

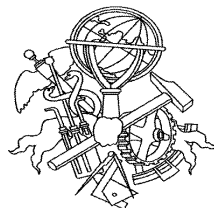
Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla

Sara Liliana Silva Nunes

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



7 de agosto de 2015

Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia
Mecânica

Candidato: Sara Liliana Silva Nunes, N°1121320, 1121320@isep.ipp.pt

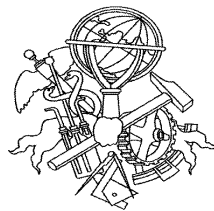
Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Francisco José Gomes da Silva, fgs@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



7 de agosto de 2015

Dedico este trabalho a todas as pessoas que contribuíram para a sua realização...

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e ao meu coorientador Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, pela oportunidade que me concederam, por todo o apoio e incentivo que me prestaram ao longo da realização deste trabalho. Agradeço em particular pela preciosa ajuda que me forneceram na parte da simulação numérica, na realização dos ensaios experimentais e na revisão do texto.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pela oportunidade concedida para a elaboração deste trabalho e por todos os ensinamentos que me foram transmitidos ao longo dos anos.

Finalmente, à minha família e amigos pelo apoio e compreensão.

Resumo

O método de união com ligações adesivas está cada vez mais a ser utilizado na conceção de estruturas mecânicas, por causa das vantagens significativas desta técnica em comparação com as ligações tradicionais. De facto, as juntas com ligação adesiva estão sob investigação intensa há bastante tempo. Entre as vantagens, destaca-se a redução de peso e possibilidade de unir diferentes materiais, incluindo compósitos, sem danificar as estruturas a ligar. Os adesivos comerciais variam desde resistentes e frágeis (por exemplo, Araldite® AV138) a menos resistentes e dúcteis (por exemplo, Araldite® 2015). Uma nova família de adesivos de poliuretano combina elevada resistência e ductilidade (por exemplo, Sikaforce® 7888).

Este trabalho compara o desempenho à tração dos três adesivos supracitados, em juntas de alumínio (Al6082-T651) de sobreposição simples e dupla, com variação dos valores de comprimento de sobreposição (L_0). A análise numérica de modelos de dano coesivo (MDC) foi realizada para analisar as tensões de arrancamento (σ_y) e as de corte (τ_{xy}) na camada adesiva, para estudar a variável de dano do MDC durante o processo de rotura e para avaliar a capacidade MDC na previsão da resistência da junta. A análise da resistência e da variável de dano ajudou na compreensão das diferenças entre os adesivos no que se refere ao processo de rotura e resistência da junta. Observou-se que as juntas de sobreposição dupla apresentam uma distribuição de tensões bastante mais favorável relativamente às juntas de sobreposição simples, principalmente devido à eliminação da flexão do substrato interior. Como resultado, a resistência destas juntas foi tipicamente superior ao dobro da observada para as juntas de sobreposição simples, com exceção de algumas configurações de junta em que houve plastificação extensa ou mesmo rotura dos substratos por tração. O trabalho proposto permitiu também concluir que as previsões MDC são tipicamente precisas, e qual a família de adesivos é mais adequada para cada configuração de junta, com a clara vantagem para o Sikaforce® 7888. Como resultado deste trabalho, foram propostas diretrizes de conceção para juntas adesivas.

Palavras-Chave

Epóxico, Poliuretano, Análise de Elementos Finitos, Mecânica da Fratura, Modelos de Dano Coesivos.

Abstract

Joining by adhesively-bonded methods is being increasingly used in the design of mechanical structures, because of the significant benefits of this technique compared to the traditional ones. Because of this, adhesively-bonded joints are under intense investigation for a long time. Amongst the advantages are the weight reduction and possibility to bond different materials, including composites, without damaging the parent structures. Commercial adhesives range from strong and brittle (e.g., Araldite[®] AV138) to less strong and ductile (e.g., Araldite[®] 2015). A new family of polyurethane adhesives combines high strength and ductility (e.g., Sikaforce[®] 7888).

This work compares the tensile performance of the three aforementioned adhesive systems in single and double-lap aluminium joints (Al6082-T651) with varying values of overlap length (L_0). A cohesive zone modelling (CZM) numerical analysis was carried out to analyse through-thickness normal (σ_y) and shear (τ_{xy}) stresses in the adhesive layer, to study the CZM damage variable during the failure process and to evaluate the CZM capability in predicting the joint strength. The stress and damage variable analyses helped in understanding the differences between adhesives in which pertains to the failure process and joint strength. It was found that double-lap joints present more efficient stress distributions over single-lap joints, mainly because of eliminating the transverse flexure of the inner adherend. As a result, the strength of these joints was typically more than twice that of the single-lap joints, except for some joint configurations in which extensive plasticization or even tensile substrate failure was found. The proposed work also enabled concluding that the CZM predictions are typically accurate, and which family of adhesives is more suited for each joint configuration, with clear advantage for the Sikaforce[®] 7888. As a result of this work, design guidelines were proposed for adhesively-bonded joints.

Keywords

Epoxy, Polyurethane, Finite Element Analysis, Fracture Mechanics, Cohesive Zone Models.

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO.....	IX
ABSTRACT.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS.....	XIX
NOMENCLATURA	XXI
1 INTRODUÇÃO.....	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 CALENDARIZAÇÃO	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 <i>Caraterização das juntas adesivas</i>	5
2.1.2 <i>Aplicações comuns das juntas adesivas</i>	7
2.1.3 <i>Esforços típicos em juntas adesivas</i>	9
2.1.4 <i>Tipos de rotura</i>	12
2.1.5 <i>Parâmetros que afetam o desempenho das juntas</i>	13
2.1.6 <i>Configurações possíveis de junta</i>	16
2.1.7 <i>Comparação entre juntas de sobreposição simples e dupla</i>	19
2.2 ADESIVOS ESTRUTURAIS	20
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i>	21
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	22
2.3 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DAS JUNTAS	23
2.3.1 <i>Mecânica dos meios contínuos</i>	24
2.3.1.1 Modelos analíticos.....	25
2.3.1.2 Modelos de Elementos Finitos	25
2.3.1.3 Critérios de rotura.....	26
2.3.2 <i>Mecânica da fratura</i>	27
2.3.3 <i>Mecânica do dano</i>	28
2.3.4 <i>Modelos de dano coesivo</i>	28
2.3.5 <i>Método de Elementos Finitos Estendido</i>	29
3 TRABALHO EXPERIMENTAL	31

3.1	MATERIAIS	31
3.1.1	<i>Substratos</i>	31
3.1.2	<i>Adesivos</i>	32
3.1.2.1	Adesivo Araldite® AV138	32
3.1.2.2	Adesivo Araldite® 2015	33
3.1.2.3	Adesivo Sikaforce® 7888	34
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL	35
3.2.1	<i>Geometria das juntas</i>	36
3.2.2	<i>Processo de fabrico</i>	37
3.2.3	<i>Procedimento de ensaio</i>	40
3.3	RESULTADOS	41
3.3.1	<i>Modos de rotura</i>	41
3.3.2	<i>Curvas P-δ</i>	45
3.3.3	<i>Resistência das juntas</i>	50
3.3.4	<i>Análise dos resultados</i>	52
4	PREVISÃO DA RESISTÊNCIA	55
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA	55
4.2	MODELOS DE DANO COESIVO	58
4.2.1	<i>Modelo de dano triangular</i>	58
4.2.2	<i>Determinação das propriedades coesivas</i>	60
4.2.2.1	Araldite® AV138	60
4.2.2.2	Araldite® 2015	61
4.2.2.3	Sikaforce® 7888	61
4.3	ANÁLISE DAS TENSÕES NAS JUNTAS	62
4.3.1	<i>Tensões de arrancamento</i>	63
4.3.2	<i>Tensões de corte</i>	65
4.4	MODOS DE ROTURA	66
4.5	ESTUDO DA VARIÁVEL DE DANO	68
4.6	PREVISÃO DA RESISTÊNCIA	72
5	CONCLUSÕES	81
	REFERÊNCIAS	83

Índice de Figuras

Figura 1 – Distribuição de tensões de ligações soldadas, rebitadas e coladas [4].....	6
Figura 2 – Aplicação dos adesivos em carros modernos [6].	7
Figura 3 – Junta típica entre o casco e o convés de um barco [7].....	8
Figura 4 – Representação dos vários esforços de uma ligação adesiva [10].	9
Figura 5 – Distribuição das tensões nos esforços de tração e compressão [4].....	10
Figura 6 – Distribuição de tensões de corte numa junta adesiva [4].	10
Figura 7 – Distribuição de tensões nos esforços de clivagem e de arrancamento [4].	11
Figura 8 – Esquema de transmissão de forças em JSS (a) e em JSD (b) [12].	12
Figura 9 – Tipos de rotura em juntas adesivas [1].	13
Figura 10 – Efeito da rigidez do adesivo na distribuição das tensões ao longo de L_0 [15].	14
Figura 11 – Distribuição das tensões em função da espessura do adesivo [15].....	15
Figura 12 – Tipos de configurações de juntas [4].	16
Figura 13 – Picos de tensão de corte nas extremidades das JSS [24].	17
Figura 14 – Distribuição da tensão de corte nas JSS e na junta de chanfro exterior [25].	18
Figura 15 – Uniões em tubos para cargas axiais e torsionais [27].	19
Figura 16 – Distribuição de tensões em função do grau de arredondamento dos substratos [41]. ...	26
Figura 17 – Curvas σ - ε do alumínio Al6082-T651 [62].	32
Figura 18 – Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [63].	32
Figura 19 – Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [63].	34
Figura 20 – Curva σ - ε de um provete maciço do adesivo Sikaforce® 7888 [65].....	35
Figura 21 – Configuração da geometria dos provetos de JSS (a) e JSD (b).	36
Figura 22 – Preparação de superfície por lixagem (a) e limpeza dos substratos (b).	37
Figura 23 – Aspeto dos substratos após preparação superficial e limpeza.	38
Figura 24 – Fixação e alinhamento dos substratos.	38
Figura 25 – Substratos com fio de pesca calibrado de 0,2 mm.	38
Figura 26 – Aplicação do adesivo Sikaforce® 7888.	39
Figura 27 – Colocação de grampos.	39
Figura 28 – Remoção do excesso de adesivo.	40
Figura 29 – Máquina de ensaios Shimadzu (a) e a respetiva fixação do provete (b).	40
Figura 30 – Modos de rotura (JSS): Araldite® AV138 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1].	41
Figura 31 – Modos de rotura (JSD): Araldite® AV138 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).	42

Figura 32 – Modos de rotura (JSS): Araldite® 2015 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1].	42
Figura 33 – Modos de rotura (JSD): Araldite® 2015 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).	43
Figura 34 – Modos de rotura (JSS): Sikaforce® 7888 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1].	44
Figura 35 – Modos de rotura (JSD): Sikaforce® 7888 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).	45
Figura 36 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para as JSS: Araldite® AV138 com $L_0=25$ mm (a), Araldite® 2015 com $L_0=37,5$ mm (b), Sikaforce® 7888 com $L_0=50$ mm (c) [1].	46
Figura 37 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente (JSD) para o Araldite® AV138, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).	47
Figura 38 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente (JSD) para o Araldite® 2015, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).	48
Figura 39 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente (JSD) para o Sikaforce® 7888, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).	49
Figura 40 – Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos em JSS [1].	50
Figura 41 – Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos em JSD.	51
Figura 42 – Definição do tipo de elementos para os diferentes constituintes das juntas para as análises de dano e resistência no ABAQUS®.	55
Figura 43 – Sentido do efeito <i>bias</i> da malha na região da sobreposição.	57
Figura 44 – Sentido do efeito <i>bias</i> da malha na região dos substratos sem contacto com o adesivo.	57
Figura 45 – Sentido do efeito <i>bias</i> da malha ao longo da espessura dos substratos.	57
Figura 46 – Condições fronteira impostas nos modelos numéricos.	58
Figura 47 – MDC triangular implementado no <i>software</i> ABAQUS®.	59
Figura 48 – Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0 [1].	63
Figura 49 – Distribuição das tensões σ_y em JSD: Araldite® AV138 (a); Araldite® 2015 (b); Sikaforce® 7888 (c).	64
Figura 50 – Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0 [1].	65
Figura 51 – Distribuição das tensões τ_{xy} , em JSD: Araldite® AV138 (a); Araldite® 2015 (b); Sikaforce® 7888 (c).	66

Figura 52 – Ausência de deformação plástica dos substratos, após rotura, para as JSS com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm [1].	67
Figura 53 – Deformação plástica dos substratos, após rotura, para as JSS com Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm [1].	67
Figura 54 – Ausência de deformação plástica dos substratos, após rotura, para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.	68
Figura 55 – Deformação plástica do substrato interior, após rotura, para as JSD com Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm.	68
Figura 56 – Variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{máx}$ é atingido para as JSS [1].	69
Figura 57 – Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=50$ mm (b).	70
Figura 58 – Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7888 para $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=50$ mm (b).	70
Figura 59 – Variável de dano na camada de adesivo no instante em que se atinge $P_{máx}$ para as JSD.	71
Figura 60 – Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm (a) e 50 mm (b).	72
Figura 61 – Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Sikaforce® 7888 e $L_0=12,5$ mm (a) e 50 mm (b).	72
Figura 62 – Início do dano, para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.	73
Figura 63 – Fim do dano, para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.	73
Figura 64 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm (a) e para o adesivo Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm (b) [1].	74
Figura 65 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).	74
Figura 66 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).	75
Figura 67 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7888 e $L_0=12,5$ mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).	75
Figura 68 – $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as JSS [1].	76
Figura 69 – $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as JSD.	77

Índice de Tabelas

Tabela 1 – Calendarização do trabalho.	3
Tabela 2 – Características das juntas adesivas [5].	7
Tabela 3 – Propriedades mecânicas das três estruturas moleculares de materiais poliméricos [33].	21
Tabela 4 – Propriedades mecânicas à tração da liga de alumínio Al6082-T651 [62].	31
Tabela 5 – Propriedades do Araldite® AV138 [64].	33
Tabela 6 – Propriedades do Araldite® 2015 [63].	34
Tabela 7 – Propriedades do Sikaforce® 7888 [65].	35
Tabela 8 – Dimensões das JSS e JSD.	37
Tabela 9 – Roturas obtidas para o adesivo Araldite® 2015.	43
Tabela 10 – Roturas obtidas para o adesivo Sikaforce® 7888.	45
Tabela 11 – Valores médios de $P_{máx}$ [N] para as JSS e para os diferentes adesivos [1].	46
Tabela 12 – Valores de $P_{máx}$ [N], obtidos experimentalmente, para o Araldite® AV138.	47
Tabela 13 – Valores de $P_{máx}$ [N], obtidos experimentalmente, para o Araldite® 2015.	48
Tabela 14 – Valores de $P_{máx}$ [N], obtidos experimentalmente, para o Sikaforce® 7888.	49
Tabela 15 – $P_{máx}$ e aumento percentual de $P_{máx}$ em função de L_O , para os três adesivos em estudo, para as JSS [1].	51
Tabela 16 – $P_{máx}$ e aumento percentual de $P_{máx}$ em função de L_O , para os três adesivos em estudo, para as JSD.	52
Tabela 17 – Propriedades dos substratos de liga de Al6082-T651.	56
Tabela 18 – Variação das dimensões da malha nas JSD em função de L_O [mm].	56
Tabela 19 – Deslocamentos aplicados nos modelos numéricos do <i>software</i> ABAQUS®.	58
Tabela 20 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A=0,2$ mm [62].	61
Tabela 21 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com $t_A=0,2$ mm [83].	61
Tabela 22 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7888 com $t_A=0,2$ mm [65].	62
Tabela 23 – Deformação plástica máxima dos substratos, verificada numericamente, para as JSS [1].	67
Tabela 24 – Deformação plástica máxima dos substratos, verificada numericamente, para as JSD.	68

Nomenclatura

Caracteres Romanos

E – Módulo de *Young*

G – Módulo de corte

G_{TC} – Tenacidade à tração

G_{TC} – Tenacidade ao corte

L_O – Comprimento de sobreposição

L_T – Comprimento total dos provetes

$P_{m\acute{a}x}$ – Força máxima

t_A – Espessura do adesivo

t_n^0 – Resistência coesiva à tração

t_p – Espessura do substrato

t_s^0 – Resistência coesiva ao corte

Caracteres Gregos

ν – Coeficiente de *Poisson*

δ – Deslocamento

δ_n^0 – Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração

δ_s^0 – Deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte

ε – Deformação

γ – Coeficiente para critério da mecânica da fratura

σ_y – Tensões de arrancamento

τ_{xy} – Tensões de corte

Abreviaturas

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

DCB – *Double-Cantilever Beam*

EF – Elementos Finitos

ENF – *End-notched flexure*

JSD – Juntas de sobreposição dupla

JSS – Juntas de sobreposição simples

MDC – Modelos de dano coesivo

SDEG – *Stiffness degradation*

TAST – *Thick adherend shear test*

1 Introdução

1.1 Contextualização

As juntas adesivas, devido às suas potencialidades na ligação de materiais, têm vindo a ter um crescimento bastante significativo na indústria. De facto, as ligações adesivas apresentam inúmeras vantagens em comparação com as ligações mecânicas mais tradicionais, como o baixo peso, maior resistência, fiabilidade, possibilidade de unir diferentes materiais, rapidez de fabrico, possibilidade de automatização e distribuição mais uniforme das tensões. No entanto, apresentam como desvantagens, na maior parte dos casos, impossibilidade de desmontagem, fraca resistência ao arrancamento e eventual necessidade de cura a elevadas temperaturas. O comportamento de uma ligação adesiva é condicionado por diferentes variáveis, tais como a configuração de junta, o tipo de adesivo, o tipo de substrato e aspetos dimensionais como por exemplo o comprimento de sobreposição (L_0), a espessura dos substratos e a espessura da camada de adesivo.

Existem diversas configurações de juntas, cuja escolha depende da aplicação em estudo, e nas quais se destacam as juntas de sobreposição simples (JSS) e as juntas de sobreposição dupla (JSD). As JSS são das juntas mais fáceis de fabricar, embora apresentem uma resistência não muito elevada relativamente à área colada devido à excentricidade das cargas transmitidas e respetiva deformação transversal da junta, o que provoca o aparecimento de tensões de arrancamento consideráveis. As JSD eliminam esta limitação, o que permite normalmente uma resistência superior ao dobro da observada para a JSS com a mesma geometria, relação esta que representa a relação da área colada das duas juntas. No que diz respeito aos adesivos, estes variam de frágeis e rígidos, como por exemplo o epóxido Araldite[®] AV138, até dúcteis e flexíveis, como é o caso do epóxido Araldite[®] 2015. Para além destes, existem adesivos que combinam uma elevada resistência e ductilidade, como por exemplo o poliuretano Sikaforce[®] 7888. A resistência e ductilidade são dois dos principais fatores que influenciam a resistência de uma junta adesiva.

Devido à crescente utilização das ligações adesivas, em conjunto com os comportamentos marcadamente diferentes das juntas adesivas em função dos parâmetros referidos, torna-se necessária a existência de ferramentas que permitam o projeto expedito destas ligações. Assim, para a análise de juntas adesivas, está a ser cada vez mais utilizado o método de Elementos Finitos

(EF) que, combinado com critérios ou modelos de dano mais ou menos complexos, pode revelar-se como uma ferramenta fundamental para o projeto de ligações adesivas. No âmbito das técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo (MDC) são uma ferramenta de grande importância, por combinar os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para previsão do desempenho das juntas adesivas. É assim possível a modelação de juntas adesivas com diferentes tipos de adesivo, como os anteriormente mencionados. Desta forma, considera-se necessária a aferição desta técnica numérica para a previsão de juntas adesivas, considerando as diferentes tipologias de adesivos existentes no mercado, e em diferentes configurações de juntas, para validação de uma ferramenta que seja universal no que concerne ao seu âmbito de aplicação.

1.2 Objetivos

O principal objetivo deste trabalho é a avaliação da técnica de MDC para projeto de juntas adesivas, considerando diferentes comportamentos de adesivos e geometria de juntas, de forma a validar uma ferramenta que possa ser utilizada de forma universal para dimensionamento. Para este efeito, foram testadas JSD com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 e diferentes comprimentos de sobreposição (L_O). A apresentação dos resultados é feita em paralelo com resultados de geometria idêntica, mas com configuração de JSS, obtidos no trabalho de Fernandes [1].

Neste trabalho, procedeu-se experimentalmente à preparação e ensaio de provetes de JSD à tração, com diferentes L_O e os referidos adesivos. Numericamente estudaram-se as distribuições das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva. No estudo por MDC, é avaliada a variável de dano SDEG (*stiffness degradation*), o que permite verificar a degradação do adesivo desde o início da aplicação da carga até à rotura completa, dada em função de L_O , e como tal explicar os resultados obtidos.

A validação foi realizada por comparação direta dos resultados experimentais obtidos nos ensaios, realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do Instituto Superior de Engenharia do Porto, com os valores numéricos obtidos com recurso ao *software* ABAQUS®.

1.3 Calendarização

Na tabela seguinte é apresentada a calendarização das várias etapas executadas para a elaboração desta tese.

Tabela 1 – Calendarização do trabalho.

Ano	2014		2015					
Mês	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun
Ensaio experimentais								
Tratamento dos dados experimentais								
Trabalho numérico								
Escrita da tese								

1.4 Organização do relatório

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, esta dissertação foi dividida em 5 capítulos distintos.

No capítulo 1 foi enquadrado o trabalho realizado, definidos os objetivos e apresentada a calendarização do mesmo.

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, que aborda os diferentes tipos de ligação, os diferentes tipos de juntas, os adesivos estruturais, os métodos mais importantes para a determinação das propriedades dos adesivos e, por último, uma descrição das técnicas mais relevantes atualmente disponíveis para previsão da resistência das juntas adesivas.

O capítulo 3 corresponde ao trabalho experimental realizado, nomeadamente a preparação das juntas, colagem dos substratos e obtenção dos provetes e ensaios de tração. Neste capítulo também é feito o tratamento e análise dos dados obtidos.

O trabalho numérico realizado no *software* ABAQUS® é apresentado no capítulo 4, incluindo resultados obtidos e análise dos mesmos, por comparação aos resultados obtidos experimentalmente. Neste capítulo é também feita a análise das distribuições de tensões, análise de dano, modos de rotura e previsão de resistência.

No capítulo 5 são apresentadas as conclusões obtidas, assim como é realizada referência a possíveis trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

A ligação adesiva é uma técnica com grande histórico de utilização. Embora a primeira patente atribuída a um adesivo tenha ocorrido em 1750 na Inglaterra, tratando-se de uma cola elaborada a partir de peixe, esta técnica já tinha sido utilizada pelos Egípcios, quinze séculos antes de Jesus Cristo, onde se empregava colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores em aplicações de madeira e pedra [2]. As primeiras ligações adesivas utilizavam adesivos naturais, como por exemplo baseados em caseína (material polimérico derivado do leite). Estes funcionavam bem exceto quando submetidos a ambientes húmidos, tornando-se muito fracos e exaladores de odores desagradáveis devido à absorção de água [2].

Durante a segunda guerra mundial, devido às exigências tecnológicas, foram desenvolvidos adesivos sintéticos constituídos por resinas de ureia-formaldeído e resinas fenólicas. Mais tarde, devido à fragilidade exibida por estes adesivos, a química dos adesivos foi modificada e melhorada através da combinação com polímeros com boa tenacidade. Estes permitiram a ligação de materiais metálicos e de madeira com muito sucesso. Atualmente, todos os adesivos são baseados em polímeros sintéticos, tais como os fenólicos, epóxidos, acrílicos e uretanos [2].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

A utilização das juntas adesivas tem vindo a ter um crescimento exponencial, o que se deve aos avanços tecnológicos dos adesivos poliméricos e aos problemas que ligações alternativas apresentam para determinados tipos de materiais e espessuras. As ligações adesivas apresentam muitas vantagens quando comparadas com outros métodos tradicionais, tais como a soldadura, brasagem, aparafusagem, rebitagem e outras ligações mecânicas. As principais causas da sua maior utilização estão relacionadas com a facilidade de fabrico, maiores cadências de produção, menores custos, facilidade em unir materiais dissimilares e melhor resistência à fadiga que as ligações tradicionais. As juntas adesivas também se caracterizam por possuírem uma boa capacidade de amortecimento de vibrações e de absorverem o choque. Contudo, quando comparadas com outros métodos de ligação, estas apresentam algumas desvantagens, nomeadamente a necessidade de

preparação e limpeza da superfície. É necessário que uma ligação adesiva elimine, ao máximo, as forças de arrancamento, clivagem e impacto, é importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e ter em consideração que há ligações adesivas que apresentam limitada resistência a condições extremas, tais como o calor e a humidade [3]. As características principais das ligações adesivas estão apresentadas na Tabela 2.

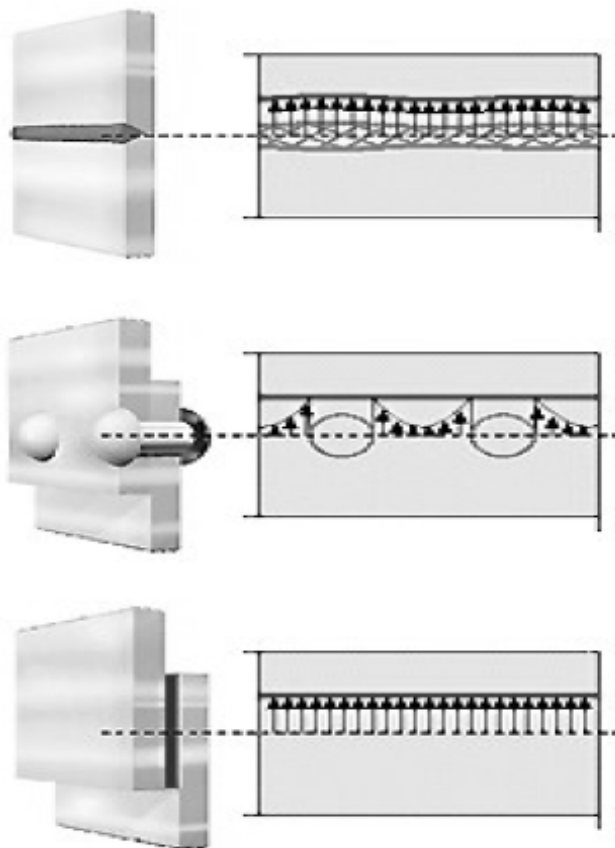


Figura 1 – Distribuição de tensões de ligações soldadas, rebitadas e coladas [4].

Na ligação adesiva, teoricamente, há distribuição das cargas e tensões sobre a área total da ligação, em vez de as concentrar em apenas alguns pontos. Desta forma, a ligação com adesivos é mais resistente à flexão e vibração do que, por exemplo, a montagem com rebites. A Figura 1 compara as distribuições de tensões de uma ligação soldada, rebitada e colada [4].

Tabela 2 – Características das juntas adesivas [5].

Juntas Adesivas	
Tipo de ligações	Ligações usualmente permanentes
Distribuição de tensões	Distribuição de tensões uniforme ao longo da largura da junta
União da junta	Sem alteração significativa da geometria dos componentes
Junção de materiais	Ideal para união de diferentes materiais
Resistência a temperaturas	Fraca resistência a elevadas temperaturas
Resistência mecânica	Excelentes propriedades de fadiga O isolamento elétrico reduz a corrosão
Preparação da junta	Necessária uma limpeza cuidada
Equipamentos	Elevado custo com equipamentos automatizados
Tempo de produção	Minutos a horas, dependendo do tipo de junta
Avaliação da qualidade	Métodos de avaliação limitados

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Os adesivos são usados numa variedade de indústrias, tais como: automóvel, aeroespacial, naval, construção, embalagem, móveis, têxtil, entre outras. Devido às vantagens que as juntas adesivas oferecem, estas começaram a ganhar o seu espaço na indústria automóvel. O uso de adesivos na indústria automóvel iniciou-se há décadas com a colagem de para-brisas. Mais tarde, estendeu-se a sua aplicação para outros componentes (Figura 2), como por exemplo os vidros traseiros.



Figura 2 – Aplicação dos adesivos em carros modernos [6].

Também eram usados no preenchimento de falhas nas soldaduras como forma de prevenir a corrosão. Com o aumento do uso dos adesivos, observou-se um aumento de resistência do veículo. De facto, o seu uso alargou-se às ligações da estrutura do veículo, o que permitiu otimizar a rigidez à torção. Para além das vantagens anteriormente referidas, as ligações adesivas também tornam o veículo mais leve e seguro [6].

Tal como na indústria automóvel, as juntas adesivas ganharam popularidade também em aplicações da indústria naval, embora só após se apurar que forneciam as características exigidas, tais como resistência à humidade, temperatura e boa durabilidade. A carga que a ligação pode suportar é outro dos parâmetros essenciais. As aplicações nesta indústria resultam, normalmente, em esforços de flexão, corte e torção. As aplicações mais comuns num barco vão desde os painéis laterais, ao casco e convés (Figura 3) [7].



