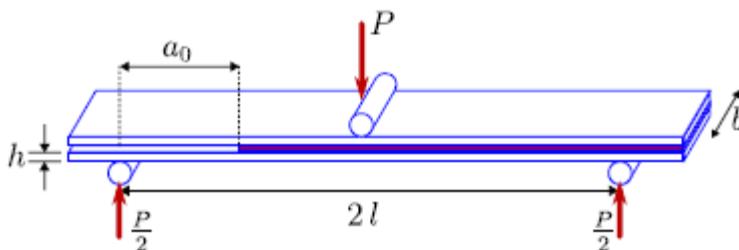


Figura 38 – Geometria do provete ENF [50]

2.3.4 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 [51] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [52] 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 [22].

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 [53]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [54] ou do número de ciclos para análises de fadiga [55, 56]. 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 [57].

Hua et al. [58] 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 permitiu 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. [59] 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.

2.3.5 Método dos Elementos Finitos Estendido

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 descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [60]. Belytschko e Black [61], 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 [62]. 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 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 [63].

Campilho et al. [64] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 39). 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.

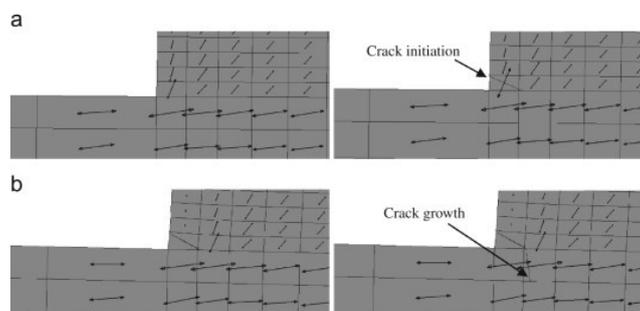


Figura 39 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [64]

2.4 Comportamento de juntas adesivas ao impacto

O estudo do comportamento de juntas adesivas sujeitas a impacto apesar de ser ainda uma vertente pouco explorada, existe alguns artigos que se focam na avaliação experimental e numérica deste tipo de solicitações. Os diferentes artigos exploram a relevância dos fatores intrínsecos à conceção da geometria. Estas variáveis podem ser:

- Geometria da junta adesiva – topo a topo;
- Tipo de junta – simples ou dupla;
- Comprimento de sobreposição da junta;
- Espessura do adesivo;
- Adesivo aplicado – dúctil, frágil, dúctil-frágil;
- Método de cura – adesivo curado após aplicação, adesivo e substratos curados em simultâneo;
- Material dos substratos – Aço, FPRC, Alumínio;
- Melhorias à geometria – raios no adesivo, chanfros interiores e exteriores.

Por outro lado, os estudos realizados têm como objetivo validar métodos numéricos e métodos experimentais de modo a facultarem um processo válido para o futuro quando necessário a avaliação e previsão de resistência de juntas adesivas.

2.4.1 Avaliação experimental

Para uma melhor explicação, na Tabela 2 é possível observar algumas investigações juntamente com os seus objetivos e conclusões.

Tabela 2 - Artigos que abordam análise experimental

Komorek et al. [65]	<p>A pesquisa apresentada neste artigo descreve um dos aspetos dos métodos de investigação de juntas adesivas submetidas ao teste de impacto usando o método do bloco.</p> <p>Os autores analisaram experimentalmente o efeito da espessura da junta adesiva uma vez sujeita a cargas de impacto. Numa primeira fase realizaram testes numéricos e de seguida os experimentais onde utilizaram um pêndulo concebido para ensaiar juntas adesivas. A energia máxima imposta ao pendulo foi de 15 J. De modo a quantificarem a resistência ao impacto da junta adesivas consideraram a dependência de modo que a energia utilizada para separar o elemento superior da amostra, e a energia perdida pelo pêndulo, é a medida de resistência ao impacto da junta adesiva. Para os ensaios os autores do artigo recorreram a aderentes de aço S235 e a liga de alumínio 2017A, e para adesivos escolheram resina epóxida Epidiam 57 e endurecedor Z1. Os modelos numéricos foram preparados com base nas amostras usadas na pesquisa experimental. O objetivo do cálculo numérico neste trabalho foi comparar a conformidade dos resultados das investigações experimentais e numéricas, bem como a avaliação da influência das condições de fronteira, que</p>
------------------------	---

foram submetidas a parametrização, sobre os valores de tensões ocorridas durante as simulações de carregamento de impacto conduzidas.

Finalizaram que, resultados da pesquisa experimental indicam um impacto significativo da espessura da junta sobre o impacto resistência das conexões adesivas - aumentar a espessura da junta resulta em uma diminuição na quantidade registada resistência ao impacto, independentemente do material dos elementos colados. Os resultados experimentais obtidos não são confirmados pelos resultados de cálculos numéricos, segundo os quais a alteração na espessura da junta não exerce efeito significativo nos valores das tensões.

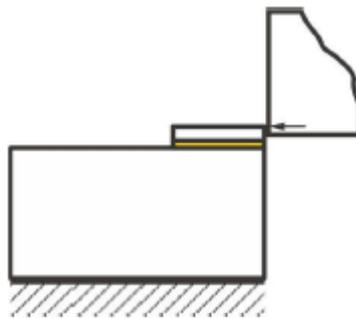


Figura 40 - Modo aplicação da carga à amostra [65]

Juntamente, relataram que a queda na resistência ao impacto associada ao aumento da espessura da junta também pode ser o resultado de um aumento da distância do pêndulo da superfície inferior da articulação, porém é necessário ser provado em estudos analíticos adicionais. Os resultados dos testes de carga de impacto realizados na mesma estrutura de teste caracterizam-se por grandes discrepâncias, causadas pela tolerância dimensional.

A análise macroscópica apontou para uma natureza regular da destruição. Por fim o método de observação microscópica

confirmou a natureza adesiva-coesa de quebrar as conexões adesivas com diferentes espessuras de junta.

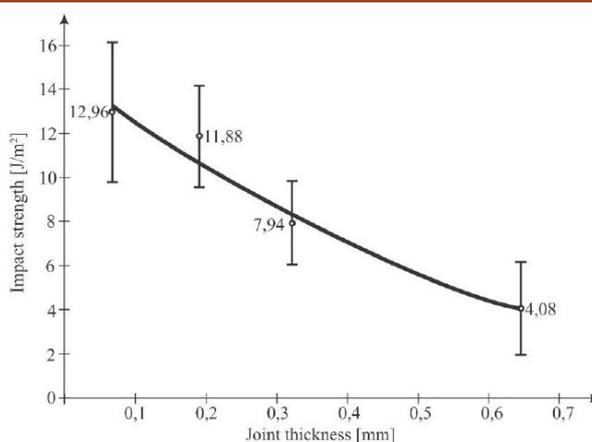


Figura 41 - Efeito da espessura na resistência da junta adesiva[65]

Este artigo de duas partes apresenta um método experimental com validação numérica da caracterização de ligações adesivas sob carga normal de impacto. Esta primeira parte apresenta resultados obtidos experimentalmente, os quais representam o comportamento mecânico de dois adesivos, metacrilato e um epóxi. Os autores apresentaram um teste de impacto análogo aos ensaios aplicados ao teste de testes estáticos a adesivos. Assim uma das vantagens deste teste é que os aparelhos e métodos atualmente usados para a penetração balística podem ser adotados facilmente para o ensaio proposto. A carga média bem como a energia absorvida pelo adesivo são variáveis determinadas através do ensaio acima referido.

Gollins et al. [66]

Para estes ensaios experimentais usaram provetes similares ao que se pode verificar na, consistindo em três partes: o prato traseiro, os aderentes (*patch*) e o adesivo. O provete foi concebido de modo a reduzir forças de corte e de torção apenas permitindo forças normais. O material do aderente aplicado foi um aço, AISI-1018 o qual foi investigado com os dois adesivos descritos anteriormente. Os adesivos propostos são ambos termoendurecíveis sendo o primeiro um acrílico e o segundo um epóxi, *Methacrylate* SG805 e EA 9309NA, respetivamente.

Nos testes de tração, a deformação no adesivo poderá ser calculada através do isolamento do deslocamento do adesivo do deslocamento total medido pelo extensómetro. Através de equações e com a informação obtida concluíram que o adesivo epóxi é rígido e resistente, no entanto o deslocamento na falha é semelhante entre os dois adesivos.

Tabela 3 - Resultados dos ensaios em condições de tração

	Módulo de Young [GPa]	Carga Máxima [MPa]	Deslocamento na falha	Energia [J]
Methacrylate	1,5 ± 0,3	28,7 ± 1,0	0,12 ± 0,01	0,13 ± 0,02
Epoxy	3,3 ± 0,3	36,1 ± 0,02	0,12 ± 0,02	0,16 ± 0,04

Por outro lado, nos testes de flexão os provetes foram submetidos até à falha. Para este teste, os resultados obtidos demonstram que a resistência à flexão é equivalente nos dois adesivos apesar do adesivo epóxi apresentar mais 25 % de resistência à tração.

Tabela 4 - Resultados das amostras em condições de flexão

Adesivo	Resistência [MPa]
<i>Methacrylate</i>	13,5 ± 1,3
Epoxy	13,0 ± 1,2

O principal objetivo deste artigo foi perceber e prever o comportamento de diferentes juntas adesivas, usando aderentes de compósito e alumínio quando submetidas a cargas de impacto e quase-estáticas. Estas juntas foram testadas a diferentes temperaturas (-30 a 80°C) seguindo as normas da indústria automóvel.

Machado et al.
[67]

O adesivo utilizado nas juntas foi um adesivo epóxi resistente ao choque (XNR6852 E-3) e para os aderentes foi escolhido duas ligas de alumínio (5754 H22 e 6060-T6) e um compósito (PRFC). Os autores recorreram a juntas do tipo JSS, e testaram-nas a diferentes temperaturas (-30, 24 e 80°C). É de notar que fabricaram juntas com aderentes diferentes de modo a representar a realidade da indústria automóvel.

Os ensaios experimentais quase-estáticos foram realizados com o auxílio de uma máquina de ensaios universal, INSTRON® 3367

equipada com uma célula de carga de 30 kN. Para este ensaio, de modo a obter a temperatura de 80°C colocaram resistências elétricas, por outro lado, para obter a temperatura de -30°C injetaram controladamente nitrogénio líquido. Um termopar foi posicionado em cada provete para controlar os valores de temperatura. Com objetivo de realizar os ensaios nos provetes com uma distribuição de temperatura homogénea, estes foram realizados após 10 minutos de a temperatura pretendida ser atingida.

Através da informação obtida dos ensaios quase-estático de provetes compostos com aderentes similares obtiveram curvas $P-\delta$ as quais estão descritas na figura seguinte.

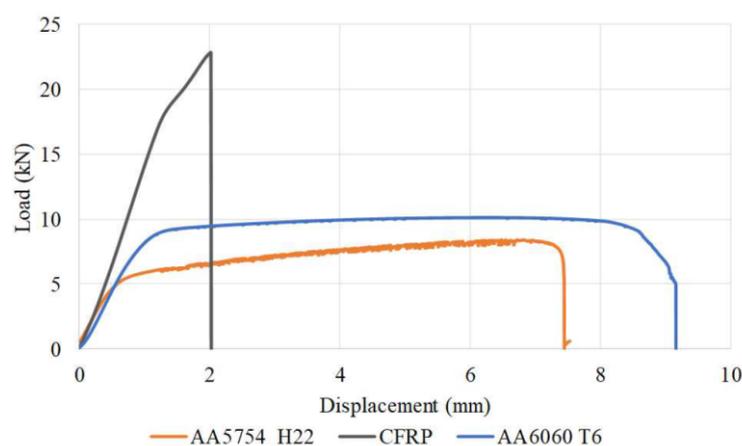


Figura 42 – Resultados das amostras em condições quase-estáticas

Os resultados em termos de carga de falha de JSS concebidos com substratos semelhantes e testados em condições quase estáticas em função da temperatura (LT, RT e HT), são apresentadas na figura seguinte

Em relação aos ensaios dinâmicos, insertos metálicos foram adicionados nas pontas dos provetes juntas adesivas, para que a força “gripping” fosse uniformemente distribuída. O instrumento utilizado denominado, *Rosand Instrumented Falling weight impact tester*, do tipo 5 H.V, com uma célula de carga de 60 kN. Este equipamento permite usar até 300 J e uma velocidade máxima de impacto de 4,5 m/s. A velocidade de impacto é definida pelo peso escolhido. Foram realizados diferentes ensaios a diferentes temperaturas com o auxílio de gás nitrogénio e uma pistola de ar quente. Cada ensaio foi concebido quando a temperatura se encontrava de uniformemente distribuída pelo provete.

Os resultados em termos de carga de falha das JSS realizados com substratos semelhantes e testados em condições de impacto em função da temperatura (BT, TA e AT) são apresentadas na figura.

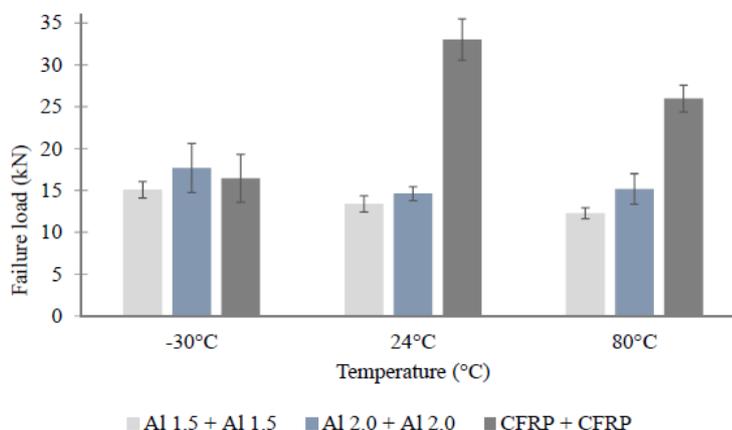


Figura 43 - Resultados das amostras em função da temperatura

Os resultados da carga de falha das JSS realizados com substratos diferentes em condições de impacto para todas as temperaturas de teste (BT, TA e AT) são apresentadas na figura abaixo.

