

Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão  
de resistência de ligações adesivas

Tiago Adelino Brandão Fernandes

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



16 de julho de 2014



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

Candidato: Tiago Adelino Brandão Fernandes, N°1121281, 1121281@isep.ipp.pt  
Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica - Ramo de Construções Mecânicas

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



16 de julho de 2014



## *Agradecimentos*

Gostaria de agradecer em primeiro lugar à minha família (pai, mãe e irmãos) por todo o apoio transmitido ao longo deste trabalho.

Um agradecimento especial ao meu orientador, o Professor Doutor Raul Campilho pelo precioso apoio fornecido na parte de simulação numérica, pela sua disponibilidade e fornecimento de dados.

Agradeço também ao meu amigo e colega de curso, o Engenheiro Pedro Santos, pelo fornecimento de documentos e companhia durante a realização deste trabalho.



## *Resumo*

Com a necessidade de encontrar uma forma de ligar componentes de forma mais vantajosa, surgiram as ligações adesivas. Nos últimos anos, a utilização de juntas adesivas em aplicações industriais tem vindo a aumentar, substituindo alguns métodos de ligação tradicionais, por apresentarem vantagens tais como, redução de concentração de tensões, reduzido peso e facilidade de processamento/fabrico. O seu estudo permite prever a sua resistência e durabilidade.

Este trabalho refere-se ao estudo de juntas de sobreposição simples (JSS), nas quais são aplicados os adesivos comerciais que variam desde frágeis e rígidos, como o caso do Araldite<sup>®</sup> AV138, até adesivos mais dúcteis, como o Araldite<sup>®</sup> 2015 e o Sikaforce<sup>®</sup> 7888. Estes são aplicados em substratos de alumínio (AL6082-T651) em juntas com diferentes geometrias e diferentes comprimentos de sobreposição ( $L$ ), sendo sujeitos a esforços de tracção. Foi feita uma análise dos valores experimentais fornecidos e uma posterior comparação destes com diferentes métodos numéricos baseados em Elementos Finitos (EF). A comparação foi feita por uma análise de Modelos de Dano Coesivo (MDC) e segundo os critérios baseados em tensões e deformações do Método de Elementos Finitos Extendido (MEFE). A utilização destes métodos numéricos capazes de simular o comportamento das juntas poderá levar a uma poupança de recursos e de tempo.

A análise por MDC revelou que este método é bastante preciso, excepto para os adesivos que sejam bastante dúcteis. A aplicação de uma outra lei coesiva pode solucionar esse problema. Por sua vez a análise por MEFE demonstrou que esta técnica não é particularmente adequada para o crescimento de dano em modo misto e, comparativamente com o MDC, a sua precisão é bastante inferior.

### *Palavras-Chave*

Adesivo, Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivos, Método de Elementos Finitos Extendido.





## *Abstract*

With the need to find a way to join components more advantageously, adhesive bonds emerged. In recent years, the use of adhesive joints in industrial applications has been increasing, replacing traditional joining methods, since they provide advantages such as reduction of stress concentrations, reduced weight and ease of processing/manufacturing. Their study allows predicting their strength and durability.

This work deals with the study of single lap joints (SLJ), in which commercial adhesives are considered, ranging from brittle and strong, as the case of Araldite<sup>®</sup> AV138, to ductile, as the Araldite<sup>®</sup> 2015 and Sikaforce<sup>®</sup> 7888. These are applied to aluminum substrates (AL6082-T651) in joints with different geometries and different overlap lengths ( $L$ ), being subject to a tensile loading. An analysis to the experimental values was carried out and a subsequent comparison of these with different numerical methods based on finite element (FE). The comparison was made by analysis of Cohesive Zone Models (CZM) and according to stresses and strain criteria by the eXtended Finite Element Method (XFEM). The use of numerical methods to simulate the behavior of the joints can lead to savings of time and resources.

The CZM with a triangular damage law revealed that this method is very accurate, except for adhesives that are quite ductile. The application of another cohesive law can solve this problem. On the other hand, the XFEM analysis demonstrated that this technique is not very suitable for damage growth under mixed mode and, compared with the CZM, its accuracy is much lower.

### ***Keywords***

Adhesive, Finite Elements, Cohesive Zone Models, eXtended Finite Element Method.



# Índice

<b>AGRADECIMENTOS</b> .....	<b>V</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>VII</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>IX</b>
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b> .....	<b>XIII</b>
<b>ÍNDICE DE TABELAS</b> .....	<b>XIX</b>
<b>NOMENCLATURA</b> .....	<b>XXI</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJECTIVOS .....	1
1.3 CALENDARIZAÇÃO .....	2
1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	3
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>5</b>
2.1 LIGAÇÃO DE COMPONENTES POR JUNTAS ADESIVAS .....	5
2.1.1 <i>Caracterização das juntas adesivas</i> .....	6
2.1.2 <i>Aplicações comuns das juntas adesivas</i> .....	7
2.1.3 <i>Esforços típicos em juntas adesivas</i> .....	8
2.1.4 <i>Tipos de rotura</i> .....	10
2.1.5 <i>Configurações possíveis de junta</i> .....	12
2.1.6 <i>Parâmetros que afectam o desempenho das juntas</i> .....	13
2.2 ADESIVOS .....	16
2.2.1 <i>Caracterização dos adesivos</i> .....	18
2.2.2 <i>Tipos de adesivos</i> .....	21
2.3 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DAS JUNTAS .....	22
2.3.1 <i>Mecânica dos meios contínuos</i> .....	23
2.3.2 <i>Mecânica da fractura</i> .....	25
2.3.3 <i>Modelos de dano coesivo</i> .....	27
2.3.3.1 <i>Modelo de dano triangular</i> .....	28
2.3.4 <i>Mecânica do dano</i> .....	30
2.3.5 <i>Método de Elementos Finitos Extendido</i> .....	32
<b>3 PREVISÃO DA RESISTÊNCIA</b> .....	<b>35</b>

# Índice

---

3.1	CARACTERIZAÇÃO DO TRABALHO EXPERIMENTAL.....	37
3.1.1	<i>Geometria dos provetes</i> .....	37
3.1.2	<i>Materiais</i> .....	38
3.1.2.1	Substratos.....	38
3.1.2.2	Adesivos.....	39
3.1.2.2.1	Araldite® AV138.....	39
3.1.2.2.2	Araldite® 2015.....	40
3.1.2.2.3	Sikaforce® 7888.....	42
3.1.3	<i>Fabrico</i> .....	43
3.1.4	<i>Ensaio</i> s.....	46
3.1.5	<i>Resultados</i> .....	47
3.1.5.1	Modos de rotura.....	47
3.1.5.2	Curvas $P-\delta$ .....	50
3.1.5.3	Cargas de rotura.....	54
3.1.5.4	Análise dos dados obtidos.....	55
3.2	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS.....	57
3.2.1	<i>Condições da análise numérica</i> .....	57
3.2.2	<i>Análise de tensões das juntas</i> .....	60
3.2.2.1	Tensões de arrancamento.....	61
3.2.2.2	Tensões de corte.....	62
3.2.3	<i>Modelo de dano coesivo</i> .....	64
3.2.3.1	Determinação das propriedades coesivas.....	64
3.2.3.1.1	Araldite® AV138.....	64
3.2.3.1.2	Araldite® 2015.....	65
3.2.3.1.3	Sikaforce® 7888.....	66
3.2.4	<i>Modos de rotura</i> .....	66
3.2.5	<i>Previsão da resistência</i> .....	69
3.3	MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO.....	74
3.3.1	<i>Condições da análise numérica</i> .....	75
3.3.2	<i>Modelo de dano utilizado</i> .....	76
3.3.2.1	Determinação das propriedades de dano.....	77
3.3.2.1.1	Araldite® AV138.....	77
3.3.2.1.2	Araldite® 2015.....	77
3.3.2.1.3	Sikaforce® 7888.....	78
3.3.3	<i>Previsão da resistência</i> .....	78
<b>4</b>	<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>87</b>
	<b>REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS</b> .....	<b>91</b>

## *Índice de Figuras*

Figura 1 – Aplicação de adesivos em carros modernos [4].....	7
Figura 2 – Ensaio de tracção de uma JSS [1] .....	9
Figura 3 – Ensaio de Clivagem ((a) ASTM D3807, (b) ASTM D5041, (c) ASTM D1062) [1] .....	9
Figura 4 – Ensaio de Arrancamento ((a) ASTM D903, (b) ASTM D1876 (c) ASTM D3167) [1].....	10
Figura 5 – Tipos de rotura numa JSS .....	11
Figura 6 – Tipos de configurações de juntas adesivas [2].....	12
Figura 7 – Plastificação dos aderentes e criação de rótulas plásticas numa JSS [14] .....	15
Figura 8 – Grupos dos Adesivos Estruturais e não Estruturais [8, 24].....	21
Figura 9 – JSS com ângulos diferentes de arredondamento [25] .....	23
Figura 10 – Variação da tensão principal máxima do adesivo com uma carga aplicada de 20 kN.....	24
Figura 11 – Lei triangular do modelo de dano coesivo .....	28
Figura 12 – Propagação do dano no MEF usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fracturados em subelementos [69].....	34
Figura 13 – Configuração da geometria do provete .....	38
Figura 14 – Curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) do alumínio AL6082-T651 [84] .....	39
Figura 15 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 [84].....	40
Figura 16 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 .....	41

Figura 17 – Curva $\sigma$ - $\varepsilon$ de provetes maciços do adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7888 [87].....	42
Figura 18 – Máquina de granalhagem “Cidblast” modelo RT6S [84].....	44
Figura 19 – Fixação dos substratos .....	45
Figura 20 – Processo de montagem das juntas.....	45
Figura 21 – Aspecto de uma junta após remoção de excessos de adesivo.....	46
Figura 22 – Máquina de ensaio Shimadzu, modelo AG-X 100, e respectiva fixação dos provetes.....	46
Figura 23 – Superfícies de rotura de provetes representativos de cada valor de $L$ de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138.....	47
Figura 24 – Vista lateral dos aderentes de uma junta com $L=50$ mm em que se empregou o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138, sem ocorrência de deformação plástica transversal.....	48
Figura 25 – Superfícies de rotura de provetes representativos de cada valor de $L$ de juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 .....	48
Figura 26 – Vista lateral dos aderentes de uma junta em que se empregou o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015, sem ocorrência de deformação plástica transversal para valores de $L$ de 25 mm (a), e com observação de deformação plástica para $L= 37,5$ mm (b) e $L=50$ mm (c).....	49
Figura 27 – Superfícies de rotura de provetes representativos de cada valor de $L$ de juntas coladas com o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7888 .....	49
Figura 28 – Vista lateral dos aderentes de uma junta em que se empregou o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7888, com observação de deformação plástica para $L =12,5$ mm (a), $L=25$ mm (b), $L= 37,5$ mm (c) e $L=50$ mm (d) .....	50
Figura 29 – Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138, com valores de $L=12,5$ mm (a), $L=25$ mm (b), $L=37,5$ mm (c) e $L=50$ mm (d).....	51

Figura 30 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015, com valores de $L=12,5$ mm (a), $L=25$ mm (b), $L=37,5$ mm (c) e $L=50$ mm (d).....	52
Figura 31 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7888, com valores de $L=12,5$ mm (a), $L=25$ mm (b), $L=37,5$ mm (c) e $L=50$ mm (d).....	53
Figura 32 – $P_{\text{máx}}$ em função de $L$ para cada tipo de adesivo .....	54
Figura 33 – Atribuição das características dos materiais no ABAQUS <sup>®</sup> .....	57
Figura 34 – Sentido do efeito <i>bias</i> da malha na região da sobreposição.....	59
Figura 35 – Sentido do efeito <i>bias</i> da malha na região não ligada dos aderentes .....	59
Figura 36 – Sentido do efeito <i>bias</i> da malha ao longo da espessura dos aderentes.....	59
Figura 37 – Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos.....	60
Figura 38 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 em função de $L$ .....	61
Figura 39 – Comparação das tensões $\sigma_y$ entre os 3 adesivos para $L=12,5$ mm.....	62
Figura 40 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 em função de $L$ .....	63
Figura 41 – Comparação das tensões $\tau_{xy}$ entre os 3 adesivos para $L=12,5$ mm .....	63
Figura 42 – Constatação da não existência de deformação plástica para as juntas com $L=12,5$ mm (a) e a existência de deformação plástica para as juntas com $L=50$ mm (b) nas juntas em que se empregou Araldite <sup>®</sup> AV138 .....	67
Figura 43 – Constatação da não existência de deformação plástica para as juntas com $L=12,5$ mm (a) e a existência de deformação plástica para as juntas com $L=50$ mm (b) nas juntas em que se empregou Araldite <sup>®</sup> 2015.....	68
Figura 44 – Constatação da não existência de deformação plástica para as juntas com $L=12,5$ mm (a) e a existência de deformação plástica para as juntas com $L=50$ mm (b) nas juntas em que se empregou Sikaforce <sup>®</sup> 7888.....	69

Figura 45 – Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite <sup>®</sup> 2015 e $L=37,5$ mm (a) e para o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7888 e $L=50$ mm (b) .....	69
Figura 46 – Variável de dano em função de $L$ para o instante de $P_{\text{máx}}$ das juntas (a) e no instante da rotura do primeiro elemento MDC nas extremidades de $L$ (b).....	70
Figura 47 – Evolução da variável de dano com $\delta$ para o adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 para $L=12,5$ (a) e $L=50$ mm (b).....	71
Figura 48 – Evolução da variável de dano com $\delta$ para o adesivo Sikaforce <sup>®</sup> 7888 para $L=12,5$ (a) e $L=50$ mm (b).....	72
Figura 49 – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente pelo MDC para os 3 adesivos .....	72
Figura 50 – Desvio máximo de $P_{\text{máx}}$ em função do comprimento dos elementos do adesivo Araldite <sup>®</sup> AV138 (a) e para o Sikaforce <sup>®</sup> 7888 (b).....	74
Figura 51 – Propriedades dos elementos segundo o MEFE.....	75
Figura 52 – Selecção da direcção de propagação da fenda para o critério MAXS .....	79
Figura 53 – Direcção de propagação da fenda na junta adesiva .....	79
Figura 54 – Variação de $P_{\text{máx}}$ em função de $L$ para os critérios MAXPS (a), MAXS (b) e QUADS (c) .....	81
Figura 55 – Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos pelo MEFE para as juntas coladas com os adesivos Araldite <sup>®</sup> AV138 e Araldite <sup>®</sup> 2015 ...	82
Figura 56 – Malha com elementos de dimensão 0,02 (a) e 0,2 mm (b).....	83
Figura 57 – Efeito do refinamento da malha pelos critérios MAXPE, MAXE e QUADE do MEFE na previsão de $P_{\text{máx}}$ para as juntas coladas com os adesivos Araldite <sup>®</sup> AV138 (a) e Sikaforce <sup>®</sup> 7888 (b) .....	84



Figura 58 – Efeito do refinamento da malha pelos critérios MAXPS, MAXS e QUADS do MEFE na previsão de  $P_{m\acute{a}x}$  para as juntas coladas com os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 (a) e Sikaforce<sup>®</sup> 7888 (b)..... 85



## *Índice de Tabelas*

Tabela 1 – Calendarização do trabalho.....	2
Tabela 2 – Características das juntas adesivas [3].....	6
Tabela 3 – Desenvolvimento cronológico dos adesivos durante o séc. XX [23] .....	18
Tabela 4 – Cargas de rotura experimentais e numéricas para juntas adesivas com o adesivo modificado [63].....	31
Tabela 5 – Dimensões do provete (em mm).....	38
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [86] .....	40
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [85].....	41
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7888 [87].....	43
Tabela 9 – Variação do $P_{máx}$ para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138.....	52
Tabela 10 – Variação do $P_{máx}$ para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015.....	53
Tabela 11 – Variação do $P_{máx}$ para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7888.....	54
Tabela 12 – Variação das dimensões da malha nas JSS.....	58
Tabela 13 – Deslocamentos aplicados nos modelos MDC do <i>software</i> ABAQUS® .....	60
Tabela 14 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A$ de 0,2 mm [80] .....	65
Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com $t_A$ de 0,2 mm [106] .....	65
Tabela 16 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7888 com $t_A$ de 0,2 mm [87].....	66