Figura 3 – Junta típica entre o casco e o convés de um barco [7].

As ligações adesivas, na indústria do calçado, são uma alternativa para a união da sola, comparativamente com a costura ou utilização de grampos. A introdução de ligações adesivas apresenta várias vantagens, tais como maior flexibilidade e juntas mais homogêneas, melhor distribuição das cargas transmitidas ao longo da junta e uma melhoria nas propriedades estéticas. Contudo, também apresenta limitações, tais como a necessidade de um grande controlo em todas as fases da conceção para se evitarem problemas de adesão. As juntas adesivas são utilizadas para colar uma diversidade de partes do sapato. Nesta aplicação específica todas as ligações são críticas. As ligações da parte superior dos sapatos são as mais importantes e difíceis de se realizar na indústria do calçado. Estas ligações devem apresentar boa durabilidade e uma boa resistência mecânica [8].

Relativamente à indústria aeroespacial, há duas classes de juntas adesivas que são utilizadas. As juntas estruturais, com adesivo epóxico, fenólico ou acrílico, que transferem as cargas entre os membros e as juntas para selagem, protegendo também as interfaces sujeitas a corrosão. As ligações adesivas assumem um papel decisivo nesta indústria, pela resistência à fadiga que apresentam, por permitirem uma redução de peso significativa, um bom isolamento, amortecimento de vibrações e uma vida útil considerável. Apesar de apresentarem vantagens quando comparadas com a grande parte dos meios de fixação mecânicos existentes, é necessária especial atenção durante a concepção de estruturas aeroespaciais, pois não existem meios de inspeção de qualidade capazes de avaliar de forma precisa o seu estado [9].

2.1.3 Esforços típicos em juntas adesivas

Os esforços típicos numa ligação adesiva são (Figura 4) [10]:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem;
- Arrancamento.

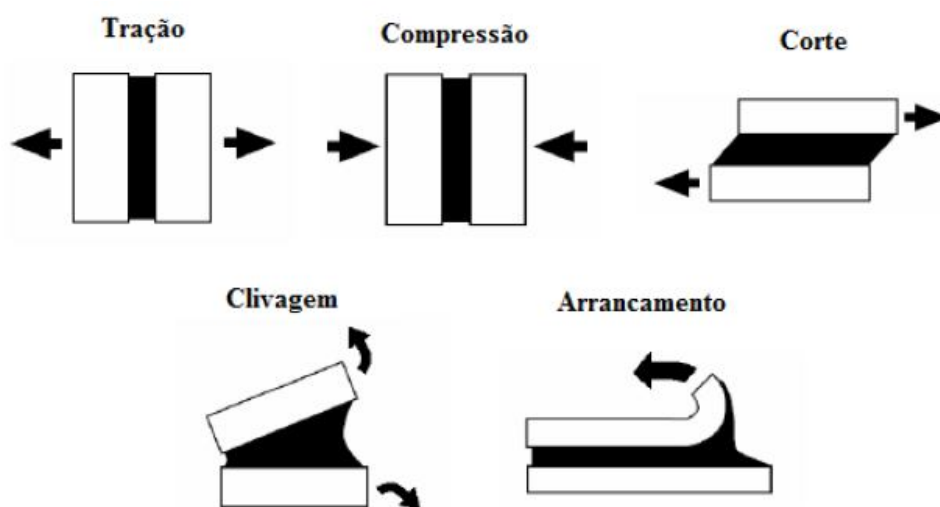


Figura 4 – Representação dos vários esforços de uma ligação adesiva [10].

Esforços de Tração – As tensões de tração desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de corte. Neste caso, as tensões normais são distribuídas uniformemente ao longo da área colada (Figura 5). As juntas devem ser concebidas de forma a ter as superfícies dos substratos paralelas e as forças perfeitamente perpendiculares a estas. Todavia, devido à dificuldade em controlar a espessura do adesivo e às forças raramente serem precisamente

axiais, originam-se tensões de clivagem e de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição.

Esforços de Compressão – As forças de compressão, tal como as forças de tração, devem-se manter perfeitamente perpendiculares à superfície de ligação, de modo a que o adesivo permaneça em compressão pura. Uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo. A distribuição das tensões é contante em toda a junta (Figura 5), e esta só rompe se a distribuição das tensões não for uniforme.

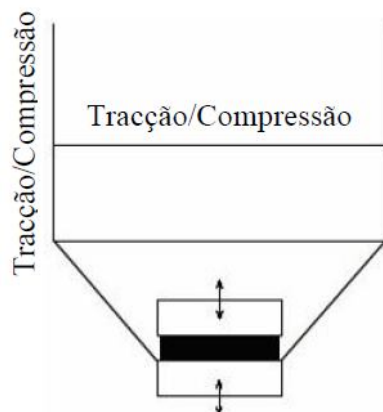


Figura 5 – Distribuição das tensões nos esforços de tração e compressão [4].

Esforços de Corte – As forças de corte provocam o escorregamento entre os dois substratos. A distribuição da tensão de corte, neste caso, tem uma maior incidência nas extremidades, conforme é visível na Figura 6. Este comportamento deve-se ao efeito da deformação diferencial ao longo de L_0 , uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente, desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da sobreposição [11]. Este efeito é mais notório com o aumento de L_0 . Devido a este comportamento, para o aumento da resistência das juntas adesivas é mais benéfico o aumento da largura da junta.

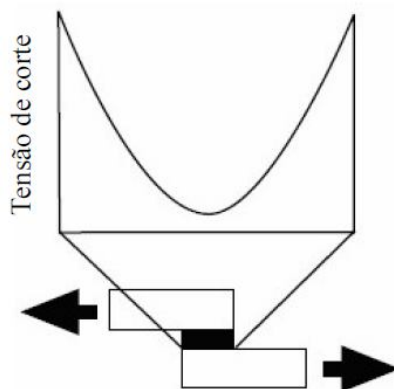


Figura 6 – Distribuição de tensões de corte numa junta adesiva [4].

Esforços de Clivagem – Os esforços de clivagem são definidos como aqueles que ocorrem quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. Estes esforços também podem acontecer em juntas de topo a topo sob carregamento axial, se as forças não forem rigorosamente axiais.

Esforços de Arrancamento – As tensões de arrancamento são semelhantes às de clivagem (Figura 7), mas aplicam-se ao caso onde um ou ambos os substratos são flexíveis. Por conseguinte, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e, conseqüentemente, maior resistência da junta adesiva.

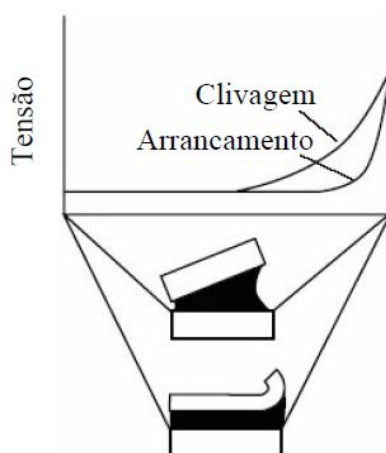


Figura 7 – Distribuição de tensões nos esforços de clivagem e de arrancamento [4].

As tensões de clivagem e de arrancamento são o principal inimigo das juntas adesivas e devem, sempre que possível, ser evitadas nas juntas adesivas, pela utilização de configurações que suportem maioritariamente esforços de corte. A Figura 8 representa esquematicamente a transmissão de forças em JSS (a) e em JSD (b). Nas JSS não é possível obter um esforço maioritariamente de corte, já que estas juntas exibem tensões de arrancamento acentuadas nas extremidades da ligação, devido à flexão significativa que sofrem sob tração devido à simetria de forças [4, 10]. De uma forma geral, as juntas sujeitas a este tipo de tensões são menos resistentes do que as solicitadas principalmente ao corte, porque as tensões de clivagem e arrancamento se concentram normalmente em zonas mais localizadas da ligação adesiva (numa ou nas duas extremidades da ligação). Assim, conclui-se que as JSD são mais favoráveis do que as JSS já que, devido à simetria dos esforços e diminuição drástica da flexão, o adesivo é fundamentalmente sujeito a esforços de corte [4, 10]. Apesar disto, mesmo nas JSD observam-se momentos fletores internos que causam tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição (Figura 8).

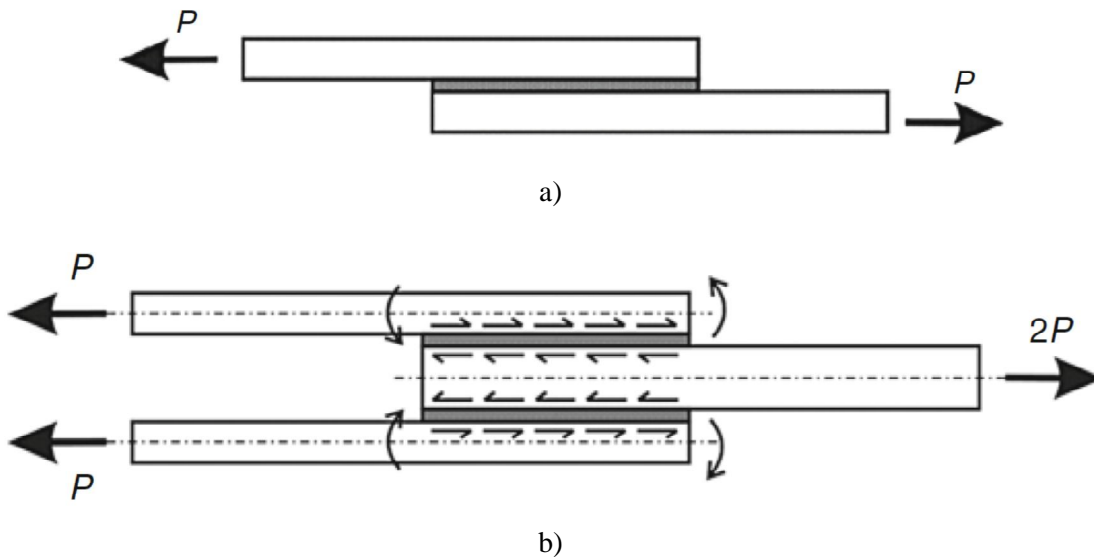


Figura 8 – Esquema de transmissão de forças em JSS (a) e em JSD (b) [12].

2.1.4 Tipos de rotura

As ligações adesivas têm como intuito a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a integridade da estrutura, quando sob solitação estática e/ou dinâmica e condições ambientais adversas, como humidade e temperatura. Como forma de aferir o comportamento e sucesso no fabrico deste tipo de ligações, é fundamental a correta avaliação dos modos de rotura induzidos nas juntas coladas. De um modo geral, podem distinguir-se três modos de rotura diferentes em juntas adesivas:

- **Rotura Coesiva** (Figura 9 a) tem lugar no interior do adesivo. Ocorre quando os substratos e a ligação entre o adesivo e o substrato são mais resistentes do que o adesivo. Neste tipo de rotura ambas as superfícies dos substratos contêm uma película de adesivo [4].
- **Rotura Adesiva** (Figura 9 b) ocorre na interface entre os substratos e o adesivo. Nesta rotura verifica-se que a superfície de um dos substratos está isenta de adesivo, enquanto o outro substrato contém todo o adesivo. Nesta situação, ocorre falha de adesão entre o adesivo e a superfície do substrato, o que pode ser resultado de uma deficiente preparação da superfície. Há roturas que inicialmente são consideradas roturas adesivas. Contudo, após uma observação mais rigorosa das superfícies de rotura, verifica-se uma fina película de adesivo em ambos os substratos [4].
- **Rotura pelo Substrato** (Figura 9 c) é uma rotura similar à rotura coesiva do adesivo, e difere apenas no local da mesma, já que neste caso a rotura se dá no substrato. Esta rotura ocorre porque a resistência interna do substrato é mais fraca do que a zona de ligação [4].

Por vezes, a rotura ocorre por uma combinação dos referidos modos - Rotura Adesiva e Rotura Coesiva - designando-se neste caso por **Rotura Mista** (Figura 9 d). Este tipo de rotura ocorre devido a uma não limpeza ou uma limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar [1, 4].

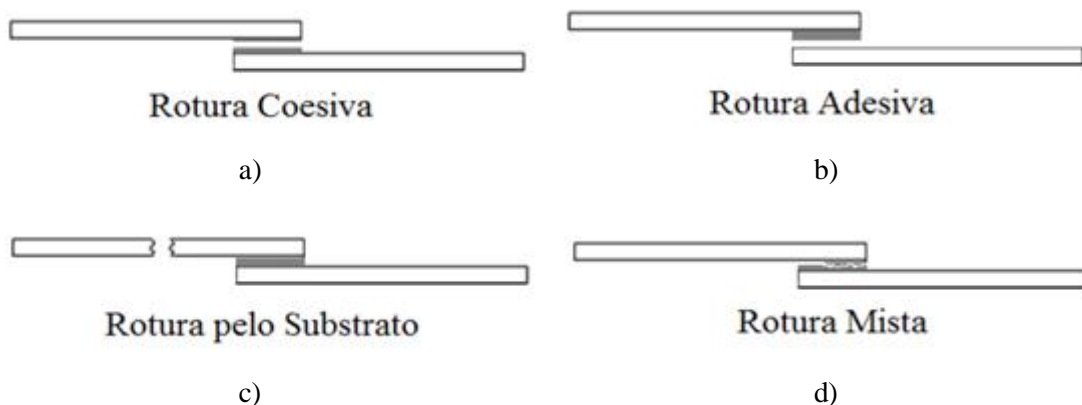


Figura 9 – Tipos de rotura em juntas adesivas [1].

2.1.5 Parâmetros que afetam o desempenho das juntas

Devido à distribuição de tensões nas juntas adesivas não ser uniforme, a média da tensão de corte pode ser muito menor que a tensão máxima local. As roturas ocorrem sempre onde há maior concentração de tensão, e de modo a melhorar a resistência da junta é fundamental reduzir esses picos de tensão. Para este efeito, deve-se ter em consideração as seguintes orientações [11]:

- Usar um adesivo dúctil e com elevada resistência;
- Usar substratos semelhantes, tanto em termos de características geométricas como em propriedades mecânicas. Caso não seja possível, usar substratos com valores de rigidez próximos;
- Usar uma camada de adesivo fina;
- Usar uma área de sobreposição grande, de forma a oferecer uma maior área de contacto e resistência.

Para além das orientações anteriormente listadas, as tensões de arrancamento também devem ser evitadas para prevenir uma rotura prematura da junta. Uma possível forma de reduzir essas tensões consiste na utilização de filetes de adesivo nas extremidades da sobreposição. Outra maneira de ultrapassar esta limitação é utilizar adesivos dúcteis que permitem uma redistribuição das tensões antes da ocorrência de rotura, o que favorece a resistência mecânica [11]. Os principais fatores que afetam o desempenho das juntas são as propriedades do material (substratos e adesivos) e a geometria (substratos, espessura do adesivo e sobreposição).

Propriedades do adesivo

Conforme já referido, as propriedades dos adesivos são um fator que afeta o desempenho e resistência da junta. Todavia, os adesivos que apresentam melhores propriedades a nível da resistência não garantem que a resistência da junta seja superior [13]. A resistência da junta não depende apenas da resistência do adesivo, mas também da sua ductilidade e rigidez. Os adesivos com elevada ductilidade e flexibilidade geralmente têm uma resistência baixa. No entanto, quando usados numa junta, a sua capacidade para distribuir uniformemente as tensões ao longo da área de sobreposição (baixa rigidez) e para deformar plasticamente pode resultar numa resistência do conjunto muito superior quando comparados com adesivos mais resistentes e rígidos [14]. Conforme é representado na Figura 10, os adesivos mais flexíveis apresentam uma distribuição mais uniforme de tensões em comparação com adesivos rígidos, para os quais se observa uma elevada concentração de tensões nas extremidades de sobreposição.

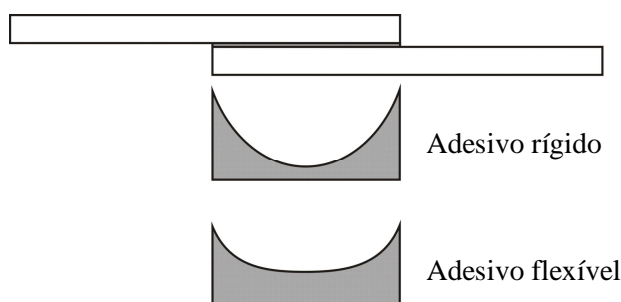


Figura 10 – Efeito da rigidez do adesivo na distribuição das tensões ao longo de L_0 [15].

O ideal seria ter um adesivo com boa resistência mecânica, bastante ductilidade e flexível. Contudo, estas três características são difíceis de combinar num adesivo. Por isso é normalmente escolhido um adesivo dúctil [11].

Propriedades do substrato

Outro fator que influencia o desempenho das juntas é o material e a geometria dos substratos. Para se obter uma junta adesiva com elevado desempenho, é essencial uma boa capacidade de adesão entre os substratos e adesivo, e geometrias idênticas dos elementos a ligar. As propriedades dos substratos, como já referido, também são de grande importância, pois têm um enorme impacto na resistência da junta. As propriedades mais importantes são o módulo de elasticidade e a resistência. A resistência do substrato é fundamental e pode explicar diversas roturas de juntas [1, 15].

Espessura do adesivo

Uma das características geométricas mais importantes no que diz respeito à distribuição de tensões e resistência da junta é o valor da espessura do adesivo. Com base em resultados experimentais,

para adesivos estruturais, uma junta com uma resistência ótima deverá ter uma camada fina de adesivo, compreendida entre 0,1 – 0,2 mm [15]. Para valores superiores a 0,2 mm, Crocombe [16] mostra que em JSS a resistência é menor, apesar dos modelos analíticos de Volkersen [17] e Goland e Reissner [18] preverem o seu aumento.

Através de uma análise elástica, verifica-se que existe uma maior concentração de tensões nas extremidades de L_0 quando a camada adesiva é de menor espessura (Figura 11 a) do que numa camada de adesivo com uma espessura superior (Figura 11 b), em que a distribuição de tensões é mais uniforme. Embora existam teorias que procuram esclarecer o porquê de espessuras superiores a 0,2 mm causarem piores valores de resistência, não existe consenso [15]. Gleich et al. [19] e Adams e Peppiatt [20] também defendem que o aumento da espessura condiciona a resistência da junta, mas por motivos diferentes. Gleich et al. [19], através do uso de EF, observou que existe um aumento das tensões de corte e de arrancamento na interface e na zona de sobreposição da junta com o aumento da espessura. Por outro lado, Adams e Peppiatt [20] afirmam que, com o aumento da espessura do adesivo, a probabilidade de ocorrerem defeitos internos tais como porosidades e microfissuras aumenta significativamente.

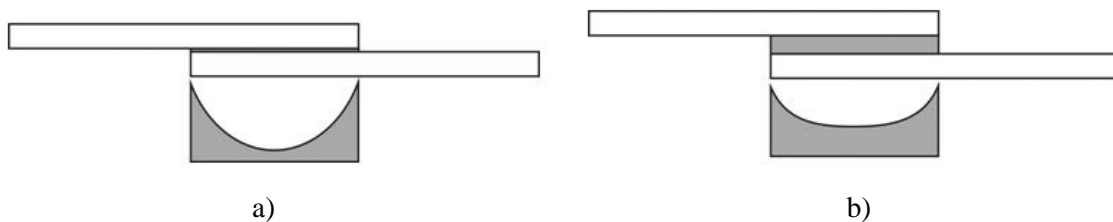


Figura 11 – Distribuição das tensões em função da espessura do adesivo [15].

Comprimento de sobreposição

Para além da espessura do adesivo, o valor de L_0 também tem uma influência direta no desempenho da junta. O aumento da largura de sobreposição aumenta proporcionalmente a resistência da junta. No entanto, o efeito de L_0 depende do tipo de adesivo (dúctil ou frágil) e do tipo de substrato. Se for usado um adesivo dúctil e um substrato elástico, a resistência da junta é proporcional ao valor de L_0 , pois o adesivo tem a capacidade de se deformar plasticamente e de redistribuir as tensões. Se o adesivo em causa for frágil e o substrato elástico, a resistência da junta não é proporcional a L_0 na medida em que a carga máxima suportada pela junta está sempre limitada pelos picos de tensão nas extremidades da sobreposição. O efeito de L_0 foi abordado em detalhe por Karachalios et al. [21] para aços macios e de alta resistência e para dois adesivos estruturais. A resistência da junta aumentou de forma mais acentuada para sobreposições curtas, mas para as juntas com substrato em aço macio, devido à plastificação dos substratos, atingiu-se um patamar de resistência para valores de $L_0 > 25$ mm, ao contrário do que aconteceu com os

substratos de aços de alta resistência. Esta ocorrência não foi observada para as juntas de aços de alta resistência até ao valor limite de $L_0=60$ mm.

2.1.6 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem apresentar vários tipos de configurações, sendo que as mais comuns estão representadas na Figura 12. A distribuição de tensões ao longo da junta depende principalmente da sua geometria e também das propriedades mecânicas do adesivo e dos substratos [22].

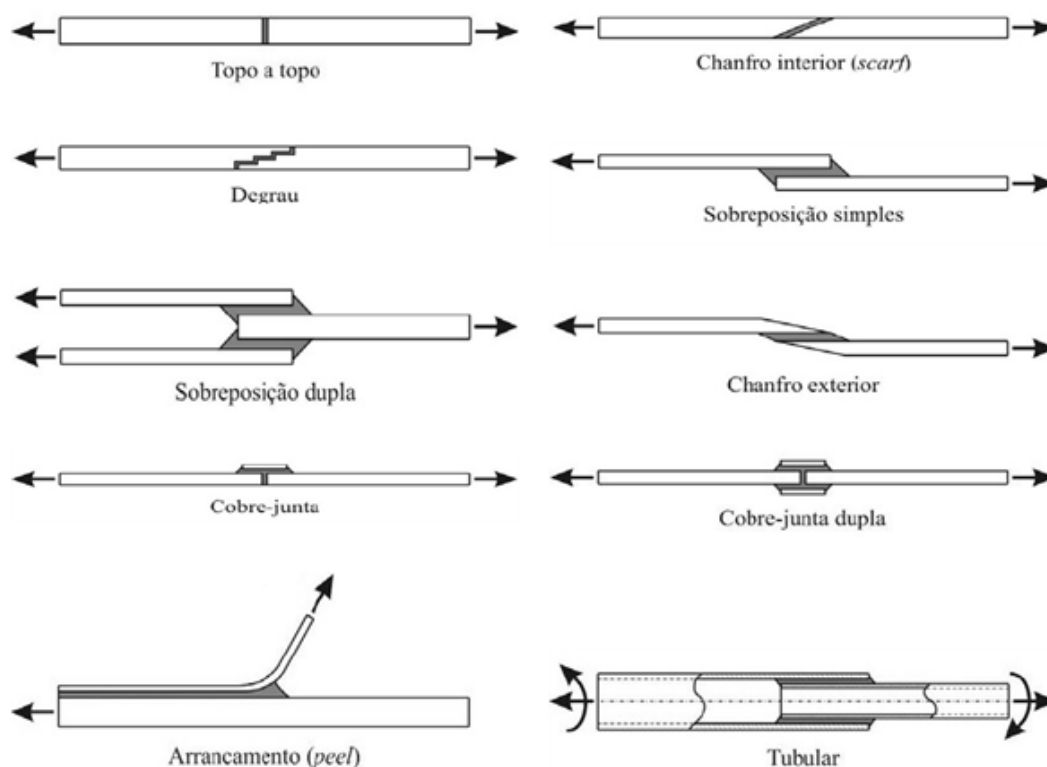


Figura 12 – Tipos de configurações de juntas [4].

Topo-a-topo

Das configurações apresentadas, as juntas topo-a-topo são as mais simples de fabricar, embora não sejam as que apresentam melhores resultados. Estas juntas apresentam elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação, e não resistem a esforços de flexão, porque o adesivo fica sujeito a clivagem.

Chanfro interior (*scarf*) e Degrau

A junta de chanfro interior, assim como a junta em degrau, produz a diminuição da variação de tensões ao longo do adesivo, aumentando a sua resistência. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto [22]. A dificuldade de maquinar os degraus ou as rampas encarece o seu processo de fabrico [20]. Com substratos em compósito, torna-se mais económico e comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, eliminando assim as operações de maquinagem [23].

Sobreposição simples

As JSS são as mais utilizadas na indústria, pois são simples de fabricar e o adesivo é solicitado maioritariamente ao corte. No entanto, registam-se efeitos de flexão, que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento). Nas extremidades ocorre um efeito de entalhe causado pela mudança brusca da geometria. Os dois efeitos combinados (flexão e mudança brusca da secção) ocorrem na zona mais crítica provocando concentração de tensões (Figura 13) e uma redução na resistência da junta. Para minimizar este problema pode recorrer-se a JSD, em que os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores [22, 24].

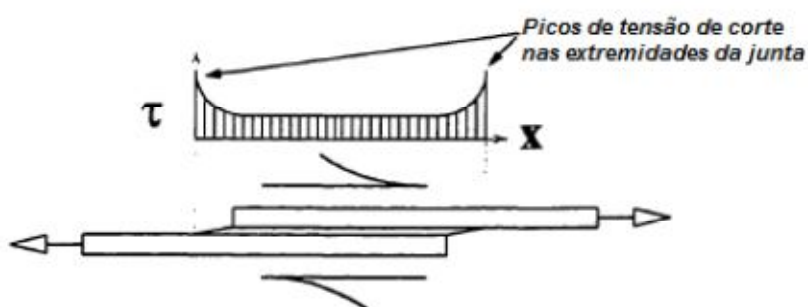


Figura 13 – Picos de tensão de corte nas extremidades das JSS [24].

Sobreposição dupla

De modo a minimizar os efeitos da flexão, podem ser consideradas JSD. Todavia, o seu processo de fabrico é mais demorado e nem sempre é possível utilizar esta configuração de junta [24]. As JSD apresentam uma configuração simétrica que se supõe isenta de flexão. No entanto, na linha de adesão, podem desenvolver-se tensões de tração e compressão, desde que os substratos exteriores sofram flexão [24].

Chanfro exterior

As juntas com chanfros exteriores foram desenvolvidas para reduzir os picos de tensão que ocorrem nas extremidades das JSS [3, 4]. Com esta modificação há uma diminuição da concentração de tensões e uma distribuição mais uniforme das mesmas (Figura 14) [25].

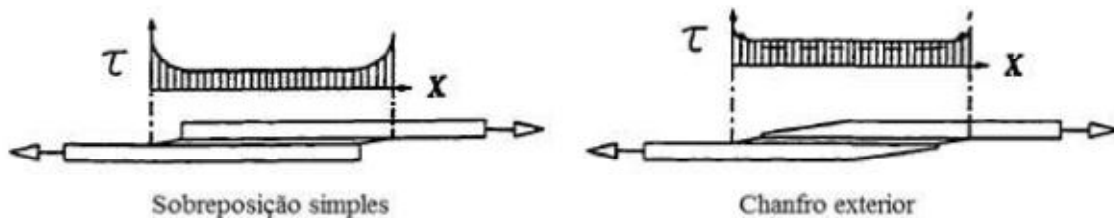


Figura 14 – Distribuição da tensão de corte nas JSS e na junta de chanfro exterior [25].

Cobre-junta e Cobre-junta dupla

Tal como nas JSS, as juntas com reforço simples também estão sujeitas a esforços de arrancamento, embora apresentem uma resistência superior às JSS. Nas juntas com reforço duplo o momento-fletor é menor, o que torna preferível esta geometria. Esta configuração de junta é usada em reparações da fuselagem de aeronaves com remendos de alumínio ou compósitos [3, 4].

Arrancamento

A solicitação de juntas obtidas por colagem de substratos finos a componentes espessos introduz geralmente forças de arrancamento. Estes esforços são os mais indesejados em juntas coladas, uma vez que as tensões se concentram em porções muito reduzidas da área de colagem.

Tubular

A junta tubular possibilita a união de tubos que podem ter a extremidade plana ou em chanfro. Esta geometria de junta resulta numa boa resistência a esforços de tração e de compressão. Contudo, caso não haja um perfeito alinhamento relativamente ao eixo de revolução, podem-se gerar esforços de arrancamento. De forma a tentar eliminar esses esforços, normalmente utilizam-se chanfros, canais e ressaltos, facilitando a montagem dos componentes, aumentando a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico (Figura 15). A inacessibilidade ao seu interior impossibilita a sua inspeção. Algumas das soluções para assegurar que o adesivo preenche toda a cavidade são a utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar [25, 27].