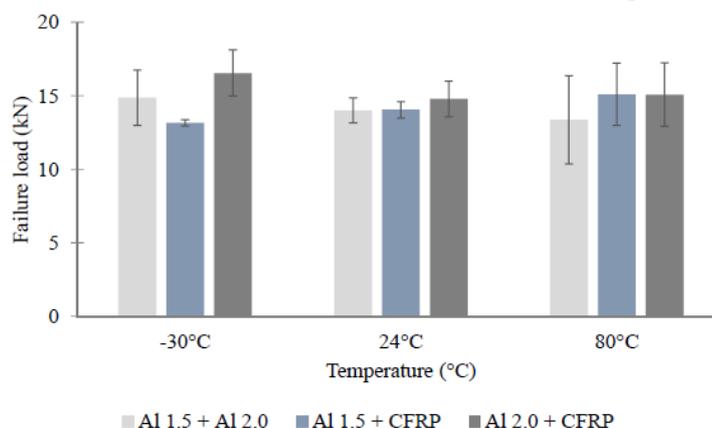


Figura 44 - Resultados das amostras de substratos dissimilares em função da temperatura

Assim, posteriormente à realização de todos os ensaios experimentais concluíram que o provete com configuração PRFC – PRFC apresentou a maior força à falha para todas as condições exceto para o teste realizado a -30°C. As juntas de alumínio demonstraram que a temperatura não tem relevância nos resultados e as cargas à falha bastante menores quando comparadas com as anteriores.

Verificou-se que o desempenho das juntas diferentes, em termos

de carga máxima, foi limitado pela deformação do alumínio em todas as condições testadas.

Também, observaram que o efeito da temperatura nas juntas é apenas notório nos provetes fabricados com PRFC – PRFC devido à dependência deste material quando atingem temperaturas próximas de T_g . Como esperado nas juntas fabricadas com um adesivo resistente e aderentes de alumínio o efeito da temperatura é limitado, apesar de perder resistência torna-se mais robusta.

Como observação final os autores relataram que é possível concluir que juntas adesivas diferentes, se usadas em conjunto com modernos adesivos resistentes a colisões, pode ser efetivamente usado para a indústria automóvel.

2.4.2 Previsão por métodos numéricos

Tabela 5 - Artigo que abordam ensaios numéricos

Autor	Descrição
Valente et al. [68]	<p>Neste artigo ainda não definitivo, é comparado os resultados obtidos para as diferentes geometrias aplicadas a uma junta de sobreposição simples. Para o estudo utilizaram geometrias de JSS com chanfros interiores, exteriores nos adesivos e também raios. Deste modo, analisou-se os resultados para as diferentes modificações e diversos adesivos. Além disto, combinaram as alterações de geometria para obter o melhor resultado. Como resultado, a técnica do modelo do dano coesivo foi validada e notaram que a melhor geometria está dependente do adesivo aplicado.</p> <p>Para o estudo numérico utilizou-se o <i>software</i> Abaqus[®], de onde retiraram a seguinte informação, curvas $P-\delta$ e a força máxima. Todos os modelos foram criados com o modelo de dano coesivo, o qual representa o processo e localização da fratura.</p> <p>Os adesivos escolhidos foram o AV138, DP8005 e o XNR6852 E2, por outro lado, o material do aderente usado foi o AÇO DIN 55 SI7.</p> <p>Assim, neste artigo é concluído que, o uso da técnica dos modelos de dano coesivo (é válida para a previsão de resultados de JSS</p>

quando sujeitas a impacto. Também registaram individualmente a influência de cada tipo de alteração na geometria, sendo que para todos casos o chanfro exterior de $7,5^\circ$ beneficiou o comportamento da junta. Já os chanfros interiores nos adesivos mostraram resultados promissores para o AV138. Em relação aos raios, salientou-se o benefício quando aplicado a um adesivo do tipo frágil visto que é bastante sensível a picos de forças. Por último, e após análise dos resultados anteriores, o artigo salienta que a melhor combinação de geometria para as JSS é definida em função do adesivo [68].

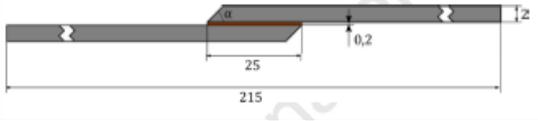
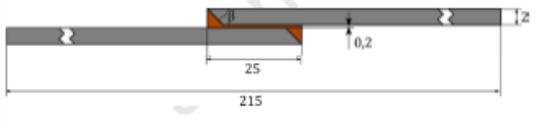
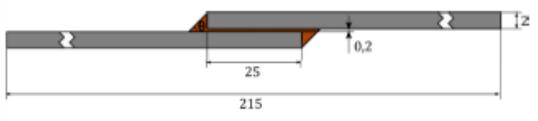
Graphical representation and key geometrical dimensions (in mm)	Designation of the configuration	Angle values under study
	Outer chamfer	7.5° 15° 30° 45° 60° 90°
	Inner chamfer	
	Adhesive fillet	

Figura 45 - Representação das alterações aplicadas nas juntas adesivas [68]

Este trabalho foca-se no estudo numérico através do modelo de dano coesivo de juntas de sobreposição simples sujeitas a cargas de impacto. Foram colocados três adesivos com propriedades distintas em teste e uma comparação inicial com resultados experimentais foi considerada. Além destes fatores, o artigo reforça o uso de um modelo 3D e diferentes aderentes.

Valente et al. [69]

De modo a prevenir uma deformação plástica no aderente durante o ensaio experimental para obter as propriedades dos adesivos, escolheu-se o AÇO DIN 55 Si7. Como referido, os três adesivos utilizados foram AV138 (resistente, mas frágil), DP8005 (alta ductilidade) e o XNR6852 (alta capacidade de absorver energia).

Então, após simulação e comparação, as curvas P- δ de um modo geral tiveram boa correspondência entre o estudo numérico, o estudo numérico de referência e o resultado experimental. O melhor resultado de P_m verificou-se com o adesivo XNR6852,

seguindo o DP8005, sendo que o AV138 obteve os piores resultados. A comparação entre os resultados atingidos no modelo 2D e 3D, validaram a modelação 2D, o que proporciona maior rapidez e menor requisitos de *hardware*. O trabalho refere que o uso do alumínio como aderente, em vez de aço afeta o valor de P_m , pois dependente do adesivo o alumínio poderá entrar em deformação plástica. Também, finaliza que a maior rigidez confere maior curvatura e, portanto, menor distribuição de carga. Por outro lado, a rigidez elevada do aderente de PRFC também reduz a P_m devido a baixa transferência de carga e que de acordo com o artigo este efeito é notório quando se utiliza adesivos com rigidez elevada.

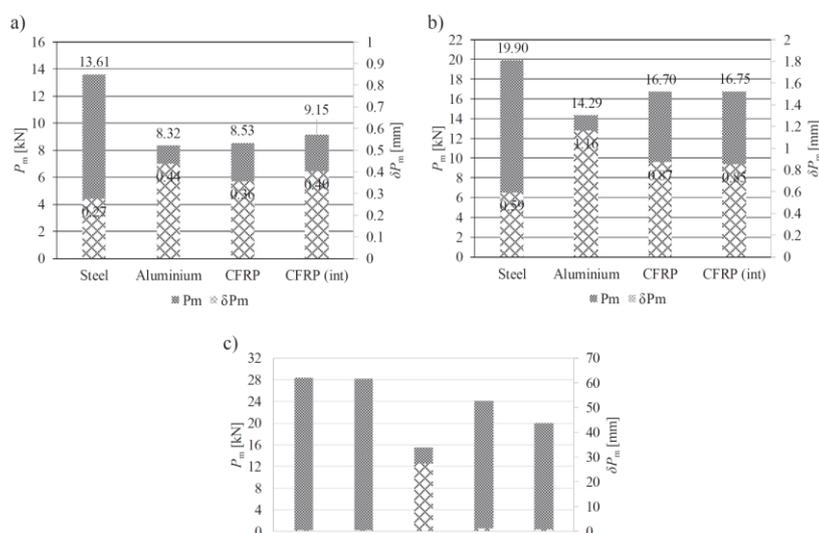


Figura 46 - Força máxima (P_m), deslocamento máximo (δP_m) - comparação dos resultados entre os diferentes aderentes ligados com o adesivo AV138, DP8005 e XNR6852 [69]

Em seguimento do artigo referido na tabela acima os autores além dos ensaios experimentais também realizaram ensaios numéricos com o objetivo de descrever a propagação da tensão ao longo do provete. Para tal recorreram ao método dos elementos finitos utilizando o *software* Abaqus®.

Machado et al.

[67]

Assim, observaram que a propagação da tensão nos ensaios em situações quase-estáticas todas as juntas adesivas apresentaram uma propagação uniforme das tensões até um dado momento, cujo é caracterizado pelo começo da deformação plástica na região de sobreposição.

Sob condições quase-estáticas o adesivo é mais dúctil devido ao alívio das cadeias poliméricas permitindo maiores deformações

em ambos os substratos e absorvendo mais energia. Na figura seguinte é possível observar a propagação das tensões nos ensaios de cargas de impacto e quase-estáticas.

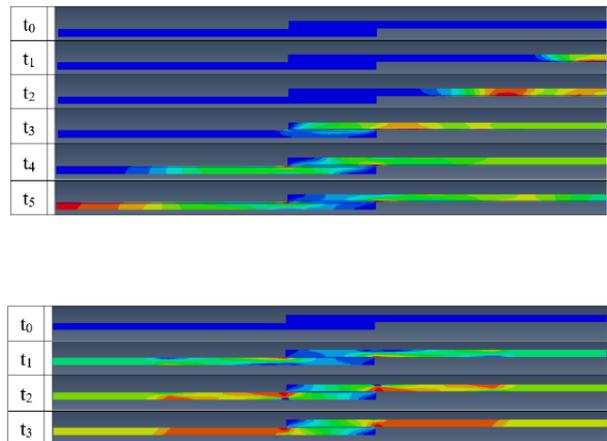


Figura 47 - Propagação da carga nos provetes [67]

Em relação aos provetes fabricados com substratos similares de PRFC, verificaram que há um aumento notável de absorção de energia em condições de impacto, que podem resultar de uma combinação de fatores. Enquanto o adesivo e a matriz de PRFC se tornam mais resistentes e mais flexível com a temperatura, o fenómeno do deslizamento por fricção da fibra de carbono dentro da matriz durante o processo de delaminação pode ser responsável por uma parte significativa da energia absorvida.

Por outro lado, os alores de energia absorvidos em função da taxa de deformação e das temperaturas de teste (BT, TA E AT), para JSSs fabricadas usando uma combinação diferente de substratos (Al 5754-H22 (Al 1.5), Al 6060-T6 (Al 2.0) e PRFC) são apresentados nas seguintes figuras.

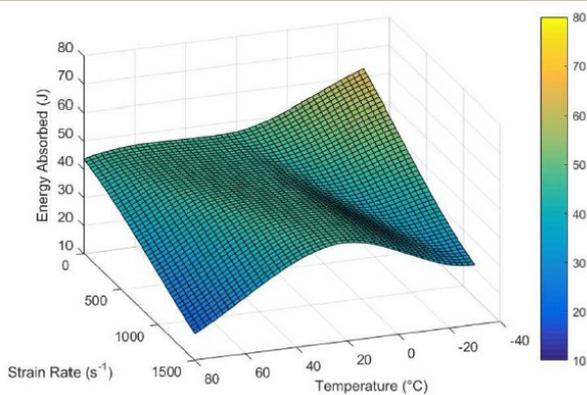


Figure 26 - Energy absorbed by SLJs with Al 5754-H22 (Al 1.5) + CFRP dissimilar substrates as function of temperature (LT, RT and HT) and strain rate.

Figura 48 - Valores de energia absorvido em função da taxa de deformação e temperatura de ensaio para provetes fabricado com AL.15 + PRFC [67]

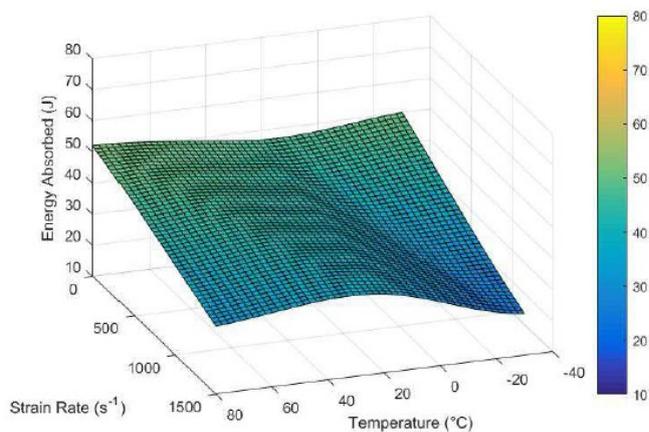


Figura 49 - Valores de energia absorvido em função da taxa de deformação e temperatura de ensaio para provetes fabricado com AL.2.0 + PRFC [67]

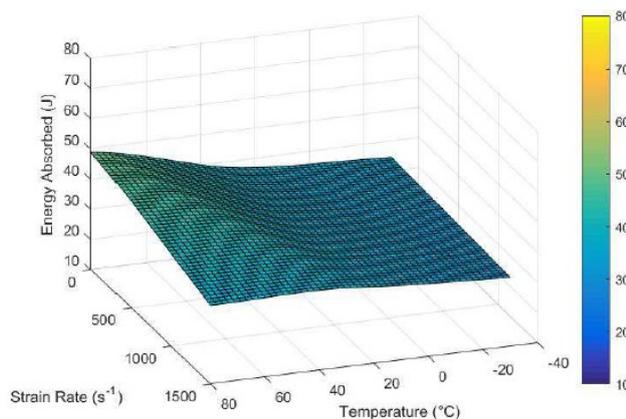


Figura 50 - Valores de energia absorvido em função da taxa de deformação e temperatura de ensaio para provetes fabricado com AL 1.5 + AL 2.0 [67]

Em relação às JSS com substratos diferentes, para a combinação

de alumínio Al 6060-T6 (Al 2.0) + PRFC, o comportamento encontrado é consistente com o apresentado por JSS com substratos semelhantes de Al 6060-T6. Nestes casos, menor energia é absorvida para condições quase-estáticas, uma vez que apenas o alumínio Al 6060-T6 (Al 2.0) tem tendência a deformar-se significativamente. O pico mais baixo de energia absorvido pelo impacto é observado em condições de BT, devido ao modo de falha, delaminação do PRFC. Juntas com substratos diferentes de alumínio (Al 5754-H22 (Al 1.5) e Al 6060-T6 (Al 2.0)) oferecem forte dependência da BT em relação à energia absorvida. Juntas desiguais com substratos de PRFC demonstraram ser ligeiramente mais sensíveis à temperatura, embora o efeito tenha sido muito menos pronunciado do que nas JSS realizadas com substratos de PRFC

Este artigo teve como principal finalidade caracterizar juntas adesivas quando colocadas sob o efeito de cargas atípicas. Para esse fim, umas avaliações dos efeitos das espessuras do adesivo sobre o desempenho mecânico das juntas foram realizados ensaios a juntas de sobreposição simples com condições de cargas quase-estáticas e fadiga de impacto.