Tabela 17 – Comparação da deformação plástica numérico-experimental.....	67
Tabela 18 – Deslocamentos de tracção aplicados para os diferentes critérios do método MEFÉ no <i>software</i> ABAQUS® .....	76
Tabela 19 – Parâmetros utilizados para a análise MEFÉ para o adesivo Araldite® AV13877	
Tabela 20 – Parâmetros utilizados para a análise MEFÉ para o adesivo Araldite® 2015...	78
Tabela 21 – Parâmetros utilizados para a análise MEFÉ para o adesivo Sikaforce® 7888.	78
Tabela 22 – Variação dos deslocamentos aplicados com o refinamento da malha para os critérios baseados em deformações.....	83
Tabela 23 – Variação dos deslocamentos aplicados com o refinamento da malha para os critérios baseados em tensões .....	84

## *Nomenclatura*

### **Caracteres Romanos**

$\mathbf{a}_i$  – Vector dos graus de liberdade nodais enriquecidos

$C$  – Curva que rodeia a ponta da fenda

$E$  – Módulo de *Young*

$G$  – Módulo de corte

$G_{IC}$  – Tenacidade à tracção

$G_{IIC}$  – Tenacidade ao corte

$H$  – Funções de forma descontínuas

$K$  – Matriz constitutiva

$L$  – Comprimento de sobreposição

$L_S$  – Comprimento dos substratos

$L_T$  – Comprimento final da junta de sobreposição simples

$N_i$  – Funções de interpolação

$P_{\text{máx}}$  – Força máxima

$S$  – Comprimento do arco

$t_A$  – Espessura do adesivo

$T_j$  – Vector de tracção

$t_m^0$  – Resistência máxima em modo misto

$t_n$  – Componente de tensão normal

$t_n^0$  – Resistência máxima em tracção

$t_s$  – Componente de tensão ao corte

$t_s$  – Espessura dos substratos

$t_s^0$  – Resistência máxima em corte

$w$  – Densidade de energia

$x$  – Distância desde a extremidade esquerda da camada do adesivo

$x_1$  – Sistema de coordenadas

$x_2$  – Sistema de coordenadas

### **Caracteres Gregos**

$\alpha$  – Coeficiente para critério da mecânica da fractura

$\beta$  – Coeficiente para critério da mecânica da fractura

$\gamma$  – Coeficiente para critério da mecânica da fractura

$\delta$  – Deslocamento

$\delta_m^f$  – Deslocamento de rotura em modo misto

$\varepsilon$  – Deformação

$\varepsilon_{\text{máx}}$  – Deformação principal máxima

$\varepsilon_n$  – Componente de deformação normal

$\varepsilon_s$  – Componente de deformação ao corte

$\tau_{\text{avg}}$  – Tensão de corte média

$\tau_{xy}$  – Tensões de corte

$\sigma_{\text{máx}}$  – Tensão principal máxima

$\sigma_y$  – Tensões de arrancamento

$\nu$  – Coeficiente de *Poisson*

## **Abreviaturas**

2D – Duas dimensões

3D – Três dimensões

ASTM – Sociedade Americana de Testes e Materiais

CTBN – *Carboxyl-terminated butadiene acrylonitrile*

DCB – *Double Cantilever Beam*

EF – Elementos Finitos

ENF – *End notched flexure*

HRR – *Hutchinson Rice Rosengreen*

ISO – Organização Internacional de Normalização

MAMD – Métodos alternativos da mecânica do dano

MAXE – Critério de deformação nominal máxima

MAXPE – Deformação principal máxima

MAXPS – Tensão principal máxima

MAXS – Critério de tensão nominal máxima

MDC – Modelo de Dano Coesivo

MEFE – Método de Elementos Finitos Extendido

MFLE – Mecânica da fractura linear elástica

QUADE – Critério quadrático de deformação

QUADS – Critério quadrático de tensão

SDEG – *Stiffness degradation*

TAST – *Thick adherend shear test*



# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

A integridade de uma estrutura com diversos componentes é geralmente determinada pelas suas ligações. Em relação aos métodos tradicionais, os adesivos são frequentemente usados pelas vantagens que apresentam, como a redução de concentrações de tensão, baixo peso e pela facilidade de fabrico. Relativamente à sua natureza, os adesivos comerciais variam de frágeis e rígidos como por exemplo o Araldite<sup>®</sup> AV138, a dúcteis e menos rígidos como o caso do Araldite<sup>®</sup> 2015. Para além destes, existem os adesivos de poliuretano que combinam uma elevada resistência e ductilidade, como por exemplo o Sikaforce<sup>®</sup> 7888. A resistência e ductilidade são dois dos principais factores que influenciam a resistência de uma junta adesiva. A resistência mecânica do adesivo é necessária para a transferência de carga ao longo da junta, enquanto a ductilidade é essencial para absorver as concentrações de tensões situadas nas extremidades das juntas, e desta forma evitar a rotura prematura destas. A variação da geometria das juntas com diferentes valores de  $L$  dá origem a diferentes estados de tensão na camada adesiva, e conseqüentemente este parâmetro têm influência no desempenho da junta. Devido à crescente utilização das juntas adesivas, a existência de métodos numéricos capazes de prever a resistência das juntas com elevada precisão pode levar a uma poupança de recursos e de tempo na análise da resistência dos adesivos e na selecção do adesivo mais adequado. Neste âmbito, dois métodos que se perfilam como métodos capazes de simular o comportamento das juntas são os MDC e o MEFE.

## 1.2 Objectivos

Neste trabalho, o desempenho dos três adesivos citados acima foi avaliado em JSS com quatro valores de  $L$ . Os resultados experimentais, obtidos de trabalhos anteriores, foram

comparados com análises numéricas detalhadas por EF, baseadas em MDC e MEFE. Foi ainda realizada uma análise das tensões de arrancamento e de corte na camada adesiva e constatadas as variações e a influência destas na resistência da junta adesiva. No estudo por MDC, é avaliada a variável de dano SDEG na camada do adesivo, o que permite constatar a degradação do adesivo desde o início da aplicação de carga até à rotura completa, dada em função de  $L$ , e como tal explicar os resultados obtidos. No estudo do método MEFE, a capacidade de previsão da resistência das juntas com os três adesivos é avaliada segundo critérios baseados em tensões e deformações, que simulam o início e a propagação do dano, no qual os seus níveis de precisão são posteriormente comparados. Para além disso, um estudo sobre o tamanho da malha é um dos objectivos deste trabalho, que vai permitir fazer uma análise da sua influência do refinamento da malha na resistência de uma junta adesiva. Com a realização destas análises vai ser possível estimar com detalhe qual a melhor técnica para avaliar o desempenho das juntas adesivas e ainda qual o adesivo mais adequado em função de  $L$ .

### 1.3 Calendarização

Durante a concepção deste trabalho, os objectivos foram realizados segundo a seguinte calendarização presente na Tabela 1.

Tabela 1 – Calendarização do trabalho

	Março			Abril			Maio			Junho		
	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-30	1-10	11-20	21-31	1-10	11-20	21-30
Revisão Bibliográfica												
Tratamento dos dados experimentais												
Trabalho numérico - MDC												
Trabalho numérico - MEFE												
Escrita da tese												

### **1.4 Organização do relatório**

Para melhor interpretação e análise do trabalho realizado, este foi dividido em vários capítulos. No capítulo 1 foi realizada uma introdução ao tema e apresentadas as etapas seguidas na tese.

No capítulo 2 foi feita a revisão bibliográfica pertinente para o trabalho em estudo, onde são abordados temas ligados à tecnologia dos adesivos, à sua aplicação em juntas, sendo referenciados as configurações e os esforços mais comuns presentes nestas e descritas as técnicas mais comuns de análise da resistência para juntas adesivas.

No capítulo 3.1 foi realizada uma abordagem dos procedimentos e materiais usados nos ensaios experimentais realizados em trabalhos anteriores e feita uma análise dos resultados obtidos.

No capítulo 3.2, relativo ao estudo por MDC, foram referenciadas as condições da análise numérica impostas no *software* ABAQUS® para o MDC, foi efectuada uma análise sobre as tensões presentes na camada do adesivo e comparados os resultados obtidos na previsão da resistência das juntas com os resultados experimentais. Para além disso, foi realizado um estudo sobre a influência do refinamento da malha na resistência da junta.

No capítulo 3.3, relativo à análise de MEFE, são mencionadas as condições da análise numérica impostas para o MEFE, bem como o modelo de dano usando critérios baseados em tensões e deformações. Posteriormente foi feita uma comparação da resistência obtida para cada adesivo com os resultados experimentais e realizada uma análise da influência do refinamento da malha na resistência da junta segundo os critérios baseados em tensões e deformações.

No último capítulo, capítulo 4, foram ditas as conclusões retiradas de todo o trabalho e feita referência a possíveis trabalhos futuros.



# 2 Revisão Bibliográfica

## 2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas

Com o intuito de unir componentes, vários métodos de ligação foram surgindo, dos quais se destacam as ligações mecânicas, ligações soldadas e as ligações adesivas. A ligação com recurso a adesivos, designada por junta adesiva, é um método frequente na união de dois ou mais componentes e, em comparação com as ligações mecânicas, permite uma distribuição de carga mais uniforme ao longo de uma área superior, fazendo com que exista uma menor concentração de tensões localizadas nas juntas [1]. Estruturalmente, uma junta adesiva é composta por substratos ou aderentes, os quais são ligados entre si por um adesivo [2].

Assim como qualquer outro método de ligação, o projecto de juntas adesivas, apesar de parecer simples, requer cuidados especiais, tais como uma selecção adequada do tipo de adesivo a usar e uma selecção da geometria da junta tendo em consideração o tipo de solicitação. É também necessário garantir uma boa adesão entre o adesivo e os substratos, evitando assim uma rotura não planeada.

A adesão entre o adesivo e os substratos é um dos aspectos mais importantes na resistência de uma junta adesiva, e para que esta seja bem sucedida é necessário fazer uma preparação cuidadosa das superfícies, uma remoção total de qualquer partícula presente nos aderentes, uma selecção rigorosa do adesivo e do aderente de acordo com as suas propriedades. Uma forma de melhorar a adesão é modificando a superfície do substrato com recurso a um tratamento superficial, como por exemplo o processo de anodização do alumínio [1].

Um outro aspecto a ter em consideração na resistência da junta, é a coesão, ou seja, a própria resistência interna do adesivo quando sujeita a esforços. A resistência e a coesão são superiores, quanto mais fortes forem as forças intermoleculares do adesivo [2].

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Comparativamente com outros meios de união, as juntas adesivas caracterizam-se por poderem juntar objectos com qualquer tipo de formas e espessuras, por possuírem uma boa capacidade de amortecimento de vibrações e de absorverem o choque e ainda por serem um método menos dispendioso e mais rápido do que a maioria dos meios de fixação mecânica. Como factor negativo comparativamente com outros métodos, as juntas adesivas requerem uma limpeza cuidadosa das superfícies, em certos casos são precisos tempos de cura elevados, muitas vezes acarretam o uso de instrumentos para auxílio durante o processo de aplicação do adesivo e exigem em certas situações uma formação especial nesta área [3]. Algumas características estão representadas na Tabela 2.

Tabela 2 – Características das juntas adesivas [3]

<b>Juntas Adesivas</b>	
Tipo de ligações	Ligações usualmente permanentes
Distribuição de tensões	Distribuição de tensões uniforme ao longo da largura da junta
União da junta	Quase invisível, sem contornos do início da ligação
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 eléctrico reduz a corrosão
Preparação da junta	Necessária uma limpeza cuidada
Equipamentos	Elevado custo
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

Hoje em dia, com o desenvolvimento de novas tecnologias, as juntas adesivas são aplicadas nas mais diversas indústrias, tais como a automóvel, calçado, aeroespacial e ainda a indústria naval.

No ramo da indústria automóvel, primeiramente apenas era feito o uso de adesivos para componentes em veículos, desde pára-brisas, vidros traseiros e até para preenchimento de vazios na soldadura, de forma a evitar a corrosão. Com o uso destes a resultar num aumento de resistência do veículo, então o seu uso abrangeu-se às ligações da estrutura do veículo obtendo uma boa optimização da rigidez à torção. As juntas adesivas ganharam o seu espaço pelas vantagens que oferecem, como o facto de conseguirem tornar o veículo mais leve, mais seguro e por ser um processo de fácil aplicação (Figura 1).



Figura 1 – Aplicação de adesivos em carros modernos [4]

Assim como na indústria automóvel, a indústria naval teve diversas alterações no seu método de fabrico. As ligações adesivas só começaram a ser usadas após se constatar que forneciam as características exigidas, como resistência à humidade, temperatura e boa durabilidade. Um outro parâmetro essencial são as cargas que as ligações podem suportar, que normalmente resultam em esforços de flexão, corte e torção. O tipo de ligações adesivas envolvidas em elementos estruturais de um barco, vão desde a aplicação em quilhas, painéis laterais e cascos [5].

No calçado o seu uso é bastante amplo e na actualidade está bastante integrado na sua concepção. Os adesivos fornecem uma alternativa na união da sola, comparativamente com a costura, pregos ou tachas, pelas vantagens que apresentam, como a flexibilidade e conforto, devido em grande parte à melhor distribuição de tensões ao longo de toda a zona da ligação adesiva. Esta ligação apresenta ainda uma boa durabilidade e uma boa resistência mecânica e a elevadas temperaturas [6].

Na indústria aeroespacial as ligações através de juntas adesivas assumem um papel preponderante, pela resistência à fadiga que apresentam, por permitem uma redução de peso significativa, um bom isolamento, amortecimento de vibrações e uma vida útil considerável. Apesar de apresentarem vantagens comparativamente a grande parte dos meios de fixação mecânicos, é necessário especial atenção durante a sua concepção, pois não existem meios de inspecção de qualidade capazes de avaliarem de forma precisa o seu estado [7].

### **2.1.3 Esforços típicos em juntas adesivas**

Numa junta adesiva, a adesão é um factor complexo que está relacionado com a resistência que esta poderá oferecer. Ao longo de várias décadas surgiram vários métodos de análise, oficializados e padronizados segundo a Sociedade Americana de Testes e Materiais (ASTM) e segundo a Organização Internacional de Normalização (ISO), tendo como base a aplicação de esforços nas juntas adesivas. Os tipos de esforços mais recorrentes são [1]:

- Esforços de Tracção – resultam da aplicação de forças perpendiculares ao plano da colagem, fazendo com que os aderentes se afastem. As tensões originadas por estes esforços podem ou não ser uniformes e o tipo de adesivo usado na junta tem um grande impacto nestes esforços. Este tipo de esforços deve ser evitado em juntas adesivas devido à baixa resistência que os adesivos usualmente têm à tracção. Por outro lado, em juntas topo a topo ou em juntas de chanfro interior a área de colagem é também bastante reduzida, o que torna este tipo de esforço mais gravoso.
- Esforços de Compressão – Similarmente ao ensaio de tracção, as forças são aplicadas perpendicularmente ao plano da colagem e devem ser alinhadas de forma a que o adesivo permaneça em compressão pura. O que muda neste tipo de esforços comparativamente aos de tracção é o sentido da força que tende a aproximar os aderentes [2].



- Esforços de Corte – estão relacionados com a aplicação de forças paralelas ao plano de colagem. É possível constatar na Figura 2 uma JSS sujeita a esforços de corte, onde a maior parte das tensões de corte originadas estão localizadas nos dois extremos do adesivo e quanto maior forem os seus valores de pico, menor será a resistência do adesivo. Numa junta adesiva com um adesivo frágil, a parte central do adesivo está sujeita a tensões quase nulas comparando com as suas extremidades [8].