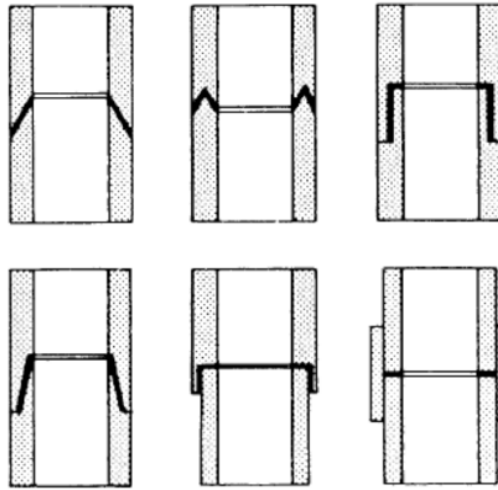


Figura 15 – Uniões em tubos para cargas axiais e torsionais [27].

2.1.7 Comparação entre juntas de sobreposição simples e dupla

As configurações mais comuns para juntas são a sobreposição simples e a sobreposição dupla. No entanto, a JSS é a mais estudada, pois é a mais simples de fabricar, embora a resistência relativamente à área colada seja a pior entre as configurações das juntas mencionadas no capítulo anterior, com exceção das juntas de arrancamento. Isto ocorre devido à excentricidade da carga aplicada, o que se reflete na flexão significativa da zona de ligação e, conseqüentemente, em elevadas tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição [28]. Estes picos de tensão somam-se às tensões de corte que ocorrem nos mesmos locais devido à deformação longitudinal dos substratos. Assim, esta configuração de junta não é utilizada para aplicações críticas.

A JSD consegue reduzir significativamente tanto as tensões de arrancamento como as tensões de corte: as tensões de arrancamento são reduzidas pela eliminação da flexão das juntas, que está na origem das altas tensões de arrancamento localizadas nas extremidades da sobreposição, enquanto as tensões de corte diminuem devido à redução da deformação diferencial dos substratos [29]. O resultado é um aumento da capacidade de carga das JSD sobre as JSS superior ao aumento da área de corte do adesivo. Uma limitação desta geometria de junta é o aumento do peso. As principais desvantagens deste tipo de junta são a maior morosidade no fabrico, os custos associados e a exigência de mão-de-obra especializada. Shin e Lee [30] compararam por ensaios experimentais e modelação de FE o desempenho de JSS e JSD entre substratos co-curados de compósito e metálicos. As distribuições de tensões de σ_y e de τ_{xy} foram comparadas e a JSD mostrou melhor comportamento devido à eliminação da deflexão transversal, redução de picos de tensões σ_y e supressão dos picos de tensões τ_{xy} na extremidade interior da sobreposição. Como resultado, a melhoria das JSD sobre as JSS ultrapassou a razão de área colada entre estes tipos de juntas, que é

de 2×. Kinloch [31] comparou as tensões τ_{xy} entre JSS e JSD coladas com um adesivo epóxico e substratos de alumínio, mostrando a redução das concentrações de tensão ao longo da sobreposição para as JSD.

Para além da configuração das juntas, as características dos adesivos também desempenham um papel crucial na resistência da junta, nomeadamente, a resistência e tenacidade / ductilidade dos adesivos. De facto, uma boa resistência permite a transferência de cargas elevadas por meio da camada do adesivo, enquanto a tenacidade permite que estas cargas sejam transmitidas através de uma grande parte da região de sobreposição. Sabe-se que um adesivo resistente mas frágil iria transferir cargas elevadas, mas apenas através de uma zona reduzida nas extremidades da sobreposição, não permitindo a plastificação e levando à fratura prematura da ligação adesiva [32]. Isto foi observado no trabalho de Campilho et al. [13] pelo estudo experimental e numérico de JSS entre substratos de compósito, considerando um adesivo frágil (Araldite[®] AV138) e um adesivo dúctil (Araldite[®] 2015) sob uma carga de tração. Foram ensaiadas juntas com L_0 entre 10 e 80 mm (com intervalos de 10 mm). Os resultados mostraram que, para ambos os adesivos, a carga de rotura ($P_{m\acute{a}x}$) aumentou linearmente sem obtenção de um valor limite de $P_{m\acute{a}x}$, o que corresponde à não cedência ou rotura do substrato. Comparando ambos os adesivos, para $L_0=10$ mm, o Araldite[®] AV138 mostrou um valor ligeiramente maior de $P_{m\acute{a}x}$ do que o Araldite[®] 2015, o que ocorreu devido ao facto de juntas com sobreposições muito reduzidas apresentarem distribuições de tensões quase uniformes. Nestas condições, a resistência do adesivo substitui a tenacidade como parâmetro mais relevante para a resistência das juntas. Uma vez que o Araldite[®] AV138 tem uma resistência mais elevada do que o Araldite[®] 2015, a respetiva junta apresenta uma maior resistência. No entanto, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 foi significativo para o Araldite[®] 2015, enquanto se revelou insignificante para o Araldite[®] AV138. Isto fica a dever-se à ductilidade do Araldite[®] 2015, que faz com que as juntas falhem apenas depois da plastificação que tem início nas extremidades de sobreposição e progride em direção ao interior da sobreposição, o que aumenta a tensão de corte média no momento de rotura.

2.2 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais distinguem-se entre si quanto à sua natureza, rigidez, resistência mecânica, resistência térmica, fragilidade, resistência à ação dos agentes químicos, composição química, modo de endurecimento, custo e desempenho.

Devido à base da sua estrutura molecular, os adesivos têm diversos tipos de classificação. Assim, podem ser classificados como [33]:

- Resinas termoplásticas (acrílica, poliamida, vinílica, entre outras);
- Resinas termoendurecíveis (fenólica, epóxido, poliéster, entre outras);
- Elastômeros (poliuretano, nitrilo, silicone, entre outros).

Tabela 3 – Propriedades mecânicas das três estruturas moleculares de materiais poliméricos [33].

Material Polimérico	Propriedades Mecânicas			
	Flexibilidade	Resistência mecânica	Resistência térmica	Resistência a agentes químicos
Resinas termoplásticas	Média	Medíocre	Medíocre	Boa
Resinas termoendurecíveis	Má	Boa	Boa	Boa
Elastômeros	Muito Boa	Má	Variável	Medíocre

Nas três estruturas moleculares apresentadas, verifica-se a existência de características específicas em cada uma, apresentando pontos fracos e fortes nas suas propriedades. Na Tabela 3 são comparadas as suas propriedades mecânicas, onde é possível verificar a diversidade existente.

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são normalmente fabricados com base em resinas termoendurecíveis. Estes devem garantir uma elevada rigidez, resistência à tração e uma flexibilidade suficiente para resistir às forças a que vão estar sujeitos, uma vez colocados em serviço. É espectável que resistam a forças consideráveis, permitindo que a resistência ao corte obtenha valores superiores a 6 MPa [34].

Dentro dos adesivos estruturais, podem-se considerar as seguintes famílias de adesivos [33]:

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

Os adesivos epóxidos e os adesivos fenólicos são os mais usados na indústria de construção mecânica, na colagem estrutural de componentes [33].

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Tal como referido anteriormente, considerando a classificação por estrutura molecular, os adesivos termoendurecíveis destacam-se como adesivos estruturais e, dentro destes, os adesivos fenólicos, acrílicos, poliuretanos e epóxidos levam vantagens entre os restantes.

No vasto leque de adesivos disponíveis, existem características distintas para a escolha do adesivo, conforme as propriedades necessárias e condições de utilização. Seguidamente são apresentadas as propriedades mais relevantes dos adesivos anteriormente mencionados [4, 33]:

Adesivos Fenólicos – inicialmente a utilização destes adesivos resumia-se à colagem de madeira. Posteriormente passaram a ser usados na colagem de metal atingindo uma resistência satisfatória. No entanto, as suas características de adesão são algo limitadas, assim como a resistência ao choque e às vibrações. De modo a ultrapassar esta limitação, têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com a resina vinílica ou um elastómero (policloropreno). Os adesivos fenólicos-vinílicos garantem uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento. A resistência à fadiga é boa devido às propriedades plastificantes da fase vinílica. Os adesivos fenólicos-policloropreno apresentam uma resistência mecânica superior às vibrações e às baixas temperaturas. No entanto, estes são sensíveis aos agentes químicos.

Adesivos Acrílicos – Nos adesivos acrílicos incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

- ✓ Os adesivos **anaeróbicos** têm uma grande aplicação na ligação de peças de geometrias cilíndricas, tais como a fixação de rolamentos, peças estriadas e roscadas. São geralmente líquidos monocomponentes que podem ser curados à temperatura ambiente e são de fácil utilização. O processo de endurecimento dá-se por uma reação de polimerização do tipo radical-livre, uma vez eliminado o oxigénio. Estes adesivos normalmente não curam fora da junta, já que estão em contacto com o oxigénio. Dá-se como exemplo o excesso do adesivo criado na altura do fabrico das juntas, cuja remoção é facilitada devido à ausência de cura. A sua resistência é bastante variável, podendo ser próxima da dos epóxidos.
- ✓ Os adesivos **cianoacrilatos** permitem colagens muito rápidas, quase instantâneas. A cura destes adesivos é influenciada pela humidade, pelo teor de pH do meio e pela espessura da junta colada. Apresentam uma resistência à tração excelente mas fragilidade e baixa resistência ao arrancamento. O custo também é elevado.
- ✓ Nos **adesivos acrílicos modificados**, a modificação faz-se com a introdução de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Apresentam elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Possuem baixa contração durante o processo

de cura e permitem ligações fortes, tolerando uma preparação mínima das superfícies e podem ser aplicados para unir uma grande variedade de materiais (especialmente os plásticos e metais). Como desvantagens, citam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada flamabilidade.

Adesivos Poliuretanos – estes adesivos possuem uma resistência ao corte e à tração inferiores quando comparados aos outros adesivos. Contudo, distinguem-se pelas seguintes características:

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

Estes adesivos podem ter uma resistência de rotura ao corte da ordem dos 20 MPa. Têm uma cura lenta à temperatura ambiente podendo ir até às 24 horas.

Adesivos Epóxicos – os adesivos epóxicos são fortemente utilizados para a colagem de metal, devido à sua elevada resistência mecânica e fácil aplicação. Estes adesivos permitem uma diversidade de aplicações, podendo ser usados em quase todos os materiais da indústria de construção mecânica. As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser alteradas adicionando outras resinas (tais como poliamida, fenólica ou polisulfido).

2.3 Previsão da resistência das juntas

No passado, a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados conduziu ao fabrico de juntas adesivas sobredimensionadas, o que invariavelmente resulta em estruturas mais pesadas e mais caras. Com a disponibilidade de metodologias de previsão fiáveis, surgiram novas possibilidades para o uso eficiente de juntas coladas. Podem ser escolhidas duas alternativas para a análise de juntas adesivas: análises de forma fechada (métodos analíticos) e métodos numéricos (por exemplo EF). O estudo de juntas adesivas remonta a 1930 com o modelo analítico de Volkersen [17] que considera os materiais totalmente elásticos e deformações do adesivo apenas em corte. No entanto, a formulação analítica de juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo se deformar plasticamente, se forem usados substratos de composto, ou se forem considerados substratos de materiais diferentes. O método de EF é a técnica mais utilizada para análise de juntas adesivas. Adams et al. [20] foram os pioneiros nesta técnica. A rotação da junta, a plasticidade dos substratos e dos adesivos e a influência do filete foram aspetos estudados em primeiro lugar por Harris e Adams [35]. A abordagem da mecânica contínua para a previsão da resistência das juntas coladas foi a técnica considerada em primeiro lugar para a previsão da

resistência de juntas adesivas, e requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. O método de EF também pode ser usado em conjunto com critérios da mecânica da fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade de tensão ou por métodos energéticos, como a técnica de fecho virtual da fenda. Contudo, com estas técnicas de modelação, o crescimento da fenda torna-se complicado devido à necessidade de voltar a criar a malha sempre que há propagação da fenda, o que tem consequências a nível do esforço computacional [36]. A modelação numérica de juntas adesivas teve grandes desenvolvimentos nas últimas décadas, e um deles é a modelação de dano por combinação de EF com MDC. Esta técnica combina a técnica de EF convencional para as regiões em que não é esperado dano e uma abordagem da mecânica da fratura através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação do dano. Uma alternativa muito recente para modelar a propagação de fendas nos materiais é o Método dos Elementos Finitos Estendido, que usa funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

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

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fratura;
- Mecânica do dano;
- Modelos de dano coesivo;
- Método dos Elementos Finitos Estendido.

2.3.1 Mecânica dos meios contínuos

Na abordagem da mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos por modelos analíticos ou por EF, são geralmente usados em critérios de rotura para estimar a resistência da junta. Isto é alcançado quando os valores previstos, obtidos por critérios de tensão ou deformação (por exemplo, o Critério de Tensão Normal Máxima ou o Critério de Tensão de Corte Máxima) atingem os valores limites dos materiais. Esta abordagem foi rapidamente aplicada para juntas em aplicações estruturais após a disponibilização do método de EF e programação de computador [35]. A vantagem desta técnica inclui a análise de estruturas coladas com ou sem dano inicial, e sob uma carga arbitrária. Todavia, esta técnica tem uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas coladas são propensas a tensões localizadas nas extremidades das regiões de sobreposição, devido às arestas vivas. Como resultado, na análise da estrutura colada em EF, a tensão nestas zonas aumenta com o refinamento da malha e não se consegue obter convergência, dando previsões dependentes da malha [37]. Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias a esta técnica de modelação, tais como a definição dos critérios mais

complexos de tensões ou deformações para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de meios contínuos mais realistas, mas ainda assim a dependência da malha continua sem solução.

2.3.1.1 Modelos analíticos

Voltando ao início da análise de estruturas ligadas, os métodos de previsão consistiam em técnicas analíticas, e as formulações de Volkersen [17] e Goland e Reissner [18] foram pioneiras numa série de estudos teóricos que tiveram a vantagem de simplificar os campos de tensão nas estruturas coladas devido ao uso de hipóteses simplificativas em termos de geometria das estruturas, carregamento e condições de fronteira, dando soluções eficientes em forma fechada. Assim, cada estrutura colada pode ser analisada de forma rápida, ainda que com muitos pressupostos incorporados [37]. Com estes modelos, as tensões e deformações podem ser facilmente calculadas, juntamente com a distribuição do momento fletor na estrutura. A resistência foi tipicamente prevista por critérios de tensão ou deformação. Até hoje, estes estudos foram progressivamente substituídos por análises numéricas, embora os estudos teóricos também tenham sido refinados ao longo dos anos em termos de capacidades de modelação, tais como adesivos não-lineares [38] ou análises geométricas não-lineares [39].

2.3.1.2 Modelos de Elementos Finitos

Por esta abordagem, utilizam-se análises de EF para estimar os campos de tensões nas juntas adesivas e na camada de adesivo, ao invés de utilizar os métodos analíticos anteriormente referidos. Uma das vantagens da utilização desta técnica é a possibilidade de análise de qualquer geometria de junta adesiva. Os primeiros trabalhos no âmbito deste método utilizaram as tensões principais máximas para estimar a rotura de materiais muito frágeis cuja rotura ocorre perpendicularmente em relação à direção da tensão principal máxima. Este critério ignora todas as outras tensões principais, mesmo que não sejam nulas. Adams et al. [11] usaram extensivamente este critério com sucesso para a previsão da resistência das juntas. No entanto, por causa da singularidade de tensões nos cantos reentrantes das juntas, as tensões dependem do tamanho e da malha utilizada e quão perto são tomadas as tensões dos pontos singulares. Na tentativa de ultrapassar esta limitação, foram utilizados os valores das tensões nos pontos de Gauss ou extrapolados os valores em pontos de Gauss para as zonas de singularidade. Portanto, é preciso ter cuidado com a utilização da tensão principal máxima. Embora este critério seja sensível ao tamanho da malha utilizada, a percepção física do processo de rotura é muito clara, já que a tensão principal máxima é a maior responsável pela rotura das juntas coladas com adesivos frágeis. Porém, deve-se notar que os cantos dos substratos geralmente não apresentam uma aresta viva. Devido ao processo produtivo, os cantos

são ligeiramente arredondados. Isto pode afetar a distribuição de tensões nos cantos dos substratos e, por conseguinte, a resistência da junta, já que as tensões são muito sensíveis à variação da geometria. Uma consequência do arredondamento dos substratos é a não existência da singularidade, o que facilita a aplicação de um critério de tensão ou deformação limites. Adams e Harris [40] demonstraram teórica e experimentalmente que a resistência de JSS com substratos arredondados e um adesivo dúctil aumentou substancialmente em relação às juntas com arestas vivas. Mais recentemente, Zhao et al. [41, 42] também estudaram o efeito do arredondamento dos substratos. Um exemplo de distribuição de tensões é dado pela Figura 16, em função do grau de arredondamento, que mostra que a singularidade de tensões desaparece com um pequeno grau de arredondamento.

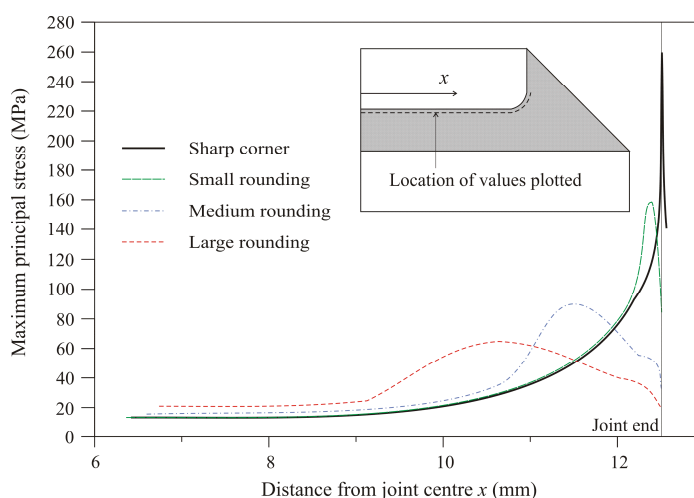


Figura 16 – Distribuição de tensões em função do grau de arredondamento dos substratos [41].

2.3.1.3 Critérios de rotura

De seguida descrevem-se alguns critérios de rotura que podem ser considerados para a análise da resistência das juntas. von Mises propôs um critério de cedência que afirma que os materiais cedem sob tensões multi-axiais quando a sua energia de distorção atinge um valor crítico,

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constante}, \quad (1)$$

onde σ_i ($i=1, 2, 3$) são as tensões principais. Este critério foi utilizado por Ikegami et al. [43] para estudar a resistência de juntas em chanfro entre compósitos de fibra de vidro e metais.

As tensões de corte têm sido extensivamente utilizadas para prever a resistência de juntas de sobreposição, especialmente em análises de forma fechada, considerando uma tensão máxima de corte igual à resistência ao corte do adesivo maciço. Greenwood [44] usou a tensão máxima de corte calculada pela análise de Goland e Reissner [18] para prever a resistência da junta. A *Engineering Sciences Data Unit* [45] implementou este critério num *software* comercial. Mais

recentemente, John et al. [46] utilizaram as tensões de corte em juntas com uma distância crítica para prever a resistência das JSD. Lee e Lee [47] também usaram a tensão de corte máxima em juntas tubulares. da Silva et al. [48, 49] demonstraram para as JSS que este critério só é válido para adesivos frágeis e comprimentos de sobreposição reduzidos. Esta abordagem ignora as tensões normais existentes em juntas de sobreposição e, portanto, sobrestima a resistência da junta.

Quando são utilizados adesivos dúcteis, os critérios baseados em tensões não são apropriados, porque as juntas ainda podem suportar grandes esforços após o adesivo ceder. Para adesivos dúcteis, Adams e Harris [50] usaram a deformação principal máxima como critério de rotura para prever a resistência da junta. Este critério também pode prever o modo de rotura. No entanto, é igualmente sensível ao tamanho de malha, tal como previamente discutido para o critério da tensão principal máxima.

2.3.2 Mecânica da fratura

A Mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os materiais são contínuos. Desta forma, não se enquadram nesta suposição defeitos ou dois materiais com cantos reentrantes. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não fornece nenhuma solução para o estado de tensão destes pontos singulares, resultando em tensões ou deformações localizadas. As fendas são os defeitos mais comuns em estruturas, para as quais se desenvolveu a mecânica da fratura. Na mecânica da fratura é bem aceite que tensões calculadas usando a mecânica dos meios contínuos são singulares (infinitos) na extremidade da fenda. Sabe-se que tal singularidade existe sempre que o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este resultado foi descoberto por Williams [51] para as tensões singulares num entalhe. Este argumento é igualmente aplicável para as tensões singulares em dois materiais colados entre si com um canto reentrante. A mecânica da fratura tem sido aplicada, com sucesso, em muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos que lidam com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação, e o respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura [52] em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda se propaga numa interface ou perto dela. Contudo, a fratura de juntas adesivas ocorre usualmente em modo misto por causa das variações das propriedades entre os diferentes materiais e do campo de tensões complexo. Os critérios de rotura em modo misto podem tomar uma forma idêntica aos critérios clássicos de rotura, embora deva ser introduzido o conceito de superfície ou envelope de fratura para lidar com a mixicidade do carregamento.

2.3.3 Mecânica do dano

Atualmente estão disponíveis técnicas avançadas de modelação que garantem previsões precisas de rotura, superando as limitações das abordagens anteriores. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou uma região interfacial, reduzindo a transferência de carga. Uma simulação de EF com base em modelação sólida contínua gera indevidamente plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo de mecânica do dano pode simular dano nos elementos pela redução das cargas transferidas. Como resultado, torna-se possível a simulação passo-a-passo do dano e fratura num caminho pré-definido ou arbitrariamente dentro de uma região [53]. Este é ainda um campo inovador sob intenso desenvolvimento, no sentido de obter técnicas mais precisas de modelação, métodos de estimativa de parâmetros de materiais fiáveis e simples, aumento de robustez e eliminação de problemas de convergência [54]. As técnicas de modelação do dano podem ser locais ou contínuas. Dentro da modelação de dano local, o dano ocorre numa linha ou superfície (análise a duas dimensões (2D) ou a três dimensões (3D), respetivamente), que simula uma rotura interfacial entre materiais, por exemplo, entre a ligação adesiva e o substrato, a fratura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Pela modelação contínua, o dano estende-se por uma área ou volume finitos (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular uma rotura ou para modelar uma fratura coesiva do adesivo. Os MDC são a técnica englobada na mecânica do dano com maior aplicação a juntas adesivas.

2.3.4 Modelos de dano coesivo

A implementação em computador das técnicas baseadas na Mecânica da Fratura Linear Elástica teve um grande sucesso há algumas décadas, mas estas encontram-se limitadas ao comportamento elástico dos materiais. Além disso, os adesivos dúcteis atualmente existentes desenvolvem zonas plásticas que podem ser maiores do que a espessura dos substratos. Os MDC foram desenvolvidos no final de 1950 / início de 1960 [55] para descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo coesiva à frente da extremidade da fenda, dando uma solução promissora para prever danos em estruturas coladas. Os MDC foram amplamente testados, desde então, para simular a iniciação e propagação de fendas em problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [56]. Estes elementos podem ser facilmente incorporados numa análise de EF para modelação do comportamento da rotura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [57]. O princípio base dos MDC é que uma ou mais regiões ou interfaces de roturas podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, em que se possibilita o crescimento do dano pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. Isto é

possível pela definição de leis de tração-separação para a modelação de interfaces ou regiões finitas. As leis dos MDC são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos, e estas podem ligar nós sobrepostos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, ou podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contato para simular uma camada fina (por exemplo, uma ligação adesiva). Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica de dano definida pela resposta das leis de tração-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. A propagação das fendas é baseada nas energias de rotura. É modelada a evolução da resistência e amaciamento até à rotura, o que permite ter em conta a degradação progressiva das propriedades do material. As leis de tração-separação são tipicamente construídas por relações lineares em cada uma das fases de carregamento [58], embora se possa definir uma ou mais fases de forma diferente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

2.3.5 Método de Elementos Finitos Estendido

O Método de Elementos Finitos Estendido é uma melhoria recente do método de EF para modelar o crescimento de dano em estruturas. O método utiliza leis de dano para a previsão da fratura baseadas na resistência dos materiais em maciço para a iniciação de dano e deformações para a rotura (definido como G_{IC}), em vez dos valores de resistência coesiva à tração/corte (t_n^0/t_s^0) ou deslocamentos correspondentes à resistência coesiva à tração/corte (δ_n^0/δ_s^0) utilizados nos MDC. O Método de Elementos Finitos Estendido tem a vantagem em relação aos MDC, da fenda não necessitar de seguir um caminho pré-definido. De facto, as fendas podem-se propagar livremente dentro de uma região do material, sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades ou que haja a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [59]. Este método é uma extensão à modelação convencional por EF, cujas características fundamentais foram referenciadas no final dos anos 90 por Belytschko et al. [60]. O Método de Elementos Finitos Estendido baseia-se no conceito de partição da unidade e pode ser implementado no método de EF tradicional através da introdução de funções locais de enriquecimento para os deslocamentos nodais perto da fenda, para permitir o seu crescimento e a separação entre as faces da fenda [61]. Devido ao crescimento de dano, a extremidade da fenda modifica continuamente a sua posição e orientação em função das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente com a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF na proximidade da extremidade da fenda.

3 Trabalho Experimental

3.1 Materiais

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais utilizados nas juntas adesivas (adesivos e substratos), e é feita a análise detalhada das propriedades mecânicas mais relevantes.

3.1.1 Substratos

Os substratos utilizados neste trabalho consistem numa liga de alumínio Al6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A seleção desta liga deveu-se ao facto de esta ter um amplo campo de aplicações estruturais. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [62], onde foram definidas as propriedades representadas na Tabela 4. As curvas de tensão-deformação (σ - ε) dos substratos de alumínio apresentadas na Figura 17 foram obtidas experimentalmente [62]. Na Figura 17 também se representa a aproximação considerada para utilização nas simulações numéricas.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas à tração da liga de alumínio Al6082-T651 [62].

Propriedades	Valor
Módulo de Young, E [GPa]	70,07±0,83
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	261,67±7,65
Resistência à tração, σ_f [MPa]	324,00±0,16
Deformação de rotura, ε_f [%]	21,70±4,24

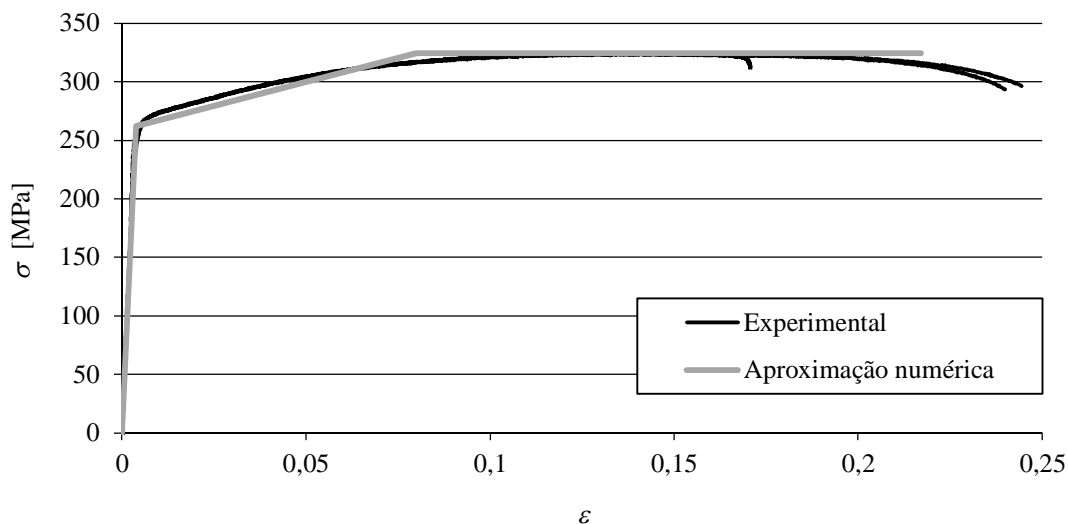


Figura 17 – Curvas σ - ε do alumínio Al6082-T651 [62].

3.1.2 Adesivos

Neste trabalho foram usados três adesivos: o Araldite[®] AV138, o Araldite[®] 2015 e o Sikaforce[®] 7888.

3.1.2.1 Adesivo Araldite[®] AV138

O Araldite[®] AV138 com o endurecedor HV 998 é um sistema epóxico bi-componente que, quando combinado, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. Este é um adesivo frágil. A combinação dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100g/40g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso ao uso de uma espátula.