Os impactos cíclicos foram induzidos usando uma máquina de teste de impacto de queda de peso, para obter os diagramas característicos de vida em fadiga de impacto. As evoluções dos parâmetros dinâmicos foram analisadas através da resistência residual, tempo de contato com impacto e degradação da rigidez. Realizaram os testes para todas as espessuras de adesivos.

Bautista et al.

[70]

Os provetes destes ensaios foram fabricados com manta de fibra de vidro em fase dispersa e uma resina epóxi como fase. Os laminados foram empilhados usando o procedimento de *lay-up* com oito camadas e uma sequência de $\pm 45^\circ$. O adesivo adotado é um composto de epóxi e uma substância de enchimento de fibra de algodão, o que provoca um aumento da viscosidade permitindo assim um melhor controlo das espessuras pretendidas.

A geometria de cada JSS seguiu o padrão apresentado na norma ASTM D5868. Assim, obtiveram provetes com 2,54 mm de largura, 177,8 mm de comprimento e um comprimento de sobreposição de 2,54 mm com um raio de 45° . Fabricaram provetes com três espessuras de adesivo, 3,18 mm; 6,35 mm e 12,70 mm.

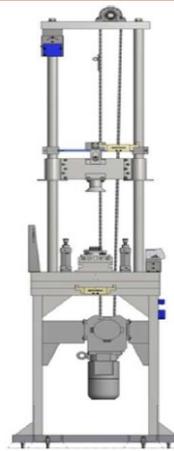


Figura 51 - Máquina DWIT [70]

Os testes de impacto cíclico, foram realizados com a máquina DWIT, apresentada na figura acima. Esta máquina possui um dispositivo de impacto no qual as amostras são colocadas. A força de impacto é medida através de quatro células de carga, localizadas na parte superior. Os impactos são provocados por um martelo em queda livre e o seu deslocamento é medido com um sensor laser.

Após todos os testes, os autores constataram a resistência à tração de cinco provetes para cada fator de mistura. A proporção de mistura de 100: 20 aumentou a força do adesivo em 12,8% em comparação à proporção de mistura de 100: 16. Além disso, a proporção de mistura de 100: 20 aumentou a força do adesivo em 7,7% em comparação com a proporção de mistura de 100: 24. Este resultados são apresentados na figura

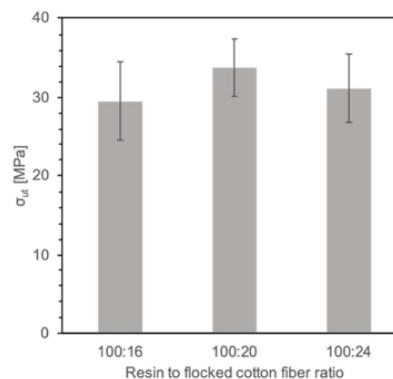


Figure 4. The adhesive tensile strengths

Figura 52 - Resistência à tração das diferentes proporções no fabrico do adesivo [70]

Depois da realização dos testes em condições quase-estáticas às

JSS obtiveram informação da carga de rotura. Foram testadas cinco amostras para cada espessura de adesivo. Constataram que o aumento da espessura da ligação adesiva provoca a diminuição da força. Para os 3,18 mm a carga média final foi de 3300 N \pm 155 N. Além disso, para os 6,35 mm a carga média final foi menos 27% apresentando um valor de 2409 N \pm 168 N e para amostras de 12,70 mm, a média final carga foi 58% menor que a carga média final das amostras de 3,18 mm e 43% menos que a carga média final dos 6,35 mm, cujo valor obtido foi de 1371 N \pm 86 N.

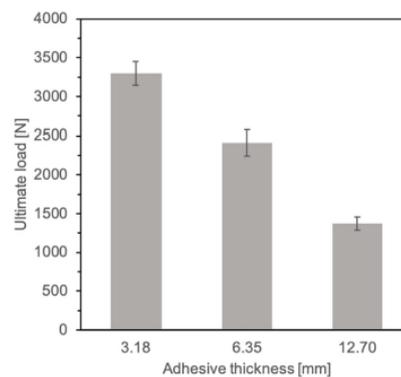


Figure 6. The ultimate loads of the SLJ specimens

Figura 53 - Carga de rotura para as diferentes espessuras de adesivo [70]

Devido a limitações do teste de impacto, a massa do peso teve de ser alterada para cada tipo de amostra testada. Assim as JSS com diferentes espessuras foram testadas sob diferentes taxas de deformação e massas. Concluiu-se que os efeitos da espessura do adesivo foram notórios constatando que a resistência diminuiu devido a redução da rigidez do provete e que os momentos aplicados aumentavam devido a este aumento de espessura. Também finalizaram que as curvas de impacto-fadiga curvas de vida dos provetes devem ser apresentadas no que diz respeito ao momento linear pois em relação à energia potencia, esta é suscetível a mudanças de massa e taxas de deformação. As mesmas energias potenciais provocam diferentes momentos lineares. Além disto, altas taxas de deformação causam falhas nas amostras após poucos impactos.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo serão apresentados dois métodos de estudo, experimental e numérico. Na parte experimental e numa fase inicial são descritos os procedimentos efetuados, tais como o fabrico das juntas, colagem dos aderentes, obtenção dos provetes e ensaios de impacto. Posteriormente são expostos e analisados os resultados adquiridos experimentalmente. Em relação à parte numérica, esta como referido acima foi realizada no *software* Abaqus® utilizando o MEF.

3.1 Trabalho experimental

Para a realização desta tese, foram realizados ensaios de impacto de JSS com dois tipos de adesivos e com diferentes L_0 . Assim, neste capítulo é efetuada a comparação dos resultados obtidos experimentalmente entre juntas com diferentes adesivos para cada L_0 e de seguida são observados e comentados os diferentes modos de rotura e relacionados com as características dos diferentes adesivos. Estes ensaios permitiram obter as curvas $P-\delta$, a resistência máxima e a o deslocamento máximo.

3.1.1 Geometria e dimensões das juntas

A geometria e dimensões das juntas foram previamente definidas e posteriormente as juntas foram fabricadas de modo a obter o mais próximo do definido. A Figura 54 representa explicitamente a geometria e dimensões para a JSS, cujos parâmetros geométricos são: comprimento total dos provetes (L_t), espessura do substrato (t_p), espessura do adesivo (t_A) e comprimento de sobreposição (L_0). No âmbito deste trabalho foi efetuado um estudo para os diferentes valores de L_0 : 12,5 mm; 25 mm e 50 mm.

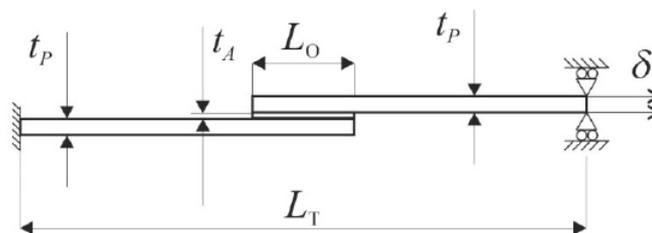


Figura 54- Geometria dos provetes utilizados, JSS [71]

Para uma melhor compreensão as dimensões referidas acima são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6 - Dimensões das JSS

Parâmetro	Valor [mm]		
L_o	12,5	25	50
t_p	3,0	3,0	3,0
t_A	0,2	0,2	0,2
L_t	180,0	180,0	180,0

3.1.2 Materiais utilizados

Neste subcapítulo são especificados todos os materiais utilizados no trabalho experimental, ou seja, os aderentes e os adesivos. É apresentada uma análise detalhada das suas propriedades mecânicas mais significativas para esta tese.

3.1.2.1 Aderentes

O material empregue como aderente para todas as juntas consiste no compósito PRFC. Na Tabela 7 podem ser consultadas as propriedades elásticas ortotrópicas do PRFC.

Tabela 7 - Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP [72]

Compósito CFRP					
E_1 [MPa]	1,09e5	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

3.1.2.2 Adesivos

Para a realização deste trabalho foram usados dois adesivos: Araldite® AV138 e o SikaForce® 7752 que são descritos neste tópico.

Araldite® AV138

O Araldite® AV138 com o endurecedor HV 998 é um sistema epóxico bi-componente, que quando combinados, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. Este adesivo é do tipo frágil. A preparação deste adesivo foi realizada na seguinte na razão de 100g de resina para 40g de endurecedor. O emprego deste adesivo é realizado de forma manual e com o auxílio de uma espátula. Este adesivo apresenta diversas vantagens, tais como [73]:

- Baixa emissão de gases e perda de voláteis;
- Excelente resistência química;
- Temperatura de cura acima de 5°C;
- Resistência a temperatura até 120°C;
- Boa capacidade de preenchimento e baixo escoamento.

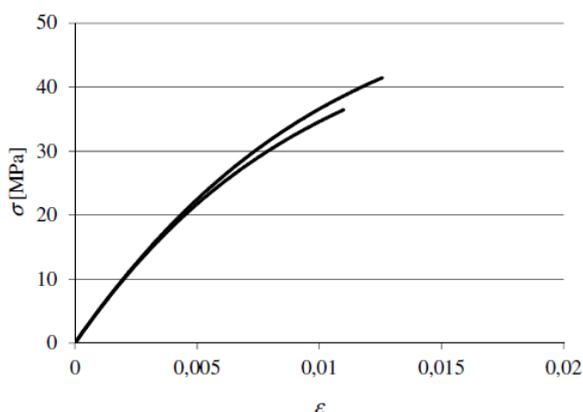


Figura 55- Curvas σ - ϵ dos provetes maciço do adesivo Araldite® AV138 [74]

Na Figura 55 estão apresentadas as curvas σ - ϵ dos provetes maciços submetidos à tração, as quais foram obtidas experimentalmente. As propriedades mecânicas e de fratura mais importantes estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138, em condições estáticas [74, 75]

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 [MPa]	$1,56 \pm 0,01$
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 [75]	
^b valor do fabricante	

3.1.2.2.1 SikaForce® 7752

O SikaForce® 7752 é um adesivo estrutural que tem como base poliuretano estrutural tixotrópico e é constituído por dois ingredientes, sendo eles a resina e o endurecedor. Este adesivo caracteriza-se por possuir uma estrutura estável e flexível, confere uma resistência térmica e uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento (Tabela 9). Para este adesivo podem-se destacar as seguintes vantagens [73]:

- Resistência ao impacto;
- Resistência ao envelhecimento;
- Cura à temperatura ambiente;
- Excelente flexibilidade a baixas temperaturas;
- Funciona como retardador de chamas.

Tabela 9 - Propriedade do adesivo SikaForce® 7752, em condições estáticas [76]

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de Young, E [GPa]	0,49 ± 0,09
Coeficiente de Poisson, ν^b	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24 ± 0,48
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,48 ± 0,25
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	19,18 ± 1,40
Módulo de elasticidade transversal, G [MPa]	0,19 ± 0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16 ± 1,14
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17 ± 0,64
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	54,82 ± 6,38
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	2,36 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41 ^a
^a valores estimados na referência [75]	
^b valor do fabricante	

3.1.3 Fabrico das juntas

Para a execução dos provetes finais são fabricadas placas de laminados compósitos que posteriormente são cortadas de modo a obter provetes com as dimensões finais. Assim, o fabrico das placas deu-se de acordo com os seguintes passos:

1. Recolher o rolo do compósito de carbono-epóxico do armazenamento a baixa temperatura ($T=-18^\circ\text{C}$), colocando em repouso durante alguns minutos à temperatura ambiente.
2. Após dimensionar as folhas de carbono-epóxico (300×300 mm) efetuou-se o corte das mesmas. Para este trabalho, a sequência de empilhamento necessária é de 0° para todas as camadas.
3. De seguida empilham-se as várias camadas obedecendo à sequência de empilhamento previamente definida. Após a colocação de cada camada de folha de carbono-epóxico, é aplicada pressão na superfície com a ajuda de uma espátula para retirar possíveis bolhas de ar e facilitar a adesão entre camadas.
4. Posteriormente ao término da colocação e empilhamento das camadas necessárias para o laminado, o conjunto é revestido com um filme desmoldante em Teflon e selado com fita adesiva resistente a altas temperaturas, que irá impedir a fuga de resina quando este for submetido ao processo de cura na prensa.

- Relativamente à cura das placas, é necessário colocá-las na prensa de pratos quentes para serem submetidas a um ciclo térmico sendo a pressão e temperatura os parâmetros a controlar. Neste processo a temperatura aumenta a uma taxa de $4^{\circ}\text{C}/\text{minuto}$, causando uma diminuição da viscosidade da resina epóxida, que escorre e reveste uniformemente as fibras de carbono. Quando a temperatura atinge os 130°C ocorre a polimerização da resina. A fase estável do processo ocorre durante 120 minutos com uma temperatura de 130°C e 2 bar de pressão, de acordo com a Figura 56.