Figura 2 – Ensaio de tração de uma JSS [1]

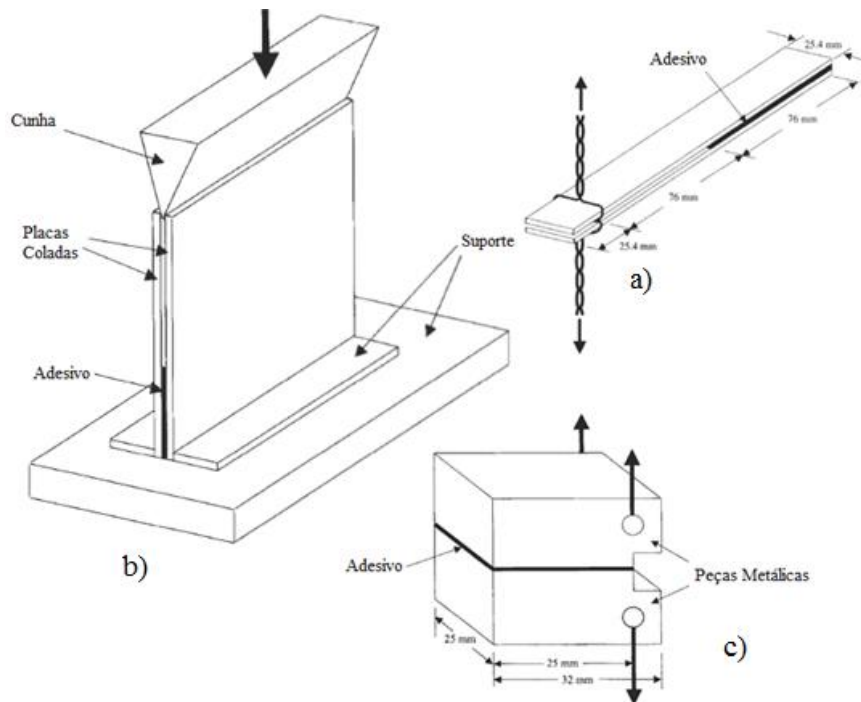


Figura 3 – Ensaios de Clivagem ((a) ASTM D3807, (b) ASTM D5041, (c) ASTM D1062) [1]

- Esforços de Clivagem – caracterizam-se por ambas as partes aderentes serem relativamente rígidas. Neste tipo de carregamento, o esforço é aplicado na extremidade de uma junta com a finalidade de separar os substratos, e observa-se concentração de tensões normais na zona de aplicação da força. A ASTM padronizou várias normas de clivagem, dos quais se destacam a ASTM D1062, a ASTM D3807 e a ASTM D5041 (Figura 3) [1].

- Esforços de Arrancamento – consistem na aplicação de forças de tracção na extremidade do aderente, com um determinado ângulo de arrancamento, que pode assumir valores bastante díspares como 5° e 90°. O tipo de junta na aplicação deste ensaio deve ser tido em conta e o ângulo de separação dos aderentes pode ser superior comparando com a clivagem. Contrariamente à clivagem, um ou dois dos aderentes são flexíveis, e estes podem deformar plasticamente através da acção das forças aplicadas. De salientar que os adesivos mais frágeis e rígidos são mais sensíveis às forças de arrancamento e conseqüentemente apresentam maiores gradientes de tensões no sentido da zona de aplicação dos esforços. Algumas das normas padronizadas pela ASTM relativas ao ensaio de arrancamento são a ASTM D1876, a ASTM D3167 e a ASTM D903 (Figura 4) [8].

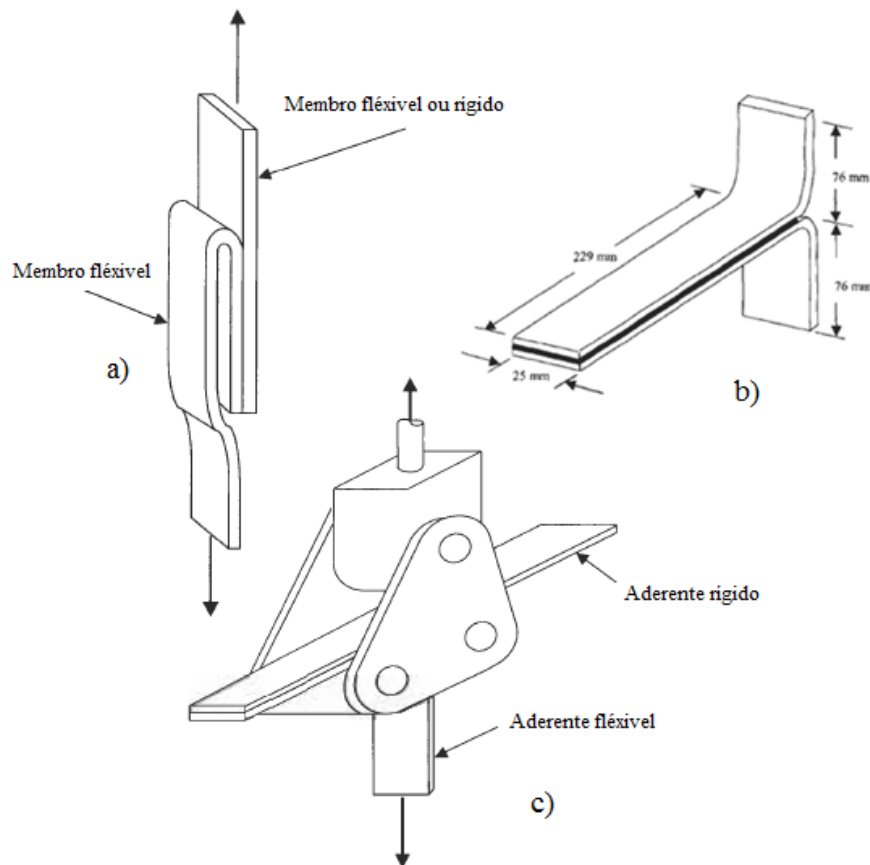


Figura 4 – Ensaios de Arrancamento ((a) ASTM D903, (b) ASTM D1876 (c) ASTM D3167) [1]

#### 2.1.4 Tipos de rotura

Uma das características essenciais numa ligação adesiva é a capacidade da sua integridade estrutural se manter, quando sujeitadas a solicitações estáticas e/ou dinâmicas e condições

ambientes adversas, como humidade e temperatura. As roturas adesivas ocorrem quando deixa de existir essa integridade, e é possível classificá-las de várias formas de acordo com o local onde se dá a rotura. Segundo a norma ASTM D5573, que classifica os modos de rotura em juntas com substratos de materiais compósitos reforçados a fibras, distinguem-se sete modos de rotura, dos quais se destacam os seguintes (Figura 5) [9]:

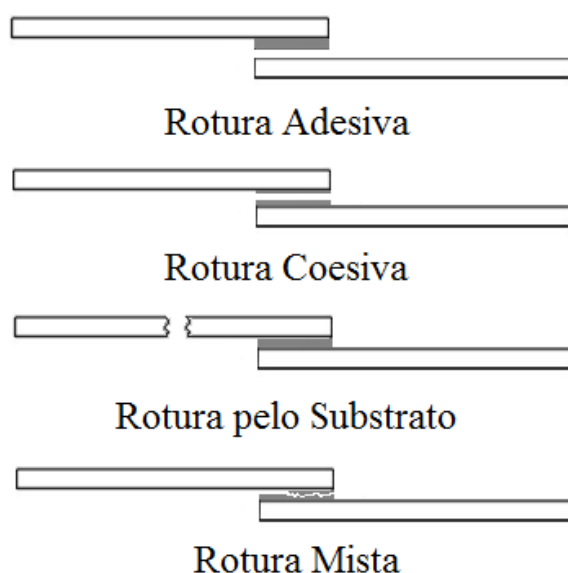


Figura 5 – Tipos de rotura numa JSS

- Rotura adesiva – rotura que ocorre na interface entre o aderente e o adesivo e por norma está relacionada com uma má preparação da superfície. Com o surgimento desta, denota-se que uma das superfícies dos substratos em contacto com o adesivo não contém qualquer porção de adesivo após rotura, o qual fica depositado na sua totalidade na outra superfície. Esta separação deve-se a uma falha na adesão entre o adesivo e a superfície do substrato.
- Rotura coesiva – caracteriza-se por a rotura se dar no interior do adesivo. Isto deve-se ao facto de as ligações entre o adesivo e os aderentes serem mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo.
- Rotura pelo substrato – este modo de rotura caracteriza-se por ser similar ao modo de rotura coesiva, diferindo apenas o local da rotura, já que esta ocorre pelo substrato. Neste caso, a resistência interna do substrato é mais fraca do que a zona de ligação entre o adesivo e substrato.

- Rotura mista – descreve-se como um modo de rotura que combina características de uma rotura adesiva e de uma rotura coesiva. A sua rotura ocorre na zona de ligação entre o adesivo e o substrato e no interior do próprio adesivo. A sua origem pode estar numa não limpeza ou numa limpeza ineficaz de uma determinada secção das superfícies a unir [2].

### 2.1.5 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem assumir várias configurações, pela possibilidade de alteração da geometria dos substratos (Figura 6). De todas as juntas existentes, destacam-se pela sua facilidade de fabrico as juntas topo a topo planas e JSS e dupla. Contudo, as JSS não são as que apresentam melhores resultados devido a elevados picos de tensões de arrancamento e de corte que apresentam nas extremidades da ligação. No caso específico das JSS, o estado de tensão é bastante complexo devido à sua geometria de ligação, pois estas geram flexão nos substratos quando sujeitas a carregamentos, o que provoca grandes gradientes de tensão de arrancamento. Por outro lado, nas juntas de sobreposição dupla este efeito já é mais limitado devido à simetria longitudinal do carregamento.

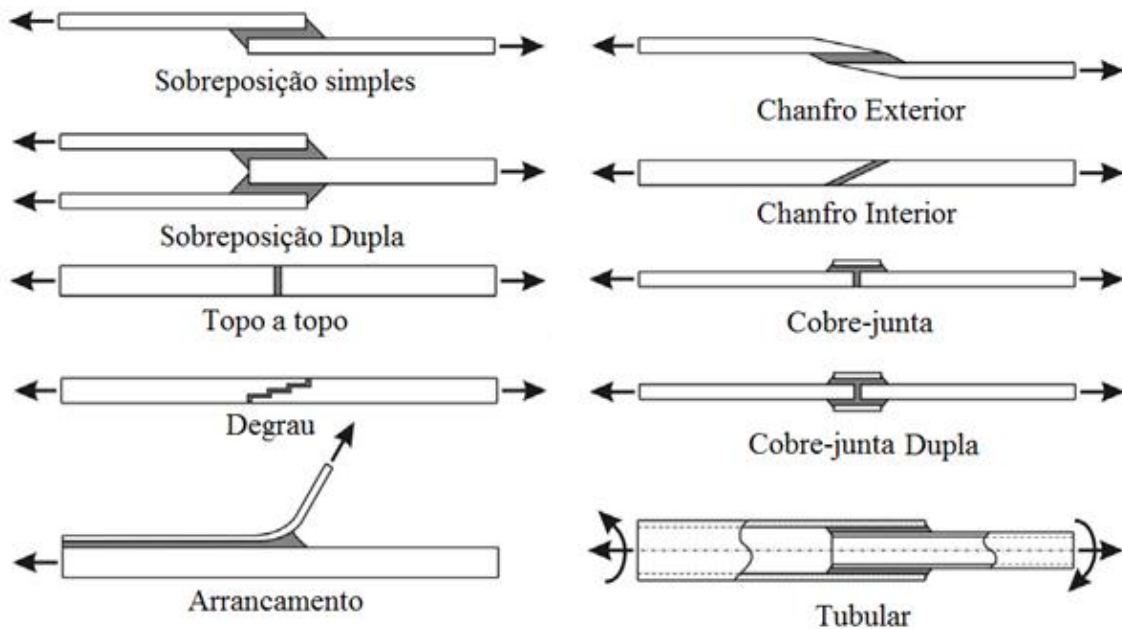


Figura 6 – Tipos de configurações de juntas adesivas [2]

Uma forma de reduzir de forma significativa esses picos de tensão é a inclusão de um filete de adesivo nessas mesmas extremidades. Apesar de o uso de filetes de adesivo diminuir os

picos de tensão e conseqüentemente melhorar a resistência a esforços de corte e arrancamento, muitas vezes não é suficiente para alcançar os resultados pretendidos, pelo que a alteração da geometria do substrato se torna fundamental. Como exemplos, existem os casos de juntas com chanfro e juntas em degrau [9].

### **2.1.6 Parâmetros que afectam o desempenho das juntas**

Um aspecto muito importante a considerar numa junta é o seu desempenho, parâmetro que está relacionado com a resistência das juntas adesivas. Os factores que mais afectam o desempenho das juntas são as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (propriedades dos adesivos e dos substratos) e as concentrações de tensões. Estas dependem da geometria da junta adesiva, do valor de  $L$ , da espessura do adesivo ( $t_A$ ) e do substrato e ainda da existência de filetes de adesivo na extremidade da sobreposição. Na eventualidade de estarem presentes efeitos térmicos, as tensões residuais assumem elevada importância na resistência da junta [10]. De facto, a resistência é tanto maior quanto menores forem as concentrações de tensões, pois o local onde estas estão presentes, por norma é o local por onde se dá a rotura. De forma a reduzir essas concentrações e picos de tensão, o seguinte conjunto de regras deve ser seguido:

- O adesivo a usar deverá ser dúctil e com elevada resistência;
- Usar substratos muito similares, quer em termos de características geométricas, quer em termos de propriedades mecânicas. Caso não seja possível tentar usar substratos com valores de rigidez próximos;
- Evitar tensões de arrancamento;
- Usar uma fina camada de adesivo (aproximadamente 0,2 mm) e
- A área de sobreposição a usar deverá ser grande (para adesivos dúcteis), de forma a oferecer maior área de contacto e resistência.

Para além das regras enumeradas, uma forma de reduzir as tensões de arrancamento é usando filetes de adesivo nas extremidades da sobreposição. Como foi referido, as tensões de arrancamento devem ser evitadas, caso contrário poderá ocorrer uma rotura prematura da junta. Uma particularidade é que em situações em que se usam adesivos dúcteis existe uma redistribuição das tensões antes da ocorrência de qualquer rotura, o que favorece a resistência mecânica [11].

Como citado anteriormente, as propriedades dos adesivos são um dos critérios que afectam de maneira significativa o desempenho e a resistência das juntas. Adesivos que apresentem melhores propriedades a nível da resistência não garantem que a resistência da junta seja superior [12]. Um adesivo mais rígido, por norma menos flexível e dúctil, induz picos de tensão muito elevados nas extremidades de  $L$ , ao invés da zona interior do adesivo, que se encontra sujeita a níveis de tensão bastante reduzidos. A tensão de corte média que estes adesivos oferecem é por norma inferior à tensão de corte média dos adesivos mais dúcteis, pois embora possuam uma rigidez menor, estes permitem uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo da zona da ligação adesiva no momento da rotura. Por terem a capacidade de se deformarem plasticamente, proporcionam juntas adesivas mais resistentes [13].

Comparativamente aos adesivos frágeis, os adesivos dúcteis têm uma resistência à fadiga maior, que é justificada pela maior capacidade de absorver energia de amortecimento e por permitirem uma distribuição de tensões mais uniformes.

O adesivo ideal, ou seja, aquele que disponibiliza uma melhor resistência da junta, será aquele que possuir características mistas da generalidade dos adesivos, como conter uma boa resistência mecânica, ser bastante dúctil e flexível. Estas três propriedades são difíceis de se combinar num só adesivo, o que por norma leva a seleccionar para uma junta adesivos rígidos, quase sempre mais resistentes e menos dúcteis [11].

Um outro factor que influencia o desempenho e a resistência das juntas é o material e respectivas propriedades dos substratos. É essencial para uma boa junta adesiva uma boa capacidade de adesão entre adesivos e substratos, igualdade geométrica dos elementos da junta e das propriedades mecânicas e alguma ductilidade do adesivo, para evitar a rotura prematura nas zonas de concentração de tensões. De facto, para substratos metálicos, a plastificação também pode causar rotura prematura da junta já que, com o aumento da carga aplicada, as tensões atingem o ponto de cedência do material e aparecem grandes deformações plásticas, originando assim rótulas plásticas. Embora estas tensões não ultrapassem a resistência dos substratos, as deformações associadas tornam-se consideráveis (Figura 7). Quando a deformação do adesivo nas proximidades das rótulas plásticas atinge o seu valor de rotura, tem lugar a iniciação do dano. Como resultado, é a cedência do aderente que controla a resistência da junta.