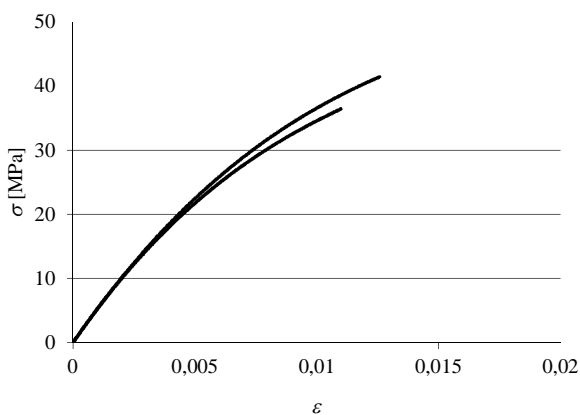


Figura 18 – Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite[®] AV138 [63].

As curvas σ - ε dos provetes maciços ensaiados à tração são apresentadas na Figura 18. Estas curvas foram obtidas experimentalmente [63]. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo são descritas na Tabela 5.

Tabela 5 – Propriedades do Araldite® AV138 [64].

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

^a Valor do fabricante.

^b Valores estimados na referência [65].

3.1.2.2 Adesivo Araldite® 2015

O Araldite® 2015 é um adesivo epóxico estrutural bi-componente de ductilidade moderada. Este adesivo, comparado com o Araldite® AV138, oferece resistências à tração e ao corte inferiores. Contudo, por ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas extremidades das juntas [63]. O Araldite® 2015 é fornecido em cartuchos, possui dois componentes, e a sua cura é efetuada à temperatura ambiente. A sua razão de aplicação é de 50g/50g, sendo a mistura realizada por um bico e aplicado por meio de uma pistola de aplicação.

Na Figura 19 são apresentadas as curvas σ - ε dos provetes maciços ensaiados à tração [63]. Os valores das principais propriedades mecânicas e de fratura deste adesivo são apresentados na Tabela 6. Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, a tensão de rotura ao corte e à tração do Araldite® AV138 é praticamente o dobro do Araldite® 2015.

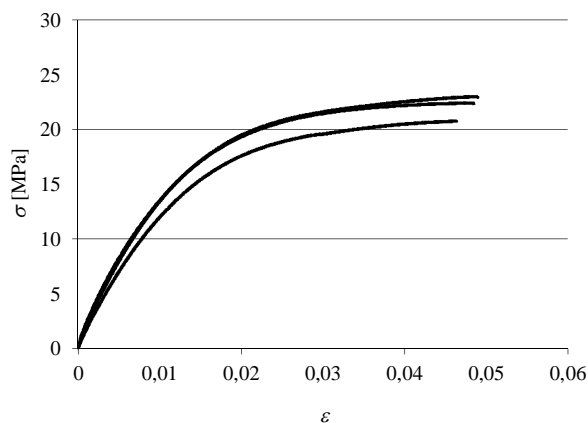


Figura 19 – Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [63].

Tabela 6 – Propriedades do Araldite® 2015 [63].

Propriedades	Valor
Módulo de Young, E [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	12,63±0,61
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	4,77±0,15
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	4,70±0,34

^a Valor do fabricante.

3.1.2.3 Adesivo Sikaforce® 7888

O Sikaforce® 7888 é um adesivo estrutural de base poliuretano de alta resistência e ductilidade. Este adesivo é composto por dois componentes, e a sua cura é feita à temperatura ambiente. Este adesivo é aplicado recorrendo ao uso de uma pistola pneumática. É o mais dúctil dos três adesivos utilizados e é particularmente aplicado na indústria automóvel [66]. Este adesivo faz parte de uma nova geração de adesivos que combinam a elevada resistência dos epóxidos com a capacidade de deformação dos elastómeros. Apresenta uma elevada resistência e capacidade de alongamento, e ainda uma elevada resistência a esforços dinâmicos, o que beneficia a sua resistência à fadiga [67].

Na Figura 20 é apresentada uma curva σ - ε representativa de ensaio de provetes maciços para este adesivo [65].

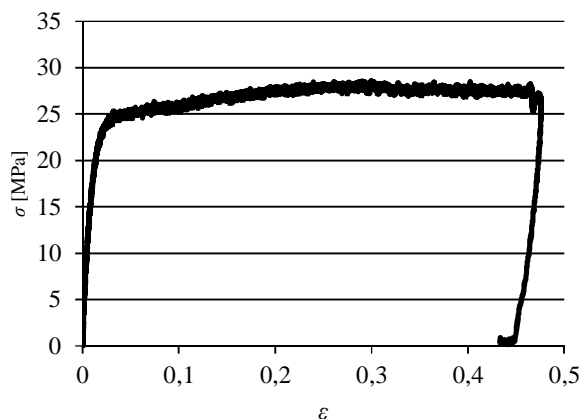


Figura 20 – Curva σ - ε de um provete maciço do adesivo Sikaforce® 7888 [65].

Os valores das principais propriedades deste adesivo estão presentes na Tabela 7 [65].

Tabela 7 – Propriedades do Sikaforce® 7888 [65].

Propriedades	Valor
Módulo de Young, E [GPa]	1,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,33 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	13,20±4,83
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	28,60±2,0
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	43,0±0,6
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	0,727 ^b
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	-
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	20 ^a
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	100 ^a
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	1,18±0,22
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	8,72±1,22

^a Valor do fabricante.

^b Valor estimado pela Lei de Hooke.

3.2 Procedimento experimental

O trabalho experimental consistiu no ensaio de JSD unidas por uma ligação adesiva e sujeitas a um esforço de tração. O objetivo é determinar a resistência que estas oferecem quando sujeitas a esta

solicitação e estudar a variação da resistência máxima em função de L_O e do adesivo utilizado. Foram também utilizados dados experimentais das JSS com geometria e adesivos idênticos, obtidos num trabalho anterior [1], para comparação das duas configurações de junta. Na descrição que se segue os resultados dos dois tipos de junta são apresentados em simultâneo.

3.2.1 Geometria das juntas

A Figura 21 representa a geometria e dimensões características das JSS e JSD, 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_O). Foi efetuado um estudo paramétrico do valor de L_O , considerando os valores de 12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm. A largura de todas as juntas foi de 25 mm. Deve ser referido que neste trabalho se consideraram valores idênticos de t_p para os substratos exteriores e interior, em oposição à utilização de áreas de secção idênticas dos dois lados da zona de ligação, isto é, considerando o substrato interior com o dobro de t_p dos dois substratos exteriores. Esta escolha não compromete os objetivos deste trabalho de comparar os diferentes adesivos em JSS e JSD e de avaliar a capacidade de previsão dos MDC.

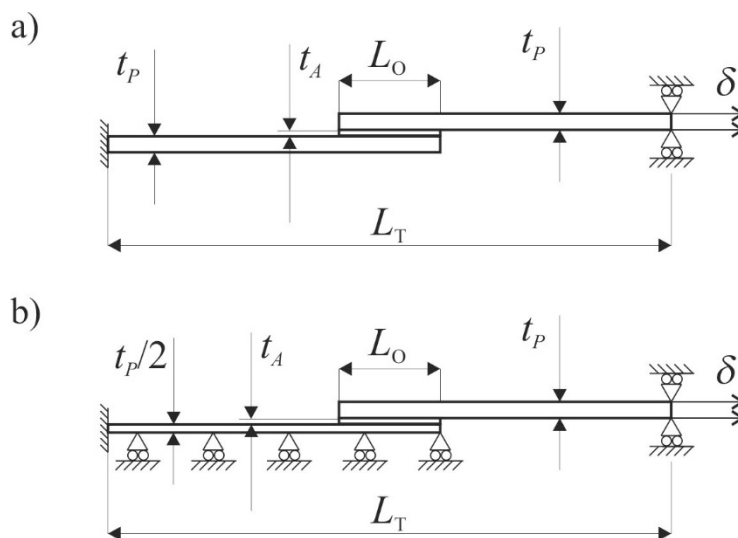


Figura 21 – Configuração da geometria dos provetos de JSS (a) e JSD (b).

As dimensões referidas anteriormente são apresentadas na Tabela 8.

Tabela 8 – Dimensões das JSS e JSD.

Parâmetro	Valor [mm]			
L_O	12,5	25,0	37,5	50,0
L_T	170,0	170,0	170,0	170,0
t_P	3,0	3,0	3,0	3,0
t_A	0,2	0,2	0,2	0,2

3.2.2 Processo de fabrico

Seguidamente, apresenta-se o processo de fabrico das JSD, que no entanto foi idêntico ao seguido para as JSS, analisadas na referência [1]. Os substratos foram fornecidos já nas suas dimensões finais, ou seja, 140x25x3 mm³. Foram necessários 60 substratos para garantir 5 provetes para cada configuração de junta.

Os substratos foram inicialmente submetidos à preparação de superfície e limpeza. A preparação da superfície consistiu no processo de lixagem dos substratos (Figura 22 a) de modo a remover camadas de óxidos e dar rugosidade à superfície, com o objetivo de melhorar o processo de colagem e ancoragem do adesivo. A limpeza superficial dos substratos foi efetuada com acetona (Figura 22 b). A Figura 23 representa um conjunto de substratos após o processo de limpeza.



Figura 22 – Preparação de superfície por lixagem (a) e limpeza dos substratos (b).



Figura 23 – Aspeto dos substratos após preparação superficial e limpeza.

Concluído o processo anteriormente descrito, procedeu-se à preparação para aplicação do adesivo. Foi necessária a utilização de barras de apoio para fixar e alinhar os substratos (Figura 24), assim como colocar fio de pesca calibrado com diâmetro de 0,2 mm nas extremidades da zona de sobreposição de forma a garantir uma espessura de adesivo constante (Figura 25).



Figura 24 – Fixação e alinhamento dos substratos.



Figura 25 – Substratos com fio de pesca calibrado de 0,2 mm.

Seguidamente a este trabalho preparatório iniciou-se a colagem dos substratos. Após aplicação do adesivo na face de colagem de um dos substratos (Figura 26), procedeu-se ao correto posicionamento entre ambos. Este contacto foi sempre feito de forma cuidada para manter o alinhamento dos substratos. Seguidamente foram colocados grampos na zona de sobreposição para, através de pressão, se garantir o valor de t_A desejado, o que resultou na expulsão do excesso do adesivo (Figura 27). Devido à dificuldade de remoção do excesso de adesivo entre os substratos exteriores dos provetes, ao fim de poucos minutos do processo de colagem, com o auxílio de um x-ato, procedeu-se à remoção do mesmo nesta zona. Finalizado todo este processo, os provetes ficaram em processo de cura, à temperatura ambiente, durante uma semana. O excesso de adesivo nas arestas exteriores foi removido com mó após cura total (Figura 28).



Figura 26 – Aplicação do adesivo Sikaforce® 7888.



Figura 27 – Colocação de grampos.

Este procedimento torna-se necessário dado que estes excessos influenciam a resistência da junta relativamente à geometria teórica, em que apenas existe uma camada de adesivo com t_A constante na zona da sobreposição.



Figura 28 – Remoção do excesso de adesivo.

3.2.3 Procedimento de ensaio

Os ensaios de tração foram realizados numa máquina de ensaios Shimadzu®, modelo AG-X 100, equipada com uma célula de carga de 100 kN e com uma distância entre maxilas de 170 mm, à temperatura ambiente. A velocidade de ensaio foi de 1 mm/min para todos os provetes.

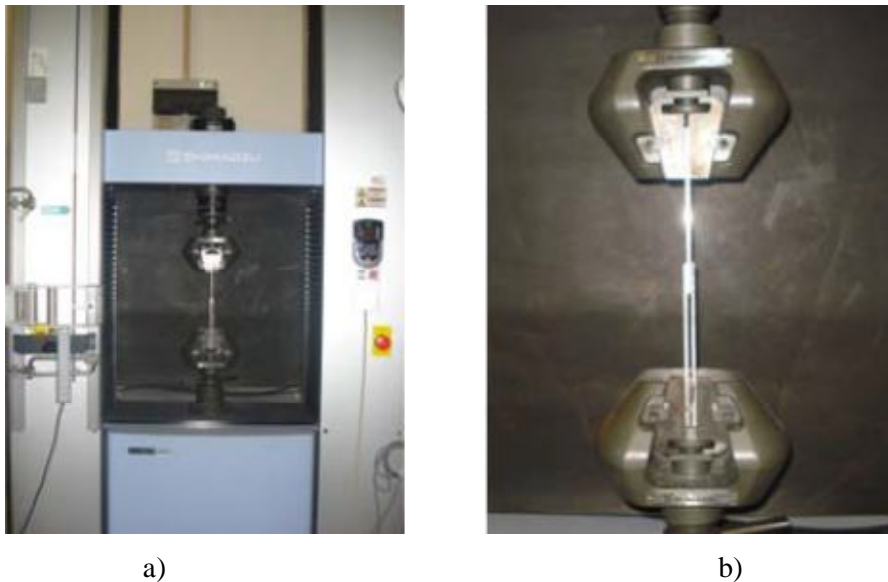


Figura 29 – Máquina de ensaios Shimadzu (a) e a respetiva fixação do provete (b).

3.3 Resultados

Neste subcapítulo são apresentados os modos de rotura e as curvas $P-\delta$ para as diferentes configurações de JSD e também alguns resultados para as JSS [1]. São apresentadas também as $P_{\text{máx}}$, efetuada a análise dos dados obtidos experimentalmente e a comparação entre as JSS e JSD.

3.3.1 Modos de rotura

Neste subcapítulo são representados os modos de rotura obtidos para as JSD, após ensaio, para os três tipos de adesivos utilizados. Também são apresentados os modos de rotura para as JSS [1].

Araldite® AV138

✓ JSS

Num trabalho experimental anterior [1] foram obtidas roturas coesivas no adesivo para todos os provetes ensaiados. Contudo, as roturas ocorreram muito próximas da interface entre o adesivo e o substrato. Na Figura 30 apresentam-se exemplos das superfícies de rotura para o Araldite® AV138 nas JSS.

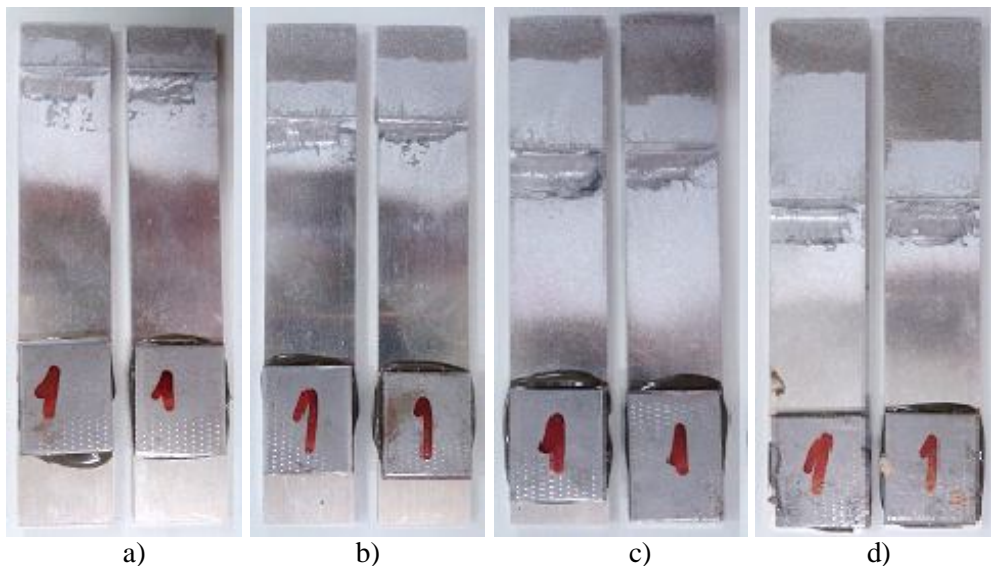


Figura 30 – Modos de rotura (JSS): Araldite® AV138 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1].

✓ JSD

Nos ensaios com o adesivo Araldite® AV138 obtiveram-se roturas coesivas no adesivo, embora por vezes próximas da interface, tal como é visível na figura seguinte.

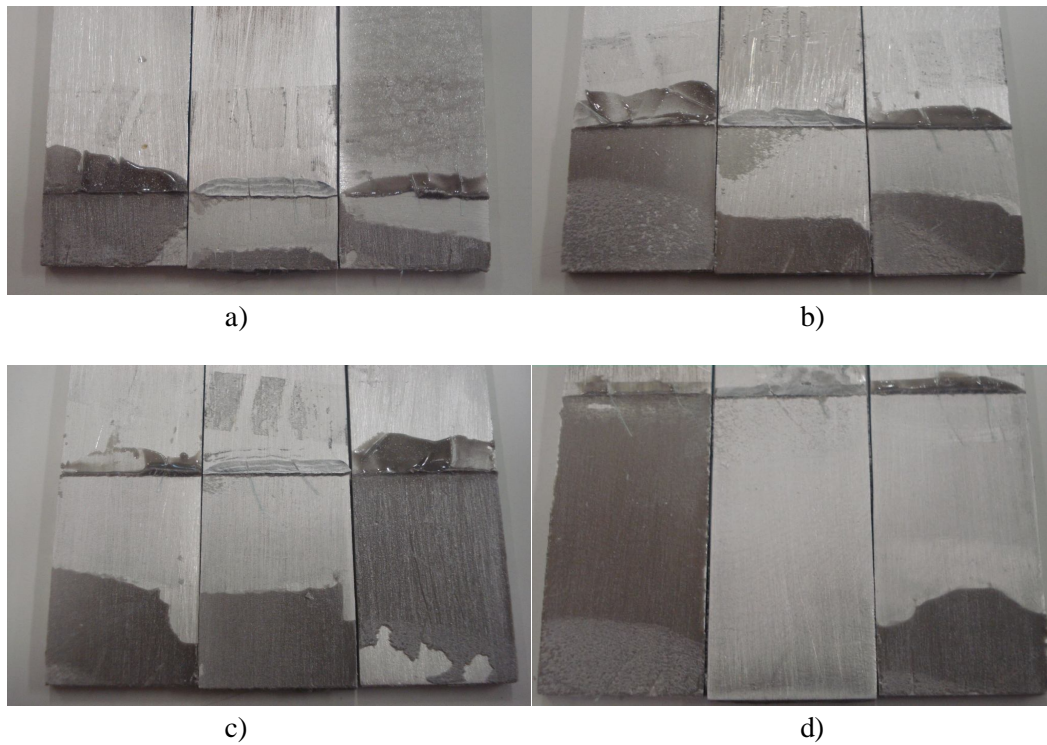


Figura 31 – Modos de rotura (JSD): Araldite® AV138 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).

Araldite® 2015

✓ JSS

Tal como sucedeu nas juntas coladas com o Araldite® AV138, no trabalho experimental anterior [1] foram apenas obtidas roturas coesivas no adesivo, conforme é possível verificar na Figura 32.

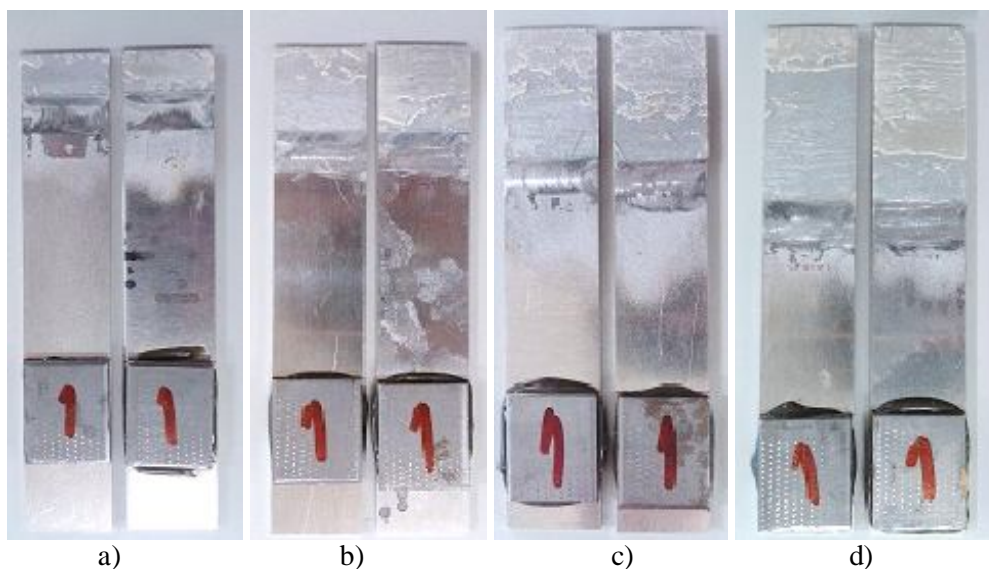


Figura 32 – Modos de rotura (JSS): Araldite® 2015 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1].

✓ **JSD**

Nos ensaios com o adesivo Araldite® 2015 obtiveram-se roturas coesivas no adesivo e roturas pelo substrato, tal como indicado na Figura 33.

A Tabela 9 exemplifica a distribuição de roturas coesivas no adesivo e pelo substrato em função de L_0 , para as JSD testadas neste trabalho.

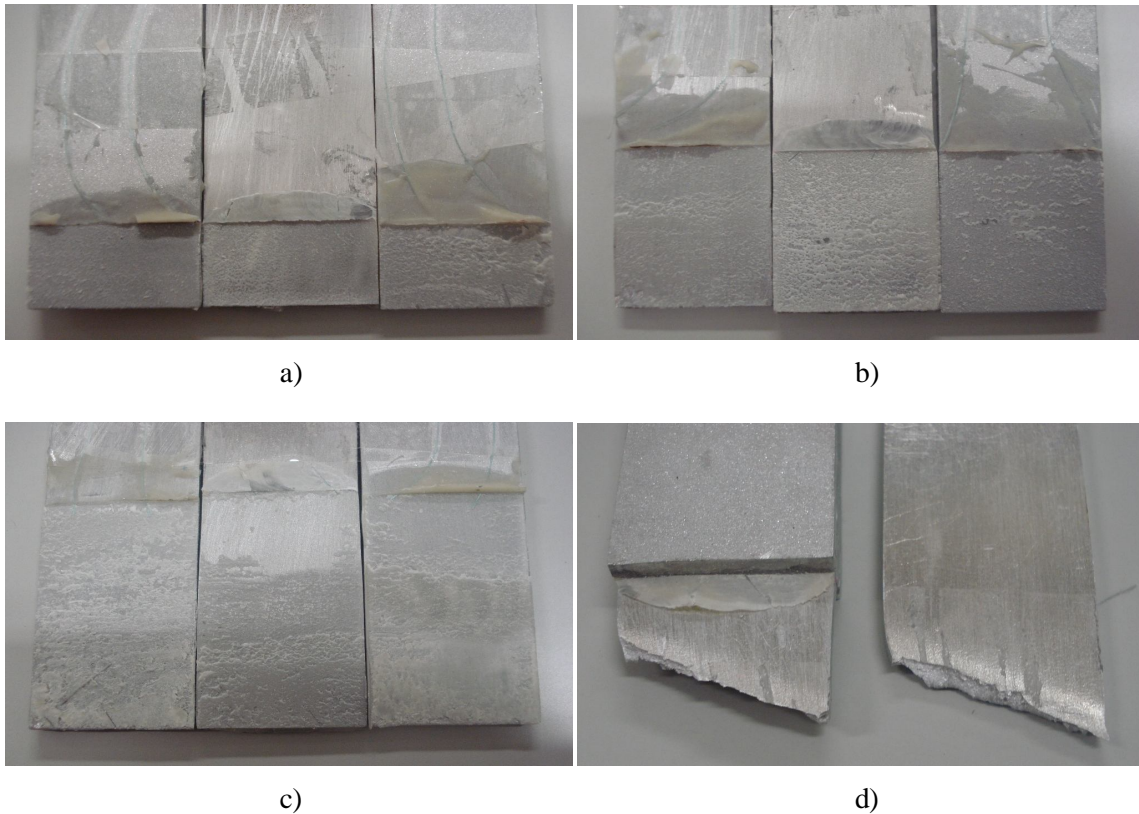


Figura 33 – Modos de rotura (JSD): Araldite® 2015 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).

Tabela 9 – Roturas obtidas para o adesivo Araldite® 2015.

Provete	12,5	25	37,5	50
1	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Substrato
2	Coesiva	Substrato	Substrato	Substrato
3	Coesiva	Substrato	Coesiva	Substrato
4	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Substrato
5	Coesiva	Coesiva	Substrato	Substrato

Sikaforce® 7888

✓ **JSS**

Para o Sikaforce® 7888, nas JSS, sucedeu uma rotura coesiva no adesivo na totalidade dos provetes em que este foi empregue (Figura 34) [1].

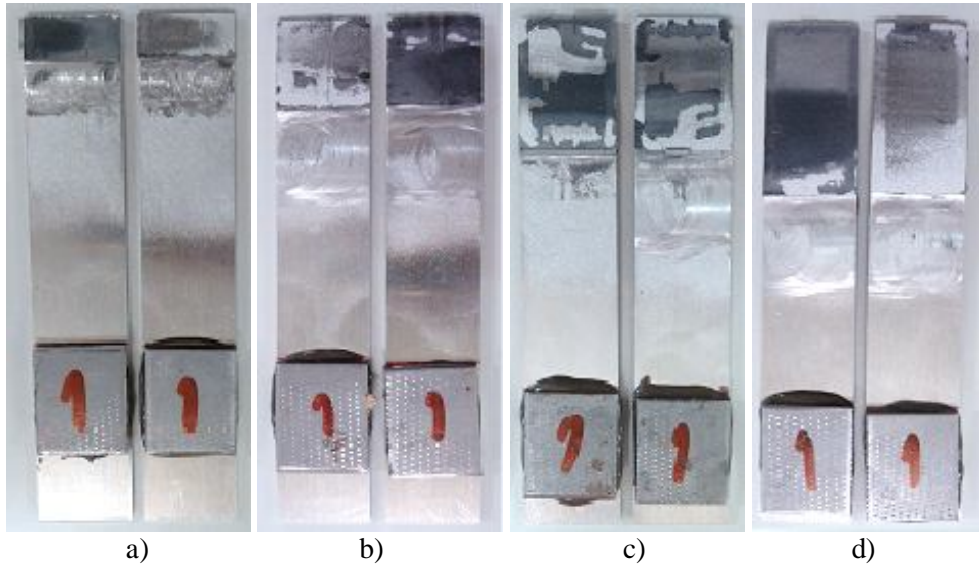


Figura 34 – Modos de rotura (JSS): Sikaforce® 7888 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d) [1].

✓ **JSD**

Dos ensaios com o adesivo Sikaforce® 7888 resultaram na maioria roturas coesivas no adesivo, embora também se tenham observado algumas roturas pelo substrato, tal como indicado na Figura 35.

Na Tabela 10 mostra-se os tipos de rotura obtidos em função do valor de L_0 , para as JSD testadas neste trabalho. As roturas coesivas mencionadas são no adesivo.

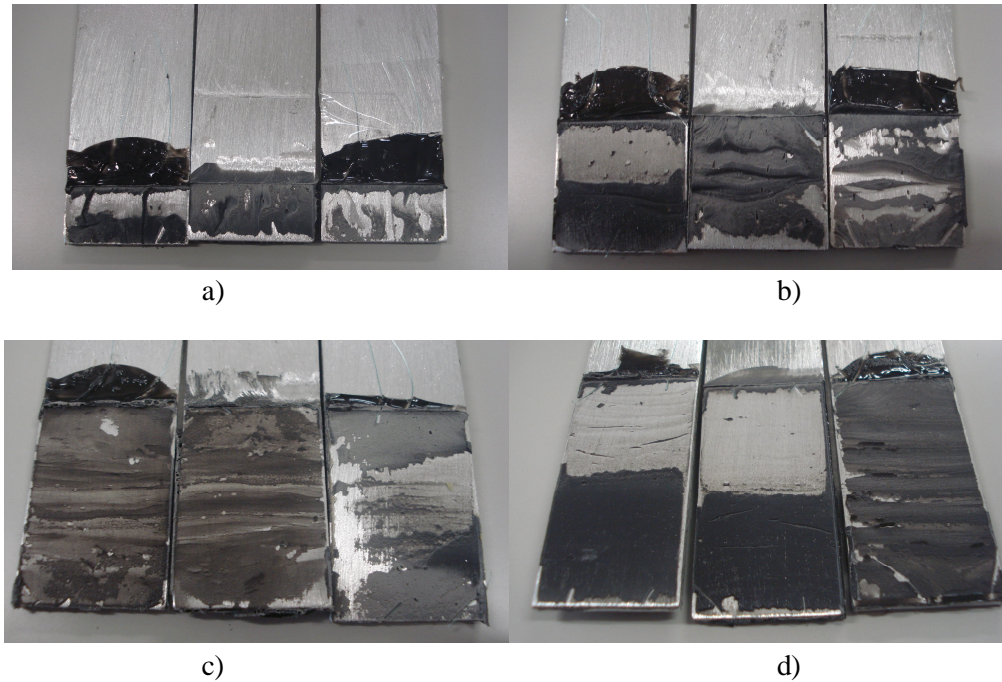


Figura 35 – Modos de rotura (JSD): Sikaforce® 7888 com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).

Tabela 10 – Roturas obtidas para o adesivo Sikaforce® 7888.