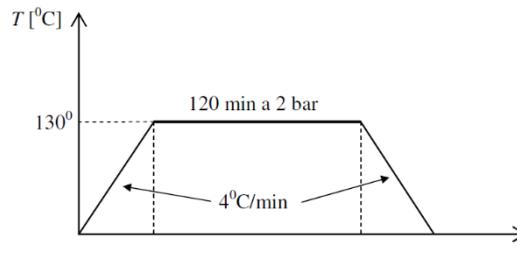


Figura 56 - Ciclo térmico aplicado

- Após o ciclo térmico as placas são retiradas da prensa.
- Depois do fabrico das placas necessárias seguiu-se o corte para obter os provetes com as dimensões finais. Para tal, utilizou-se uma serra de disco adiamantado. Para facilitar o corte dos provetes, preparou-se um gabari que garantiu a largura de 15 mm. Após efetuou-se cortes transversais para se obter 115 mm de comprimento.



Figura 57 - Antes e depois da limpeza com o auxílio de uma lixa

- Recorreu-se ao auxílio de barras de apoio para fixar e alinhar os substratos (Figura 58), assim como colocar fio de pesca calibrado com diâmetro de 0,2 mm nas extremidades da zona de sobreposição para garantir uma espessura uniforme de adesivo (Figura 59).



Figura 58 - Provetes alinhados e com os grampos de pressão



Figura 59 - Fio de pesca calibrado com 0,2 mm de diâmetro

9. Após alinhamento e fixação dos aderentes na barra de apoio, efetuou-se a aplicação do adesivo na face de colagem de um dos aderentes. Esta fase foi efetuada de forma meticulosa para manter o alinhamento dos aderentes. De seguida, colocaram-se grampos na zona de sobreposição para, através de pressão, garantir o valor de espessura da camada adesiva inicialmente pretendida (t_A), resultando assim no vazamento do adesivo em excesso. Finalizado, todo este processo, os provetes ficam em processo de cura, à temperatura ambiente, durante uma semana.
10. Posteriormente, e os após provetes já estarem curados, procedeu-se à remoção do excesso de adesivo numa máquina de furar de bancada com uma ferramenta conhecida por mó. É de notar, que este processo foi efetuado com cuidado de modo a remover apenas o excesso e não partes dos substratos. Além disto, é importante realizar esse processo, visto que o excesso de adesivo poderá ter influência na resistência da junta adesiva.

3.1.4 Ensaio das juntas

Posteriormente à realização e preparação das juntas, realizou-se o ensaio de impacto sob as mesmas. Para tal utilizou-se um equipamento Rosand® Instrumented Falling Weight Impact Tester type 5 HV. O ensaio de impacto com o uso deste mecanismo consiste na queda de um peso que por sua vez transfere a energia do impacto para a amostra em avaliação.

O provete é posicionado no equipamento na vertical e o aderente superior é retido por uma amarra e é fixo com um parafuso. Para garantir um correto alinhamento vertical e reduzir a possível existência de cargas excêntricas recorre-se ao auxílio de um calço. O peso também guiado de modo a garantir um alinhamento correto no instante do impacto.

Nestes ensaios, pretende-se obter uma energia de impacto de 40 J. Para tal se verificar, utilizou-se a equação seguinte, da qual se retira a altura de queda do peso. Visto que nos instantes iniciais do ensaio o peso libertado apenas tem energia potencial e no momento do impacto apenas tem energia cinética, considerando que as perdas durante o trajeto não são significativas. Então consideração que há completa transformação de energia potencial gravítica para energia cinética.

Na equação abaixo, E representa a energia de impacto aplicada à junta, m é a massa do peso colocado ao aderente inferior, g corresponde à aceleração da gravidade e por fim h_0 representa a altura de queda do peso.

$$E = m \times g \times h_0 \quad (2)$$

Porém, na modelação numérica não se considera a distância de queda necessária para obter 40 J de energia. Assim através da equação obtém-se a velocidade exigida no momento do impacto. Portanto, a velocidade para estes ensaios é de 1,75 m/s.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2 \quad (3)$$

Em que v é a velocidade do peso no momento do impacto.

3.1.5 Resultados obtidos e discussão

No capítulo seguinte são apresentadas as curvas $P-\delta$ para as diferentes JSS em função de L_0 e adesivo. É igualmente efetuada uma análise dos dados registados experimentalmente na forma de gráficos de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 .

3.1.5.1.1 AV138

Para o adesivo AV138 são apresentadas na Figura 60 as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente em função de L_0 . É possível observar um comportamento com grandes oscilações de P em todas as curvas obtidas, o que se considera normal visto que se trata de ensaios em regime dinâmico. Para os diferentes L_0 testados constatam-se diferenças para os valores de deslocamento máximo, mas tal, como referido acima, além de serem ensaios em condições dinâmicas, foram realizados em condições experimentais onde poderá haver menor precisão na leitura dos deslocamentos máximo. Apesar destas diferenças, para cada L_0 as forças máximas são similares [69].

Após examinar as curvas P - δ , verifica-se que a deformação à rotura da JSS aumenta de $L_o=12,5$ mm para $L_o=25$ mm, porém o mesmo não se verifica após testar as JSS com $L_o=50$ mm. Constatam-se valores idênticos de deformação à rotura para os L_o de maior dimensão, comprovando assim que o adesivo AV138 apesar de ser considerado um adesivo rígido perde desempenho com o aumento do comprimento de sobreposição.

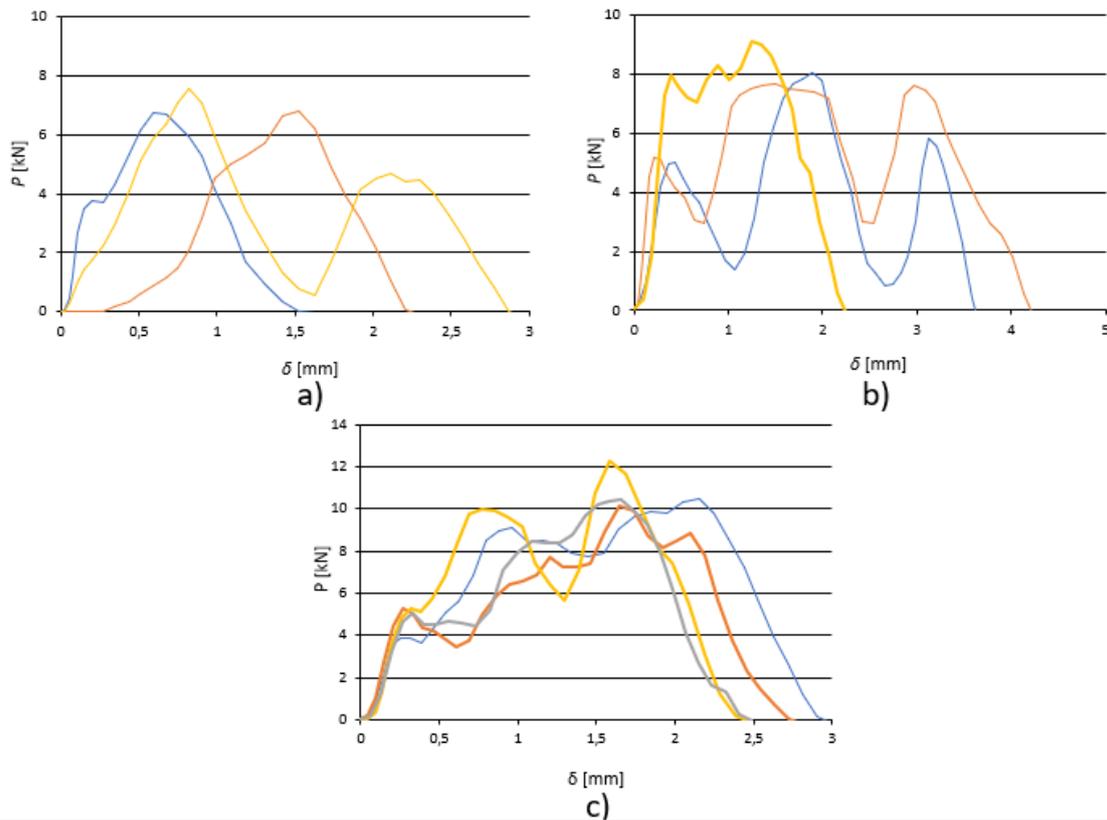


Figura 60 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSS) para o Araldite® AV138, com $L_o=12,5$ mm (a), $L_o=25$ mm (b), $L_o=50$ mm (c)

3.1.5.1.2 SikaForce® 7752

Na Figura 61 são expostas as curvas P - δ registadas experimentalmente para as JSS com o adesivo SikaForce® 7752 e para os diferentes valores de L_o . Do mesmo modo que o adesivo AV138, verifica-se um comportamento oscilatório, no entanto as forças máximas obtidas para cada L_o testado também são semelhantes entre L_o . De notar que para o $L_o=25$ mm os valores de deslocamento registados são bastantes similares.

Bem como o desempenho do adesivo AV138, com o aumento de L_o verifica-se incremento da força máxima e da deformação à rotura. Contudo, o adesivo SikaForce® 7752, ao contrário do que acontece com o caso anterior, oferece maior resistência para L_o de maiores dimensões. Tal pode-se verificar, pois observa-se um aumento de maior magnitude de deformação à rotura entre o $L_o=25$ mm e $L_o=50$ mm.

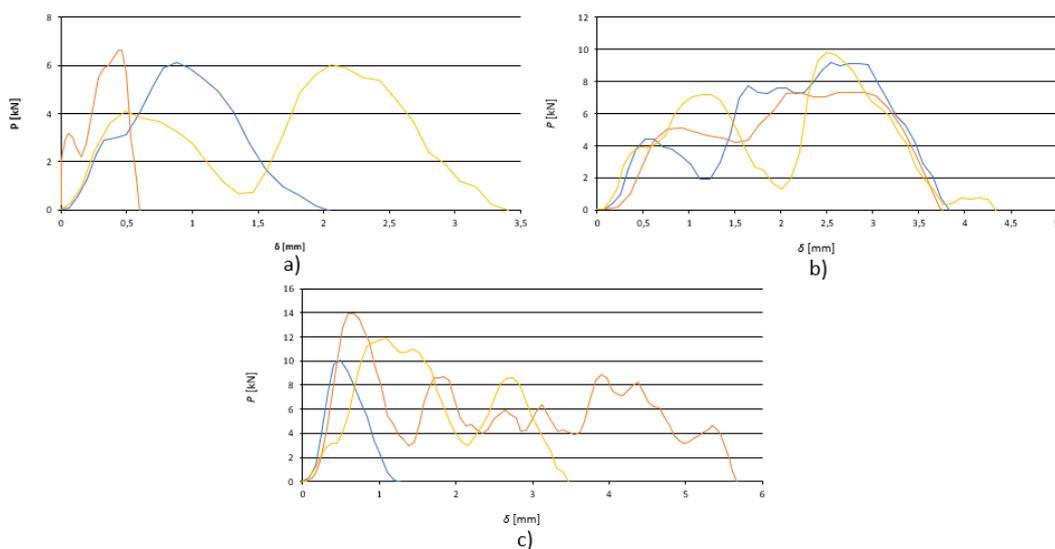


Figura 61 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSS) para o SikaForce[®] 7752, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=50$ mm (c)

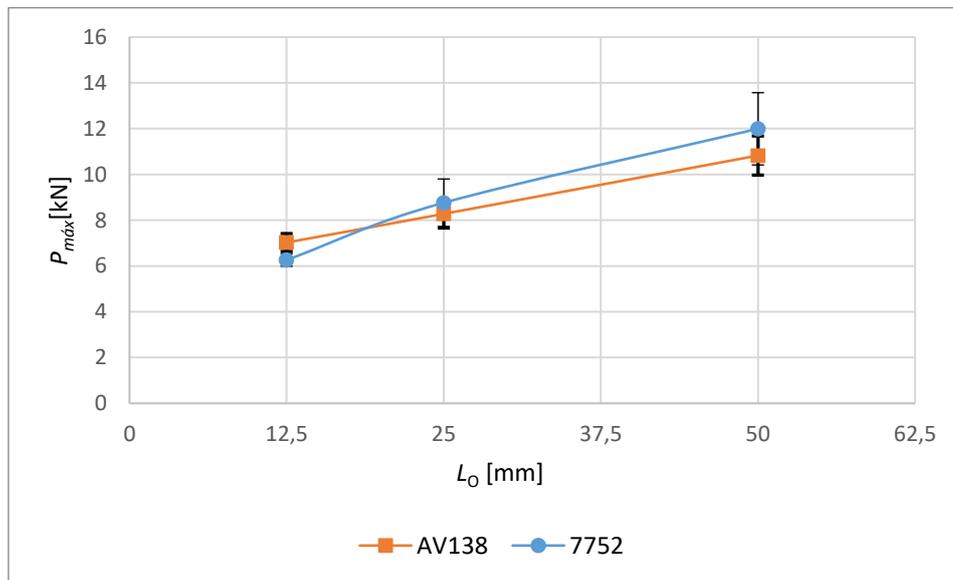
No geral, a força máxima observada aumenta a cada incremento de L_0 , porém estes valores são menores do que o adesivo AV138 sob as mesmas circunstâncias. As curvas P - δ corroboram o comportamento flexível típico do adesivo SikaForce[®] 7752, mostrando deslocamentos máximos superiores ao a do adesivo AV138.