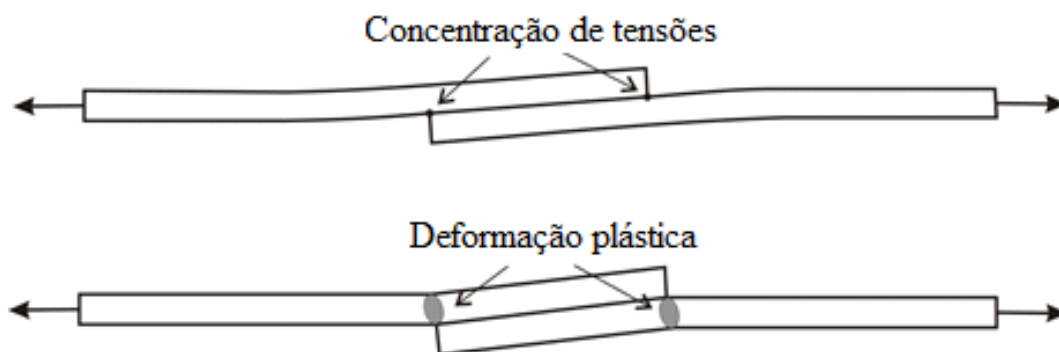


Figura 7 – Plastificação dos aderentes e criação de rótulas plásticas numa JSS [14]

Se forem usados compósitos laminados, as fibras das camadas superficiais devem estar orientadas com a direcção da solicitação, para que não ocorra uma rotura interlaminar das camadas. Um outro parâmetro a considerar nos compósitos é a resistência ao arrancamento, que por ser baixa pode gerar uma rotura interlaminar do substrato devido a tensões de arrancamento [15]. Se forem usados substratos que possuam rigidez longitudinal diferentes, a distribuição de tensões não é uniforme. Esta diferença diminui a resistência da própria junta, pelo que se torna fundamental usar substratos com propriedades similares.

Uma das características geométricas mais importantes no que diz respeito à distribuição de tensões e resistência das juntas adesivas é o valor de  $t_A$ . Para adesivos estruturais verifica-se que a junta adesiva obtém uma resistência máxima quando  $t_A$  está entre 0,1 e 0,2 mm. Para valores superiores a 0,2 mm, Crocombe [16] mostra que em JSS a resistência é menor, apesar de modelos analíticos de Volkersen [17], Goland e Reissner [18] preverem o seu aumento. Através de uma análise elástica, constata-se que existe uma maior concentração de tensões nas extremidades de  $L$  da junta quando a camada adesiva é mais fina (menor espessura) do que perante uma camada adesiva com uma espessura superior, 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. Gleich et al. [19] e Adams e Peppiati [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 Peppiati [20] afirmam que com o aumento

da espessura do adesivo a probabilidade de ocorrerem defeitos internos tais como existência de vazios e microfissuras aumenta significativamente.

Tal como o valor de  $t_A$ , também o valor de  $L$  tem influência directa no desempenho da junta. A resistência é tanto maior quanto maior for o  $L$ . No entanto, o tipo de adesivo e de substrato também têm influência na resistência da junta, na medida em que estes influenciam a evolução da carga máxima da junta com o valor de  $L$ .

Por exemplo, se se usar um adesivo dúctil e um substrato elástico, a resistência da junta é proporcional ao valor de  $L$ , 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 ao  $L$ , na medida em que, como as tensões se encontram concentradas nas extremidades das juntas, por maior que seja o comprimento, a distribuição de tensões continuará inalterada.

Um método que pode ser usado e que é bastante viável para determinar o comportamento de uma junta adesiva em que se usam adesivos frágeis e diferentes  $L$ , é o MDC. Para adesivos dúcteis, este método de análise requer a utilização de leis coesivas mais elaboradas relativamente à tradicional lei triangular.

Como já foi referido, perante a presença de efeitos térmicos as tensões residuais assumem elevada importância na resistência da junta. Durante a realização da junta, variações de temperatura podem acelerar o processo de cura do adesivo e posteriormente dar origem a tensões internas. No processo de cura, o adesivo contrai conforme a temperatura diminui gerando na maioria das situações deformações ou fendas e conseqüentemente uma diminuição da resistência da junta [10].

## **2.2 Adesivos**

Embora não exista uma data específica sobre o exacto momento em que se usaram os primeiros adesivos, sabe-se que desde os tempos remotos que o homem usufrui deles pela sua facilidade de processamento a fim de obter os produtos desejados, sejam eles utensílios para seu trabalho ou objectos de decoração. Os primeiros adesivos que existiram, sobretudo colas, eram de origem natural e produzidos em pequena escala, em grande parte



feito artesanalmente, sendo que nos inícios do século XVII os níveis de produção de cola começaram a aumentar para níveis de produção correspondentes a uma grande indústria. O registo mais antigo de fabricação de cola tem origem na Holanda em 1690, progredindo a sua fabricação essencialmente por países como Inglaterra, França e Alemanha, havendo no início do século XIX registos de produção de cola no Estados Unidos da América em cidades como Boston, Nova York e Filadélfia.

O uso de adesivos como forma de união entre materiais começou a tomar outras proporções principalmente no século XX, onde a produção de adesivos expandia-se por todo o mundo, devido em grande parte à evolução da indústria aeronáutica, pois para além suprimir deficiências causadas pelos meios de fixação mecânicos existentes, começou a identificar-se como um método economicamente viável (baixo custo) e capaz de permitir uma forma de união entre quase todo tipo de materiais quando comparado com outros métodos de união, como a soldadura.

Segundo Kinloch [21], um adesivo pode ser definido como um material que quando aplicado a superfícies de materiais, consegue juntá-los e fazer com que resistam à separação, podendo ter uma viscosidade variável, e assumir desde uma forma líquida até uma massa pastosa. Normalmente, este é constituído por componentes como polímeros orgânicos e por um ou mais compostos, que reagem quimicamente de forma a produzir um polímero. No que toca à sua aplicação, estes devem encontrar-se num estado totalmente ou parcialmente líquido com a finalidade de possibilitar um bom contacto molecular com as partes aderentes. Deve ser aplicado sobre a forma de uma camada fina, endurecendo (processo de cura) posteriormente até assumir uma forma sólida [21]. Relativamente à sua classificação, os adesivos podem ser avaliados quanto à origem, podendo ser de origem sintética (materiais gerados pelo homem, como o caso dos polímeros) ou de origem natural (materiais gerados pela natureza, como subprodutos animais e agricultura) [22]. Embora os adesivos sintéticos tendam a apresentar melhores propriedades de resistência e processamento, a escolha do adesivo deve ser feita conforme a aplicação que se deseja.

Podem também ser classificados pelo modo como endurecem, que está directamente relacionado com perda de solvente, perda de água, fase de arrefecimento ou ainda pela reacção química.

### 2.2.1 Caracterização dos adesivos

Para além de serem caracterizados quanto à sua origem, no ramo da indústria os adesivos podem ser caracterizados quanto à sua função, definidos como estruturais ou não estruturais, quanto à sua composição química, descritos pelos grupos dos termoendurecíveis, termoplásticos, elastómeros e híbridos, quanto ao seu método de reacção e ainda segundo a forma física que podem apresentar, custo e modo de aplicação.

No que se refere à família que estes apresentam, os adesivos estruturais sofreram uma evolução notória durante essencialmente o século XX. Essa evolução cronológica foi aclarada por Hartshorn em 1986 [23] de acordo com a Tabela 3.

Tabela 3 – Desenvolvimento cronológico dos adesivos durante o séc. XX [23]

<b>Adesivos Estruturais</b>	
1910	Fenol-formaldeído
1920	Colas de origem animal
	Colas vegetais
	Cola de peixe
	Colas albumina
1930	Colas de caseína
	Uréia-formaldeído
	Nitrilo-fenólicos
1940	Vinílicos-fenólicos
	Acrílicos
	Poliuretanos
	Epóxidos
1950	Cianocrilatos
	Anaeróbicos
	Poliamida
1960	<i>Polibenzimidazole</i>
	<i>Polyquinoxaline</i>
	2º Geração - Acrílicos

Apesar da evolução cronológica, os adesivos estruturais sempre se caracterizaram como adesivos com elevado índice de desempenho, resistentes a quase todos os meios ambientes (mais comuns) e que apresentam bons níveis de resistência de corte, ostentando valores superiores a 5 MPa. Estes adesivos têm como função sustentar as ligações estruturais, suportando elevadas cargas sem que ocorram grandes deformações.

Por sua vez, os adesivos não estruturais não possuem a capacidade de suportar elevadas cargas pela débil resistência de corte e temperatura que apresentam, chegando mesmo a se degradarem perante exposições prolongadas ao meio ambiente. Para além disso, apesar de apresentarem baixa resistência a agentes químicos, a escolha do adesivo depende da aplicação que se pretenda. Perante situações de ligações temporárias e situações em que são usados em conjunto com um método mecânico, os adesivos não estruturais são ideais, tendo estes ainda capacidade de oferecer um isolamento e uma capacidade de amortecimento de vibrações fora do alcance dos adesivos estruturais.

Segundo a sua composição química, os adesivos classificam-se essencialmente em quatro grupos:

- Adesivos Termoendurecíveis caracterizam-se por serem fracos quando sujeitos a elevadas temperaturas devido à ocorrência de oxidação ou através da geração de rupturas nas cadeias moleculares. A cura nestes materiais é originada através de uma reacção química irreversível com temperaturas variáveis conforme o tipo de adesivo. Após este processo os materiais não podem voltar a serem aquecidos constantemente e o seu amolecimento com recurso ao calor só pode ser feito até certo ponto.
- Adesivos Termoplásticos são vistos como materiais que podem ser fundidos através da aplicação de calor, salientando que a constante aplicação a elevadas temperaturas pode levar à degradação destes por oxidação. Esta constante exposição limita o número de ciclos térmicos destes materiais, que se caracterizam pela sua estrutura molecular, linear ou ramificada. Contrariamente aos adesivos termoendurecíveis, estes têm uma menor resistência a agentes químicos, não curam com o calor, possuem uma temperatura de serviço mais limitada e o seu endurecimento, adesão e solidificação ocorrem por arrefecimento.
- Adesivos Elastómeros possuem a capacidade de retomar o seu comprimento inicial após serem sujeitos a grandes deformações por intermédio de esforços de tracção

ou compressão. Isso é possível através da elevada tenacidade, do baixo módulo de elasticidade e ainda pela boa capacidade de deformação e de absorção de energia que estes materiais possuem. São descritos como materiais muito viscoelásticos, com elevada capacidade de resistir a forças de arrancamento, sendo bastante flexíveis, o que facilita a ligação de substratos com diferentes coeficientes de expansão térmica.

- Adesivos Híbridos definem-se como adesivos compostos por combinações entre resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastoméricas. Esta combinação de resinas permite a estes adesivos conter na sua estrutura as propriedades mais relevantes de cada uma delas, como melhores valores de resistência ao arrancamento e melhor capacidade de absorção de energia.

Sobre o método de reacção, este é um parâmetro que permite caracterizar os adesivos e que está directamente ligado ao processo de cura. A temperatura de cura, um dos parâmetros a ter em conta no seu processo, na maioria das ocasiões influencia as características dos adesivos que por norma não possuem um elevado grau de reticulação. Estes reagem ou solidificam por essencialmente quatro processos: reacção química, perda de solvente, perda de água ou ainda devido ao arrefecimento.

É possível caracterizar ainda um adesivo segundo a sua forma física, que está inteiramente ligado com a sua composição. Podem apresentar-se sobre a forma de pastas ou líquidos, podendo uma ou mais partes não possuir solvente. Também podem apresentar-se apenas sobre a forma líquida, ou seja, adesivos com solvente ou água, ou ainda sobre a forma sólida, caso de adesivos em pó, fita e filme.

Para além das classificações referenciadas, o custo revela-se na actualidade como um parâmetro significativo, em que o preço depende de factores como o método de produção e o volume em causa. A finalidade do adesivo, o tipo, seu peso, seu método de processamento, assim como o tempo de cura são critérios que estão ligados ao seu valor final. Relativamente ao modo de aplicação dos adesivos, recorrem-se muitas vezes a equipamentos como seringas, pistolas de aplicação manual ou equipamentos pneumáticos para facilitar o processo de deposição [8].

### 2.2.2 Tipos de adesivos

Na caracterização dos diversos tipos de adesivos, estes dividem-se em dois grupos, estruturais e não estruturais, tendo como base o seu desempenho. Os adesivos estruturais consistem essencialmente em acrílicos, poliaromáticos de alta temperatura, fenólicos e os epóxidos, enquanto os adesivos não estruturais são sobretudo borrachas sintéticas, poliésteres, termofusíveis, colas de contacto e adesivos inorgânicos. Na Figura 8 é efectuada a devida caracterização dos adesivos segundo a sua família.

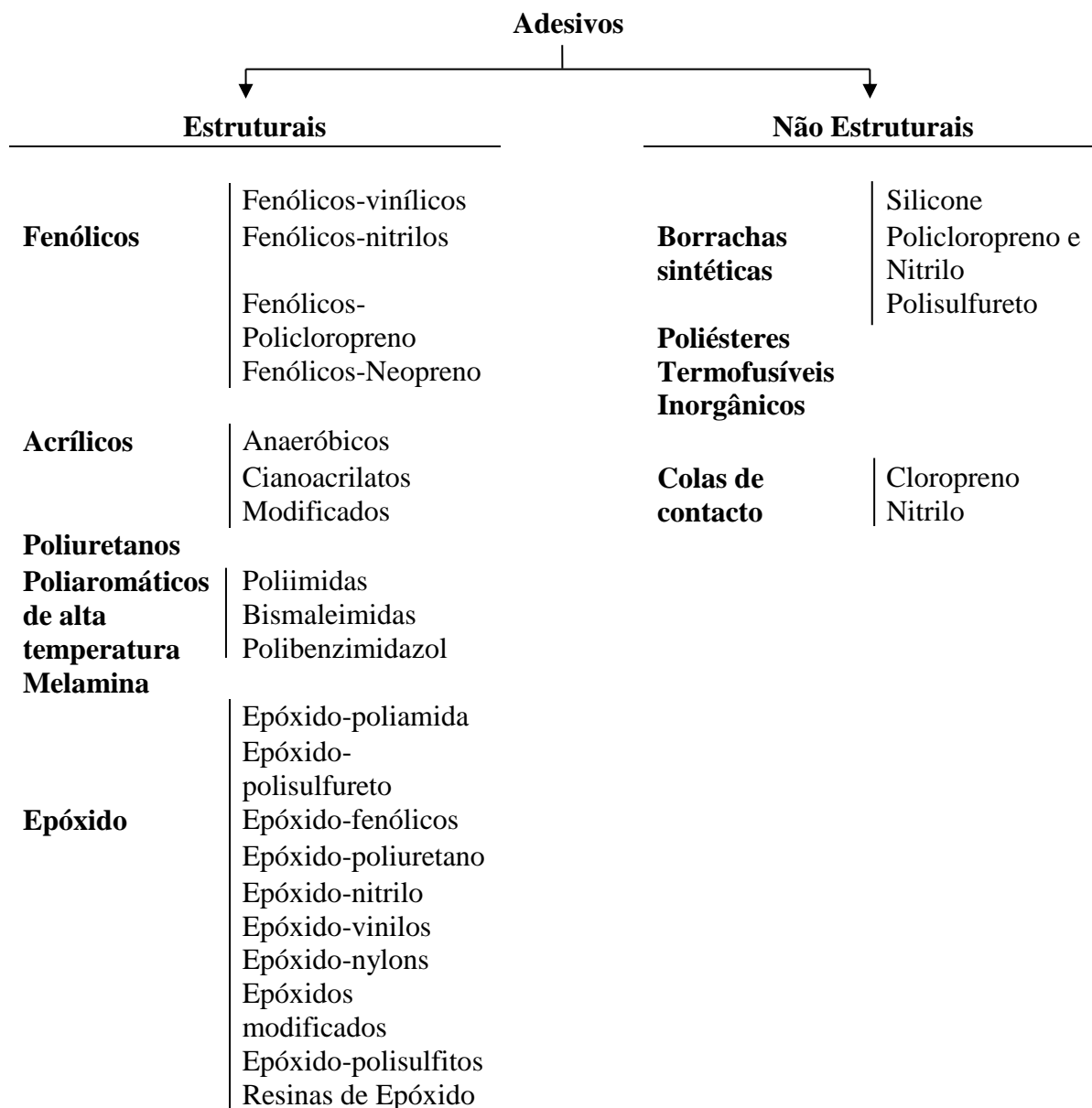


Figura 8 – Grupos dos Adesivos Estruturais e não Estruturais [8, 24]

Dentro dos adesivos estruturais, os epóxidos destacam-se essencialmente por serem versáteis e pelas propriedades mecânicas. São bastante comercializados na indústria

aeronáutica, automóvel, construção e na indústria da madeira, encontrando-se disponíveis numa vasta variedade de formas. Caracterizam-se por ostentarem uma baixa densidade, uma baixa resistência ao arrancamento e uma elevada resistência ao corte. Ao longo de vários anos, foram efectuadas diversas experiências com o objectivo de melhorar as propriedades menos favoráveis destes adesivos, até que no final da década de setenta, estes passaram a ter um melhor desempenho com a introdução de butadieno, produto industrial muito usado na produção de borracha [23].