Provete	12,5	25	37,5	50
1	Coesiva	Coesiva	Substrato	Substrato
2	Coesiva	Substrato	Substrato	Coesiva
3	Coesiva	Coesiva	Coesiva	Coesiva
4	Coesiva	Coesiva	Substrato	Coesiva
5	Coesiva	Substrato	Coesiva	Coesiva

3.3.2 Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo são representadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para os diferentes adesivos e valores de L_0 , assim como as $P_{\text{máx}}$ para cada um dos adesivos. Também são representadas curvas $P-\delta$ para as JSS, obtidas num trabalho anterior [1], para comparação de resultados.

✓ JSS

Na Figura 36 estão representados exemplos de curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para os três tipos de adesivos utilizados nas JSS.

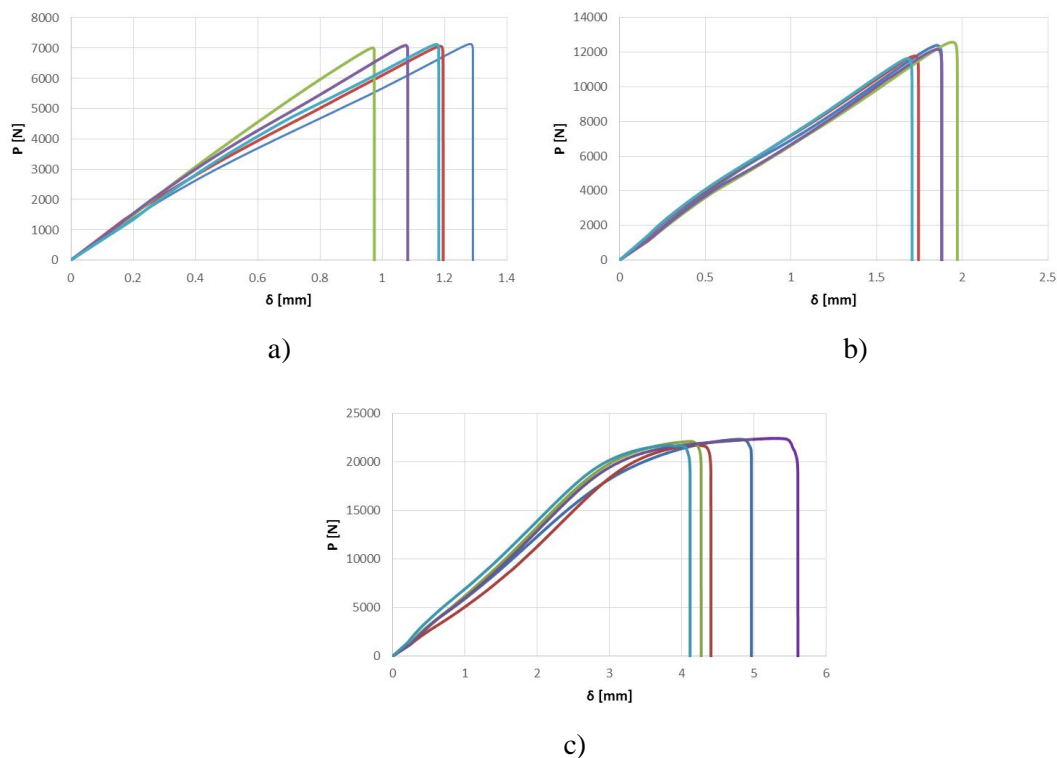


Figura 36 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para as JSS: Araldite[®] AV138 com $L_0=25$ mm (a), Araldite[®] 2015 com $L_0=37,5$ mm (b), Sikaforce[®] 7888 com $L_0=50$ mm (c) [1].

Na Tabela 10 são apresentados os valores médios de $P_{\text{máx}}$. Verifica-se um comportamento linear da junta até à rotura para os adesivos Araldite[®] AV138 e Araldite[®] 2015 e para todos os valores de L_0 . O Sikaforce[®] 7888 apresenta um comportamento não linear na proximidade de $P_{\text{máx}}$ para $L_0=50$ mm, devido à elevada plasticidade do adesivo, o que induziu cargas mais elevadas e, conseqüente, plastificação dos substratos. Para os outros valores de L_0 as curvas foram lineares. No geral, existe uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento [1].

Tabela 11 – Valores médios de $P_{\text{máx}}$ [N] para as JSS e para os diferentes adesivos [1].

L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite [®] AV138	5793,2	7079,1	8417,1	9342,2
Araldite [®] 2015	5520,5	9207,7	12116,8	13927,9
Sikaforce [®] 7888	8099,4	13311,4	17427,8	22097,0

✓ JSD

Araldite[®] AV138

Na Figura 37 são apresentadas as curvas P - δ . Na Tabela 12 podem-se visualizar os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente, em JSD, para o Araldite[®] AV138 e para os diferentes valores de L_0 .

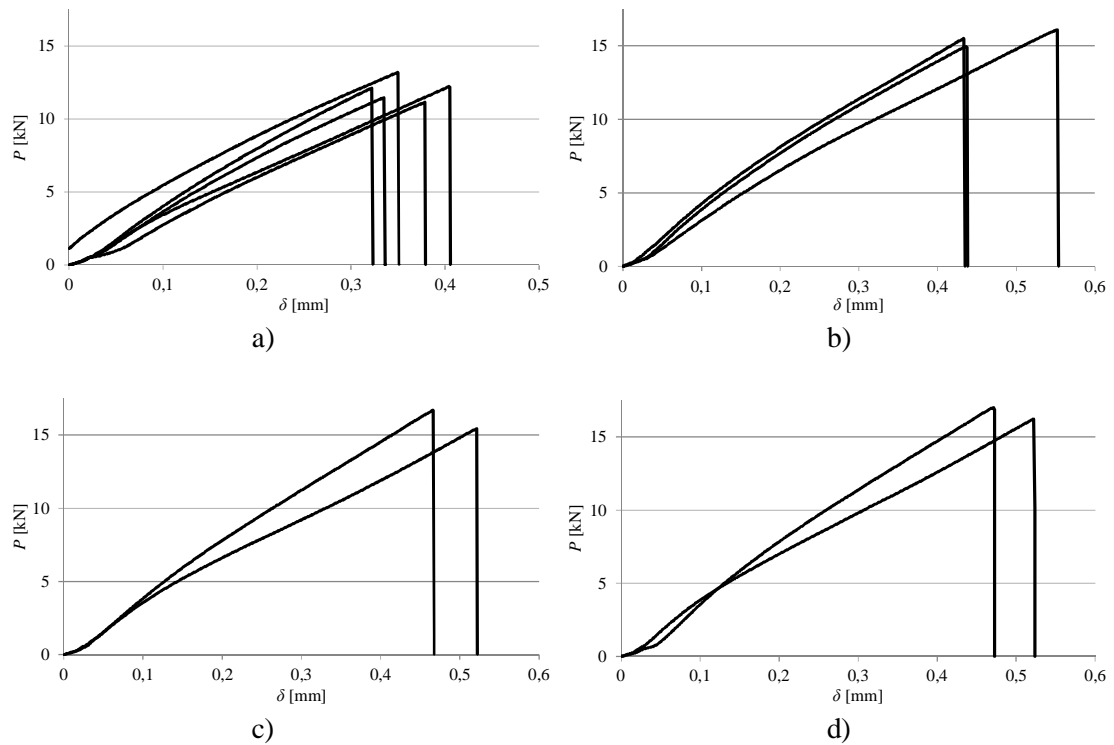


Figura 37 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSD) para o Araldite[®] AV138, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).

Verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura. Apenas se regista a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e questões de amarração dos provetes. Refira-se que os provetes cujos valores não são apresentados na tabela foram considerados inválidos devido a um comportamento marcadamente diferente dos restantes com a mesma configuração de junta.

Tabela 12 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N], obtidos experimentalmente, para o Araldite[®] AV138.

Provete	12,5	25	37,5	50
1	11148,3	14947,8	-	-
2	12118,9	-	-	-
3	13192,5	15517,2	15433,7	-
4	11462,1	16089,8	16695,6	16234,4
5	12227,9	-	-	17026,1
Média	12029,9	15518,3	16064,7	16630,2
Desvio Padrão	790,3	571,0	892,3	559,9

Araldite® 2015

Tal como para o adesivo anterior, são apresentadas as curvas $P-\delta$ (Figura 38) e na Tabela 13 podem-se visualizar os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente, em JSD, para o Araldite® 2015 e para os diferentes valores de L_0 .

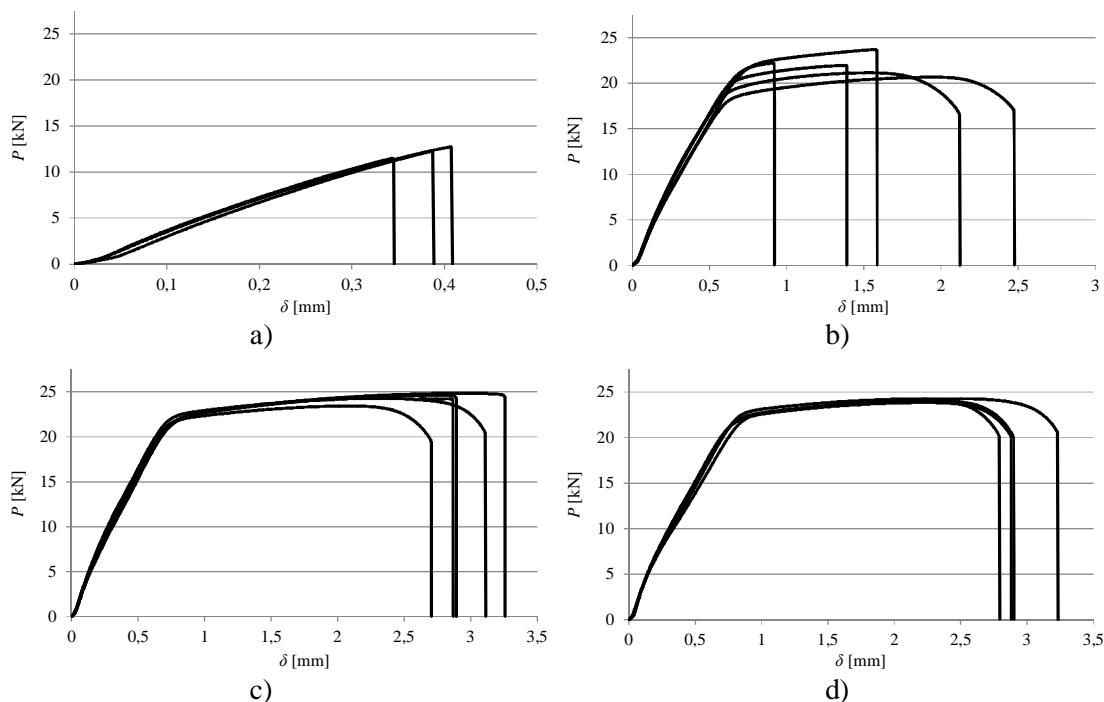


Figura 38 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente (JSD) para o Araldite® 2015, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).

Também se verifica um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=12,5$ mm. Para os restantes L_0 , já se verifica platificação dos substratos. As pequenas oscilações observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios. Os valores não apresentados na tabela correspondem a provetes que foram desprezados.

Tabela 13 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N], obtidos experimentalmente, para o Araldite® 2015.

Proвете	12,5	25	37,5	50
1	-	22208,7	24839,3	24271,9
2	-	21154,5	23420,4	24228,8
3	12715,4	20657,8	24592,2	-
4	11508,0	23697,3	24623,0	23857,0
5	12238,5	21962,4	24271,2	24060,0
Média	12154,0	21936,1	24349,2	24104,4
Desvio Padrão	608,2	1164,3	557,4	188,6

Sikaforce® 7888

Na Figura 39 são apresentadas as curvas P - δ e na Tabela 14 os valores experimentais de $P_{\text{máx}}$ para as JSD coladas com o Sikaforce® 7888 e para os diferentes valores de L_0 .

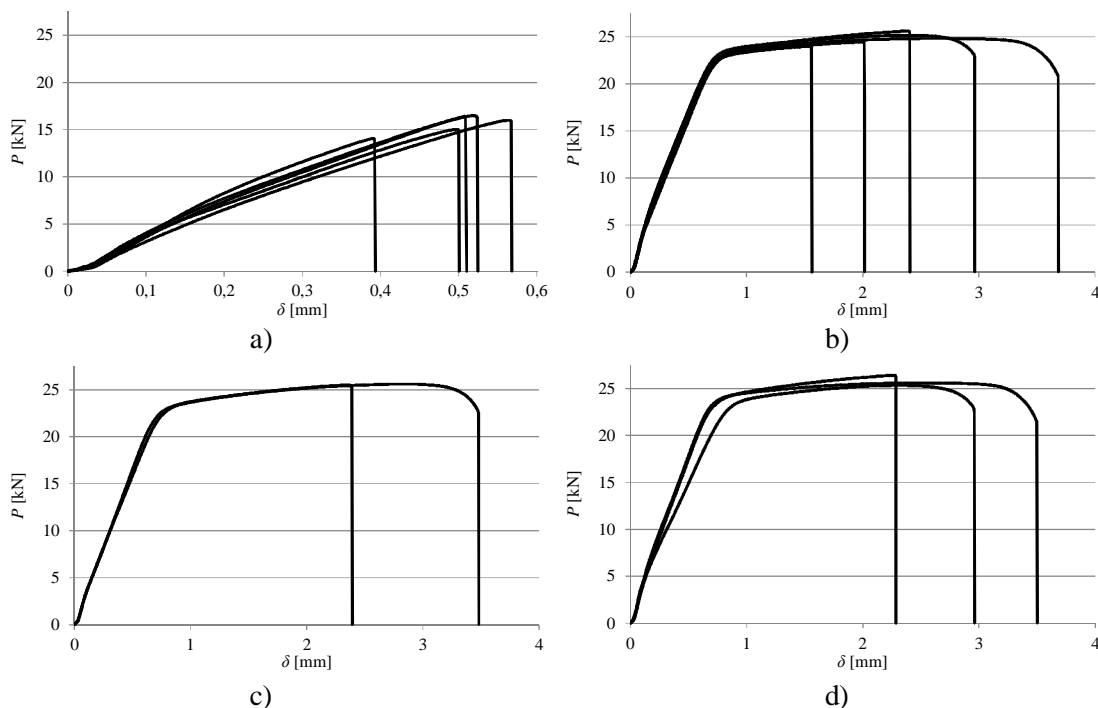


Figura 39 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente (JSD) para o Sikaforce® 7888, com $L_0=12,5$ mm (a), $L_0=25$ mm (b), $L_0=37,5$ mm (c), $L_0=50$ mm (d).

Devido à plasticidade que o adesivo possui, observou-se plastificação dos substratos para as juntas com $L_0 \geq 25$ mm. Tal como nos adesivos anteriores, e devido à rigidez elástica das juntas e questões de amarração dos provetes, são observadas pequenas oscilações. De mencionar que os valores não apresentados na tabela foram considerados não válidos.

Tabela 14 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N], obtidos experimentalmente, para o Sikaforce® 7888.

Proвете	12,5	25	37,5	50
1	15992,6	24458,4	-	25322,6
2	16487,1	25164,7	-	-
3	14066,8	23994,3	-	-
4	16394,8	25629,1	25615,2	26398,0
5	15035,6	24836,5	25517,1	25581,5
Média	15595,4	24816,6	25564,7	25767,4
Desvio Padrão	1029,8	629,7	67,2	561,3

3.3.3 Resistência das juntas

Nas figuras seguintes (Figura 40 e Figura 41) apresentam-se os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e os respectivos desvios padrão para os três adesivos utilizados e para as duas geometrias em estudo, JSS [1] e JSD. Os valores experimentais são comparados com o modelo analítico de Volkersen para o Araldite® AV138 (devido à fragilidade do adesivo) e pelo critério de plastificação generalizada (*global yielding* - GY) para os outros dois adesivos (devido à sua ductilidade) [64].

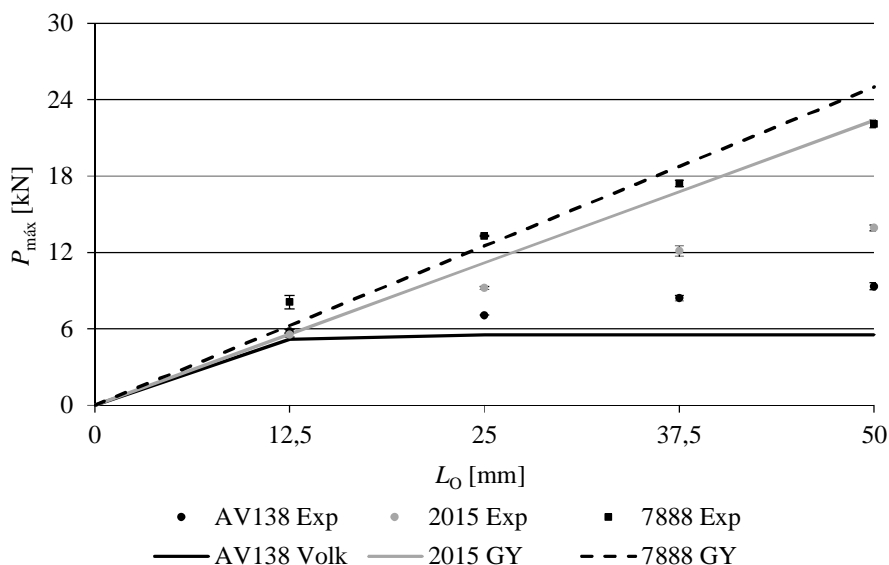


Figura 40 – Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos em JSS [1].

Da análise da Figura 40 pode-se constatar que o aumento da resistência das juntas com L_0 , em JSS, quando usado o adesivo Sikaforce® 7888, é quase linear devido à sua grande ductilidade, o que justifica a proximidade com o critério GY. O Araldite® 2015 já apresenta alguma discrepância para o mesmo critério, devido à menor ductilidade. Para o adesivo Araldite® AV138 o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 não é muito significativo, o que justifica a proximidade com o modelo analítico de Volkersen. Todavia, os três adesivos apresentam um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 .

Na Tabela 15 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ médios para cada adesivo e L_0 , assim como os respectivos aumentos percentuais de $P_{m\acute{a}x}$ para a configuração de junta com um dado valor de L_0 relativamente ao valor imediatamente inferior.

A Figura 41 apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}$ das JSD para os três adesivos considerados. Devido aos modos de rotura verificados experimentalmente, incluindo rotura por tração dos substratos (*adherend failure* - AF), são também apresentadas as curvas de previsão pelos critérios GY e AF. Conforme é visível na Figura 41, para as JSD, pode-se concluir que houve um aumento de

resistência significativo nas juntas com os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 em função de L_0 e que o aumento da resistência no Araldite® AV138 com este parâmetro não é muito significativo, tal como nas JSS.

Tabela 15 – $P_{m\acute{a}x}$ e aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 , para os três adesivos em estudo, para as JSS [1].

L_0 [mm]		12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	5793,2	7079,1	8417,1	9842,2
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	22,2	18,9	11,0
Araldite® 2015	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	5520,5	9207,7	12116,8	13927,9
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	66,8	31,6	15,0
Sikaforce® 7888	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	8099,4	13311,4	1727,8	22097,0
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	64,4	30,9	26,8

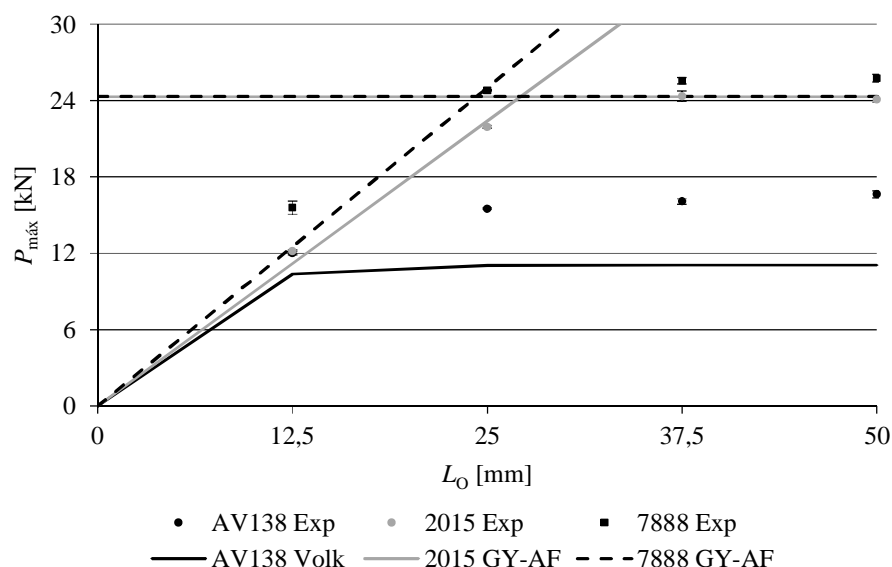


Figura 41 – Valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ e desvio padrão em função de L_0 para os diferentes adesivos em JSD.

O aumento percentual no Araldite® AV138, varia desde $\approx 29\%$ entre valores de L_0 de 12,5 mm e 25 mm, até $\approx 3,5\%$ entre valores de L_0 de 37,5 mm e 50 mm. O aumento reduzido de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para este adesivo está relacionado com a fragilidade do adesivo. Observa-se que, para o Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ mm, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é muito próximo do Araldite® AV138. Contudo, o Araldite® 2015 apresenta um aumento percentual de 80,5% entre valores de L_0 de 12,5 mm e 25 mm, até um valor nulo para L_0 mais elevados devido à plastificação dos substratos. Esta ocorrência também se observou para o Sikaforce® 7888. Para os três adesivos apresentados, é notório que o aumento da

resistência é maior entre os valores de L_0 de 12,5 mm e 25 mm. Para os restantes L_0 , a resistência tende a manter-se constante. Para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, o critério GY é adequado até um valor de L_0 de 25 mm. A partir deste ponto, o critério AF torna-se o mais apropriado devido a corresponder aos modos de rotura reais anteriormente expostos (plastificação extensa ou mesmo rotura dos substratos por tração).

A Tabela 16 mostra os valores de $P_{m\acute{a}x}$ médios para cada adesivo e L_0 , bem como os aumentos de $P_{m\acute{a}x}$ para a configuração de junta com um dado valor de L_0 relativamente ao valor imediatamente inferior.

Tabela 16 – $P_{m\acute{a}x}$ e aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 , para os três adesivos em estudo, para as JSD.

	L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	12030,0	15518,3	16064,7	16630,2
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	29,0	3,5	3,5
Araldite® 2015	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	12154,0	21936,1	24349,2	24104,4
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	80,5	11,0	-1,0
Sikaforce® 7888	$P_{m\acute{a}x}$ médio [N]	15595,4	24816,6	25564,7	25767,4
	Aumento de $P_{m\acute{a}x}$ [%]	-	59,1	3,0	0,8

3.3.4 Análise dos resultados

JSS

A análise aos dados apresentados para as JSS [1] mostra que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 varia consoante o adesivo. Comparativamente aos outros dois adesivos, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo Araldite® AV138 não é tão acentuado. Para valores de $L_0=12,5$ mm, este adesivo apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ ligeiramente superior ao Araldite® 2015. Contudo, com o aumento de L_0 , observa-se um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ mais notório para o Araldite® 2015. Para $L_0=50$ mm os valores do adesivo Araldite® 2015 superam em 49,1% os valores do Araldite® AV138. Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ do adesivo Sikaforce® 7888 são bastante superiores aos restantes para todos os valores de L_0 . Para este adesivo, quanto maior for o valor de L_0 mais acentuada é a capacidade da junta suportar elevados esforços de tração. Face ao Araldite® 2015, para $L_0=12,5$ mm o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é superior em 46,7% e para $L_0=50$ mm a diferença é cerca de 58,7%. A melhoria de resultados para o adesivo Araldite® AV138 é mais notória, atingindo 136,5% para $L_0=50$ mm. Para $L_0=12,5$ mm a diferença é de 39,8%, menor do que para o adesivo Araldite® 2015.

JSD

Finalizados os ensaios experimentais das JSD, verifica-se que o aumento de $P_{\text{máx}}$ varia com o L_0 e com o adesivo aplicado. Os adesivos apresentam comportamentos diferentes entre eles. Contudo, observa-se que os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 apresentam valores de $P_{\text{máx}}$ muito próximos para $L_0 \geq 25$ mm. Os resultados de $P_{\text{máx}}$ são dependentes das propriedades dos adesivos, nomeadamente da rigidez, resistência e ductilidade. A rigidez do adesivo influencia a distribuição de tensões, já que um adesivo cuja rigidez é baixa consegue obter uma distribuição de tensões mais uniforme quando comparado com um adesivo de alta rigidez [11].

No Araldite® AV138 não se verifica um aumento muito significativo de $P_{\text{máx}}$ com L_0 devido à fragilidade deste adesivo. Como consequência desta característica, quando as tensões limites do adesivo são atingidas nas extremidades de sobreposição, dá-se a rotura da junta, devido à falta de capacidade de plastificação do adesivo [62]. Para $L_0=12,5$ mm, este adesivo apresenta um valor de $P_{\text{máx}}$ muito próximo do Araldite® 2015 pois, para valores de L_0 baixos, as distribuições das tensões são mais constantes, o que faz com que um adesivo frágil possa apresentar uma resistência muito similar a um adesivo dúctil. O Araldite® 2015, embora apresente propriedades mecânicas inferiores ao Araldite® AV138, tem uma tenacidade que o define como um adesivo dúctil. Como tal, observa-se um aumento significativo de $P_{\text{máx}}$ para valores de L_0 superiores a 12,5 mm, embora as distribuições de tensões passem a ter um maior gradiente de tensões com o aumento progressivo de L_0 [68]. Para $L_0=50$ mm, os valores do adesivo Araldite® 2015 superam em 31,0% os valores do Araldite® AV138. Um adesivo dúctil tem a capacidade de distribuir a carga de forma mais uniforme através do uso das regiões em que as tensões são tipicamente mais baixas. Por outro lado, num adesivo frágil a carga concentra-se nas extremidades da sobreposição sem que haja possibilidade de existir plastificação do adesivo, resultando numa tensão de corte média reduzida no momento da rotura [20]. Os valores de $P_{\text{máx}}$ para o Sikaforce® 7888 são superiores aos restantes para todos os valores de L_0 . No entanto, para $L_0 \geq 25$ mm os valores do Araldite® 2015 apresentam-se muito próximos, porque a rotura foi governada pela rotura do substrato. Face ao Araldite® AV138, para $L_0=12,5$ mm o valor de $P_{\text{máx}}$ é superior em 22,9% e para $L_0=50$ mm é cerca de 35,5%. Para L_0 de 25 mm e 37,5 mm a diferença percentual entre este dois adesivos (Sikaforce® 7888 face ao Araldite® AV138) rondam os 37,0%. Observa-se para o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7888 que, acima de $L_0=25$ mm, o $P_{\text{máx}}$ tende a entrar num patamar, devido à plastificação e rotura prematura dos substratos. O Sikaforce® 7888 combina propriedades de resistência do epóxido e ductilidade dos poliuretanos, e é favorável para qualquer que seja o valor de L_0 .

A seleção do adesivo deve incidir em adesivos que combinem uma menor rigidez e uma maior ductilidade, à exceção de valores de L_0 baixos, onde os adesivos rígidos também apresentam bom desempenho. Para cargas não uniformes, tais como o arrancamento e clivagem, os adesivos dúcteis

também oferecem bons resultados [11]. Desta forma, conclui-se que para valores de L_0 baixos, o Araldite® AV138 é uma opção viável. Quando se pretende valores de L_0 superiores a 12,5 mm, a escolha deve incidir no Araldite® 2015. O Sikaforce® 7888 deve ser escolhido quando são pretendidos valores de $P_{máx}$ mais elevados. Contudo, refere-se que a plastificação ou rotura prematura dos substratos pode colocar um limite superior à resistência da junta, tal como foi observado neste trabalho. De salientar que a seleção do adesivo para uma determinada junta deve ter em conta todos estes fatores. De realçar que os valores obtidos na Figura 41 estão de acordo com o esperado, em função das características dos adesivos utilizados.

4 Previsão da Resistência

Neste capítulo pretende-se efetuar a previsão da resistência nas juntas adesivas estudadas e posterior comparação com os resultados experimentais do capítulo 3. Para este efeito começa-se por apresentar as condições da análise numérica, modelo coesivo utilizado e determinação das propriedades coesivas. Para auxiliar a análise dos resultados obtidos, é efetuado um estudo de tensões e da análise de dano na camada do adesivo. Refere-se que os resultados para as JSS são os obtidos na referência [1].