3.1.6 Comparação de resultados

Na Tabela 10 são apresentados os valores registados de força máxima e a diferença percentual para ambos os adesivos testados em função de L_0 . Como já realçado anteriormente, a $P_{máx}$ aumenta a cada incremento de L_0 porém, este aumento é de maior magnitude para o adesivo SikaForce[®] 7752 (30 % para $L_0=25$ mm e 91% para $L_0=50$ mm) do que para L_0 reduzidos. Então este adesivo apresenta melhor desempenho para as JSS com L_0 de maiores dimensões. Por outro lado, o adesivo AV138 para JSS com L_0 de menor dimensão apresenta uma força máxima superior, devido ao seu perfil rígido – frágil. Com o incremento de L_0 a força máxima aumenta, contudo tal não se verifica com a mesma proporção que o SikaForce[®] 7752 – 17% para $L_0=25$ mm e 53% para $L_0=50$ mm. Para o adesivo AV138 é expectável que apresente melhor rendimento com geometria de JSS para L_0 com dimensões menores. Com a finalidade de clarificar a diferença de desempenho para os diferentes L_0 trataram-se os dados registados de modo a obter um gráfico. A Figura 62 possibilita a visualização da tendência das JSS fabricadas com o adesivo AV138 a diminuir o desempenho. De igual forma, verifica-se a melhoria de desempenho para as JSS fabricadas com o adesivo SikaForce[®] 7752.

Tabela 10 - $P_{m\acute{a}x}$ e aumento percentual em função de L_0

SikaForce® 7752			AV138	
L_0 [mm]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	Diferença
12,5	6,26	-	7,03	-
25	8,76	30%	8,28	17%
50	11,99	91%	10,82	53%

Figura 62 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os adesivos testados em função de L_0

3.2 Trabalho numérico

Nesta dissertação, para além da análise experimental, também se efetuou um estudo das juntas adesivas através do MEF e MDC de modo a retirar previsões dos comportamentos das juntas quando sujeitas a uma carga de impacto. Neste capítulo, são descritos todos os parâmetros introduzidos para se efetuar uma simulação numérica.

3.2.1 Condições da análise numérica

Para efetuar a simulação numérica pelo MEF/MDC, recorreu-se ao *software* Abaqus®. Com o intuito de simplificar o modelo e conseqüentemente reduzir o número de elementos de malha, o modelo foi produzido em 2D com as dimensões descritas no capítulo 3.1.1.

De modo a simular a massa do equipamento do ensaio experimental, foi adicionada uma secção suplementar no seguimento do aderente superior (Figura 63).

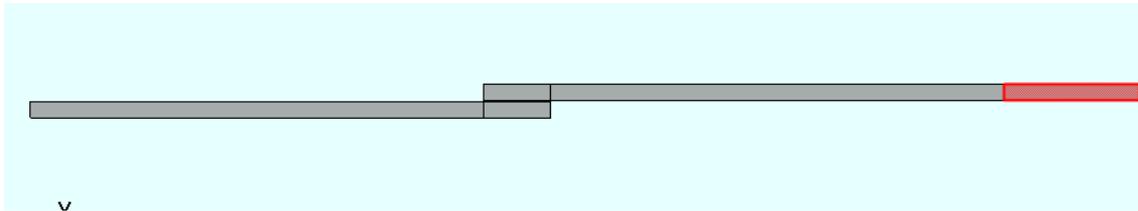


Figura 63 - Representação da secção do peso

No campo *field outputs* foram pedidos os seguintes parâmetros: CSTRESS, LE, PEEQ, RF, S, SDEG, STATUS, U e V. É de salientar que partes destes parâmetros são bastante importantes para a análise dos resultados.

São exemplos desta importância os parâmetros RF e U, pois possibilitam na análise das curvas $P-\delta$, onde o parâmetro RF regista as reações a cada instante e o parâmetro U regista o deslocamento também a cada instante. As curvas $P-\delta$, como referido anteriormente permitem a análise da resistência da junta, dos deslocamentos, da influência dos diversos parâmetros, entre outros.

Além de RF e U o parâmetro PEEQ e o S são considerados também fundamentais para o estudo da carga de impacto sobre a junta adesiva, já que permitem identificar a deformação plástica e tensão equivalentes nos aderentes e sua localização. Não menos importante refere-se o parâmetro SDEG que fornece a informação sobre a degradação dos elementos coesivos, permitindo assim analisar visualmente a distribuição de carga na camada adesiva.

Para prosseguir com a análise numérica foi necessário criar os diferentes tipos de materiais, com a atribuição das propriedades respetivas que regem o seu comportamento. Estes materiais são alocados nas secções pretendidas, como é possível verificar na Figura 64. A secção verde corresponde ao material do adesivo e o cinzento corresponde ao material do substrato.

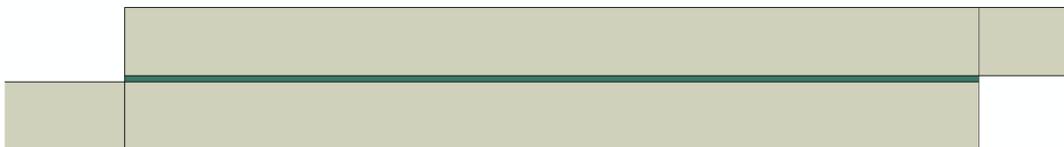


Figura 64 – Secções e materiais atribuídos no modelo 2D

No modelo utilizado foram utilizados dois tipos de elementos. Na Figura 65 é possível visualizar o controlo de malha, onde a amarelo está representada a secção do adesivo com um controlo de malha do tipo *sweep*, à qual foram atribuídos elementos coesivos do tipo COH2D4, duas dimensões e quatro nós. As restantes secções, ou seja, as secções dos substratos, foram modeladas com um controlo de malha estrutural, com a

escolha de elementos bidimensionais quadriláteros de estados plano de deformação, do tipo CPE4R.

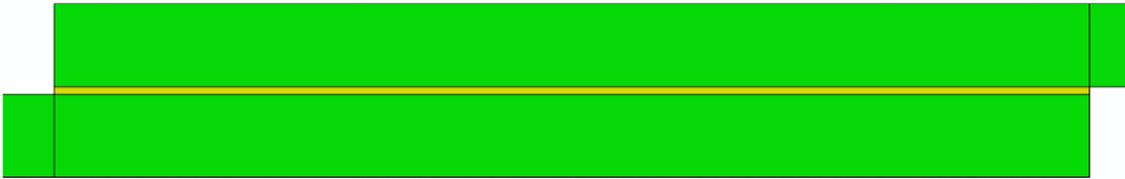


Figura 65 – Controlo de malha no modelo de validação

Em relação a dimensões da malha, foram aplicados diferentes comprimentos aos nós quadriláteros que constituem a malha. Na Figura 66 é possível observar diferentes comprimentos dos nós. Após a aplicação da malha obtiveram-se os seguintes valores de elementos na malha. Repare-se que para o desenvolvimento desta dissertação foram realizadas duas simulações para cada caso, de modo a retirar as curvas $P-\delta$ e as distribuições de tensões. Deste modo, para a análise de tensões foi necessário refinar - Figura 67 - a malha de modo a obter maior precisão nos resultados obtidos. Assim, a simulação realizada para retirar as tensões é a que necessita de um maior refinamento na malha para capturar de forma correta as concentrações de tensões expectáveis.

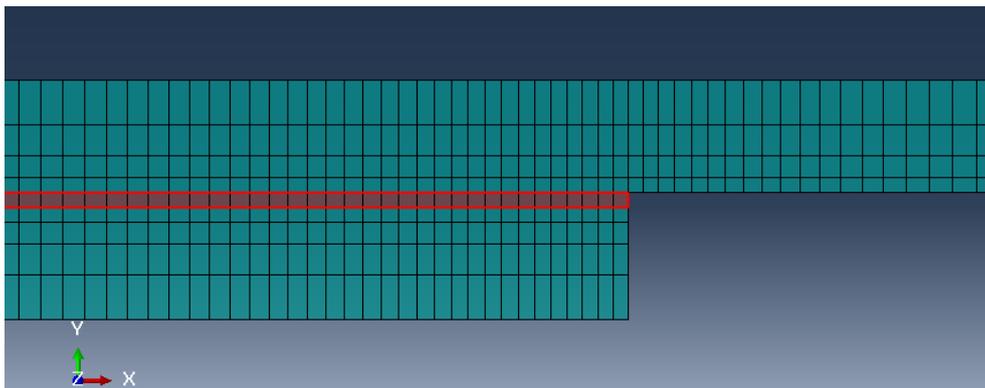


Figura 66 - Exemplo de malha obtida com diferentes comprimentos de elementos para a análise de resistência

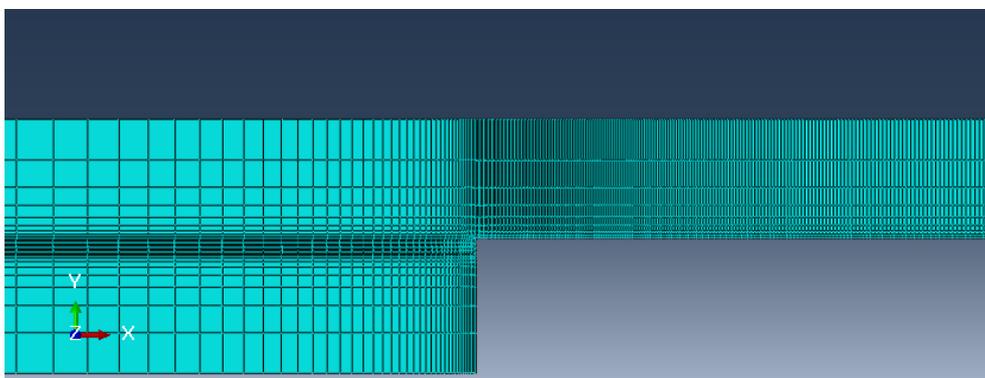


Figura 67 - Exemplo de malha obtida com diferentes comprimentos de nós para a análise de tensões

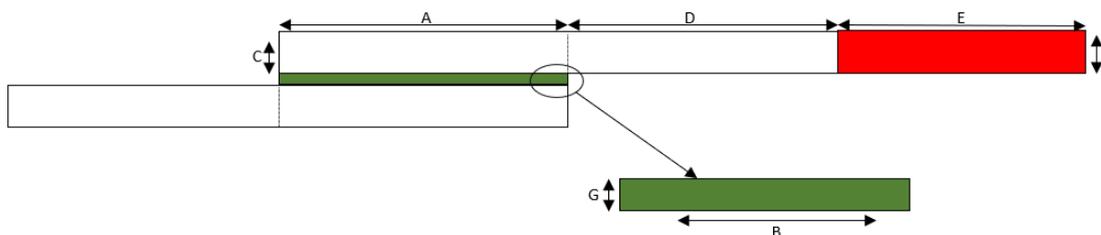


Figura 68 – Diferente refinamento utilizado na malha

A Figura 68 representa esquematicamente os diferentes locais de aplicação de diferentes comprimentos de nós que constituem a malha do modelo. Assim, para as arestas A e C, que se situam na zona do substrato que irá sofrer maior deformação, aplicou-se um comprimento de malha crescente e simétrico (*double bias*) com valores compreendidos entre 0,2 e 0,5 mm. Na zona do adesivo atribuiu-se, para a aresta G, apenas um nó. Por outro lado, para a aresta B, introduziram-se valores compreendidos de 0,2 e 0,5 mm e conjugados simetricamente (*double bias*). Na zona menos crítica da junta, para a aresta D utilizaram-se comprimentos de nós crescentes da esquerda para a direita com valores de 0,2 mm a 2 mm. Por fim na secção que representa a massa optou-se por valores de 2 mm para a aresta E. Por sua vez, para a aresta F foram introduzidos valores de comprimento de um modo crescente (cima para baixo) de 0,2 a 0,5 mm. Note-se que a junta é simétrica, pelo que o substrato inferior tem uma malha idêntica à malha do substrato superior. Além disto, a malha foi gerada de modo a que na zona crítica da junta, nomeadamente a camada adesiva, fosse mais refinada de modo a melhorar a precisão dos resultados obtidos. Por outro lado, e como já referido, para a segunda simulação alteraram-se os valores acima descritos de modo a refinar a malha, assim para as arestas A e C, aplicou-se valores entre 0,02 e 0,5 mm. Na zona do adesivo, atribuiu-se para a aresta, dez elementos. Para a aresta B aplicaram-se valores de 0,02 e 0,5 mm e conjugados simetricamente. Na zona D, os valores aplicados foram entre 0,02 e 2 mm. Por último os valores de espaçamento dos nós na aresta F estavam compreendidos entre 0,02 mm a 0,5 mm.

Tabela 11 - Quantidade total de elementos de malha do modelo

	Simulação para retirar distribuição de tensões	Simulação para retirar curvas $P-\delta$
	JSS	JSS
12,5 mm	26204	2910
25 mm	28640	3518
50 mm	33512	4754

Como já referido, o principal objetivo da previsão numérica é simular o ensaio de impacto, e para tal foram criadas condições fronteira e solicitações que têm como finalidade reproduzir o comportamento da junta quando sujeita a carga de impacto. Deste modo, impôs-se um encastramento na extremidade esquerda, bloqueando U_1 e U_2 , que correspondem aos movimentos de translação nos eixos X e Y, respetivamente, e também um bloqueio de UR_3 para conferir bloqueio da rotação em torno do eixo Z. Da mesma forma, na extremidade direita do aderente superior foi imposta uma restrição em U_2 , ou seja, no eixo Y. Esta última restrição foi colocada na extremidade oposta à ligação adesiva, junto ao contacto com a secção que representa a massa do ensaio experimental. É de notar que as dimensões e a densidade desta secção foram calculadas e introduzidas de a igualar a energia cinética aplicada. A energia cinética aplicada foi de 40J, e para obter este valor nos ensaios numéricos a densidade da secção foi devidamente calculada de modo a obter uma massa idêntica à aplicada nos ensaios experimentais. A Figura 69 descreve a situação descrita e apresenta a vermelho a massa do ensaio experimental.

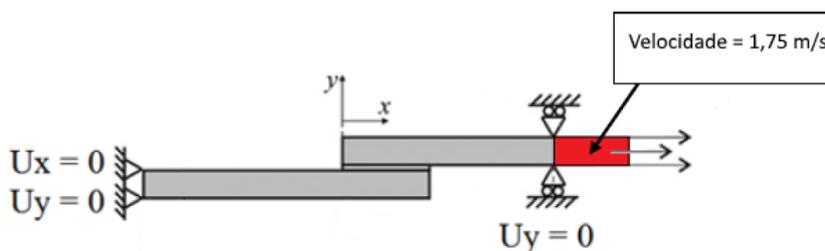


Figura 69 - Condições fronteira e solicitações aplicadas [77]

Para simular numericamente um ensaio de impacto, foi aplicado um campo de velocidade uniforme na secção apresentada também a vermelho.