Uma grande desvantagem dos epóxidos é o facto de poderem originar doenças no tecido humano (pele). Os tempos de cura destes adesivos diferem consoante a temperatura aplicada e as propriedades do epóxido, mas independentemente desse parâmetro a contracção originada neste processo é bastante reduzida. Após o processo de cura, os epóxidos passam a ter uma maior durabilidade e aqueles que curam a temperaturas superiores são os que possuem temperaturas de transição vítrea mais elevadas [21].

Para além dos adesivos epóxidos, outros adesivos estruturais bastante comercializados são os fenólicos. Isto deve-se em grande parte pela sua diversidade de formas, por terem um baixo custo e por possuírem propriedades favoráveis como boa resistência a altas temperaturas, elevada capacidade de estabilidade dimensional e imensa durabilidade. São aplicados sobre a forma de uma solução em álcool, acetona ou água e a cura é realizada a uma temperatura de 280 F (cerca de 138 °C) por um período de vários minutos. São adequados para o uso exterior e frequentemente usados para colar madeira, sendo capazes de fornecer forças de ligação superiores à do substrato. As suas propriedades não se alteram significativamente perante baixas temperaturas e as juntas resistem à presença de água a ferver e fungos. Estas resinas também têm sido aplicadas para fixar metal a vidro ou madeira [3].

### **2.3 Previsão da resistência das juntas**

A previsão da resistência das juntas pode ser feita com recurso às seguintes técnicas:

- Mecânica dos meios contínuos
- Mecânica da fractura
- Modelos de dano coesivo
- Mecânica do dano
- Método dos Elementos Finitos Extendido

Os métodos citados são de seguida descritos com algum detalhe.

### 2.3.1 Mecânica dos meios contínuos

As técnicas da mecânica dos meios contínuos consistem na utilização de métodos analíticos ou numéricos para obtenção dos campos de tensão nas juntas e posterior comparação das tensões máximas obtidas com um critério tipicamente de tensões ou deformações para aferir a rotura. No âmbito dos EF, Adams et al. [11] usou o critério da tensão principal máxima para prever com sucesso a resistência de juntas adesivas. O critério da tensão principal máxima foi sugerido para materiais frágeis. No entanto, as restantes tensões principais não são consideradas neste critério, apesar de o seu valor não ser nulo. Um aspecto relevante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de  $L$ . Contudo, a tensão principal máxima continua a ser um critério fiável para juntas com adesivos frágeis.

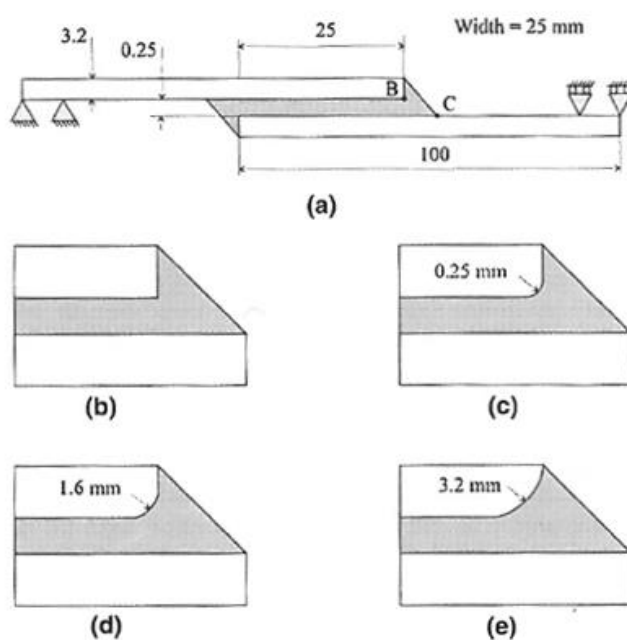


Figura 9 – JSS com ângulos diferentes de arredondamento [25]

Uma forma de aumentar substancialmente a resistência de JSS em que os substratos possuem cantos nas suas extremidades em contacto com o adesivo, e diminuir a variação das tensões e deformações estimadas numericamente, é através de um arredondamento

dessas extremidades, como se visualiza na Figura 9 [25]. Esta alteração vai originar uma variação na distribuição de tensões na zona modificada geometricamente [26].

O efeito causado por este arredondamento das extremidades dos substratos foi estudado posteriormente por Zhao et al. [25,27], sendo possível constatar na Figura 10 a variação das tensões principais máximas em função do valor do raio de arredondamento [25].

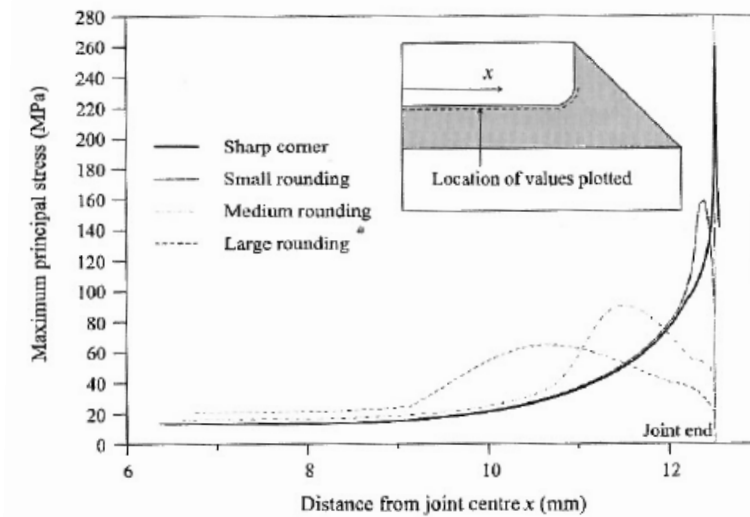


Figura 10 – Variação da tensão principal máxima do adesivo com uma carga aplicada de 20 kN

O critério proposto por von Mises afirma que o material cede sobre tensões multi-axiais, quando a energia de distorção atinge um valor crítico [28]. Para situações em que sejam usados adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados, pois após o adesivo ceder este ainda consegue suportar deformações elevadas antes da rotura. Assim como para os adesivos frágeis, os valores obtidos são influenciados pelas dimensões da malha [29]. Se for necessário precisão elevada, o critério de tensão de corte máxima é o adequado para JSS em que sejam empregues adesivos frágeis e valores de  $L$  reduzidos [30, 31].

Nos finais do século XX (Clarke e McGregor [32]), verificou-se que é possível prever a rotura de um adesivo maciço quando a tensão principal máxima excede a tensão máxima uniaxial ao longo de um determinado comprimento normal à direcção da tensão principal máxima. Neste critério, a variação da resistência estimada para a junta não é significativa com a mudança da geometria da junta, como por exemplo com o arredondamento do canto da extremidade em contacto com o adesivo. Mais recentemente, um outro critério verifica



que existe rotura quando a densidade de energia plástica média dentro de uma junta atinge um valor crítico [27].

### **2.3.2 Mecânica da fractura**

Um dos motivos pelo qual a mecânica da fractura surgiu foi com o intuito de colmatar a incapacidade da mecânica dos meios contínuos em solucionar certos problemas existentes nas estruturas, tais como pontos de descontinuidade de tensões que resultam em singularidades de tensões e de deformações. De facto, a mecânica dos meios contínuos adopta que a estrutura e o seu material são contínuos e que as tensões calculadas são singulares na extremidade da fenda. A teoria da mecânica da fractura foi desenvolvida em especial para casos em que estejam presentes fendas nas estruturas. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das superfícies é menor que  $180^\circ$ . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. A descontinuidade de tensões continua a existir, porém deixam de existir superfícies livres.

Para materiais dúcteis, uma quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [33]. A teoria da mecânica da fractura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, mas a solução HRR (Hutchinson Rice Rosengreen) desenvolvida por Hutchinson [34] e por Rice e Rosengreen [35] foi usada para modelar roturas dúcteis. No ramo da indústria aeronáutica foi adoptado o conceito de projecto com tolerância ao dano que posteriormente se expandiu para outros campos da engenharia. Este conceito foi baseado no conceito da mecânica da fractura linear elástica (MFLE). De salientar que a rotura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tracção e corte e também pelo efeito dos substratos.

Relativamente aos critérios de rotura clássicos, os critérios de rotura em modo misto podem ser desenvolvidos de uma forma similar a estes, embora deva ser introduzido o conceito do envelope da fractura, que fornece uma função para rotura em função das componentes de tenacidade em tracção e corte. Com o objectivo de ajustar os resultados experimentais várias funções matemáticas têm sido propostas, como o caso do critério 3D, descrito pela seguinte expressão [36]:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^\gamma = 1. \quad (1)$$

Na expressão referida,  $G_I$ ,  $G_{II}$  e  $G_{III}$  correspondem aos valores actuais de taxa de libertação de energia sob tracção pura, deslizamento e rasgamento, enquanto  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  e  $G_{IIIC}$  correspondem aos valores críticos respectivos. Os valores de  $\alpha$ ,  $\beta$  e  $\gamma$  variam de acordo com o critério usado. O critério linear energético assume que  $\alpha = \beta = \gamma = 1$  e o critério quadrático admite que  $\alpha = \beta = \gamma = 2$ . A escolha do critério será feita de forma a ajustar da melhor forma aos resultados experimentais. Independentemente do tipo de caso, o envelope da fractura pode ser ajustado para corresponder aos resultados experimentais de forma precisa pela inclusão de constantes adicionais. O uso de um factor generalizado de intensidade de tensão, semelhante ao factor de intensidade de tensão usado na mecânica da fractura, tem sido investigado para prever o início da ocorrência de fractura nas extremidades da interface entre adesivo e aderentes de uma junta de sobreposição [37]. Assume-se que a fractura tem início quando o factor de intensidade de tensão atinge o seu valor crítico, estimado experimentalmente [38]. Conclui-se que a mecânica da fractura pode ser usada para prever a resistência de uma junta ou para prever a resistência residual se existir alguma fenda ou singularidade [32]. Estes métodos permitem uma boa aproximação em juntas em que os factores críticos de intensidade de tensão foram determinados, mas a extrapolação para outras formas de geometria torna-se discutível. Perante materiais que deformam plasticamente, os conceitos da mecânica da fractura linear elástica têm de ser estendidos para a mecânica da fractura elasto-plástica. Uma forma de resolver estes problemas é com o recurso ao integral  $J$ . Este integral é definido através da seguinte expressão [35]:

$$J = \int_C w dx_2 - T_j \frac{\partial u_j}{\partial x_1} dS. \quad (2)$$

$C$  indica a curva a rodear a ponta da fenda,  $S$  designa o comprimento do arco,  $w$  a densidade de energia,  $u_j$  o vector deslocamento,  $T_j$  o vector de tracção e por fim  $x_1$  e  $x_2$  o sistema de coordenadas. Embora o integral  $J$  seja usado por diversos pesquisadores para prever a resistência de juntas adesivas, para adesivos dúcteis os valores críticos não são

independentes da geometria da junta. Foi comprovado que o integral  $J$  para uma junta adesiva depende do comprimento da interface [39].

### 2.3.3 Modelos de dano coesivo

Os modelos MDC tiveram início com os trabalhos de Barenblatt (1959, 1962) e Dugdale (1960). Foi proposto o conceito de zona coesiva para descrever o dano sob cargas estáticas da zona de processo coesiva à frente da ponta da fenda. A partir desse momento o MDC começou a ser testado como forma de simular o início da ocorrência de uma fenda e da propagação destas na zona coesiva e interfacial ou até mesmo para casos de delaminação de compósitos. Uma característica deste modelo é que pode facilmente ser incorporado em programas que têm como base o método de EF e desta forma avaliar o comportamento de vários materiais sob fractura [40]. O MDC é baseado no pressuposto de que uma ou mais regiões ou interfaces de fractura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, em que o crescimento do dano é permitido através da introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. A técnica consiste no estabelecimento de leis de tracção-separação (também denominadas leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas. Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um dado percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tracção-deslocamento relativo ( $t-\delta$ ) [27]. Para além disso, estes modelos são usados para simular a evolução da força e conseqüentemente do enfraquecimento da região, até a fenda estar completa, permitindo desta forma simular a deterioração das propriedades dos materiais. As leis referidas de tracção-separação são frequentemente representadas por relações lineares em cada um das etapas de carregamento (elasticidade, plasticidade e ou degradação), apesar de qualquer uma das etapas poder ser definida de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiável do comportamento dos materiais [41]. Este modelo foi implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS® em duas (2D) e três dimensões (3D). O caso do modelo triangular 2D foi implementado para análise com cargas estáticas, enquanto o modelo 3D [42], embora seja muito similar a este, inclui uma componente adicional de corte.

O uso de MDC com recurso à análise do método de EF consiste no método mais usado para prever a modelação do dano estático ou de fadiga [43]. Podem ser usadas as técnicas de aproximação local ou contínua, uma vez que podem ser considerados para modelar uma

fractura interfacial de camadas em compósitos ou a interface entre o adesivo e o aderente para simular roturas adesivas (aproximação local), ou por outro lado para simular uma pequena camada de adesivo de espessura constante (aproximação contínua). A modelação de juntas adesivas pela aproximação contínua tem um grande campo de aplicação [44], mas a camada única de elementos coesivos usada para modelar a camada adesiva torna impossível a diferenciação dos efeitos ao longo da espessura ou de concentrações de tensões na direcção da interface, permitindo apenas obter um comportamento equivalente da camada adesiva [45].

O modelo triangular 2D está representado na Figura 11, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

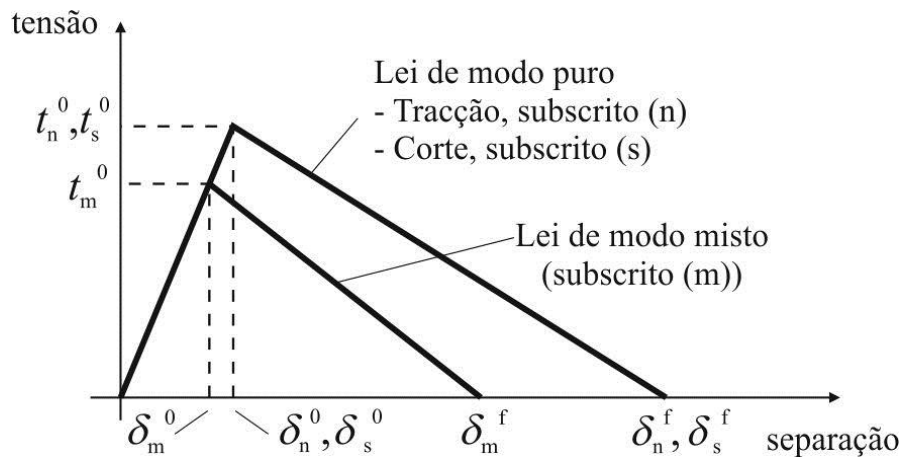


Figura 11 – Lei triangular do modelo de dano coesivo

O grande benefício de usar os MDC é simular o comportamento de estruturas até à rotura e possibilitar incluir nos modelos numéricos múltiplas possibilidades de rotura, dentro de diferentes regiões ou entre as interfaces de materiais.

### 2.3.3.1 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 [46]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [47], linear parabólico [48], exponencial [49], polinomial [50] e trapezoidal [51]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada

[52]. Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo são anulados na lei coesiva respectiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tensão e corte [53]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente directa de deformação e de uma deformação de corte que são determinados recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $K_{COH}$ , a qual relaciona as tensões e deformações em tracção e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} \varepsilon . \quad (3)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição dependente da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fracturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [43]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 , \quad (4)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [53]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1 . \quad (5)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam com uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [54].

Quando  $t_m^0$  é atingido (Figura 11), pela igualdade da equação 5, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos ( $\delta_m^f$  na Figura 11) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (6)$$

#### 2.3.4 Mecânica do dano

Embora os elementos coesivos possam ser englobados na mecânica do dano, neste capítulo apenas se referem os métodos alternativos a estes. Nestes métodos, estabelece-se um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva dos materiais através de uma redução de rigidez ou resistência. Como exemplo prático apresentam-se ligações adesivas finas [55], delaminação de compósitos ou ainda rotura da matriz [56]. Esta variável de estado pode ser utilizada numa lei de evolução de dano para modelar o dano antes da iniciação da fenda e durante o crescimento da mesma. As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam directamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [57]. Pelos métodos alternativos da mecânica do dano (MAMD), o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [58] ou do número de ciclos para análises de fadiga [59, 60]. Os modelos MAMD têm sido usados para cenários de fadiga de amplitude constante e variável [61]. Comparativamente à modelação de fadiga por MDC, as técnicas de MAMD não possibilitam uma distinção clara entre o início da fadiga e as fases de propagação desta, embora possam dar uma base para a previsão [55]. De salientar, no entanto, que é possível modelar a evolução do dano antes do crescimento de uma macro-fenda. Como vantagem comparativamente ao MDC, em aplicações específicas, esta pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido, enquanto pelo MDC a propagação da fenda é limitada a trajectos pré-definidos [62].