4.1 Condições da análise numérica

A análise numérica realizada teve por base o *software* ABAQUS®. Este *software* baseia-se no método de EF e a sua escolha deve-se à possibilidade de utilização do MDC para prever a resistência das JSD. De modo a perceber melhor o comportamento destas juntas, inicialmente foi efetuada uma análise de tensões na camada do adesivo. Esta análise foi realizada considerando uma malha muito refinada e modelação dos substratos e adesivo por elementos sólidos bidimensionais de estado plano de deformação. Para as análises de dano e de resistência, considerou-se uma malha mais grosseira, uma vez que a propagação de dano por MDC é independente do tamanho da malha, desde que se garanta o refinamento mínimo. Neste caso, os substratos foram modelados com elementos sólidos bidimensionais de estado plano de deformação e o adesivo com elementos coesivos (Figura 42), considerando apenas um elemento na direção da espessura do adesivo.

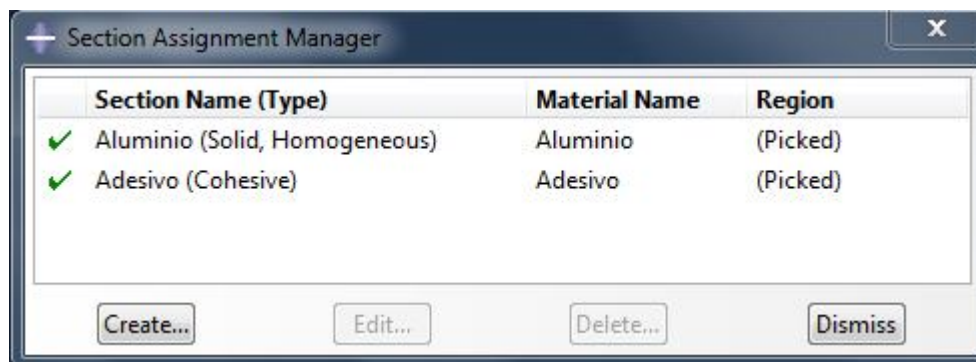


Figura 42 – Definição do tipo de elementos para os diferentes constituintes das juntas para as análises de dano e resistência no ABAQUS®.





Também foi necessário introduzir as propriedades mecânicas dos materiais em estudo, nomeadamente dos substratos (Tabela 17) e dos adesivos (cujos parâmetros vão ser discutidos posteriormente).

Tabela 17 – Propriedades dos substratos de liga de Al6082-T651.

Substrato	E [MPa]	ν	σ_y [MPa]	σ_f [MPa]
Al6082-T651	70070	0,3	261,67	324

As malhas para os modelos de análise de tensões são bastante refinadas. Com o refinamento da malha é possível eliminar a instabilidade dos valores de tensão na proximidade das extremidades de sobreposição, teoricamente consideradas regiões singulares [68]. Conforme se pode verificar na Tabela 18, ao longo da junta existe variação na dimensão da malha, que é mais refinada na zona da camada de adesivo. O número de elementos e rácio de *bias* (rácio de refinamento) de cada aresta da junta foram escolhidos por forma a garantir um maior refinamento nas zonas críticas da junta.

Tabela 18 – Variação das dimensões da malha nas JSD em função de L_0 [mm].

	12,5	25	37,5	50
Zona de sobreposição				
Número de Elementos	40	80	120	160
Rácio de <i>bias</i>	3	3	3	3
Altura do substrato superior				
Número de Elementos	8	8	8	8
Rácio de <i>bias</i>	3,5	3,5	3,5	3,5
Altura do substrato inferior				
Número de Elementos	4	4	4	4
Rácio de <i>bias</i>	3,5	3,5	3,5	3,5
Comprimento não ligado dos substratos				
Número de Elementos	100	90	80	80
Rácio de <i>bias</i>	12	12	12	12

Tal como se pode verificar na Figura 43, ao longo de L_0 o efeito *bias* foi construído a partir da região central do adesivo no sentido das extremidades de L_0 . Na região relativa ao comprimento dos substratos, que não tem contacto com o adesivo, a malha foi refinada no sentido da camada adesiva, tal como demonstrado na Figura 44.

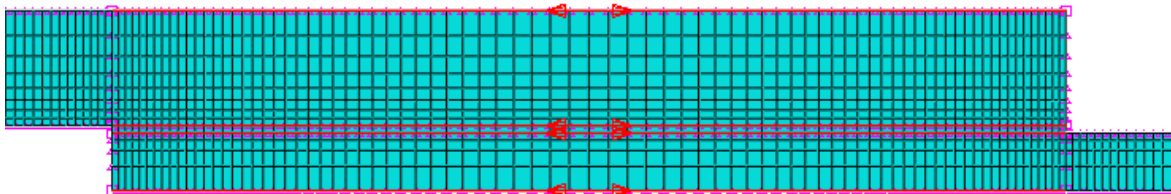


Figura 43 – Sentido do efeito *bias* da malha na região da sobreposição.



Figura 44 – Sentido do efeito *bias* da malha na região dos substratos sem contacto com o adesivo.

Por último, também foi aplicado um refinamento crescente da malha ao longo da espessura dos substratos, tal como se verifica na Figura 45.

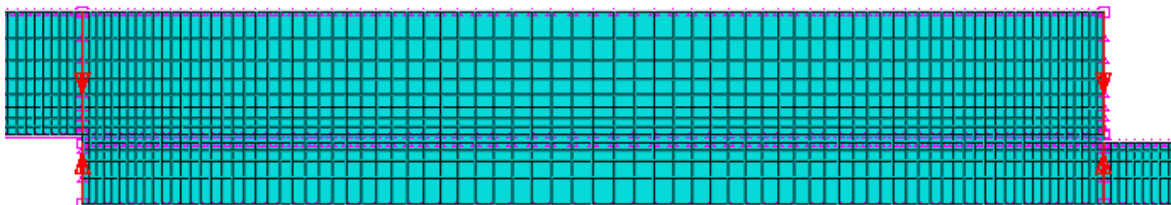


Figura 45 – Sentido do efeito *bias* da malha ao longo da espessura dos substratos.

As variações do número de elementos e do efeito *bias* na malha para os diferentes L_0 têm como objetivo diminuir o esforço computacional, permitindo uma redução do tempo na obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensão. No que diz respeito às condições de fronteira utilizadas nos modelos numéricos (Figura 46), de forma a simular as condições reais dos ensaios experimentais, considerou-se uma das extremidades da junta encastrada, enquanto na extremidade oposta foi aplicada uma restrição vertical e um deslocamento de tração.



Figura 46 – Condições fronteira impostas nos modelos numéricos.

Na análise por MDC o adesivo foi modelado com elementos coesivos pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos e uma lei de tração-separação triangular. Os deslocamentos aplicados nos modelos numéricos, em função de L_0 , variam para os diferentes adesivos utilizados, conforme mostra a Tabela 19.

Tabela 19 – Deslocamentos aplicados nos modelos numéricos do *software* ABAQUS®.

Adesivo \ L_0 [mm]	12,5	25	37,5	50
Araldite® AV138	0,5	0,5	6	8
Araldite® 2015	0,5	0,5	6	8
Sikaforce® 7888	0,5	0,5	8	8

4.2 Modelos de dano coesivo

4.2.1 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [69]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [70], linear parabólico [71], exponencial [72], polinomial [73] e trapezoidal [74]. 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 [54]. O modelo triangular 2D implementado no *software* ABAQUS® está representado na Figura 47, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e corte [75]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e de uma deformação de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezadas.

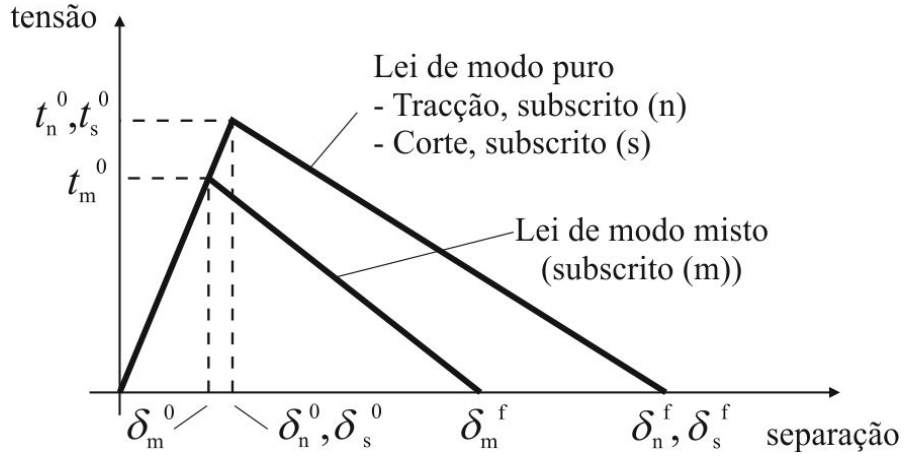


Figura 47 – MDC triangular implementado no *software* ABAQUS®.

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

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

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [68]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que

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

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [75]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão

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

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [76]. Quando t_m^0 é

atingido (Figura 47), pela igualdade da equação (4), 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 47) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} .

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

4.2.2 Determinação das propriedades coesivas

No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de provetes maciços à tração e corte [77, 78]. No entanto, observa-se uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina devido à restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto [79, 80, 81]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

4.2.2.1 Araldite® AV138

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [82]. No entanto, devido à inexistência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente do mais indicado, que foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de tração e de corte (*Thick Adherend Shear Test* (TAST)), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L_0=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de tração e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido [62] concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 20 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [62].

Tabela 20 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A=0,2$ mm [62].

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

4.2.2.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo do Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior [82] através de um método inverso. Num estudo anterior [83] é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo.

Tabela 21 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com $t_A=0,2$ mm [83].

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

A Tabela 21 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto [83]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [84] e ensaios TAST [85], respetivamente.

4.2.2.3 Sikaforce® 7888

No caso do adesivo Sikaforce® 7888 não se encontram disponíveis até à data as propriedades coesivas obtidas por métodos inversos. Para este adesivo, foram utilizados como aproximação valores de t_n^0 e t_s^0 obtidos por ensaios de adesivo à tração ou dados pelo fabricante, respetivamente. Para os valores de G_{IC} e G_{IIC} , foram utilizados valores obtidos através de ensaios DCB e ENF, pela

respetiva ordem. A generalidade dos valores das propriedades presentes na Tabela 22 foram obtidos experimentalmente no trabalho de Neto [65], à exceção de G , t_s^0 e G_{IC} . Para G_{IC} não foi utilizado o valor apresentado por [65], devido à obtenção de roturas parcialmente adesivas, indicativas de uma medição incorreta desse valor. Em alternativa, foi utilizado o valor obtido por [86], em que G_{IC} foi definido num ensaio DCB de provetes de compósito de fibra natural de juta com matriz de epóxico. Para os valores de G e t_s^0 foram considerados os valores do fabricante. No trabalho de Neto [65], os valores de E e t_n^0 foram obtidos por ensaios de adesivos à tração, com recurso a um extensómetro, fixo na zona de menor secção do provete, a uma velocidade de 1 mm/min. Foram registados os valores de P e δ até ocorrer a rotura e posteriormente tratados no *software* Microsoft Excel®.

Tabela 22 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7888 com $t_A=0,2$ mm [65].

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

4.3 Análise das tensões nas juntas

Este capítulo compara a distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e das tensões de corte (τ_{xy}) para as JSS e para as JSD, considerando os diferentes valores de L_0 e a meio da espessura do adesivo, de forma a compreender as variações de resistência para as diferentes configurações de junta, conforme se irá discutir posteriormente. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , representando a média de valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de L_0 . As distribuições de tensões dizem respeito ao adesivo Araldite® 2015, embora também sejam representativas dos outros dois adesivos. De facto, observa-se que as distribuições de tensões são similares entre adesivos, embora tenham sido encontradas pequenas diferenças dependendo da rigidez dos adesivos (uma maior rigidez aumenta os picos de tensão nas extremidades da sobreposição [87]).

As figuras seguintes mostram as distribuições das tensões σ_y e das tensões τ_{xy} em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$).

4.3.1 Tensões de arrancamento

As distribuições de tensões σ_y para as JSS em função de L_0 são dadas pela Figura 48 [1]. De uma forma geral verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , exceto em zonas muito localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [88, 89]. Na região interior da camada do adesivo geram-se tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tração. Este efeito está relacionado com a curvatura ou deformação transversal da junta, que é governada pela deformação dos substratos, e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma. As tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura prematura [68, 76].

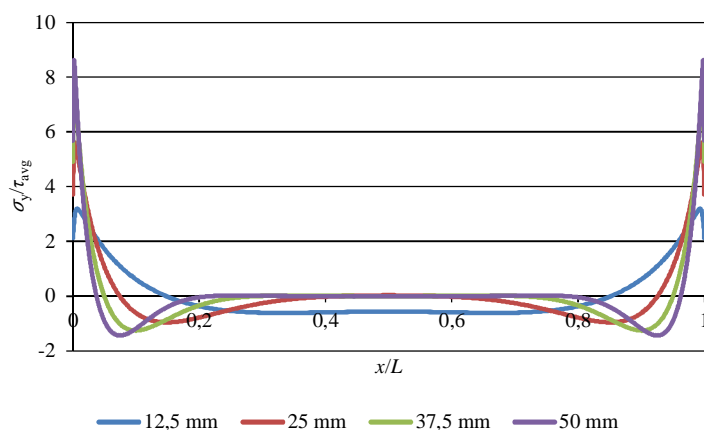


Figura 48 – Distribuição de tensões σ_y a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0 [1].

O estudo paramétrico de L_0 mostrou que os picos de tensões σ_y ocorrem sempre nas extremidades de sobreposição. Para valores de L_0 mais elevados, observam-se picos compressivos na proximidade das singularidades, que aumentam de magnitude com L_0 . Ao mesmo tempo as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se menos significativas. Esta tendência tende a parar a propagação de dano após dano localizado nas zonas de singularidades [77], o que justifica algumas vezes que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é obtido após a iniciação da fenda [90]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 deve reduzir a resistência média da junta na área colada, especialmente para juntas com adesivos frágeis [91].

As distribuições das tensões σ_y para as JSD com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 49. Verifica-se que o adesivo Araldite® AV138, comparativamente com os outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, que correspondem às extremidades de L_0 na junta da camada de adesivo. O valor de rigidez que este apresenta é

bastante elevado, o que origina estes picos mais elevados de concentração de tensões que podem levar a uma rotura prematura da junta. O valor máximo de σ_y/τ_{avg} para $L_0=50$ mm e para o adesivo Araldite® AV138 é de 14,4 enquanto para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 é de 8,6 e 8,7, respetivamente. Verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , exceto em zonas muito localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades de tensões devido à geometria das extremidades da junta [88, 89]. As JSD eliminam a flexão transversal dos substratos que nas JSS surge devido à transmissão assimétrica de cargas entre os substratos [92]. Isto pode ser justificado com a simetria de cargas aplicadas nas JSD. Todavia, os substratos continuam com flexão, o que se reflete nas tensões σ_y através da camada do adesivo. O perfil das tensões σ_y para as JSD (Figura 49) é idêntico na extremidade exterior da sobreposição, com concentrações de picos perto de $x/L_0=0$ [93]. Ao contrário das JSS, na extremidade interior da sobreposição, os picos de tensão σ_y são de compressão [94]. As tensões σ_y na região central da sobreposição são aproximadamente nulas, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de L_0 . Os picos das tensões σ_y são mais pequenos do que para as JSS para todos os valores de L_0 [29]. Este comportamento, juntamente com os picos de compressão na extremidade exterior, antecipa largos benefícios na resistência da junta relativamente à área colada [94].

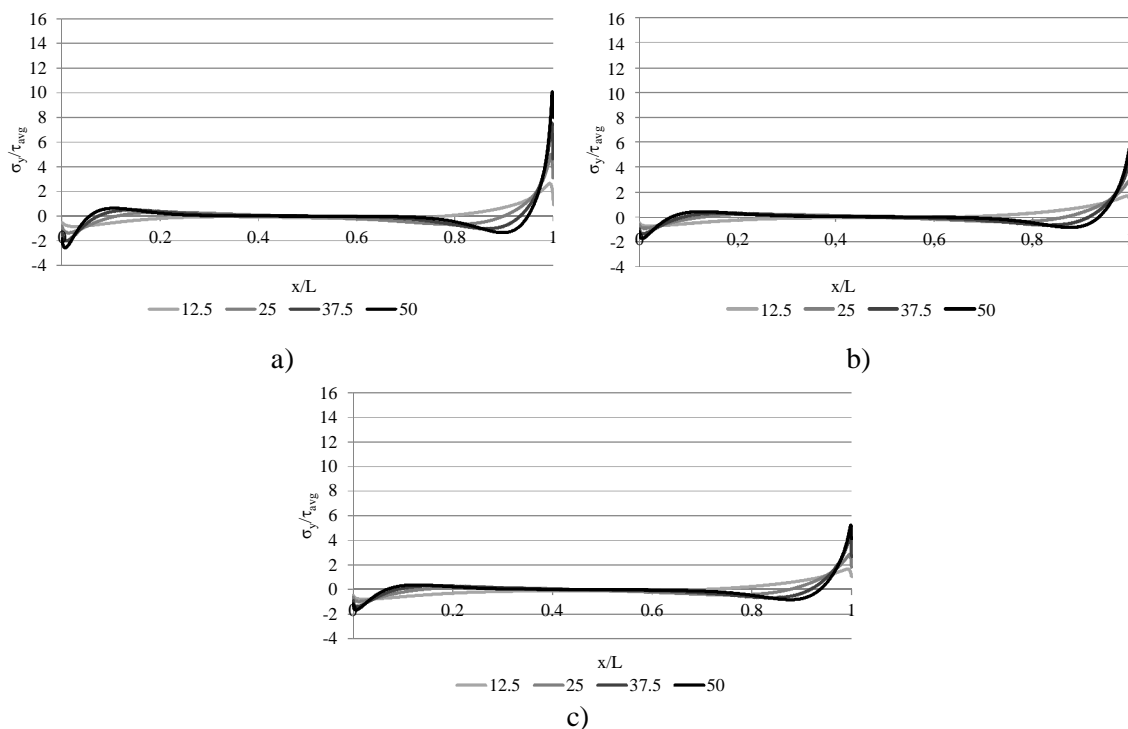


Figura 49 – Distribuição das tensões σ_y em JSD: Araldite® AV138 (a); Araldite® 2015 (b); Sikaforce® 7888 (c).

4.3.2 Tensões de corte

Tal como para a distribuição de tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} para a JSS apresentada na Figura 50 [1] demonstra valores mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição [95, 96]. Isto deve-se à deformação diferencial de cada um dos substratos ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre dos substratos e aumenta progressivamente até à extremidade oposta [11, 17, 97]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se empreguem adesivos frágeis a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição [97]. Por sua vez, os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nessas regiões, ao mesmo tempo que a região interna da sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes, o que possibilita um aumento da resistência da junta [68, 98].

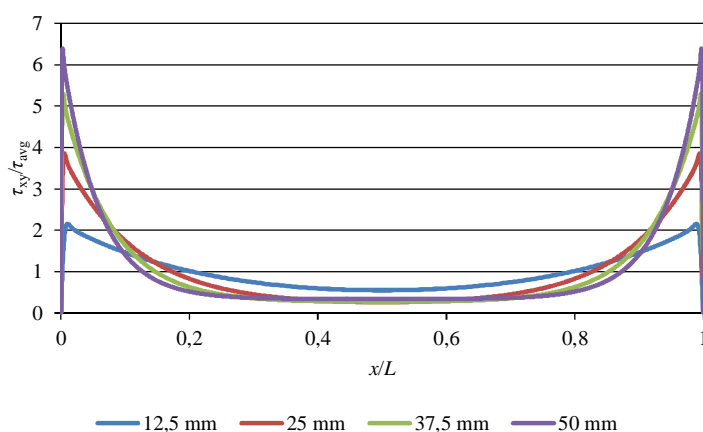


Figura 50 – Distribuição de tensões τ_{xy} a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de L_0 [1].

Na Figura 51 estão representadas as tensões τ_{xy} para as JSD com os três adesivos em estudo. As distribuições das tensões τ_{xy} para as JSD são mais uniformes do que para as JSS [99]. Estas apresentam uma maior magnitude na extremidade exterior da sobreposição do que no lado oposto devido às elevadas cargas induzidas no substrato interior na proximidade de $x/L_0=0$. O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} para $L_0=50$ mm e para o adesivo Araldite® AV138 é de 11,1, enquanto para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 é de 7,9 e 8,0, respetivamente. A redução do gradiente das tensões τ_{xy} na extremidade interior da sobreposição, em comparação com as JSS, é causada pela menor variação das deformações longitudinais entre os dois substratos exteriores e o substrato

interior, o que reduz o efeito da deformação diferencial [94]. Comparando os picos das tensões τ_{xy} com os obtidos para as JSS (Figura 50) observa-se que, na extremidade interior da sobreposição estes são muito mais pequenos em magnitude normalizada. Na extremidade exterior da sobreposição, as tensões τ_{xy} também são menores. Esta modificação no perfil das tensões τ_{xy} deve-se refletir na resistência da junta, de tal modo que deve ser obtido mais do que o dobro da resistência das JSS (que é a relação da área colada entre estas duas configurações de junta) [98]. Igualmente ao observado para as JSS, deve-se salientar que $P_{\text{máx}}$ não deve aumentar na mesma proporção de L_0 , já que os picos das tensões σ_y e τ_{xy} nas arestas da sobreposição aumentam com L_0 . Além disso, isto deve ser mais visível nas juntas coladas com adesivos frágeis, que não permitem a plastificação da camada do adesivo quando as tensões limite são atingidas nas extremidades da sobreposição [97].

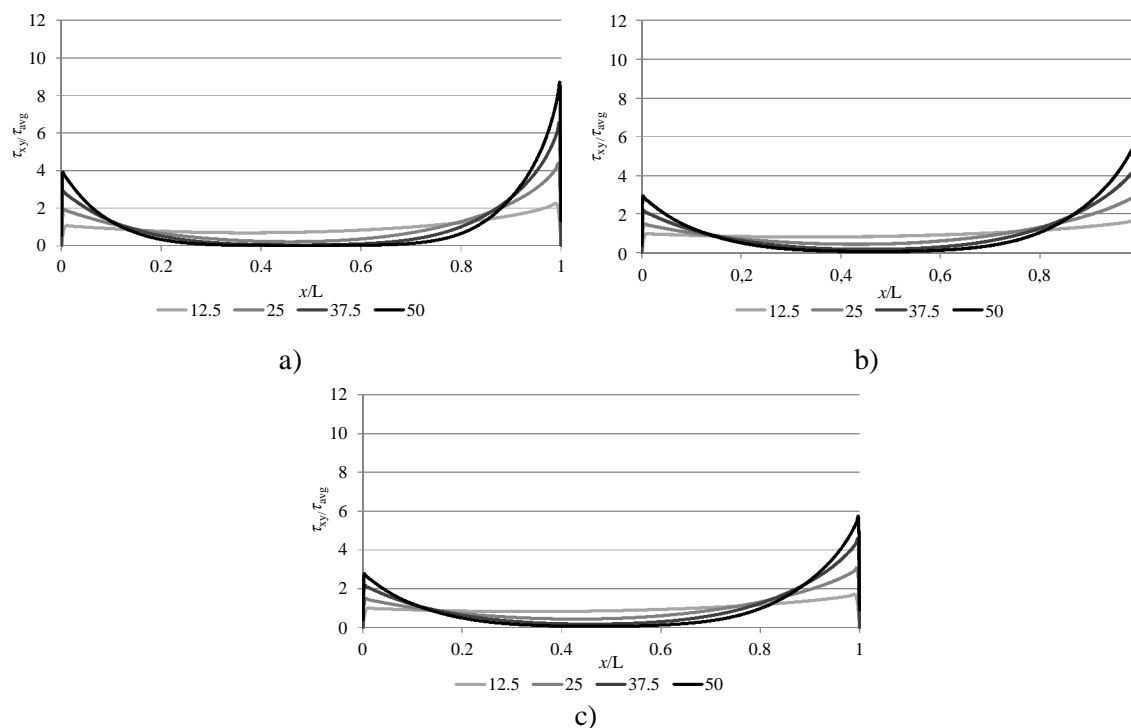


Figura 51 – Distribuição das tensões τ_{xy} , em JSD: Araldite[®] AV138 (a); Araldite[®] 2015 (b); Sikaforce[®] 7888 (c).

4.4 Modos de rotura

Após a realização dos ensaios através do *software* ABAQUS[®] nas JSS e JSD verificou-se que existe deformação plástica dos substratos nas juntas coladas com dois adesivos (Araldite[®] 2015 e Sikaforce[®] 7888), embora não tenha sido observada para todos os valores de L_0 . A deformação plástica dos substratos foi mais evidente no adesivo mais dúctil, como era espectável, devido aos valores mais elevados de $P_{\text{máx}}$ que estas juntas atingem.

Na Tabela 23 são apresentados os valores máximos da deformação plástica dos substratos obtidos numericamente para os diferentes adesivos e valores de L_0 para as JSS. Para o Araldite® AV138 não se observou deformação plástica nos substratos. Isto pode ser constatado na Figura 52), onde se mostra os substratos após rotura para $L_0=12,5$ mm. No adesivo Araldite® 2015, os valores da deformação plástica dos substratos obtidos numericamente são nulos apenas para $L_0=12,5$ mm. Para $L_0=25$ mm a deformação é de 0,105% e para $L_0=50$ mm atinge 0,413%. Tal como sucedeu com o adesivo Araldite® 2015, numericamente o Sikaforce® 7888 apresenta valores de deformação plástica dos substratos a partir de $L_0=25$ mm, embora com valores bastante superiores. Isto ocorre essencialmente devido às propriedades de resistência e ductilidade deste material, e respetivo valor mais elevado de $P_{máx}$, o que faz com que a deformação plástica dos substratos atinja valores superiores. Para $L_0=25$ mm a deformação plástica dos substratos é de 0,344% e quando $L_0=50$ mm o seu valor é de 1,43% (Figura 53). Com $L_0=12,5$ mm não se regista deformação plástica dos substratos.

Tabela 23 – Deformação plástica máxima dos substratos, verificada numericamente, para as JSS [1].

L_0 [mm]	Araldite® AV138 [%]	Araldite® 2015 [%]	Sikaforce® 7888 [%]
12,5	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,105	0,344
37,5	0,0	0,249	0,758
50	0,0	0,413	1,430



Figura 52 – Ausência de deformação plástica dos substratos, após rotura, para as JSS com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm [1].

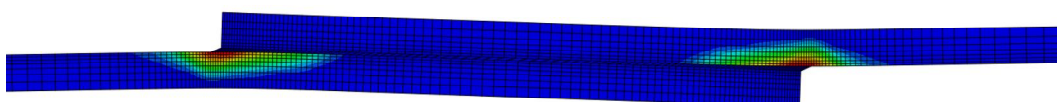


Figura 53 – Deformação plástica dos substratos, após rotura, para as JSS com Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm [1].

Os valores máximos da deformação plástica dos substratos para as JSD são indicados na Tabela 24, para os três adesivos utilizados e para todos valores de L_0 . Tal como nas JSS, nas JSD também não se verificou deformação plástica dos substratos para o Araldite® AV138 (Figura 54). Para o Araldite® 2015 e Sikaforce 7888® os valores da deformação plástica dos substratos são nulos para $L_0=12,5$ mm e para $L_0=25$ mm a deformação é reduzida. Para o Araldite® 2015, nos restantes valores de L_0 , observa-se plastificação dos substratos de 0,662% para $L_0=37,5$ mm e 0,706% para $L_0=50$ mm. Os valores da plastificação com o Sikaforce® 7888 são os mais elevados entre os adesivos estudados. Para $L_0=37,5$ mm registou-se uma plastificação de 0,945% e para $L_0=50$ mm de 0,961% (Figura 55).

Tabela 24 – Deformação plástica máxima dos substratos, verificada numericamente, para as JSD.

L_0 [mm]	Araldite® AV138 [%]	Araldite® 2015 [%]	Sikaforce® 7888 [%]
12,5	0,0	0,0	0,0
25	0,0	0,015	0,036
37,5	0,0	0,662	0,945
50	0,0	0,706	0,961

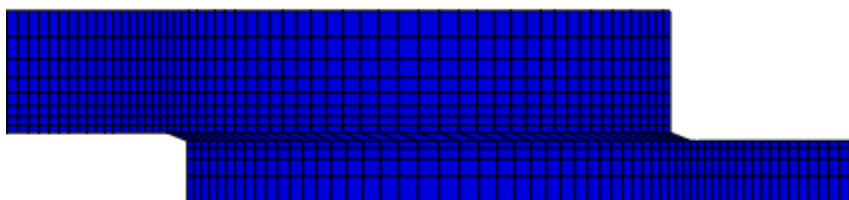


Figura 54 – Ausência de deformação plástica dos substratos, após rotura, para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.