A simulação numérica tem uma duração de ensaio de 5 ms. Os intervalos de tempo correspondentes a cada incremento foram controlados automaticamente pelo *software*, o que por sua vez garante que a duração desse intervalo para a velocidade de propagação de onda de impacto aplicado não exceda o comprimento de cada elemento. Assim, os *field outputs* foram parametrizados de modo a que a evolução temporal em representação gráfica seja feita em períodos de 50 μ s. Nas opções de *history outputs*, foi pedido o registo de informação como o deslocamento e as forças de reação a cada 100 incrementos. Recorreu-se à redução do número de registos para que o tratamento da informação fosse facilitado. A redução em 100 vezes, além de facilitar o tratamento da informação, também permitiu uma boa resolução para a identificação de picos de carga.

Para ser possível registar a carga a que o provete está sujeito a cada instante, foi criado o registo da soma das forças de reação na aresta correspondente ao encastramento. Por outro lado, para registo do deslocamento foi indicado o vértice inferior da interface entre a secção representativa da massa experimental e o aderente.

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 [33]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [30], linear parabólico [29], exponencial [31], polinomial [32] e trapezoidal [26]. 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 [34]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 70, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

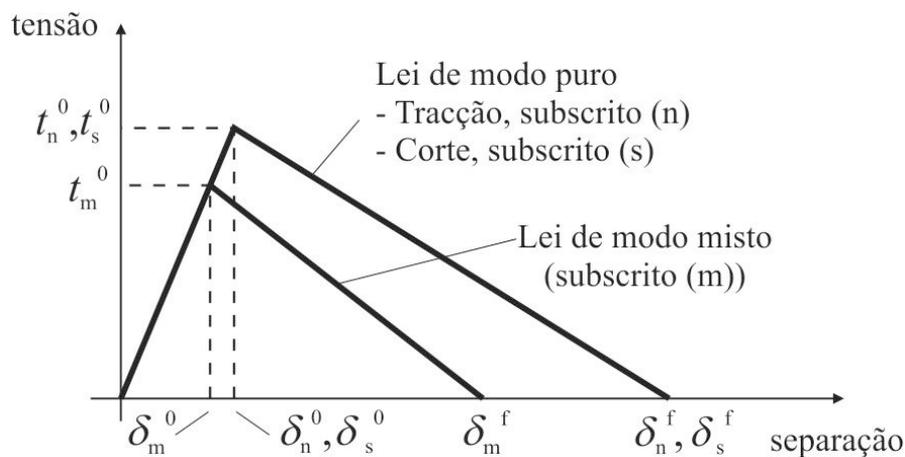


Figura 70 - Lei triangular do modelo de dano coesivo

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 [36]. 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 \mathbf{K}_{COH} , a qual relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{K}_{nn} & \mathbf{K}_{ns} \\ \mathbf{K}_{ns} & \mathbf{K}_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (4)$$

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

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (5)$$

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 [36]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1. \quad (6)$$

$\langle \rangle$ 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 [79]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 70), 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 70) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (7)$$

3.2.3 Determinação das propriedades dos materiais

No capítulo 3.1.2 estão apresentadas as propriedades estáticas dos adesivos em estudo, AV138 e SikaForce® 7752. Porém para a previsão de resistência ao impacto por método numérico é necessário constatar as propriedades em função da velocidade.

As propriedades em função da velocidade dos materiais aplicados no estudo numérico foram determinadas no decorrer do estudo de Silva [80] e podem ser observadas na Tabela 12. As propriedades para as velocidades de 1 mm/min e 100 mm/min foram determinadas através de ensaios experimentais. Para a velocidade de 105000 mm/min (1,75 m/s) resultam da extrapolação logarítmica a partir das propriedades de menor velocidade de ensaio.

Tabela 12 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [80]

Adesivo	Velocidade (mm/min)	t_n [MPa]	t_s [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
	1	41	30,2	0,35	4,9
AV138	100	49,1	36,2	-	-
	10500	70,2 (30) *	51,7 (22,1) *	0,35	4,9 (0,6) *

* valores estimados

Em contrapartida, para o adesivo SikaForce® 7752, os valores das suas propriedades em função da velocidade foram obtidos através do método inverso. Assim, pode ser consultada as propriedades obtidas na Tabela 13

Tabela 13 – Propriedades obtidas por método inverso

Adesivo	Velocidade (mm/min)	t_n [MPa]	t_s [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
7752	1	187	26,44	1,18	2,705

3.2.4 Estudo de JSS

Neste capítulo, apresenta-se o estudo numérico das JSS para os diferentes adesivos utilizados e para os diversos comprimentos de sobreposição. Deste modo, é possível observar os diferentes comportamentos das JSS com os diferentes parâmetros.

3.2.4.1 Distribuição de tensões

Como descrito anteriormente, nesta dissertação o comprimento de sobreposição representado nos gráficos de distribuição de tensões resulta da divisão da coordenada x pelo comprimento total de sobreposição. Assim, é possível observar e comparar a distribuição de tensões entre JSS com diferentes comprimentos de sobreposição. As tensões que se obteve resultam do quociente entre o valor de tensão efetiva sobre a tensão média de corte obtida para o valor de L_0 respetivo.

3.2.4.1.1 Araldite AV138

Na Figura 71 é apresentada a distribuição de tensões de corte da JSS com o adesivo AV138 para os L_0 testados. Para o valor de sobreposição de 50 mm observa-se o pior comportamento, registando-se um pico num dos extremos da camada adesiva. Por outro lado, para o comprimento de sobreposição de 12,5 mm observa-se o melhor desempenho, sendo que a tensão registada nos extremos da camada adesiva se

encontra abaixo dos restantes valores de comprimento de sobreposição. É de salientar que neste ensaio dinâmico, ao contrário do que acontece nos ensaios quase-estáticos, não se constata simetria na distribuição das tensões.

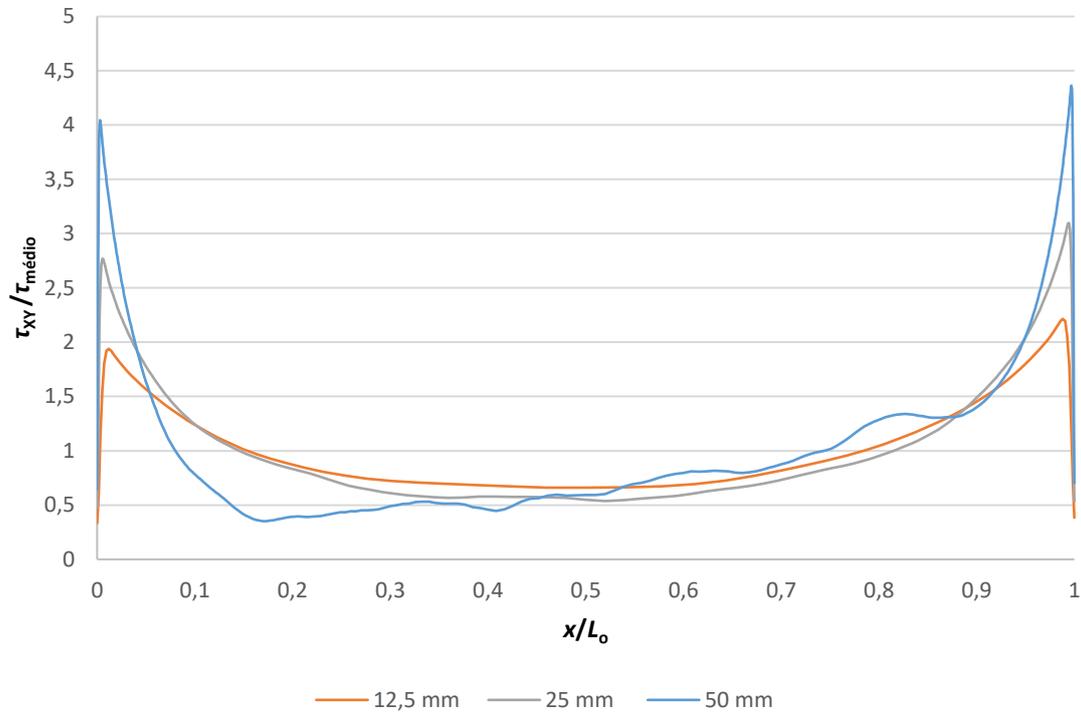


Figura 71- Distribuição de tensões τ_{XY} com o adesivo AV138

Por outro lado, as tensões de arrancamento com o adesivo AV138 são expostas na Figura 72. É de salientar que todas as dimensões de comprimento de sobreposição apresentam valores com distribuição aproximadamente simétrica à exceção da junta adesiva com $L_o=50$ mm. Para este caso, repara-se que uma das pontas da camada adesiva a concentração de tensões de arrancamento tem valores mais baixos. Como referido no parágrafo acima, também se observa assimetria e maior variação ao longo do L_o da JSS ao contrário do que acontece em ensaios quase-estáticos [81]. Também se observa um aumento da concentração e gradientes de tensão nas extremidades da camada adesiva, bem como se verifica nos casos estáticos [82].

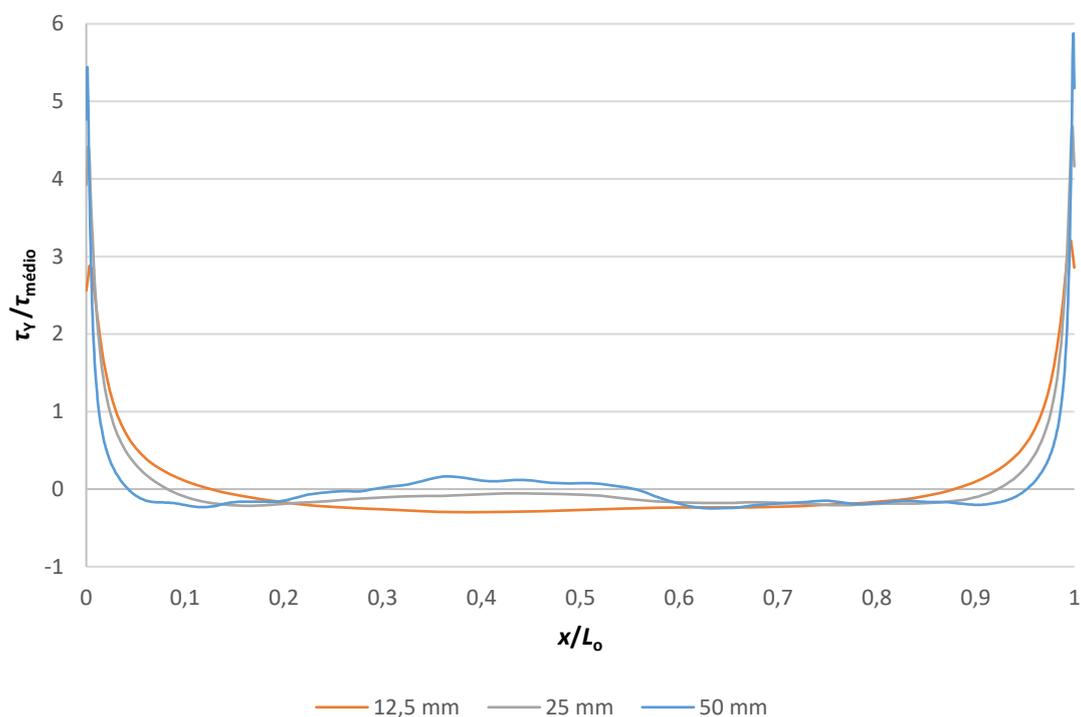


Figura 72 - Distribuição de tensões τ_y com o adesivo AV138

3.2.4.1.2 SikaForce® 7752

No mesmo âmbito, mas com um adesivo diferente, para o adesivo SikaForce® 7752 os resultados encontram-se expostos na Figura 73. Observa-se valores idênticos na distribuição de tensões de cortes para os $L_0=37,5$ mm e $L_0=50$ mm. O melhor desempenho é verificado no menor L_0 e a concentração de tensões aumenta nas extremidades da camada adesiva. Note-se que para todas as dimensões de L_0 testado, os picos anotados são de menor valor com o adesivo SikaForce® 7752 do que os valores registados com o adesivo AV138. Estas diferenças devem-se ao facto de se tratar de um adesivo com maior flexibilidade, ou seja, o próprio adesivo potencia uma distribuição mais uniforme. Assim, para este caso específico – adesivo dúctil – é constatado novamente uma assimetria das distribuições dado que se trata de um ensaio dinâmico.

O comportamento na distribuição de tensões de arrancamento para o adesivo SikaForce® 7752 está apresentado na Figura 74. Após análise do gráfico, repara-se que para o valor de $L_0=25$ mm, há registo de um pico com valor maior do que os restantes ensaios. Verifica-se através do gráfico situações de compressão e tração nas JSS provocado pela rotação da junta quando solicitada ao impacto.