Chen et al. [63], através da técnica MAMD utilizando a energia de deformação plástica média, previram o início da rotura e a propagação desta em JSS, bem como a carga de ruptura. Nesta técnica aplicaram-se dois adesivos, Ciba<sup>®</sup> MY750 com endurecedores HY906, e o mesmo adesivo modificado com *carboxyl-terminated butadiene acrylonitrile* (CTBN). Através de uma análise por EF, foi possível executar uma simulação do processo de rotura da seguinte forma. Quando era obtida uma solução convergente após cada incremento de carga, era realizado uma verificação para averiguar se a condição de rotura tinha sido atingida em qualquer região da junta. Perante estas condições, os valores de  $E$  e do coeficiente de *Poisson* ( $\nu$ ) do material no interior da região são repostos a zero ou muito próximos de zero, de tal modo que este pode deformar-se quase livremente sem transferir qualquer carga. A comparação entre resultados experimentais e EF que prevê cargas de ruptura mostrou que o critério de energia específico utilizado foi bastante bem sucedido para a previsão da fractura. Todas as análises realizadas foram baseadas em condições bastante realistas: todos consideram a teoria de grandes deslocamentos e todos os materiais foram tratados elasto-plasticamente com base nos seus resultados experimentais, com ou sem um filete de adesivo. Na Tabela 4 são dados alguns exemplos de carga de rotura de uma junta com o adesivo modificado com ou sem filete de adesivo, com indicação da diferença entre valores experimentais e numéricos.

Tabela 4 – Cargas de rotura experimentais e numéricas para juntas adesivas com o adesivo modificado [63]

Caso	Carga de rotura (kN)	Desvio padrão (kN)	Carga de rotura numérica (kN)	Diferença (kN)	Erro [%]
cst	9,51	0,53	9,54	0,03	0,3
csftc	11,03	0,52	10,44	-0,59	-5,3
clt	11,8	0,25	12	0,2	1,7
clftc3	12,51	0,41	12,45	-0,06	-0,5
clftc1	15,65	1,51	15	-0,65	-4,2
cbt	8,76	0,73	10,08	1,32	15,1
cbftc	11,08	1,19	10,8	-0,28	-2,5

Cst – Aderentes de aço sem filete, Csftc – Aço com filete, Clt 2L73 – Alumínio sem filete, Clftc3 2L73 – com defeito na interface do filete, Clftc1 2L73 – Alumínio com pequenos defeitos no filete, Cbt 2024 TB – Alumínio sem filetes, Cbftc 2024 TB – Alumínio com filete.

### 2.3.5 Método de Elementos Finitos Extendido

De uma forma geral, o MEFE consiste numa modificação da formulação do método de EF cuja finalidade reside na análise do crescimento do dano em meios contínuos. O método utiliza leis de dano que se baseiam na resistência em bruto dos materiais para a iniciação do dano e deformações para previsão da rotura, em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  usados nos MDC. Comparativamente com os modelos MDC, o MEFE apresenta a vantagem de a fenda não ter de seguir um trajecto pré-definido. A fenda propaga-se de forma livre no interior do material sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades ou que haja a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [64]. Este método é uma extensão dos EF, cujas características fundamentais foram referenciadas na década de 90 [65]. O MEFE é baseado no conceito de partição de unidade e pode ser implementado no método de EF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, para permitir o crescimento do dano e separação entre as faces da fenda [66]. Devido ao crescimento do dano, a extremidade da fenda modifica constantemente a sua posição e orientação conforme as condições de carga e a geometria da estrutura, simultaneamente à criação das funções de enriquecimento necessárias para os nós dos EF na proximidade da extremidade da fenda. O MEFE considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFE por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fracturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas (MAXPS) ou das deformações principais máximas (MAXPE), enquanto as leis tracção-separação que simulam a degradação dos materiais até à fractura podem ser lineares ou exponenciais. A iniciação do dano é assumida por um critério contínuo, calculado a partir do estado de tensão ou de deformação em cada ponto de integração dos EF. A iniciação do dano pode ser avaliada por diferentes critérios. Os critérios MAXPS e MAXPE baseiam-se nas seguintes funções de dano, respectivamente [67]:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\sigma_{max}^0} \right\} \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_{max} \rangle}{\varepsilon_{max}^0} \right\}, \quad (7)$$



onde  $\sigma_{max}$  é a tensão principal máxima actual num dado ponto de integração e  $\sigma_{max}^0$  é a resistência de um material à tracção. A interpretação dos parêntesis de Macaulay é idêntica à da equação 5 e é usada para especificar que uma tensão compressiva não induz dano. O critério de tensão nominal máxima (MAXS) e o critério de deformação nominal máxima (MAXE) são dados por esta ordem [67]:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \quad e \quad f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}. \quad (8)$$

onde  $t_n$  e  $t_s$  são as componentes de tensão normal e ao corte da superfície fracturada, e  $t_n^0$  e  $t_s^0$  são os respectivos valores limites. Os parâmetros referentes ao MAXE têm o mesmo significado, onde  $\varepsilon_n$  e  $\varepsilon_s$  são as componentes de deformação normal e ao corte, e  $\varepsilon_n^0$  e  $\varepsilon_s^0$  são os devidos valores limites. Outros dois critérios de elevada importância são o critério quadrático de tensão (QUADS) e o critério quadrático de deformação (QUADE). Os critérios são dados, respectivamente, pelas seguintes funções [67]:

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2. \quad (9)$$

Todos os critérios referidos são satisfeitos quando o valor de  $f$  atingir a unidade. O crescimento do dano é baseado na incorporação de funções de enriquecimento na formulação convencional de EF, e que permitem modelar o salto dos deslocamentos que existe entre as faces da fenda durante a propagação do dano.

A expressão fundamental do vector de deslocamentos  $\mathbf{u}$ , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [68]:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(\mathbf{x}) [\mathbf{u}_i + H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i], \quad (10)$$

O  $N_i(\mathbf{x})$  e  $\mathbf{u}_i$  estão relacionados com a componente convencional de EF, e correspondem pela ordem respectiva às funções de interpolação e ao vector de deslocamentos nodais. O segundo termo entre parêntesis retos,  $H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i$ , apenas está activo para os nós nos quais alguma função de forma é cortada pela fenda e pode ser expresso pelo produto do vector dos graus de liberdade nodais enriquecidos incluindo os nós mencionados,  $\mathbf{a}_i$ , com as funções de forma descontínuas associadas,  $H(\mathbf{x})$ , nas superfícies da fenda. O método é

baseado no estabelecimento de nós fantasmas, que subdividem os elementos interceptados por uma fenda e simulam a separação entre os subelementos criados. A propagação da fenda é possível pelo uso de nós fantasmas, que inicialmente têm as mesmas coordenadas que os nós reais e que estão completamente fixos aos nós reais até à iniciação do dano. Após o elemento ter sido interceptado por uma fenda, este é dividido em dois subdomínios. A descontinuidade nos elementos é tornada possível pela adição de nós fantasmas sobrepostos aos nós originais (Figura 12). Quando um elemento fractura, cada um dos dois subelementos vai ser formado pelos nós reais (aqueles correspondentes à parte fracturada) e nós fantasmas (aqueles que já não pertencem à parte respectiva do elemento original). Estes dois subelementos têm campos de deslocamentos completamente independentes e substituem o elemento original. A partir deste ponto, cada par de nó real/fantasma do elemento fracturado separa de acordo com uma lei até à rotura. Neste ponto os nós reais e fantasmas ficam livres de se mover sem restrições, simulando assim o crescimento do dano.

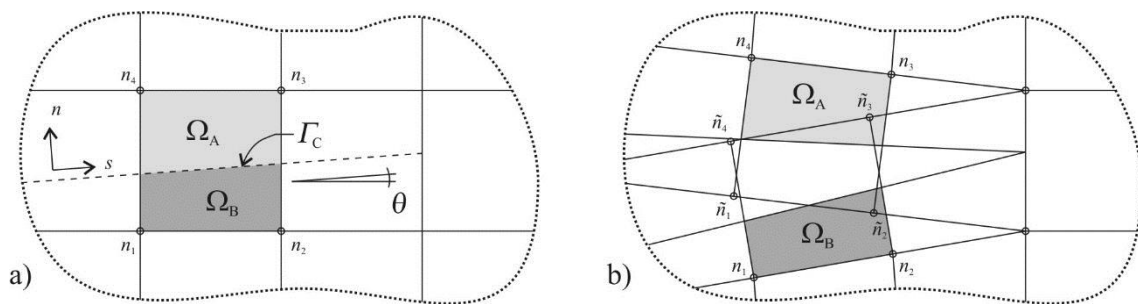


Figura 12 – Propagação do dano no MEFE usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da partição de elementos fracturados em subelementos [69]

# 3 Previsão da Resistência

Actualmente está disponível um vasto número de métodos para análise de juntas adesivas, tais como analíticos ou numéricos, que usam diferentes critérios para prever o início da degradação do material, dano e até mesmo roturas completas. da Silva et al. [31] apresenta uma análise detalhada dos métodos analíticos disponíveis [70]. Estes métodos são por norma fáceis de usar mas consideram várias hipóteses simplificativas [71]. A previsão da resistência das juntas envolve o conhecimento da distribuição de tensões e a aplicação de um critério de rotura adequado. Para geometrias complexas e consideração de modelos complexos para o comportamento de materiais, uma análise de EF é mais indicada para obtenção da distribuição de tensões. Os métodos baseados na mecânica da fractura usam a tenacidade dos materiais como o parâmetro principal para a avaliação de fractura. Inicialmente, estes métodos consistiam em técnicas energéticas mais simples ou baseadas no factor de intensidade de tensões que necessitam da existência de um defeito inicial nos materiais [72].

Recentemente, têm surgido métodos numéricos mais avançados como o MDC, que prevêm a resistência de estruturas através da combinação de critérios de tensões para prever a iniciação do dano, com critérios energéticos, para prever a rotura [73, 74]. Este método é bastante fiável para juntas adesivas, uma vez que a ductilidade desempenha um papel importante no processo de rotura devido aos gradientes de tensão. Sendo assim, são facilmente modelados cenários de rotura frágil ou de plastificação progressiva em camadas de adesivos dúcteis. O método baseia-se numa medição precisa das resistências coesivas em tracção ( $t_n^0$ ) e corte ( $t_s^0$ ), e numa medição da tenacidade à tracção ( $G_{IC}$ ) e de tenacidade ao corte ( $G_{IIC}$ ) [75]. É ainda capaz de prever a resistência de juntas adesivas [76]. Ridha et al. [77] estudaram por MDC a reparação de componentes por remendos embebidos com adesivos em painéis compósitos ligados por um adesivo epóxico dúctil designado por FMs 300M (Cytec). Foi comparado o amaciamento pela lei linear, exponencial e trapezoidal.

Apesar da previsão da resistência ser bastante precisa, no modelo linear e exponencial os valores de resistência são previstos por defeito em quase 20%, em virtude da degradação excessiva da zona plastificada nas extremidades da ligação adesiva, o que não é observado nos ensaios experimentais. Kafkalidis e Thouless [51] foram dos primeiros autores a fazer investigações sobre a precisão da resistência de juntas pelo MDC usando leis coesivas trapezoidais. As cargas de rotura foram estimadas com precisão para JSS simétricas e assimétricas.

Comparativamente com os MDC, o MEFE é superior na modelação uma vez que a fenda não necessita de seguir um caminho pré-definido. De facto, as fendas podem crescer livremente no interior de uma região maciça de um material sem a necessidade da malha corresponder à geometria das discontinuidades nem que a malha tenha de ser refeita na proximidade da fenda [64]. O MEFE consiste numa modificação da formulação dos EF, e baseia-se no conceito de partição da unidade [78]. A formulação EF é modificada pela inclusão de funções de enriquecimento locais para os deslocamentos nodais na vizinhança da fenda [66, 78]. Consoante a propagação da fenda, a sua orientação varia continuamente de acordo com as tensões na vizinhança da fenda e, simultaneamente, são criadas funções de enriquecimento para os pontos nodais à frente da fenda. Este método é utilizado em diversos ramos da engenharia, mas não existem muitas aplicações disponíveis para prever a resistência de juntas adesivas. Nos trabalhos [69, 79], o MEFE foi aplicado para prever a resistência e o tipo de fenda em provetes *Double-Cantilever Beam* (DCB) a alta temperatura, admitindo diferentes adesivos e aderentes (material e espessura). Para estimar os parâmetros do modelo MEFE foi necessário determinar as propriedades por métodos padronizados. A correspondência dos testes DCB com os resultados do MEFE foi muito aceitável no que diz respeito às curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ). Uma avaliação da resistência das JSS e dupla foi implementada por Campilho et al. [80] através do uso do *software* ABAQUS<sup>®</sup>. Verificou-se que a formulação não é adequada para modelar a propagação de dano em modo misto, uma vez que a rotura progride no sentido dos aderentes, o que não vai de encontro ao comportamento real das juntas. De salientar que os locais de iniciação de dano foram estimados correctamente. Sugiman et al. [81] analisou JSS em modo misto por MDC e MEFE, de tal forma que os filetes de adesivo nas extremidades da sobreposição foram modelados por elementos contínuos incorporados no MEFE, e a camada adesiva foi simulada por elementos MDC por uma abordagem local, isto é, com elementos contínuos para modelar o comportamento do adesivo e uma camada

de elementos coesivos no centro da espessura para promover a propagação do dano. A solução proposta permitiu a iniciação de fendas no filete, o crescimento em direcção à camada adesiva e a propagação da fenda por elementos MDC.

### 3.1 Caracterização do trabalho experimental

Os ensaios descritos nesta secção foram realizados num trabalho anterior [82]. O trabalho realizado na presente tese consistiu em todo o tratamento das curvas  $P-\delta$  experimentais e catalogação dos modos de rotura de forma a produzir a informação que se apresenta no capítulo 3.1. Relativamente ao trabalho experimental, este consistiu no ensaio de JSS unidas por ligação adesiva, sujeitas a esforços de tracção, com o intuito de determinar a resistência que estas oferecem a esta solicitação e de estudar a variação da resistência máxima em função de  $L$ . Na elaboração das JSS foi usado um tipo de substrato, três tipos de adesivos e designados 4 valores de  $L$ . Para cada tipo de adesivo foram produzidos 20 provetes, o que perfaz 5 provetes para cada valor de  $L$ . Na totalidade foram produzidas 60 JSS. Neste capítulo é feita uma comparação dos resultados obtidos experimentalmente entre juntas com diferentes adesivos para cada  $L$ , são analisados os diferentes modos de rotura e são discutidos os resultados obtidos em função das características de cada adesivo.

#### 3.1.1 Geometria dos provetes

Relativamente à geometria dos provetes ambos os substratos das juntas possuem forma paralelepipedal como consta na Figura 13 e com dimensões idênticas. O comprimento final da JSS ( $L_T$ ) é sempre constante, bem como a espessura do adesivo ( $t_A$ ), a espessura dos substratos ( $t_S$ ) e a sua largura ( $b$ ). Embora possuam dimensões idênticas ( $L_S$ ), o comprimento dos substratos até aos pontos de amarração ( $L_S$ ) varia de acordo com o  $L$ . Esta variação está directamente ligada com o valor de  $L$ , pois quais maior for esse comprimento, maior será o comprimento dos substratos ( $L_S$ ). As dimensões referidas anteriormente estão apresentadas na Tabela 5 em função do respectivo valor de  $L$ .