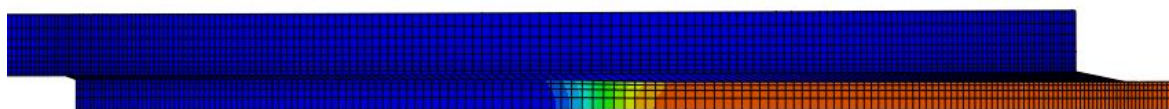


Figura 55 – Deformação plástica do substrato interior, após rotura, para as JSD com Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm.

4.5 Estudo da variável de dano

Uma outra ferramenta que ajuda à comparação entre JSS e JSD é o estudo da variável de dano SDEG dos elementos coesivos da camada de adesivo ao longo de x/L_0 . Esta variável dá a

degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC (Figura 47) e varia entre $SDEG=0$ (material não danificado) até $SDEG=1$ (rotura completa). A Figura 56 mostra a variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é obtido para as JSS [1]. Nesta análise, só se consideram os valores menores e maiores de L_O (12,5 e 50 mm), uma vez que representam os comportamentos limite das juntas, enquanto as juntas entre estes valores extremos mostram um comportamento intermédio entre estas configurações de juntas.

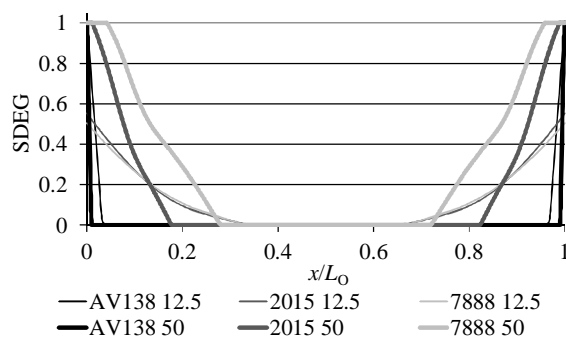


Figura 56 – Variável de dano na camada de adesivo no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido para as JSS [1].

Na Figura 56 verifica-se que, independentemente do adesivo, o dano estende-se por uma área mais alargada para $L_O=12,5$ mm, porque o gradiente das tensões τ_{xy} (que governam o processo de rotura) é menor para L_O reduzidos. Comparando os três adesivos usados, verifica-se que a curva da variável de dano se torna mais plana ao longo de L_O para o adesivo Araldite[®] 2015 e Sikaforce[®] 7888 devido à capacidade de plastificação e redistribuição de tensões destes adesivos. Este comportamento é responsável pelo elevado valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido para estes dois adesivos. Para o Sikaforce[®] 7888 e $L_O=50$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ ocorre com o dano total de 8,4% de L_O , devido à grande ductilidade do adesivo. Este valor é de 2,0% para o Araldite[®] 2015 e quase nulo para a Araldite[®] AV138.

A análise da evolução da variável de dano com o carregamento aplicado é também bastante útil. Este estudo foi realizado para as JSS [1] e apenas para os adesivos Araldite[®] AV138 e Sikaforce[®] 7888. A variável de dano é representada para valores crescentes de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$ [%], onde $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ é o deslocamento em $P_{m\acute{a}x}$ (como resultado, um valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ de 100% corresponde a $P_{m\acute{a}x}$). Para as JSS e o adesivo Araldite[®] AV138 (Figura 57), por este ser um adesivo frágil, o valor de SDEG na sobreposição varia entre $SDEG=0$ (ausência de dano) e $SDEG=1$ (dano completo) numa extensão muito reduzida, o que resulta numa zona de dano muito pequena. O valor de $P_{m\acute{a}x}$ é atingido com um grau insignificante de plastificação do adesivo nas extremidades de sobreposição. Este comportamento é responsável pelo aumento reduzido de $P_{m\acute{a}x}$ com L_O . A rotura completa ocorre muito rapidamente (entre $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=100\%$ e 101,24% para $L_O=12,5$ mm e entre 100% e 102,47% para

$L_0=50$ mm). A principal diferença para as JSS coladas com o adesivo Sikaforce® 7888 (Figura 58) foi a variação mais gradual de SDEG através da zona colada, devido a este adesivo ter uma ductilidade significativa. Para $\delta/\delta_{P_{\max}}=100\%$, por exemplo, apenas uma fração de $\approx 35\%$ ($L_0=12,5$ mm) e 44% ($L_0=50$ mm) da sobreposição está sem dano. A porção restante da sobreposição está na fase de amaciamento da lei coesiva ou já atingiu mesmo a rotura. Para $L_0=12,5$ mm, a rotura completa ocorreu em $\delta/\delta_{P_{\max}}\approx 200\%$, enquanto para $L_0=50$ mm corresponde a um $\delta/\delta_{P_{\max}}\approx 125\%$, o que corresponde a um processo de rotura muito mais gradual do que para o Araldite® AV138.

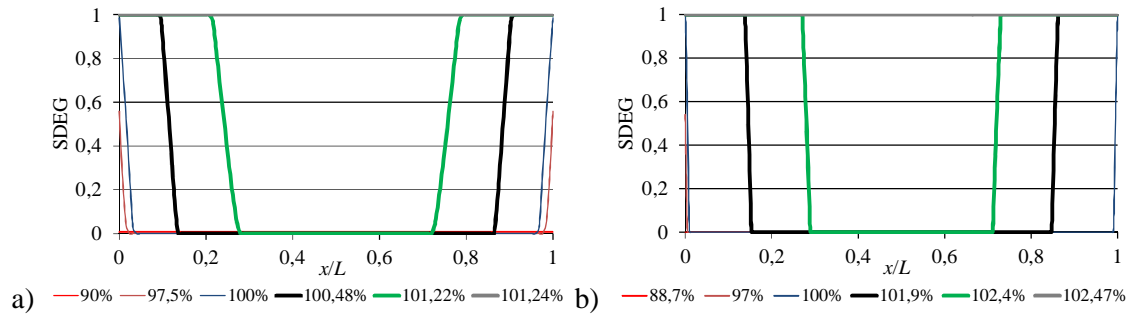


Figura 57 – Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=50$ mm (b).

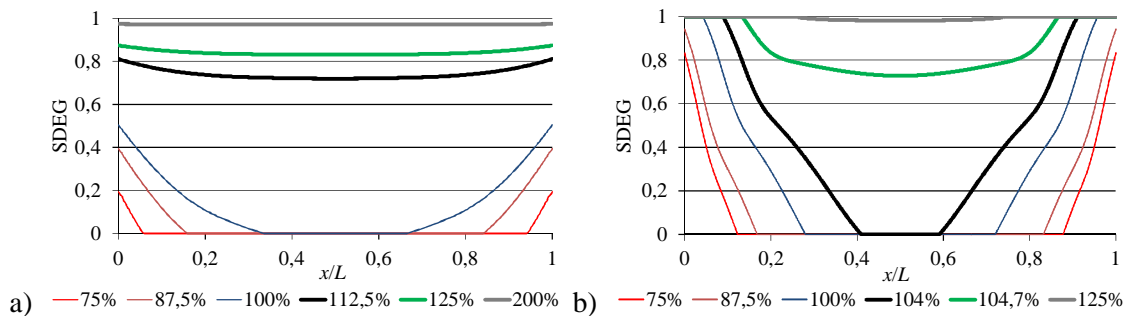


Figura 58 – Evolução da variável de dano com δ para o adesivo Sikaforce® 7888 para $L_0=12,5$ mm (a) e $L_0=50$ mm (b).

Para as JSD (Figura 59) e para todos os adesivos, considerando o instante de P_{\max} , o dano propaga-se ao longo da zona colada numa extensão que depende do adesivo utilizado, e este deixa de ser simétrico devido às distribuições também assimétricas das tensões σ_y e τ_{xy} ao longo da sobreposição (Figura 49 e Figura 51, respetivamente). De facto, devido à maior deformação longitudinal dos substratos na extremidade exterior da sobreposição, as tensões σ_y e τ_{xy} concentram-se nesta zona, tornando este o local do início do dano. Tal como nas JSS, o dano apresenta uma distribuição mais uniforme para $L_0=12,5$ mm do que para 50 mm, devido à menor magnitude dos picos de tensões σ_y e τ_{xy} . Pela comparação das configurações de junta com $L_0=12,5$ e 50 mm, e ao contrário do observado nas JSS, no instante em que P_{\max} é atingida, a extensão do

dano para o interior da zona colada nem sempre é maior para as juntas com $L_0=50$ mm, dependendo antes do adesivo. O elevado grau de dano para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 quando $P_{\text{máx}}$ é atingido para $L_0=12,5$ ou 50 mm é indicativo do elevado grau de plastificação até à rotura e, correspondentemente, dos valores mais elevados de $P_{\text{máx}}$ que se esperam relativamente ao adesivo Araldite® AV138. De igual forma às JSS, os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 possibilitam que uma região plástica considerável contribua para a resistência das juntas, ao contrário do adesivo frágil Araldite® AV138, que concentra o dano na extremidade da sobreposição. Quando o $P_{\text{máx}}$ é atingido, as juntas adesivas com o Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm apresentam dano total em 44,0% na zona de ligação, comparado com os 35,1% para as juntas com o Araldite® 2015 e 13,1% com o Araldite® AV138.

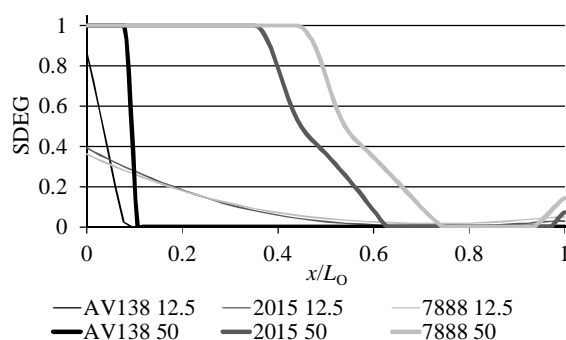


Figura 59 – Variável de dano na camada de adesivo no instante em que se atinge $P_{\text{máx}}$ para as JSD.

Apresenta-se na Figura 60 a evolução de SDEG com $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$ para o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm (a) e 50 mm (b). A Figura 61 representa uma análise idêntica para o adesivo Sikaforce® 7888. Para as JSD coladas com o Araldite® AV138, a rápida variação de SDEG desde o estado não danificado até dano completo que se observou para as JSS é também observada nestas juntas, especialmente para $L_0=50$ mm. Como resultado, a rotura destas juntas ocorre com um grau muito pequeno de plastificação. Para $L_0=12,5$ mm, a rotura completa ocorreu a menos de 100,1% de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$, enquanto para $L_0=50$ mm este valor aumentou para 110,9%. Comparando com as configurações de junta correspondentes das JSS [1], além da ausência de simetria nos gráficos de dano, $P_{\text{máx}}$ é atingido com maior (mas ainda reduzida) porção de dano na sobreposição, o que é resultado da melhoria nas distribuições das tensões das JSD relativamente às JSS (Figura 49 e Figura 51 em comparação com a Figura 48 e Figura 50). Esta diferença deve ser responsável por valores de $P_{\text{máx}}$ superiores em mais de 2× aos apresentados para as JSS. Em comparação com o Araldite® AV138, o dano do Sikaforce® 7888 estende-se muito mais gradualmente através das juntas devido à capacidade de plastificação deste adesivo. Também devido a este facto, para $P_{\text{máx}}$ ($\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$) e para $L_0=12,5$ mm, só $\approx 21\%$ do adesivo está sem dano. Para $L_0=50$ mm, este valor é $\approx 54\%$. Comparando com os resultados das JSS [1], deixa de haver simetria nas curvas de dano. A rotura completa ocorre para $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}} \approx 150\%$ e 115% para as juntas com $L_0=12,5$ mm e 50

mm, respetivamente, por causa da ductilidade superior ao Araldite® AV138. O valor menor de $\delta/\delta_{P_{\max}}$ para valores maiores de L_0 é justificado pela plastificação do substrato interior, o que desencadeia uma rotura prematura do adesivo. Contudo, em ambos os casos a rotura é muito mais progressiva do que para o adesivo Araldite® AV138. A quantidade significativa de dano completo para $L_0=50$ mm e para $\delta/\delta_{P_{\max}}=100\%$ (31,1%) é o resultado da plastificação do substrato interior, que reduz o valor efetivo de L_0 que contribui para P_{\max} . Isto irá provavelmente conduzir a um rácio de resistência entre esta JSD e a JSS correspondente menor do que a relação de área colada, de 2×, entre estas duas configurações de junta.

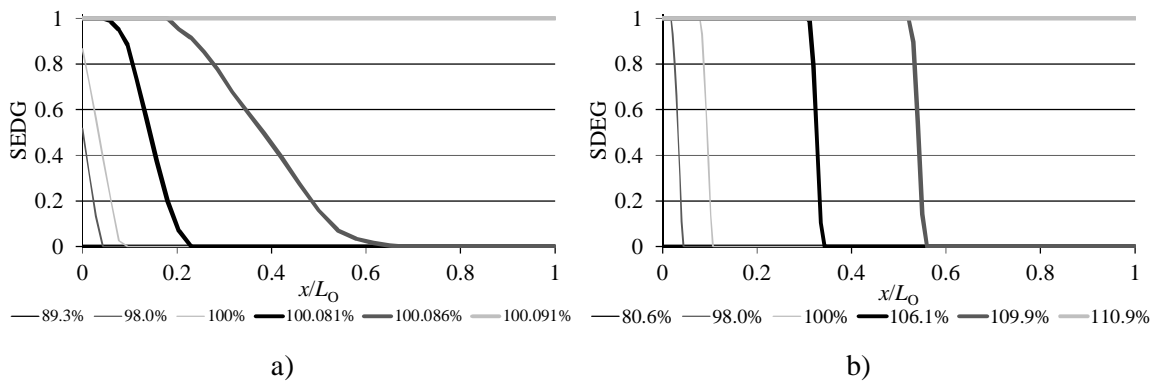


Figura 60 – Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm (a) e 50 mm (b).

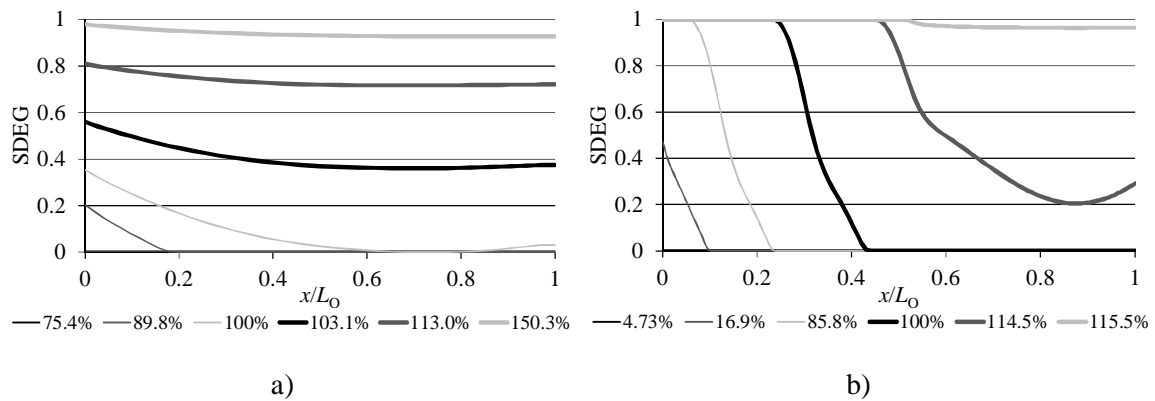


Figura 61 – Evolução de SDEG na zona colada com a aplicação de δ para as JSD com Sikaforce® 7888 e $L_0=12,5$ mm (a) e 50 mm (b).

4.6 Previsão da resistência

Este capítulo compara as previsões de P_{\max} pelos MDC com os resultados dos ensaios experimentais e apresenta uma discussão detalhada dos resultados obtidos, ou seja, comparação dos adesivos e configurações de juntas utilizadas (JSS ou JSD), em função das conclusões tiradas nas

análises de tensões e de variável de dano. O dano começa sempre nas duas extremidades da sobreposição (JSS) ou na extremidade exterior da sobreposição (JSD) com posterior propagação para o interior da camada adesiva. A Figura 62 mostra o início da propagação do dano para uma JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm e na Figura 63 mostra-se o fim do dano na mesma junta. De um modo geral, a concordância entre as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) experimentais e dos MDC foi bastante razoável.

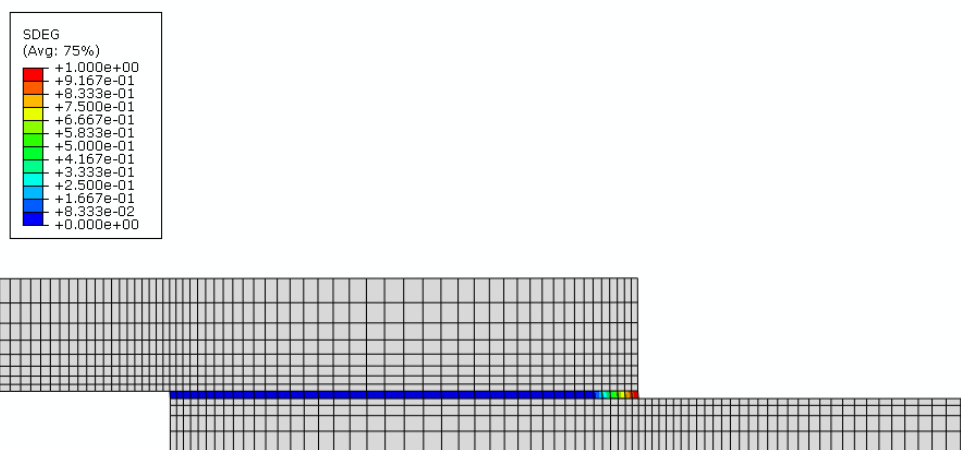


Figura 62 – Início do dano, para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm.

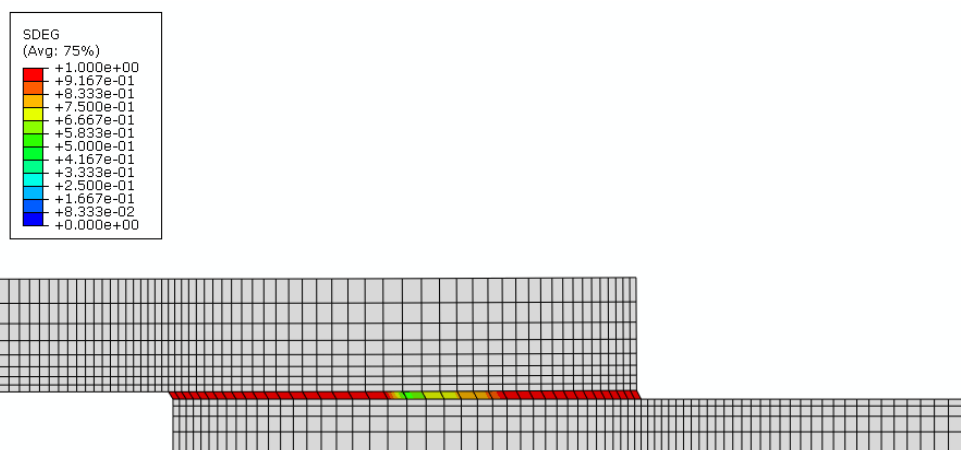


Figura 63 – Fim do dano, para as JSD com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm

Apresentam-se inicialmente alguns exemplos de curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC. Na Figura 64, apresentam-se as curvas para as JSS, com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm (Figura 64 a) e para as juntas com o Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm (Figura 64 b) [1]. A correlação geral para as JSS foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se empregou os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, em relação à $P_{\text{máx}}$, rigidez ou deslocamento de rotura [1]. Para o Sikaforce® 7888, os resultados experimentais

superam os numéricos, sendo este facto abordado mais à frente nesta tese. A Figura 65, Figura 66 e Figura 67 mostra a comparação de todas as curvas P - δ obtidas experimentalmente para as JSD com as respetivas previsões numéricas para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888, respetivamente. Também para esta configuração de junta, as previsões numéricas foram de encontro ao comportamento experimental.

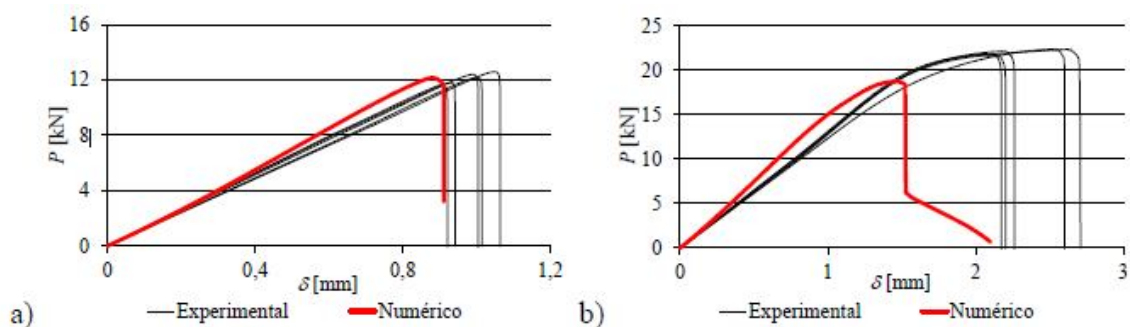


Figura 64 – Curvas P - δ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0 = 37,5$ mm (a) e para o adesivo Sikaforce® 7888 e $L_0 = 50$ mm (b) [1].

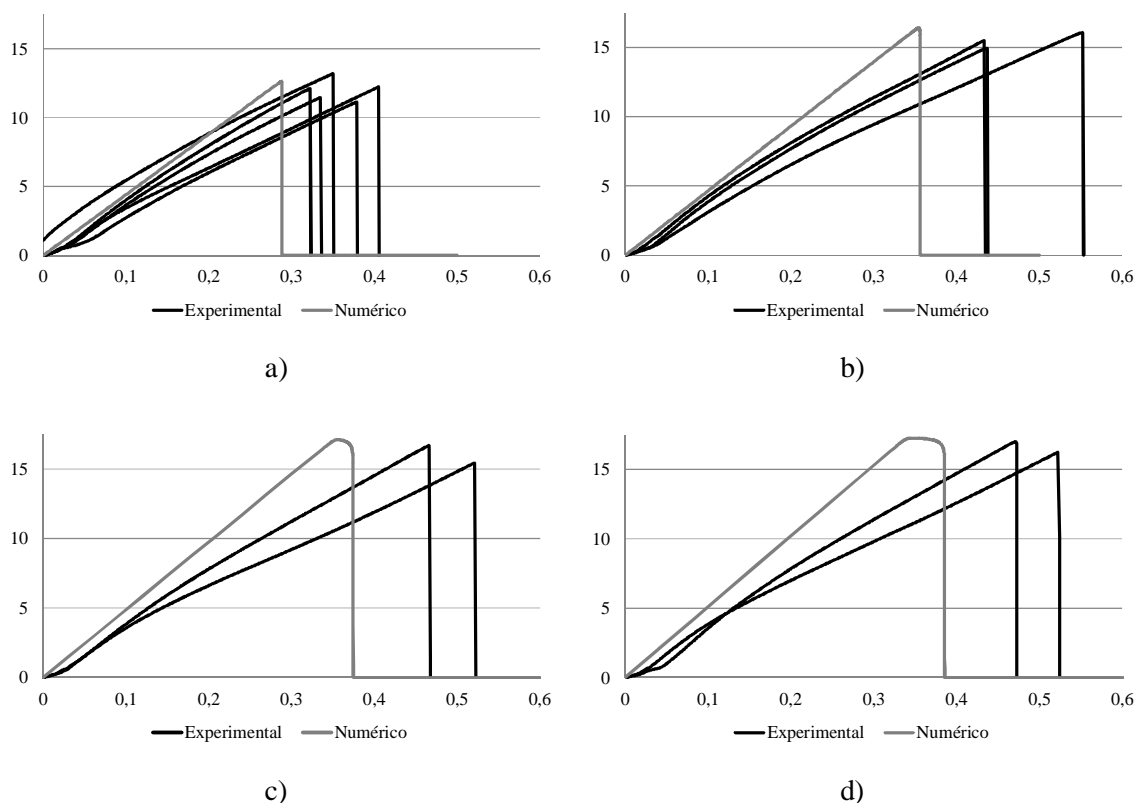


Figura 65 – Curvas P - δ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0 = 12,5$ mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).

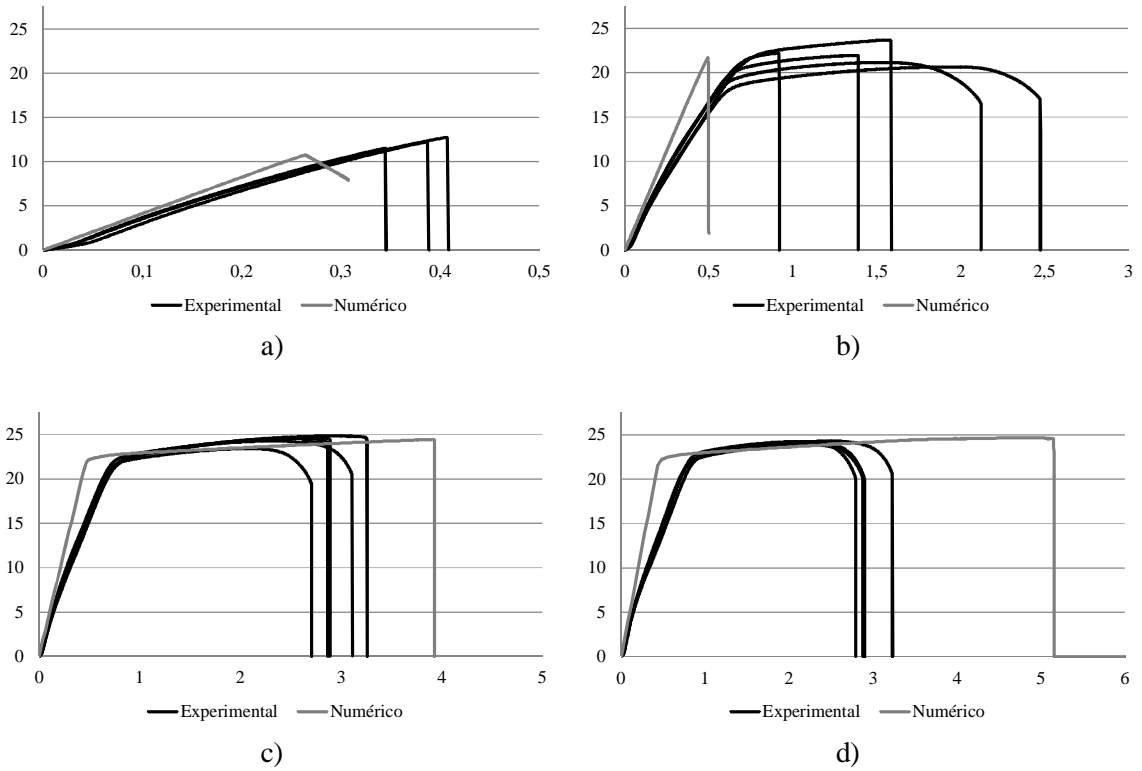


Figura 66 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite[®] 2015 e $L_0=12,5$ mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).

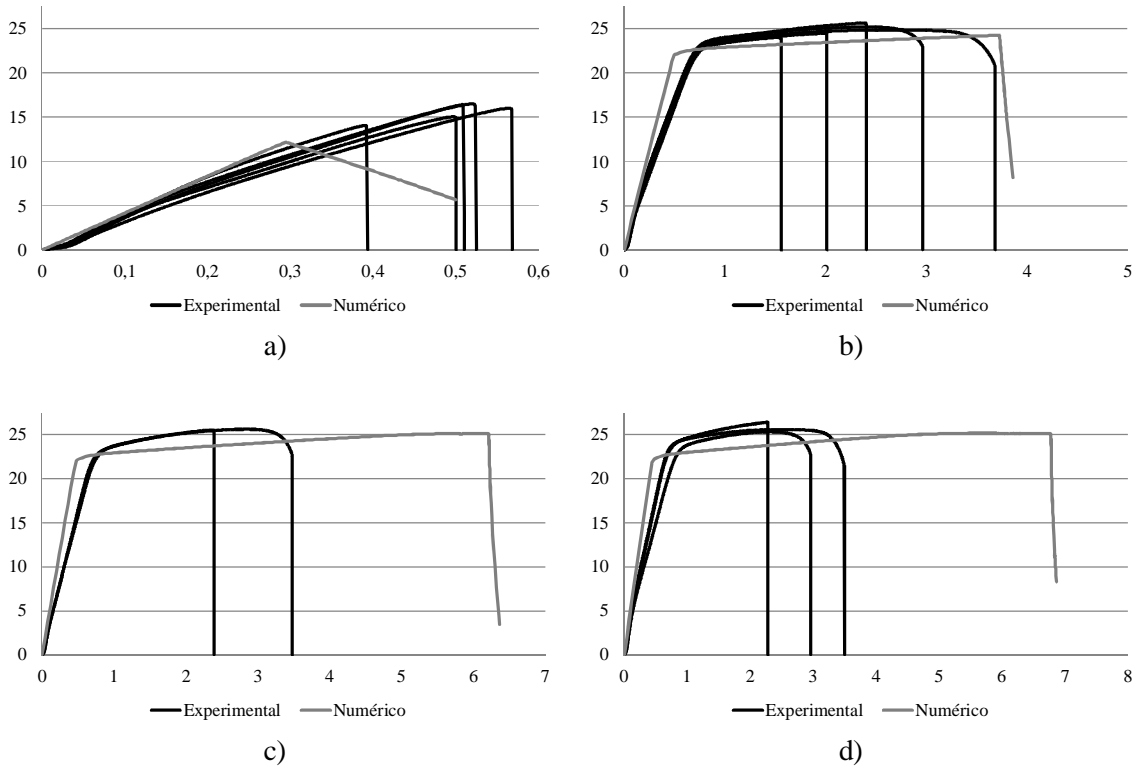


Figura 67 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimental e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce[®] 7888 e $L_0=12,5$ mm (a), 25 mm (b), 37,5 mm (c) e 50 mm (d).