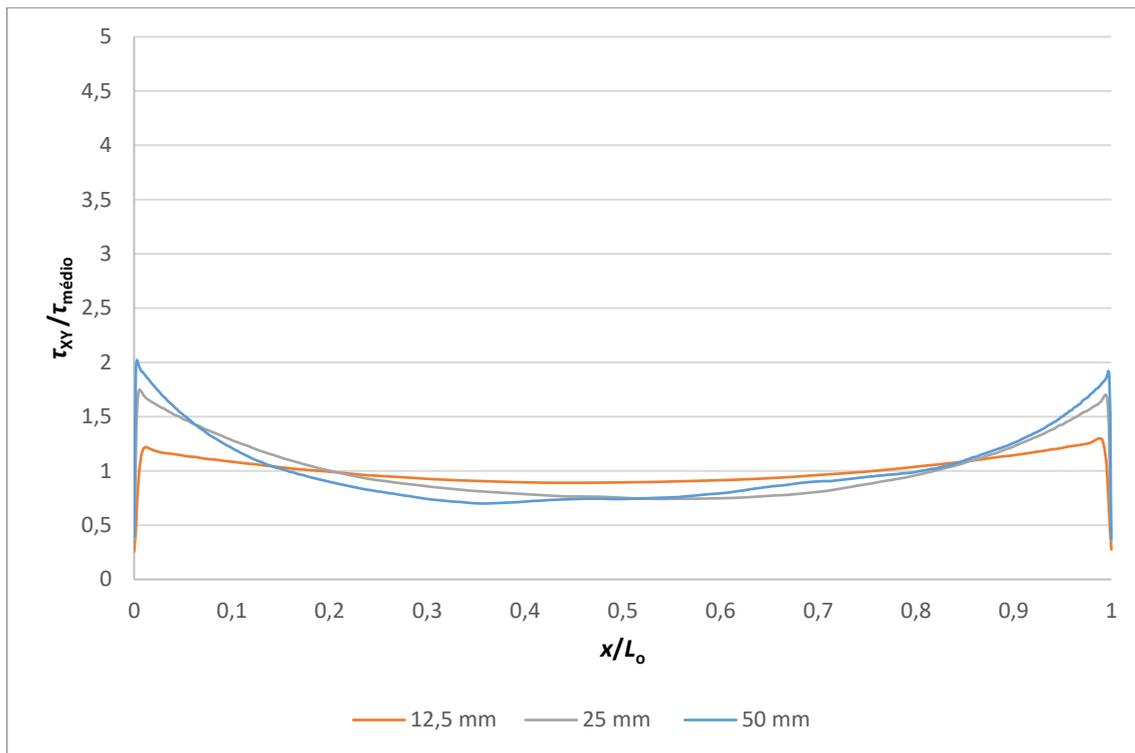


Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo SikaForce® 7752

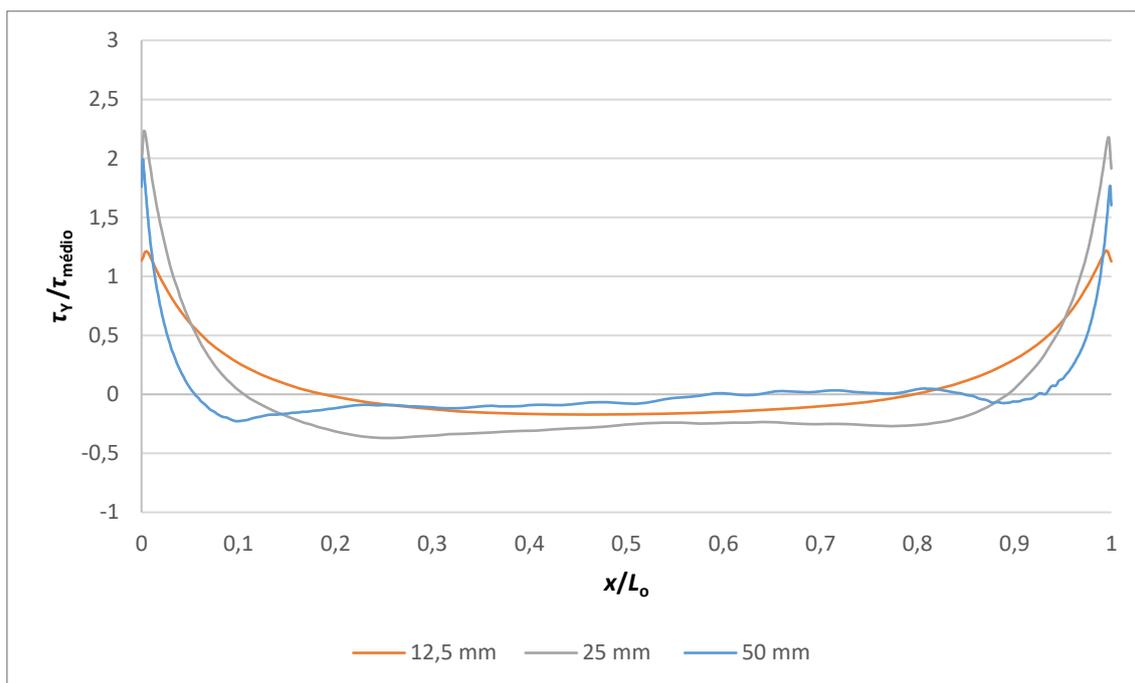


Figura 74 - Distribuição de tensões τ_y com o adesivo SikaForce® 7752

3.2.4.2 Previsão da resistência

Além da análise da distribuição de tensões de corte e arrancamento, nesta dissertação realizou-se o estudo da resistência das juntas para os diferentes L_0 e adesivo.

3.2.4.2.1 Araldite AV138

Assim, após o tratamento da informação obtida, na Figura 75 é possível observar as curvas $P-\delta$ para os diferentes L_0 com o adesivo AV138. Observa-se que a carga máxima e o deslocamento aumentam com o aumento de L_0 .

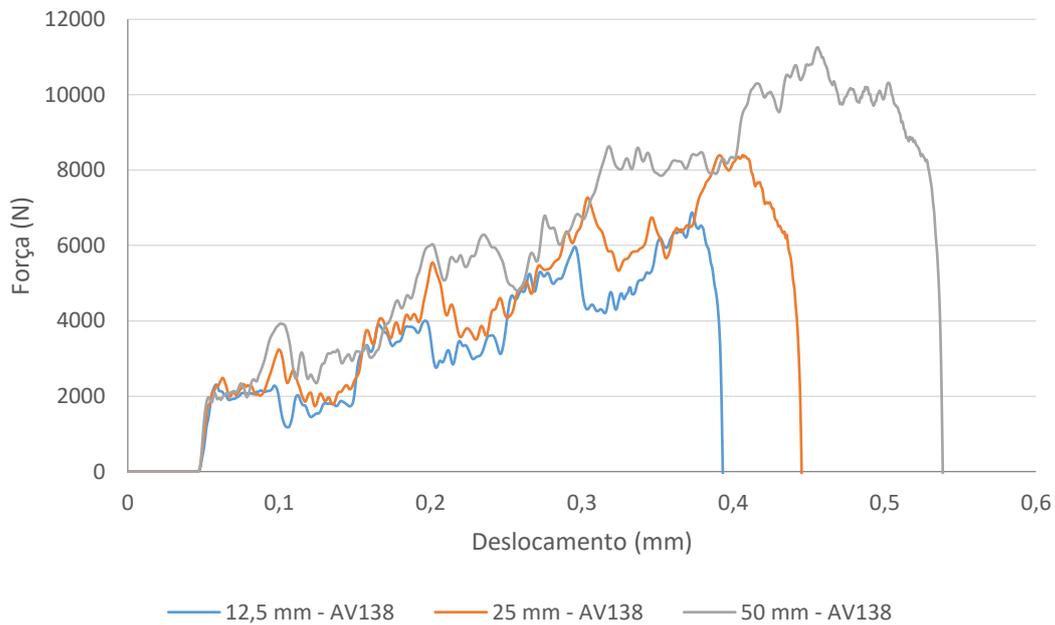


Figura 75 – Curva $P-\delta$ com o adesivo AV138 em função de L_0

Na Figura 76 estão expostos os valores de carga máxima e deslocamento para cada comprimento de sobreposição com o adesivo AV138. Pode-se constatar que o valor de carga máxima aumenta proporcional ao aumento de L_0 . Aliado a este aumento de resistência está o valor de deslocamento, que também aumenta até ao ponto de rotura.

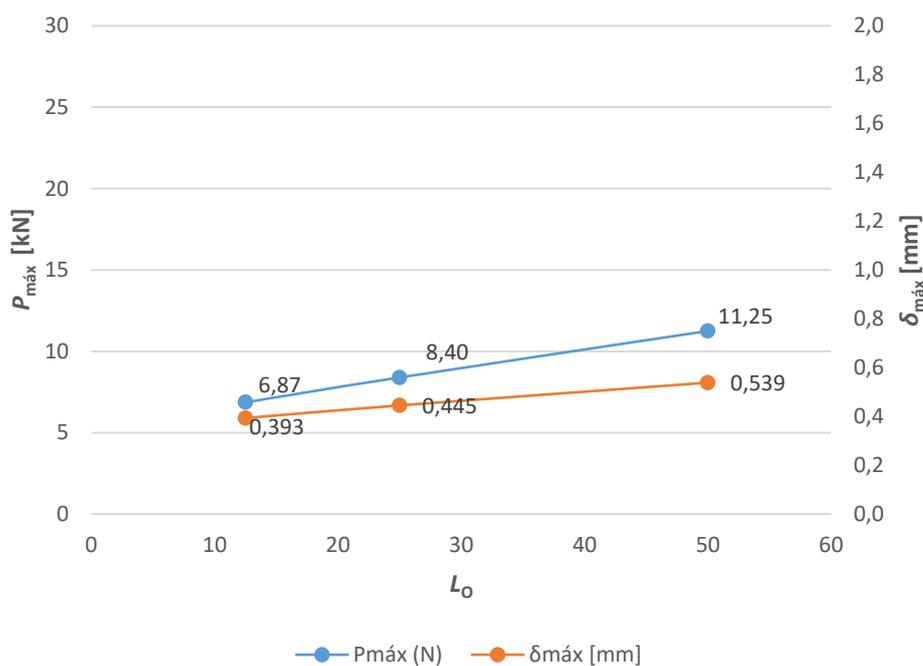


Figura 76 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de L_o

Tabela 14 – Efeito de L_o na carga máxima para o adesivo AV138

L_o [mm]	$P_{máx}$ [kN]	Diferença
12,5	6,8	-
25	8,4	22 %
50	11,3	64 %

Além da força máxima e deslocamento máximo, nesta dissertação também foi possível obter os valores de energia absorvidos pela JSS para cada L_o . Na Tabela 15 é apresentada a energia absorvida, que resulta do cálculo da área abaixo da curva $P-\delta$. O cálculo obteve-se através da ferramenta Excel.

Após observação dos valores, salienta-se que os mesmos aumentam a cada incremento de L_o . O aumento da energia absorvida para $L_o=25$ mm e $L_o=50$ mm comparado com $L_o=12,5$ m é de 46% e 146% respetivamente. Verifica-se que o aumento diminui de magnitude a cada incremento, pois como já referido o adesivo AV138 apresenta um comportamento típico de um material rígido-frágil.

Tabela 15 - Energia absorvida com o adesivo AV138

L_0 [mm]	E [J]	Diferença
12,5	1,3	-
25	1,9	46 %
50	3,2	146 %

3.2.4.2.2 SikaForce® 7752

Tal como para o adesivo AV138, após registo dos valores obtidos nos ensaios de JSS com SikaForce® 7752 tratou-se os valores de modo a obter as curvas $P-\delta$.

Note-se que, da mesma forma que o adesivo AV138, os resultados do adesivo SikaForce® 7752 apresentam carga aplicada crescente de acordo com o incremento do valor de L_0 (Figura 77). Em geral, as JSS com o adesivo 7752 tiveram um comportamento mais flexível, visto que a deformação na rotura é superior à do adesivo AV138.

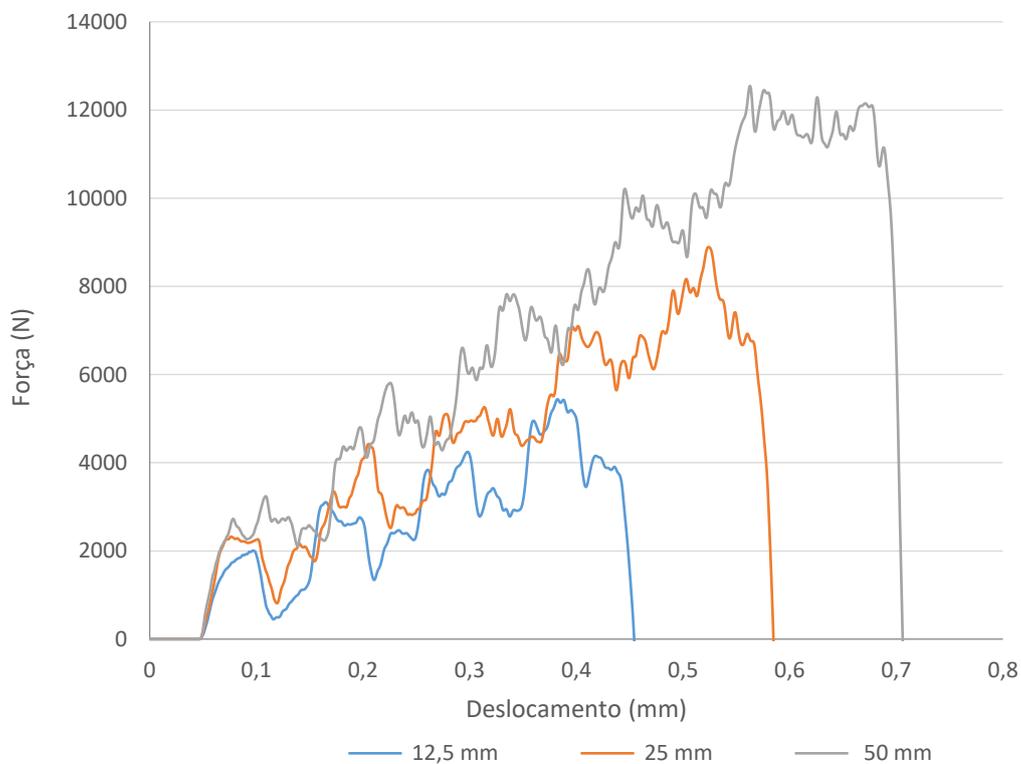


Figura 77- Curva $P-\delta$ com o adesivo SikaForce® em função de L_0

Na Figura 78 é apresentado os valores máximos para as JSS com o adesivo SikaForce® 7752. É de notar que não se verifica proporção direta no aumento dos valores de carga máxima e deslocamento máximo. Para $L_o=25$ e $L_o=50$ mm os valores de força máxima são superiores ao do adesivo AV138, devido ao seu perfil do tipo flexível. Além destas observações, repara-se que os o SikaForce® 7752 é aquele que maior incremento apresenta com os maiores valores de L_o .