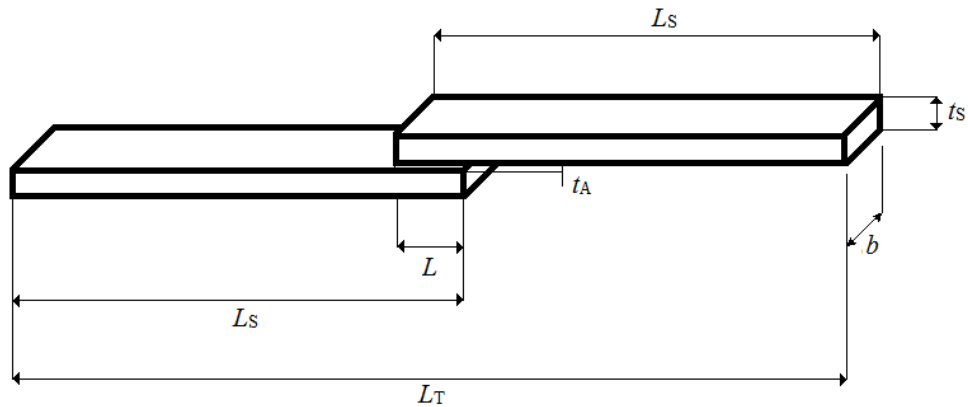


Figura 13 – Configuração da geometria do provete

Tabela 5 – Dimensões do provete (em mm)

Designação				
Comprimento de Sobreposição $L$	12,5	25	37,5	50
Comprimento dos substratos $L_S$	78,75	97,5	103,75	110
Largura $b$	12,5	12,5	12,5	12,5
Espessura dos substratos $t_S$	3	3	3	3
Comprimento final da JSS $L_T$	170	170	170	170
Espessura do adesivo $t_A$	0,2	0,2	0,2	0,2

### 3.1.2 Materiais

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais usados no trabalho experimental, mais propriamente os substratos e os adesivos, e é feita uma análise detalhada das suas propriedades mecânicas mais relevantes para a análise numérica a realizar.

#### 3.1.2.1 Substratos

O material usado como substrato em todas as juntas consiste na liga de alumínio AL6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua selecção deveu-se não só pelas boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [83], onde foram definidas as seguintes propriedades: resistência à tracção de 324,00±0,16 MPa, módulo de *Young* ( $E$ ) de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura de 21,70±4,24%.

As curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) dos substratos de alumínio foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [83], e encontram-se representadas na Figura 14. Também está representada a aproximação numérica usada nos modelos MDC e MEFE.

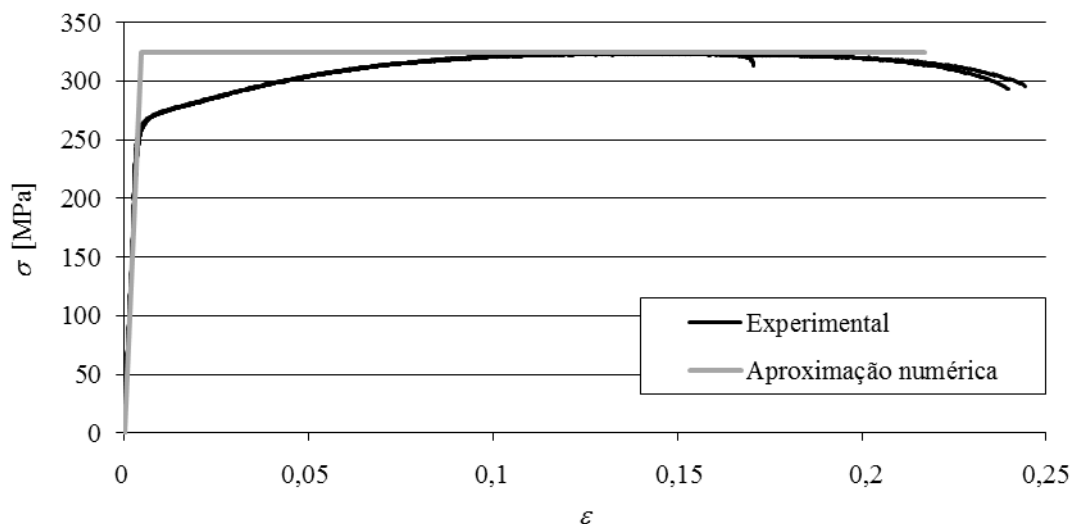


Figura 14 – Curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) do alumínio AL6082-T651 [84]

### 3.1.2.2 Adesivos

Neste tópico mencionam-se os adesivos usados no trabalho experimental e suas propriedades. Nas JSS usaram-se três tipos de adesivos: o Araldite<sup>®</sup> AV138, que se caracteriza por ser um adesivo epóxico frágil, o Araldite<sup>®</sup> 2015, definido como sendo um adesivo epóxico dúctil, e o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, que se caracteriza como um adesivo poliuretano estrutural que combina alta ductilidade com resistência mecânica.

#### 3.1.2.2.1 Araldite<sup>®</sup> AV138

O adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 descreve-se como um adesivo epóxico frágil mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [85]. As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tracção são dadas na Figura 15. Estas foram obtidas experimentalmente na referência [85]. Na Tabela 6 visualizam-se as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

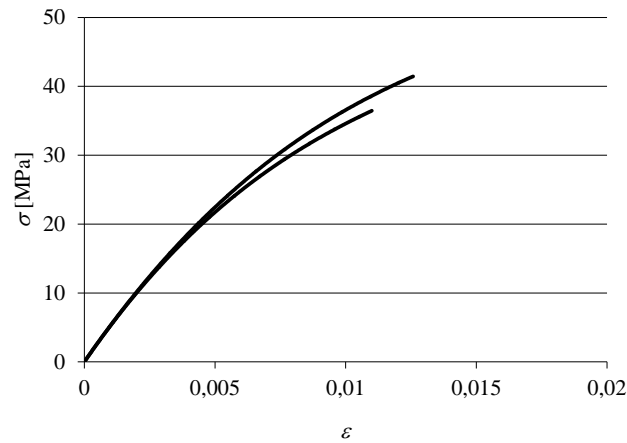


Figura 15 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 [84]

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 [86]

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

<sup>a</sup> valores estimados na referência [87]

<sup>b</sup> valor do fabricante

### 3.1.2.2.2 Araldite<sup>®</sup> 2015

O adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite AV138 oferece uma resistência à tracção e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil



possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [85].

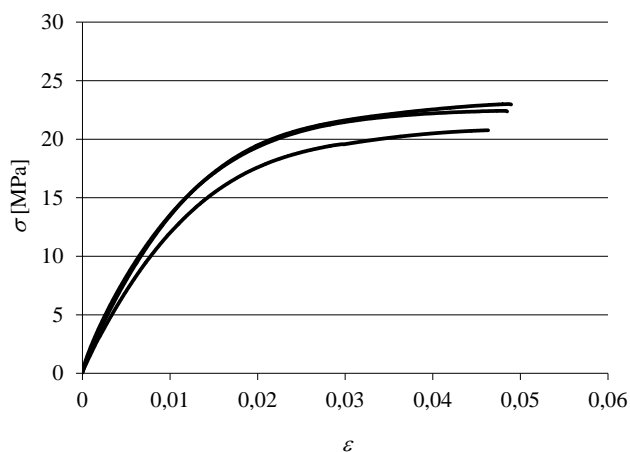


Figura 16 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [85]

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

<sup>a</sup> valor do fabricante

Apresentam-se as curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  (Figura 16) dos provetes maciços para este adesivo, obtidas experimentalmente na referência [85]. Na Tabela 7 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo e, comparando os valores deste adesivo com o Araldite<sup>®</sup> 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 tracção do Araldite<sup>®</sup> AV138 é praticamente o dobro da do Araldite<sup>®</sup> 2015.

### 3.1.2.2.3 Sikaforce<sup>®</sup> 7888

O Sikaforce<sup>®</sup> 7888 é um adesivo estrutural de base poliuretano de alta resistência e ductilidade. Este adesivo é composto por dois componentes, o seu processo de cura ocorre à temperatura ambiente durante cerca de 24 horas e é sobretudo aplicado na indústria automóvel [9]. 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 [88]. Na Figura 17 está apresentada uma curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  representativa de ensaio de provetes maciços para este adesivo [87].

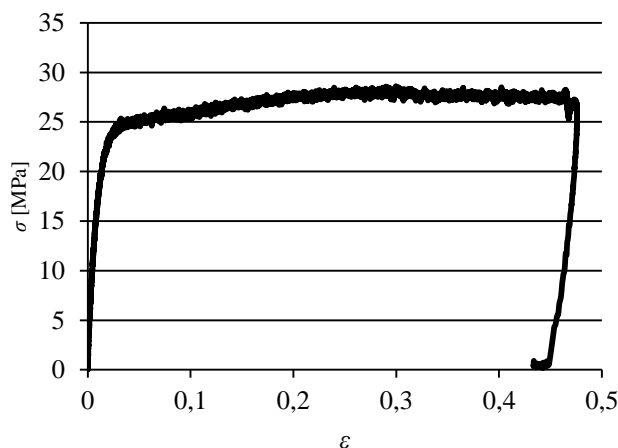


Figura 17 – Curva  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888 [87]

Os valores das principais propriedades deste adesivo estão presentes na tabela seguinte.

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7888 [87]

Propriedades	Sikaforce® 7888
Módulo de <i>Young</i> , $E$ [GPa]	1,89±0,81
Coefficiente de <i>Poisson</i> , $\nu^*$	0,33*
Tensão de cedência à tracção, $\sigma_v$ [MPa]	13,20±4,83
Tensão de rotura à tracção, $\sigma_f$ [MPa]	28,60±2,0
Deformação de rotura à tracção, $\varepsilon_f$ [%]	43,0±0,6
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	0,727 <sup>a</sup>
Tensão de cedência ao corte, $\tau_v$ [MPa]	-
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	20*
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	100*
Tenacidade à tracção, $G_{IC}$ [N/mm]	1,18±0,22
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	8,72±1,22

\*valor do fabricante

<sup>a</sup> estimado pela Lei de Hooke

### 3.1.3 Fabrico

A fabricação dos provetes envolveu várias etapas até estes ficarem prontos para ensaio. A liga de alumínio foi fornecida em placa de grandes dimensões com 3 mm de espessura. Os provetes foram obtidos por um processo de corte automático através de um disco de corte, o que permitiu obter provetes com 170 mm de comprimento por 25 mm de largura. Os substratos foram sujeitos a dois processos, sendo que o primeiro processo define-se como processo passivo mecânico de granalhagem que tem como objectivo remover camadas de óxido e aumentar a rugosidade da superfície, e assim melhorar o processo de colagem. O segundo processo consistiu na limpeza de excessos de óxido e desengorduramento das superfícies com recurso a acetona. Este segundo processo caracteriza-se como sendo um processo passivo químico. A operação de granalhagem dos substratos foi realizada no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP numa granalhadora designada por “Cidblast” modelo RT6S (Figura 18) com granalha de alumina. Estes processos são de extrema importância e devem ser realizados com cuidado de forma a garantir uma superfície com

boas características de molhabilidade e conseqüentemente uma maior área de contacto entre aderentes e adesivo [84, 89].



Figura 18 – Máquina de granalhagem “Cidblast” modelo RT6S [84]

Após o processo de limpeza das superfícies procedeu-se à colagem dos substratos. Para a colagem das juntas, foram inseridos entre os substratos, nas bordas da sobreposição, fios calibrados com um diâmetro de 0,2 mm para garantir o valor correcto de  $t_A$ . Para que a colagem fosse realizada com sucesso foi necessário alinhar os substratos em barras de apoio, fixados nestas através de grampos. Entre os substratos e as barras de apoio colocaram-se tiras de Teflon<sup>®</sup> para evitar que os excessos de adesivo unam os provetes às barras, facilitando deste modo a remoção dos provetes após colagem. O posicionamento correcto dos substratos para obter os diferentes valores de  $L$  foi realizado manualmente com recurso a um paquímetro digital. Este  $L$  corresponde ao comprimento do adesivo admitindo que não existem filetes nas extremidades. A cura do adesivo aplicado no provete foi levada a cabo de acordo com as especificações do fabricante para a cura completa, isto é, durante pelo menos 48 horas à temperatura ambiente para os três adesivos utilizados. Foram colados calços de alumínio nas bordas dos provetes para um alinhamento correcto na máquina de ensaios. A colocação destes calços varia com  $L$  para garantir o valor de  $L_T$  de 170 mm. Na Figura 19 visualiza-se o processo de fixação dos substratos à barra de apoio.



Figura 19 – Fixação dos substratos

Com os substratos alinhados e fixos à barra de apoio, aplicaram-se nestes o respectivo adesivo à temperatura ambiente de 20° a 25°C através de uma espátula ou pistola de aplicação. Os adesivos aplicados nos diferentes substratos foram o Araldite® 2015, Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7888. Com o respectivo adesivo aplicado procedeu-se à colocação destes na posição final, garantindo o correcto alinhamento entre os mesmos como se verifica na Figura 20.



Figura 20 – Processo de montagem das juntas

Após este processo foi necessário deixar a junta curar pelo menos 2 horas para manusear os provetes. De seguida, com um alicate retirou-se o fio de pesca e com um x-acto retirou-

se o excesso de adesivo, ficando o provete com o seu aspecto final, como se verifica na Figura 21.

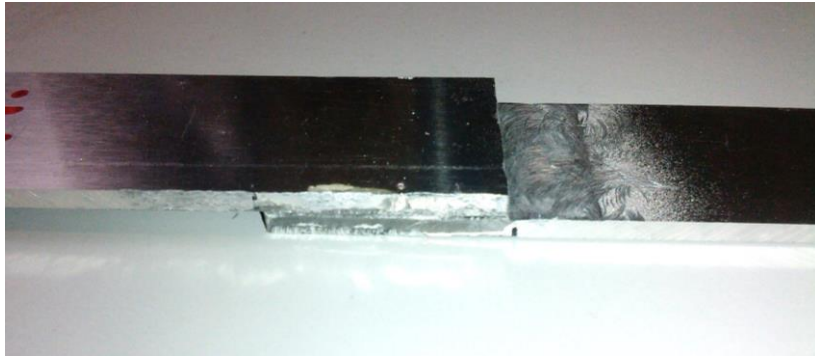


Figura 21 – Aspecto de uma junta após remoção de excessos de adesivo

Finalizado o processo de colagem foram deixados os provetes a curar, à temperatura ambiente, durante um período de uma semana, ficando depois prontos para a realização dos ensaios.

### 3.1.4 Ensaios

Com os provetes finalizados, iniciaram-se os ensaios de tracção (Figura 22).



Figura 22 – Máquina de ensaio Shimadzu, modelo AG-X 100, e respectiva fixação dos provetes

Estes ensaios foram realizados numa máquina de ensaios Shimadzu, modelo AG-X 100, equipada com uma célula de carga de 100 kN, à temperatura ambiente, e em controlo de

deslocamentos (1 mm/min). A distância entre as maxilas foi de 170 mm. Para cada tipo de adesivo foram realizados 20 ensaios, 5 para cada  $L$ .

### 3.1.5 Resultados

Neste tópico descrevem-se os modos de rotura e as curvas  $P-\delta$  via gráfica para os diferentes tipos de adesivos e valores de  $L$  das JSS. São definidas as forças máximas ( $P_{máx}$ ) para cada condição e é feita uma análise global dos dados obtidos experimentalmente.

#### 3.1.5.1 Modos de rotura

Neste ponto abordam-se os modos de rotura obtidos após os ensaios de tracção. Inicialmente apresentam-se, na Figura 23, as superfícies de rotura para provetes representativos das séries de provetes com o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 com os quatro valores de  $L$  (12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm), por esta ordem da esquerda para a direita.



Figura 23 – Superfícies de rotura de provetes representativos de cada valor de  $L$  de juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138

Observando os 20 provetes em que foi usado o Araldite<sup>®</sup> AV138 verifica-se que ocorreu uma rotura coesiva em todos eles, pois existe adesivo em ambas as superfícies dos aderentes. No entanto, refere-se que a rotura ocorreu muito próximo de uma das interfaces entre adesivo e substrato, razão pela qual na Figura 23 esta ocorrência não é muito



perceptível. Observou-se para todos os valores de  $L$  a ausência de deformação plástica transversal dos substratos. Na Figura 24 representa-se a vista lateral de um provete com  $L=50$  mm, onde se constata a ausência de deformação plástica.



Figura 24 – Vista lateral dos aderentes de uma junta com  $L=50$  mm em que se empregou o adesivo Araldite® AV138, sem ocorrência de deformação plástica transversal

Tal como sucedeu nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, nas juntas coladas com o Araldite® 2015 ocorreu novamente uma rotura coesiva nos 20 provetes.



Figura 25 – Superfícies de rotura de provetes representativos de cada valor de  $L$  de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015

Na Figura 25 estão representados as superfícies de rotura em que se empregou o adesivo Araldite® 2015 com os quatro valores de  $L$  (12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm), por esta ordem da esquerda para a direita. Tal como para o adesivo Araldite® AV138 a rotura foi coesiva.