A Figura 68 mostra a comparação entre os valores experimentais médios e as previsões numéricas por MDC dos valores de $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para as JSS e para os três adesivos em análise [1]. Também é apresentado o desvio padrão dos resultados experimentais.

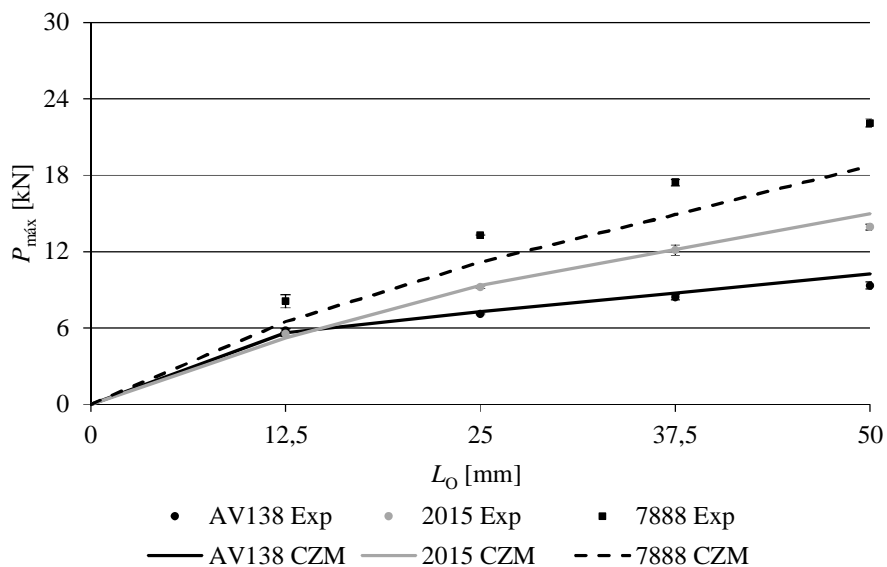


Figura 68 – $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as JSS [1].

Os resultados das JSS apresentam diferentes tendências, dependendo das características dos adesivos (rigidez, resistência e ductilidade). O valor de E dos adesivos também influencia a distribuição das tensões e conseqüentemente a resistência: um adesivo com menor valor de E tem uma distribuição de tensões mais uniforme [6]. Esta variação torna as juntas coladas com a Araldite® AV138 com picos de tensões mais elevados (os valores do E dos adesivos podem ser comparados na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7). A Figura 48 e a Figura 50 mostram que o perfil das tensões σ_y e τ_{xy} tornam-se mais constantes com a redução de L_0 , o que torna as sobreposições menores mais dependentes da resistência do adesivo. Por outro lado, um adesivo frágil sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona colada, enquanto os adesivos dúcteis permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, ao mesmo tempo que o interior da zona colada aumenta a sua contribuição para a resistência da junta [20]. Pode também ser realizada uma correlação com os gráficos da variável de dano (Figura 56) em que, quando $P_{\text{máx}}$ é atingida, o adesivo Araldite® AV138 concentra o dano numa região normalizada com menor extensão do que para os dois outros adesivos. Além disso, a rotura completa é atingida para um valor significativamente menor de $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$ do que para os adesivos dúcteis, porque este adesivo é frágil [32]. Assim, o resistente mas frágil Araldite® AV138 permite um valor ligeiramente mais elevado de $P_{\text{máx}}$ do que o menos resistente mas dúctil Araldite® 2015 para $L_0=12,5$ mm (diferença experimental de 4,9%). Com o aumento de L_0 , o Araldite® 2015 torna-se progressivamente melhor

do que o Araldite® AV138 pela plastificação que ocorre antes da rotura, no sentido de acomodar os picos de tensão nas extremidades da sobreposição. A diferença para $L_0=50$ mm é de 49,1%. O Sikaforce® 7888 combina uma alta resistência e ductilidade, e a rotura ocorre em condições que se assemelham à plastificação generalizada até grandes valores de L_0 [98]. Assim, os resultados são melhores do que para os outros dois adesivos para toda a gama de valores de L_0 testados. O aumento de $P_{\text{máx}}$ em comparação com Araldite® 2015 é entre 46,7% ($L_0=12,5$ mm) e 58,7% ($L_0=50$ mm). Os valores correspondentes ao Araldite® AV138 são 39,8% e 136,5%.

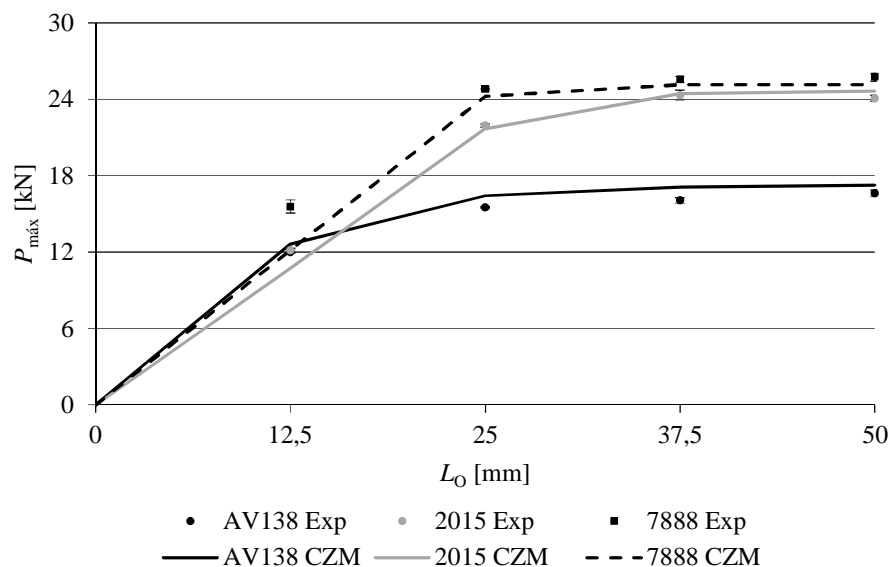


Figura 69 – $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as JSD.

A resistência das JSD também é altamente dependente do adesivo (Figura 69). Como mencionado anteriormente, o Araldite® AV138 mostrou picos mais elevados de tensões, devido à rigidez mais elevada. A Figura 49 e Figura 51 mostram as tensões σ_y e τ_{xy} destas juntas, respetivamente. Comparado com JSS, as tensões σ_y tornam-se compressivas na extremidade interior da sobreposição, enquanto na extremidade oposta os picos normalizados diminuem, exceto para $L_0=50$ mm. As tensões τ_{xy} tornam-se mais uniformes para as JSD com uma redução dos picos de tensão (exceto para $L_0=50$ mm). Da mesma forma às JSS, valores maiores de L_0 aumentam os picos de tensão. Por outro lado, as distribuições da variável de dano no instante em que $P_{\text{máx}}$ é atingido mostraram que, igualmente às JSS, as JSD coladas com o Araldite® AV138 concentram o dano numa pequena região numa das extremidades de sobreposição (Figura 59), o que também é indicativo de valores menores de $P_{\text{máx}}$. A rotura completa destas juntas também ocorre muito rapidamente, especialmente para $L_0=12,5$ mm ($\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}\approx 100,1\%$), o que deve corresponder a uma pequena melhoria de $P_{\text{máx}}$ com L_0 . Esta discussão explica os valores de $P_{\text{máx}}$ na Figura 69: o Araldite® AV138 tem valores semelhantes aos do Araldite® 2015 para $L_0=12,5$ mm ($P_{\text{máx}}$ inferior

em 1,0%), mas esta diferença aumenta bastante com L_0 (diferenças de cerca de 30% para os outros valores de L_0). Por causa das cargas mais elevadas para as JSD, observou-se a plastificação dos substratos para $P \approx 16$ kN e rotura à tração para $P \approx 24$ kN. Esta ocorrência afetou os gráficos $P_{\text{máx}}-L_0$ do Araldite® 2015 e do Sikaforce® 7888, cujas juntas atingem pelo menos a carga de plastificação para $L_0 \geq 25$ mm. Para o caso particular do Araldite® 2015, a plastificação do substrato interior ocorreu para $L_0 = 25$ mm e a rotura do mesmo à tração foi observada para os valores maiores de L_0 . Como tal, o gráfico $P_{\text{máx}}-L_0$ dá um valor estacionário de $P_{\text{máx}}$ para $L_0 \geq 25$ mm. O Sikaforce® 7888 comporta-se melhor para $L_0 = 12,5$ mm, mas, igualmente devido à plastificação ou rotura do substrato interior, os valores de $P_{\text{máx}}$ tornam-se idênticos aos do Araldite® 2015 para valores mais elevados de L_0 (observou-se rotura do substrato à tração para $L_0 \geq 25$ mm). Em comparação com o Araldite® 2015, as melhorias de $P_{\text{máx}}$ para os valores limites de L_0 são de 28,3% ($L_0 = 12,5$ mm) e 6,9% ($L_0 = 50$ mm). Relativamente ao Araldite® AV138, as diferenças correspondentes são de 29,6 e 54,9%.

Comparando os resultados das JSS e das JSD, é encontrada uma melhoria de resistência em mais de 2 vezes para as JSD, exceto para as configurações de junta que sofrem plastificação ou rotura do substrato interior. Este comportamento está de acordo com a discussão anterior das tensões que mostra que as JSD, além de duplicarem a área de colagem, apresentam tensões σ_y e τ_{xy} com picos de tensão inferiores que ajudam a aumentar a resistência média da junta relativamente à área colada. Além disso, a análise de dano apresentou variações mais graduais da variável de dano para as JSD nas quais não se observou plastificação do substrato interior (Figura 59), reforçando uma melhoria de $P_{\text{máx}}$ sobre a área colada. Nas configurações de junta com plastificação do substrato interior (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888 com $L_0 = 50$ mm), uma porção significativa da sobreposição está totalmente danificada quando $P_{\text{máx}}$ é atingido, justificando a menor melhoria da resistência sobre as JSS. Para o Araldite® AV138, a melhoria da resistência nas JSD comparativamente às JSS para valores crescentes de L_0 é de 107,6%, 119,2%, 90,9% e 78,0% (valores experimentais). Estes resultados são consistentes com o início da plastificação do substrato em ≈ 16 kN, afetando assim as juntas com $L_0 \geq 37,5$ mm. Os valores equivalentes para o Araldite® 2015 são de 120,2%, 138,2%, 101,0% e 73,1%. Neste caso, embora a carga da plastificação do substrato tenha sido ultrapassada para $L_0 = 25$ mm, o adesivo é mais dúctil e mostrou ser menos afetado por este efeito. As melhorias de resistência para o Sikaforce® 7888 foram de 92,5%, 86,4%, 46,7% e 16,6%. Neste caso, a melhoria da resistência é afetada pela plastificação do substrato logo para $L_0 = 12,5$ mm, devido às cargas mais elevadas sustentadas pelos substratos. Os resultados globais apresentados neste capítulo demonstram que, se não for possível combinar a resistência e ductilidade num adesivo, é preferível utilizar adesivos menos resistentes mas dúcteis. A única exceção é para valores muito pequenos de L_0 , para os quais adesivos resistentes mas frágeis apresentam resultados comparáveis devido à maior uniformidade das distribuições das tensões.

Esta análise é válida tanto para as JSS com para as JSD, embora a resistência limite dos substratos possa provocar a existência de um limite máximo para a resistência das juntas.

Ao analisar a capacidade de previsão dos MDC, considera-se que os resultados foram muito próximos para as juntas coladas com o Araldite[®] AV138 e Araldite[®] 2015, com desvios relativos máximos, relativamente aos valores experimentais, de 9,8% (Araldite[®] AV138, JSS com $L_0=50$ mm) e -11,5% (Araldite[®] 2015, JSD com $L_0=12,5$ mm). Em geral, os desvios são menores a 5%. As previsões numéricas para o Sikaforce[®] 7888, para as configurações de junta em que a rotura é governada pela camada adesiva em vez dos substratos, subestimou os valores de P_{\max} até 22,0% (JSD com $L_0=12,5$ mm). Este comportamento foi causado pela grande ductilidade deste adesivo (ver Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7), que não é adequadamente modelada pela lei coesiva triangular. De facto, embora este modelo dê uma ideia aproximada da resistência da junta, para se obterem resultados mais precisos, podem ser antes consideradas leis coesivas trapezoidais [13].

5 Conclusões

Os principais objetivos deste trabalho foram (1) uma avaliação comparativa de três adesivos estruturais, representativos de toda a gama de adesivos em JSS e JSD e (2) realizar uma análise detalhada das tensões, da variável de dano e da resistência por modelação de MDC.

Os resultados obtidos mostraram que o comportamento das juntas é altamente dependente do tipo de adesivo. O Araldite® AV138, em virtude de ter um valor mais elevado de E , apresenta picos de tensão mais elevados. Uma vez que é mais frágil do que os outros dois, a melhoria de $P_{\text{máx}}$ com L_O é muito limitada, tanto para as JSS como para as JSD. Por outro lado, o Araldite® 2015 permite a plastificação da ligação adesiva quando se atinge a tensão limite, o que resulta num aumento da resistência da junta. Isto foi confirmado pela análise da variável de dano, que mostrou que, quando $P_{\text{máx}}$ é atingido, uma quantidade significativa da sobreposição está com dano. O Sikaforce® 7888 consegue combinar alta resistência com ductilidade, o que resulta num desempenho melhor para todos os valores de L_O . Os valores de $P_{\text{máx}}$ para as JSD ultrapassam em mais de $2\times$ os valores correspondentes para as JSS, que representa a relação da área de colagem, exceto nas configurações de junta em que se observa plastificação dos substratos. Este comportamento ocorre devido à melhoria das distribuições de tensões, especialmente no final da sobreposição do substrato interior, o que também se reflete num dano menor nesta zona no momento da rotura. Para os valores maiores de L_O , em algumas das configurações de junta testadas (nomeadamente, com o Araldite® 2015 e Sikaforce® 7888) ocorreu plastificação do substrato interior, provocando uma rotura prematura do adesivo, ou mesmo rotura do substrato ao invés de rotura na ligação adesiva.

A previsão de $P_{\text{máx}}$ das JSS e JSD foi efetuada em primeiro lugar por critérios analíticos simples adequados a cada tipo de adesivo. Para as juntas com o Araldite® AV138 considerou-se o critério de Volkersen. Para os restantes adesivos considerou-se o critério de GY e de AF para contabilizar os casos em que se observou rotura dos substratos. Nalguns casos a previsão por estes critérios foi aceitável, embora noutros tenham sido obtidas diferenças consideráveis, nomeadamente na utilização do critério de Volkersen para valores de L_O mais elevados, e no critério GY para o Araldite® 2015. A técnica dos MDC, para além da análise das tensões e do dano, que permitiram a justificação detalhada dos resultados obtidos, mostrou ser bastante precisa na previsão da resistência das juntas, com a exceção das configurações de junta que obtiveram rotura na ligação

adesiva com o Sikaforce[®] 7888. Neste caso, devido à grande ductilidade do adesivo, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais. Esta limitação pode ser contornada usando um MDC mais adequado para o adesivo em questão. Em geral, pode-se concluir que o Sikaforce[®] 7888 é recomendado para todas as configurações de junta testadas e para os valores de L_0 . Para sobreposições curtas, o Araldite[®] AV138 ainda consegue apresentar resultados comparativos com os outros mas, com o aumento de L_0 torna-se bastante desfavorável, quer para as JSS quer para as JSD.

Como sugestões para trabalhos futuros, refere-se o uso de diferentes substratos, com uma tensão de rotura superior ao utilizado neste trabalho. Em vez de uma lei triangular, poderia ser usada uma lei trapezoidal, especialmente para o Sikaforce[®] 7888. Para além disso, poderia ser feito um estudo em que estivessem presentes filetes de adesivo nas extremidades da junta já que, propositadamente ou involuntariamente, as juntas adesivas podem apresentar esta alteração à geometria de base.

Referências

1. Fernandes TAB. Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
2. Da Silva, JPM. Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2012.
3. da Silva LFM, de Magalhães AG, de Moura MFSF, Juntas Adesivas Estruturais. Publindústria, Porto, 2007.
4. Pinto, AMG. Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos. Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.
5. Petrie EM. Handbook of adhesives and sealants. McGraw.Hill, New York, 2000.
6. Dilger K. Automobiles. In: Adams RD. Adhesive bonding: Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited. Cambridge England, 2005.
7. Hentinen M. Boats and marine. In: Adams RD. Adhesive bonding: Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited. Cambridge England, 2005.
8. Martín-Martínez JM. Shoe industry. In: Adams RD. Adhesive bonding: Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited. Cambridge England, 2005.
9. Pate KD. Applications of adhesives in aerospace. In: Adams RD. Adhesive bonding: Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited. Cambridge England, 2005.
10. Moreira RDF. Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência. Tese Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.
11. Adams RD, Comyn J, Wake WC. Structural adhesive joints in engineering. 2nd edn. Chapman & Hall, London, 1997.
12. da Silva LFM. Design rules and methods to improve joint strength. In: da Silva LFM, Ochsner A, Adams RD (eds). Handbook of adhesion technology. Springer-Verlag. Berlin Heidelberg, 2011.
13. Campilho RDSG, Banea MD, Neto JABP, da Silva LFM. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013;44:48-56.
14. da Silva LFM, Rodrigues T, Figueiredo MAV, de Moura M, Chousal JAG. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. The Journal of Adhesion 2006;82:1091-1115.

15. da Silva LFM, Campilho RDSG. Design of adhesively-bonded composite joints. In: Vassilopoulos AP. Fatigue and fracture of adhesively-bonded composite joints: Behaviour, simulation and modelling. Woodhead Publishing, Kidlington, 2015.
16. Crocombe AD. Global yielding as a failure criteria for bonded joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1989;9:145-153.
17. Volkersen O. Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonguerschnitten. *Luftfahrtforschung* 1938;15:41-47.
18. Goland M, Reissner E. The stresses in cemented joints. *Journal of Applied Mechanics* 1944;66:A17-A27.
19. Gleich DM, van Tooren MJL, Beukers A. Analysis and evaluation of bond line thickness effects on failure load in adhesively bonded structures. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2001;15:1091-1101.
20. Adams RD, Peppiatt NA. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *Journal of Strain Analysis* 1974;9:185-196.
21. Karachalios EF, Adams RD, da Silva LFM. Single lap joints loaded in tension with ductile steel adherends. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2013; 43:96-108.
22. Owens JFP. Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal shear joints. A Thesis Master of Science in Engineering: University of New Brunswick, 1998.
23. Das MDR, Madenci E, Ambur DR. Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repairs in composite laminates and sandwich panels. *Journal of Mechanics of Materials and Structures* 2008;3:1641-1658.
24. Army - MR, Navy - AS, Air Force - 11. Composite Materials Handbook, Vol 3: Polymer Matrix Composites Materials Usage, Design, and Analysis. Department of Defense, United States of America: MIL - HDB-17-3F, 2013.
25. Constante CJ. Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais. Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
26. Ebnesajjad S (ed.). *Adhesives Technology Handbook*. 2nd Edition. William Andrew, 2008.
27. Montes JR, Lucas CM, Romero JCR. *Procesos industriales para materiales no metálicos*. 2ª Edición, Madrid España : Edutirial Vision Net.
28. Zhao B, Lu ZH, Lu YN. Two-dimensional analytical solution of elastic stresses for balanced single-lap joints – Variational method. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2014;49:115-126.
29. Shishesaz M, Bavi N. Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2013;27:1197-1225.

30. Shin KC, Lee JJ. Bond parameters to improve tensile load bearing capabilities of co-cured single and double lap joints with steel and carbon fiber-epoxy composite adherends. *Journal of Composite Materials* 2003;37:401-420.
31. Kinloch AJ. *Adhesion and adhesives: Science and technology*. Springer, Heidelberg, 1987.
32. Fernandes TAB, Campilho RDSG, Banea MD, da Silva LFM. Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction. *The Journal of Adhesion* 2015;91:841-862.
33. Esteves JL. *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 1990.
34. Packham DE, *Handbook of Adhesion*. John Wiley & Sons, Chichester, 2005.
35. Harris JA, Adams RD. Strength prediction of bonded single-lap joints by non-linear finite element methods. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1984;4:65-78.
36. Sosa JLC, Karapurath N. Delamination modeling of GLARE using the extended finite element method. *Composites Science and Technology* 2012;72:788-791.
37. Panigrahi SK, Pradhan B. 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;26:183-201.
38. Hart-Smith LJ. *Stress analysis: a continuum mechanics approach*. In: Kinloch AJ (ed.) *Developments in Adhesives 2*. Applied Science Publishers, London, 1981.
39. Penado FE. A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 1998;11:272-287.
40. Adams RD, Harris JA. The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1987;7:69-80.
41. Zhao X, Adams RD, da Silva LFM. Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2011;25:819-836.
42. Zhao X, Adams RD, da Silva LFM. Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2011;25:837-856.
43. Ikegami, K. Takeshita, T. Matsuo, K. Sugibayashi, T. Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metal. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1990;10:199-206.
44. Greenwood L. The strength of a lap joint, in *Aspects of Adhesion-5*, ed. by D. Alner (University of London Press, London, 1969).
45. Engineering Sciences Data Unit, *Inelastic shear stresses and strains in adhesive bonding lap joints loaded in tension or shear (Computer Program)*. Engineering Sciences Data Item Number 79016 (1979).

46. John, SJ, Kinloch, AJ, Matthews, FL. Measuring and predicting the durability of bonded fibre/epoxy composite joints. *Composites* 1991;22:121-127.
47. Lee, SJ, Lee, DG. Development of a failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint. *The Journal of Adhesion* 1992;40:1-14.
48. da Silva LFM, Carbas RJC, Critchlow GW, Figueiredo MAV, Brown K. Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009;29:621-632.
49. da Silva LFM, das Neves PJC, Adams RD, Spelt JK. Analytical models of adhesively bonded joints – Part I: literature survey. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009;29:319-330.
50. Adams RD, Harris JA. Strength prediction of bonded single lap joints by nonlinear finite element methods. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1984;4:65-78.
51. Williams ML. The stresses around a fault or crack in dissimilar media. *Bulletin of the Seismological Society of America* 1959;49:199–204.
52. Fernlund G, Spelt JK. Failure load prediction. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1991;11:213-227.
53. Duan K, Hu X, Mai YW. Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2004;18:39–53.
54. Liljedahl CDM, Crocombe AD, Wahab MA, Ashcroft IA. Damage modelling of adhesively bonded joints. *International Journal of Fracture* 2006;141:147–161.
55. Barenblatt GI. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics* 1959;23:622–636.
56. Feraren P, Jensen HM. Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints. *Engineering Fracture Mechanics* 2004;71:2125–2142.
57. Ji G, Ouyang Z, Li G, Ibekwe S, Pang SS. Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. *International Journal of Solids and Structures* 2010;47:2445–2458.
58. Yang QD, Thouless MD. Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints. *International Journal of Fracture* 2001;110:175–187.
59. Mohammadi S. *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. Blackwell Publishing, New Jersey, 2008.
60. Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *International Journal of Fracture Mechanics* 1999;45:601–620.
61. Moës N, Dolbow J, Belytschko T (1999). A finite element method for crack growth without remeshing. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 1999;46:131–150.

62. Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, Silva LFM, Jesus AMP. Strength prediction of single and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2011;31:363-372.
63. Campilho RDSG, Banea MD, Neto JABP, Silva LFM. Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2013;88:513-533.
64. Neto JABP, Campilho RDSG, da Silva LFM. Parametric study of adhesive joints with composites. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2012;37:96–101.
65. Neto JABP. Estudo paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito. Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
66. Nascimento ANS. Efeito da espessura do adesivo na resistência de juntas de sobreposição simples, na ligação materiais compósitos. Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
67. Loureiro ALCD. Determination of the strain distribution on the adhesive joints using Fiber Bragg Grating (FBG). Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
68. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Composites Science and Technology* 2005;65:1948–1958.
69. Pinto AMG, Magalhães AG, Campilho RDSG, de Moura MFSF, Baptista APM. Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive. *The Journal of Adhesion* 2009;85:351–376.
70. Alfano G, Crisfield MA. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International Journal for Numerical Methods in Engineering* 2001;50:1701–1736.
71. Allix O, Corigliano A. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. *International Journal of Fracture* 1996;77:111–140.
72. Chandra N, Li H, Shet C, Ghonem H. Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces. *International Journal of Solids and Structures* 2002;39:2827–2855.
73. Chen J. Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models. *Journal of Thermoplastic Composite Materials* 2002;15:429–441.
74. Kafkalidis MS, Thouless MD. The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. *International Journal of Solids and Structures* 2002;39:4367–4383.
75. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *International Journal of Solids and Structures* 2008;45:1497–1512.

76. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009;29:195–205.
77. Campilho RDSG. Modelação da execução de reparações em materiais compósitos. Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
78. Pocius AV. *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*, 2nd Edition. 83, Hanser, 2002.
79. Andersson T, Stigh U. The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. *International Journal of Solids and Structures* 2004;41:413–434.
80. Leffler K, Alfredsson KS, Stigh U. Shear behaviour of adhesive layers. *International Journal of Solids and Structures* 2007;44:530–545.
81. Hogberg JL, Stigh U. Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer. *Engineering Fracture Mechanics* 2006;73:2541–2556.
82. Campilho RDSG, Pinto AMG, Banea MD, Silva RF, da Silva LFM. Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry. *Journal of Adhesion Science Technology* 2011;25:2351-2368.
83. de Moura MFSF, Gonçalves JPM, Chousal JAG, Campilho RDSG. Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints. *International Journal Adhesion & Adhesives* 2008;28:419–426.
84. Marques EAS, Silva LFM. Joint strength optimization of adhesively bonded patches. *International Journal Adhesion & Adhesives* 2008;84:917–936.
85. Campilho RDSG, Moura MFSF, Ramantani DA, Morais JLL, Domingues JJMS. Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs. *International Journal Adhesion & Adhesives* 2009;29:678–686.
86. Campilho RDSG, Moura DC, Gonçalves DJS, da Silva JFMG, Banea MD, da Silva LFM. Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites. *Composites: Part B*. 2013;50:120-126.
87. Adams RD. *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. Woodhead Publishing Ltd, Bristol, 2005.
88. Radice J, Vinson J. On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structure: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation *Composites Science and Technology* 2006;66:2528-2547.
89. Taib AA, Boukhili R, Achiou S, Boukehili H. Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints. *International Journal Adhesion & Adhesives* 2006;26:237-248.

90. Campilho RDSG. Repair of composite and wood structures. Tese Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
91. Reis, P, Antunes F, Ferreira JAM. Influence of superposition length on mechanical resistance of single lap adhesive joints. *Composite Structures* 2005;67:125-133.
92. De Castro J, Keller H. Ductile double-lap joints from brittle GFRP laminates and ductile adhesives, Part I: Experimental investigation. *Composites Part B: Engineering* 2008;39:271-281.
93. Jiang W, Qiao P. An improved four-parameter model with consideration of Poisson's effect on stress analysis of adhesive joints. *Engineering Structures* 2015;88:203-215.
94. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS, Morais JLL. Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model. *Journal of Adhesion Science and Technology* 2008;22:1565-1591.
95. Vable M, Maddi JR. Boundary element analysis of adhesively bonded joints. *International Journal Adhesion & Adhesives* 2006;26:133-144.
96. Luo Q, Tong L. Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints. *International Journal of Solids and Structures* 2007;44:2349-2370.
97. Grant LDR, Adams RD, da Silva LFM. Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 2009;29:405-413.
98. Davis M, Bond D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *International Journal of Adhesion & Adhesives* 1999;19:91-105.
99. Vallée T, Correia JR, Keller T. Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations. *Composites Science and Technology* 2006;66:1903-1914.