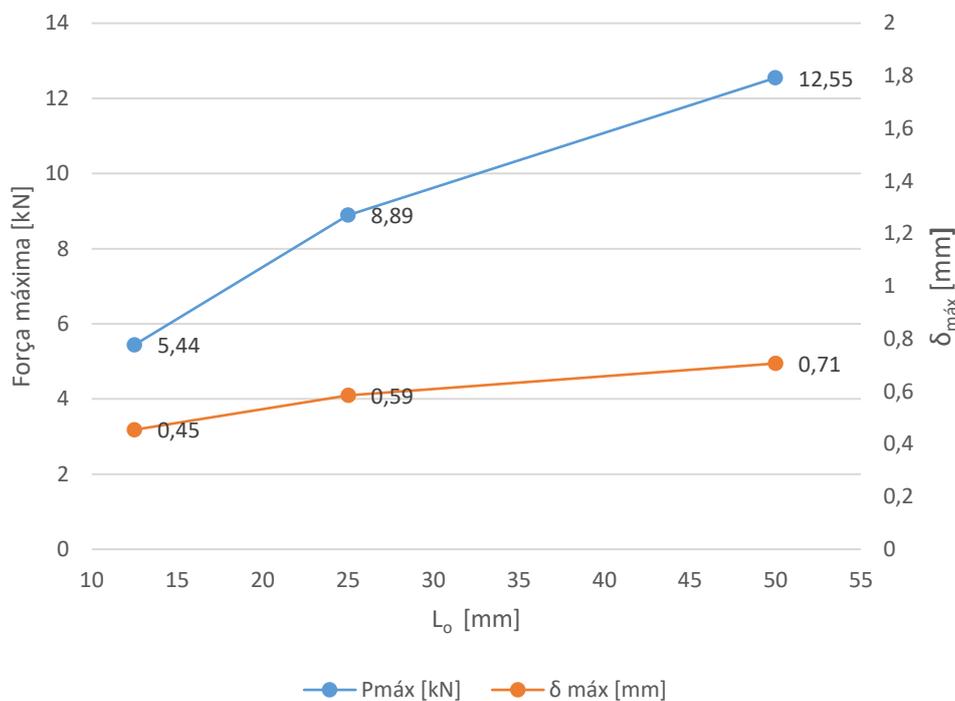


Figura 78 - Valores máximos obtidos com o adesivo SikaForce® 7752 em função de L_o

Na Tabela 16, tal como o adesivo AV138 é apresentado a influência de L_o na energia absorvida pelo modelo com o adesivo SikaForce® 7752. Como já referido anteriormente, sendo o adesivo 7752 do tipo flexível repara-se que a energia absorvida é superior à do modelo com o adesivo AV138. Com o aumento de L_o , do mesmo modo que AV138, a energia absorvida também aumenta, no entanto, este aumento é de maior magnitude, apresentando valores de aumento de 127% para $L_o=25$ mm e 336% para $L_o=50$ mm em relação a $L_o=12,5$ mm.

Tabela 16 - Energia absorvida com o adesivo SikaForce® 7752

L_o [mm]	E [J]	Diferença
12,5	1,1	-
25	2,5	127 %
50	4,8	336 %

3.2.4.3 Estudo numérico vs. experimental

Por último e não menos importante, neste subcapítulo apresenta-se a comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos através de previsões numéricas.

Na Figura 79 é possível verificar a comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos numericamente para as JSS testadas com o adesivo AV138. Através da reta criada, torna-se visível a proximidade dos valores obtidos numericamente dos valores experimentais. Para o $L_0=12,5$ mm o erro obtido do ensaio numérico comparado com o experimental foi de 2,2%. Para os valores o $L_0=25$ mm e o $L_0=50$ o erro registado foi de 1,5% e 3,9%, respetivamente. No geral, os valores de erro observados estão dentro da tolerância, +- 10%.

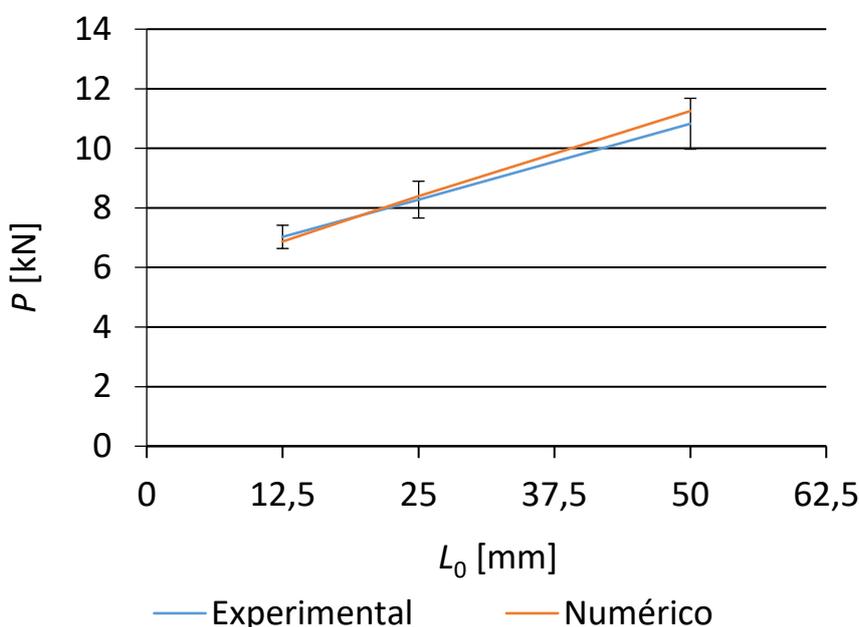


Figura 79 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos na previsão numérica para o adesivo AV 138 em função de L_0

Referente às JSS testadas com a adesivo SikaForce® 7752, os valores de erro registados são maiores quando comparados com os das JSS com AV138. O valor de erro para o $L_0=12,5$ foi de 13,15%, o qual não se encontra dentro da tolerância de aceitação. Para $L_0=25$ mm e $L_0=50$ mm os valores registados foram de 1,47% e 4,61%. Na Figura 80 verifica-se a comparação dos valores experimentais

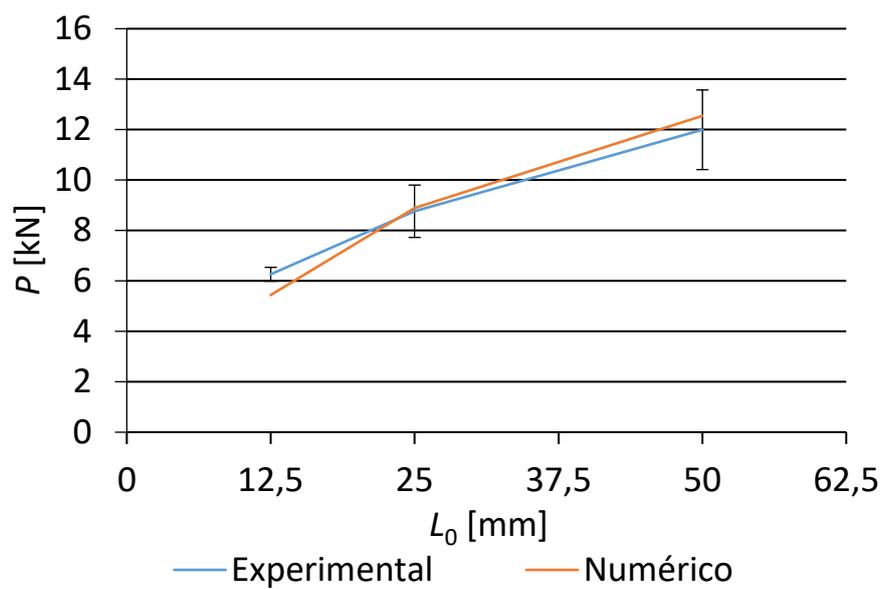


Figura 80 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos na previsão numérica para o adesivo SikaForce® 7752 em função de L_0

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Nesta dissertação as JSS estudadas, foram fabricadas com diferentes adesivos e com diferente comprimento de sobreposição. Deste modo, foi possível estudar a influência destes dois fatores relevantes.

Numa primeira fase observou-se que o aumento de comprimento de sobreposição influencia o desempenho da junta, como seria de esperar. Com o aumento do comprimento de sobreposição verifica-se um aumento de resistência da junta tal acontece, pois, a área do adesivo também aumenta. Porém, este aumento de resistência não é linearmente proporcional ao aumento de comprimento de sobreposição para os dois adesivos avaliados, sendo o adesivo SikaForce® 7752 o que mais beneficia com este aumento de área de adesivo. Por outro lado, o adesivo AV138, sendo um adesivo rígido, mas frágil, apresenta um maior aumento resistência para valores menores de comprimento de sobreposição. Observou-se que para este adesivo com o aumento de L_o as concentrações tensões ao arrancamento nas extremidades da camada adesivo eram de magnitude elevada o que por sua vez provoca a fratura da junta prematuramente. Ao contrário do adesivo AV138, o adesivo SikaForce® 7752 sendo um adesivo dúctil apresenta maior distribuição de tensões, provocando assim menores valores de tensões nas extremidades da zona adesivada. Assim, também se conclui que os picos de σ_y/τ_{med} e τ_{xy}/τ_{med} ocorrem sempre nas extremidades da ligação.

Deste modo, destaca-se que a escolha do comprimento de sobreposição numa dada aplicação terá de ser bem considerada, isto posto que o seu aumento não significa um aumento de resistência na mesma proporção.

Em relação ao desempenho da JSS com os diferentes adesivos, observou-se que o adesivo SikaForce® tem maior capacidade de absorção de energia quando comparado com o AV138. Também, para salientar a maior tenacidade do SikaForce® 7752 os valores de deslocamento à rotura deste adesivo foram de maior amplitude do que os valores registados para as JSS com AV138.

Para dar continuidade ao estudo de JSS solicitadas ao impacto, salienta-se algumas sugestões para trabalhos futuros tais como ensaios a juntas adesivas com maiores comprimentos de sobreposição de modo a perceber os limites da influência deste parâmetro. Por outro lado, também seria benéfico o estudo numérico deste tipo de juntas modeladas em 3D, com o intuito de verificar tensões que poderão não ter ocorrido na simulação em 2D.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
3. Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
4. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdão, Holanda: Elsevier.
5. CEYS. *Como reparar a sola de um sapato*. 2020 [Data de acesso: 08-10-2020]; Available from: <https://www.mundoceys.com/pt/projeto/1/como-reparar-sola-de-um-sapato>.
6. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, e 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.
7. Banea, M., L.d. Silva, e R. 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.
8. Dean, G., G. Lord, e B.C. Duncan, *Comparison of the measured and predicted performance of adhesive joints under impact*. 1999, National Physical Laboratory: Teddington, Reino Unido.
9. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. *Luftfahrtforschung* 15, 1938: p. 41-47.
10. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
11. Harris, J.A. e 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.
12. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, 2012. **72**(7): p. 788-791.
13. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
14. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007. **26**(2): p. 183-201.
15. 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.

16. 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.
17. 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.
18. 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.
19. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
20. 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.
21. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
22. Duan, K., X. Hu, e 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.
23. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Berlim, Alemanha: Springer.
24. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e 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.
25. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e 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.
26. Kafkalidis, M.S. e 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.
27. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
28. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e 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.
29. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
30. Alfano, G. e 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.
31. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e 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.
32. 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.

33. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. De Moura, e 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.
34. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
35. de Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques, e 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.
36. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e 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.
37. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
38. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e 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.
39. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e 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.
40. Carlberger, T. e 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.
41. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e 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.
42. Zhu, Y., K.M. Liechti, e 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.
43. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
44. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
45. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
46. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, e 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.
47. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e 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.

48. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
49. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
50. Gustafson, P.A. e 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.
51. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
52. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e 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.
53. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001, Berlim, Alemanha: Springer Berlin Heidelberg.
54. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
55. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e 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.
56. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e 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.
57. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e 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.
58. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e 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.
59. Chen, Z., R.D. Adams, e 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.
60. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Hoboken, Reino Unido: Wiley.
61. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
62. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
63. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.

64. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e 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.
65. Komorek, A., J. Godzimirski, e W. Kucharczyk, *The Influence of the Joint Thickness Upon the Impact Strength of Block Adhesive Joints*. Transportation research procedia, 2018. **35**: p. 80-89.
66. Gollins, K., N. Elvin, e F. Delale, *Characterization of adhesive joints under high-speed normal impact: Part I—Experimental studies*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **98**: p. 102529.
67. Machado, J., E. Marques, e L.F. da Silva, *Influence of low and high temperature on mixed adhesive joints under quasi-static and impact conditions*. Composite Structures, 2018. **194**: p. 68-79.
68. Valente, J., R. Campilho, E. Marques, J. Machado, e L.F. da Silva, *Geometrical optimization of adhesive joints under tensile impact loads using cohesive zone modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **97**: p. 102492.
69. Valente, J., R. Campilho, E. Marques, J. Machado, e L. da Silva, *Adhesive joint analysis under tensile impact loads by cohesive zone modelling*. Composite Structures, 2019. **222**: p. 110894.
70. Bautista, A., J. Casas, M. Silva, e A. Porras, *A Dynamic Response Analysis of Adhesive-Bonded Single Lap Joints Used in Military Aircrafts Made of Glass Fiber Composite Material under Cyclic Impact Loading*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020: p. 102644.
71. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015.
72. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
73. Pinto, S.D.M., *Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis*. 2013, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
74. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, e L.F.M. 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.
75. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, e L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
76. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
77. da Silva, M.R.G., *Impact of mixed adhesive joints for the automotive industry*. 2015, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
78. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.

79. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e 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.
80. da Silva, M.R.G., *Impact of mixed adhesive joints for the automotive industry*. 2015.
81. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016.
82. Reis, P., F. Antunes, e J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Composite structures, 2005. **67**(1): p. 125-133.