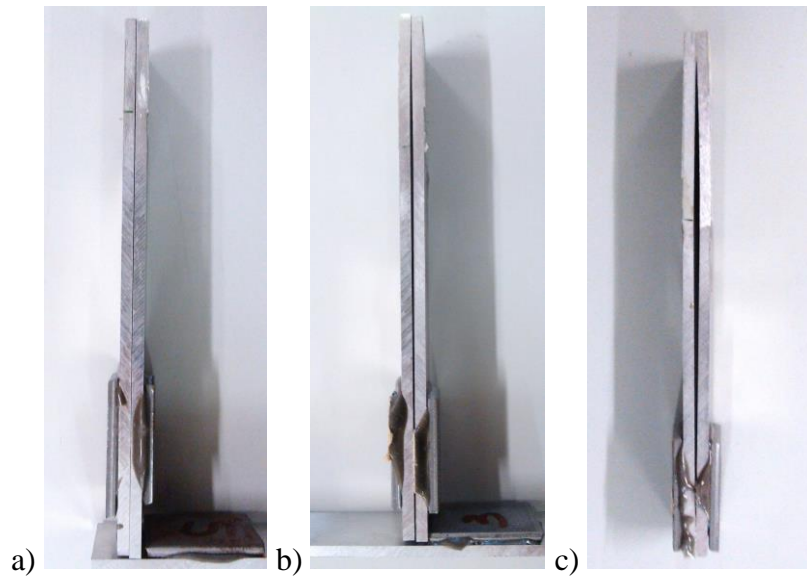


Figura 26 – Vista lateral dos aderentes de uma junta em que se empregou o adesivo Araldite® 2015, sem ocorrência de deformação plástica transversal para valores de  $L$  de 25 mm (a), e com observação de deformação plástica para  $L= 37,5$  mm (b) e  $L=50$  mm (c)

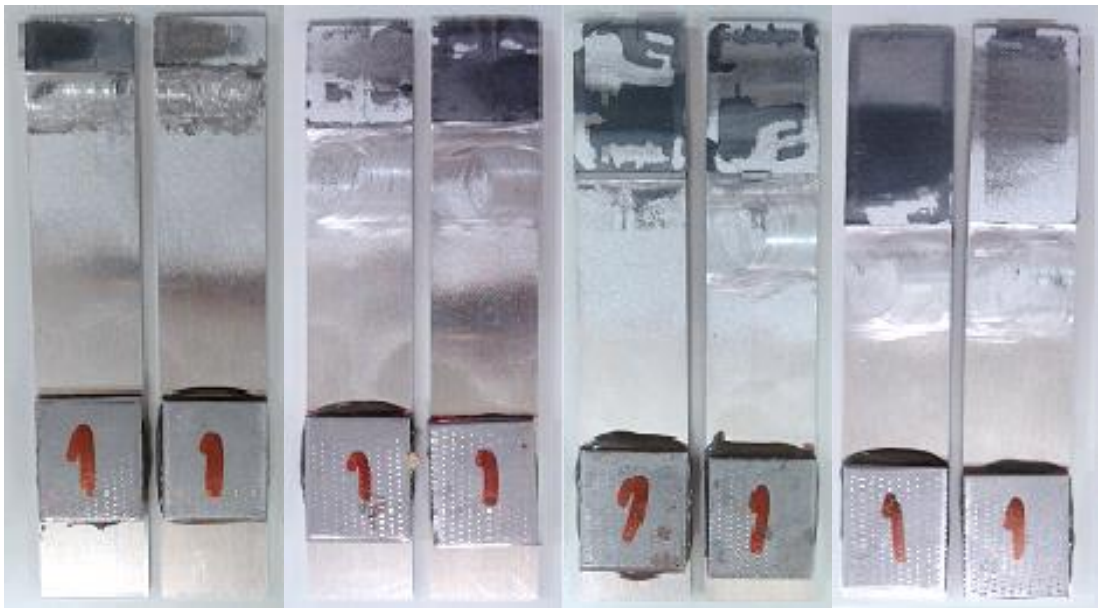


Figura 27 – Superfícies de rotura de provetes representativos de cada valor de  $L$  de juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7888

Uma vez que o adesivo Araldite® 2015 é um adesivo mais dúctil que o adesivo Araldite® AV138 e foram obtidos valores de  $P_{\text{máx}}$  superiores, observaram-se deformações plásticas para alguns valores de  $L$ . A deformação plástica transversal aumentou com  $L$ . Na Figura 26 não está representado nenhum provete com  $L=12,5$  mm por não ocorrer deformação

plástica transversal, tal como ocorreu para o caso a) em que  $L=25$  mm. Só se observou deformação plástica transversal para  $L=37,5$  mm (b) e  $L=50$  mm (c).

Para o SikaForce<sup>®</sup> 7888, o último adesivo a ser testado em JSS, sucedeu uma rotura mista na totalidade dos provetes em que este foi empregue. A rotura ocorreu parcialmente no interior do próprio adesivo e na ligação entre o adesivo e o aderente. Estão representados na Figura 27 as superfícies de rotura em que se empregou o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888 com os quatro valores de  $L$  (12,5 mm, 25 mm, 37,5 mm e 50 mm), por esta ordem da esquerda para a direita.

Como a resistência das juntas coladas com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888 é bastante superior à observada para os dois outros adesivos, os aderentes vão sofrer deformações plásticas a partir do valor de  $L$  mais reduzido ( $L=12,5$  mm). Na Figura 28 este efeito é visível para os diferentes valores de  $L$ , embora para  $L=12,5$  mm seja imperceptível.

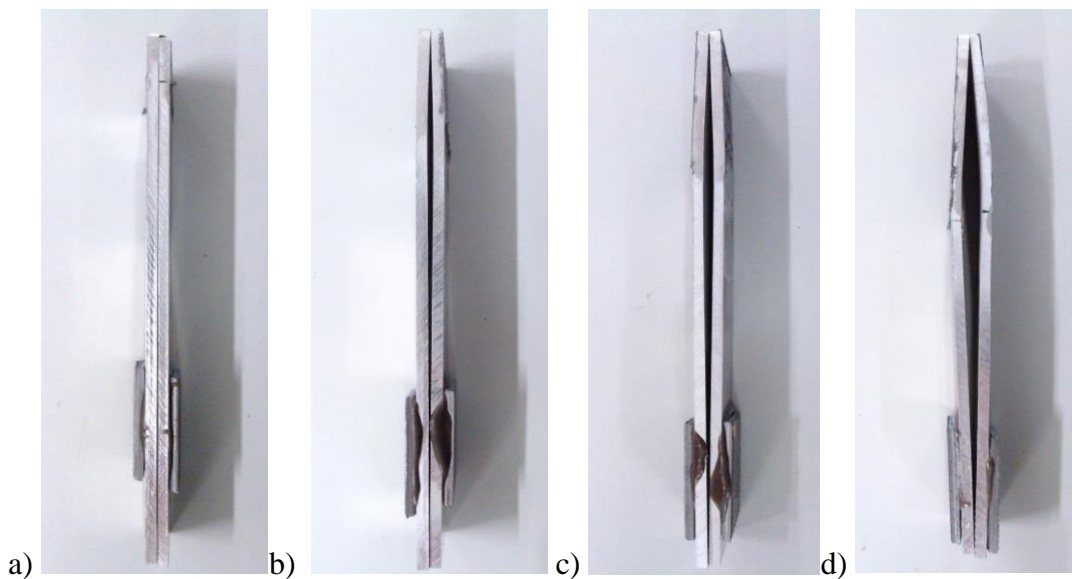


Figura 28 – Vista lateral dos aderentes de uma junta em que se empregou o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, com observação de deformação plástica para  $L =12,5$  mm (a),  $L=25$  mm (b),  $L= 37,5$  mm (c) e  $L=50$  mm (d)

### 3.1.5.2 Curvas $P-\delta$

Assim como para os modos de rotura, o primeiro caso em estudo das curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) é referente às juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138. Na Figura 29 estão representadas as curvas  $P-\delta$  para os diferentes valores de  $L$ .

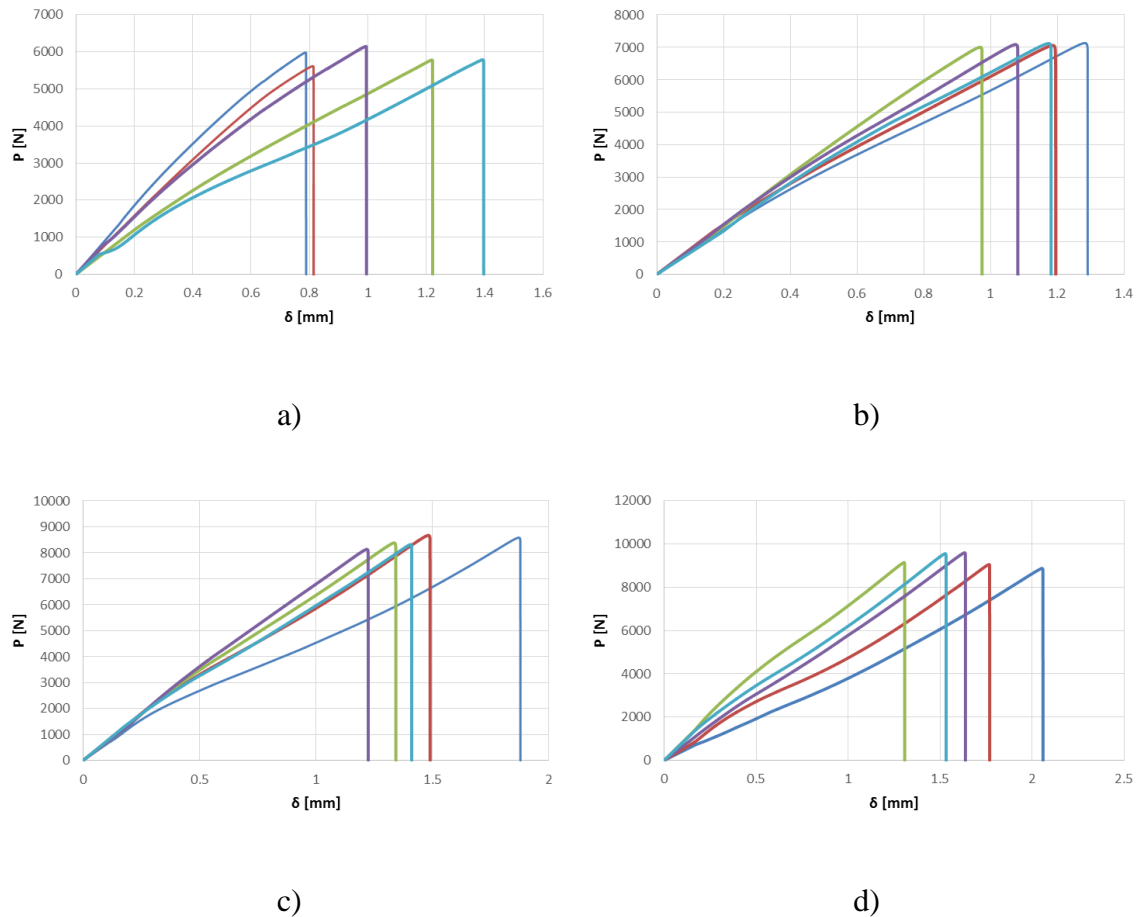


Figura 29 – Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, com valores de  $L=12,5$  mm (a),  $L=25$  mm (b),  $L=37,5$  mm (c) e  $L=50$  mm (d)

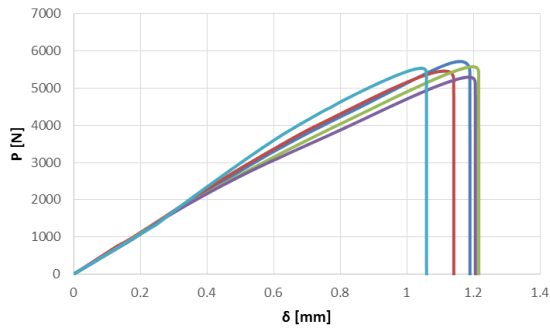
Na Figura 29 verifica-se o comportamento linear da junta até à rotura, e a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina e questões da amarração dos provetes. De salientar que no geral existe uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez, carga máxima e respectivo deslocamento.

Observa-se que os valores de  $P_{\text{máx}}$  aumentam com o valor de  $L$ . No caso d) em que  $L=50$  mm, em relação ao caso a) em que  $L=12,5$  mm, verifica-se um aumento do  $P_{\text{máx}}$  de 61.3%. O aumento percentual provocado pela variação do  $L$  não é constante e na Tabela 9 constata-se essa variação do  $P_{\text{máx}}$  para as quatro situações em estudo.

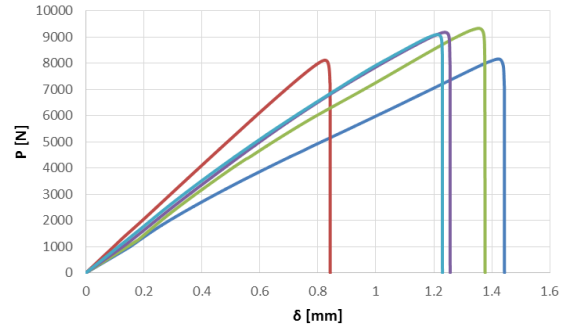
Para as juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 as curvas  $P-\delta$  estão apresentadas na Figura 30. Para este adesivo, o aumento do  $P_{\text{máx}}$  no caso d) em que  $L=50$  mm, em relação ao caso a) em que  $L=12,5$  mm, é de 152.3%.

Tabela 9 – Variação do  $P_{\text{máx}}$  para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138

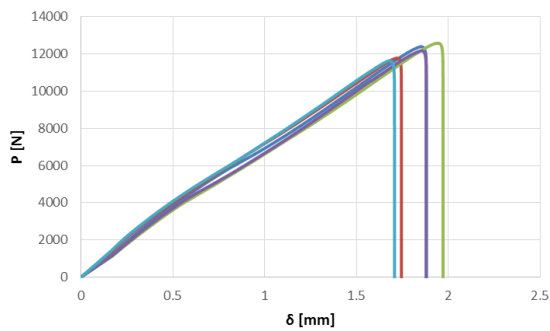
$L$ [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx}}$ médio [N]	5793,2	7079,1	8417,1	9342,2
Desvio padrão	149,7	51,0	214,2	278,5
Aumento $P_{\text{máx}}$ [%]	-	22,2	18,9	11,0



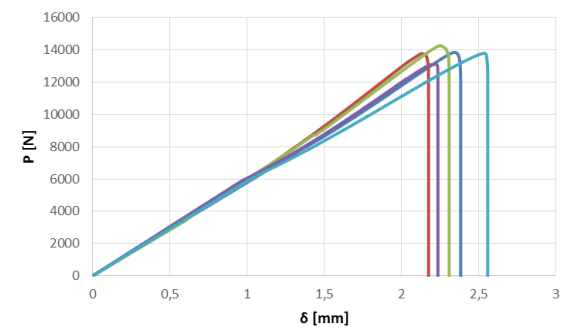
a)



b)



c)



d)

Figura 30 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® 2015, com valores de  $L=12,5$  mm (a),  $L=25$  mm (b),  $L=37,5$  mm (c) e  $L=50$  mm (d)

Da mesma forma que no adesivo anterior, verifica-se um comportamento linear da junta até à rotura, mas oscilações mais pequenas na rigidez elástica das juntas. Tal como no adesivo anterior, existe uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez,  $P_{\text{máx}}$  e respectivo deslocamento.

O aumento percentual deste adesivo, provocado pela variação de  $L$ , comparando com o adesivo Araldite® AV138, é bastante superior. Na Tabela 10 verifica-se essa variação do  $P_{\text{máx}}$  para os diferentes casos.

Tabela 10 – Variação do  $P_{\text{máx}}$  para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015

$L$ [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx}}$ médio [N]	5520,5	9207,7	12116,8	13927,9
Desvio padrão	154,8	120,7	398,5	229,9
Aumento $P_{\text{máx}}$ [%]	-	66,8	31,6	15,0

No último caso em estudo, as curvas  $P-\delta$  das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7888 apresentam um aumento do  $P_{\text{máx}}$  de até 172,8%. Neste adesivo, o  $L$  tem elevada influência no seu  $P_{\text{máx}}$ . Esta variação está presente na Figura 31.

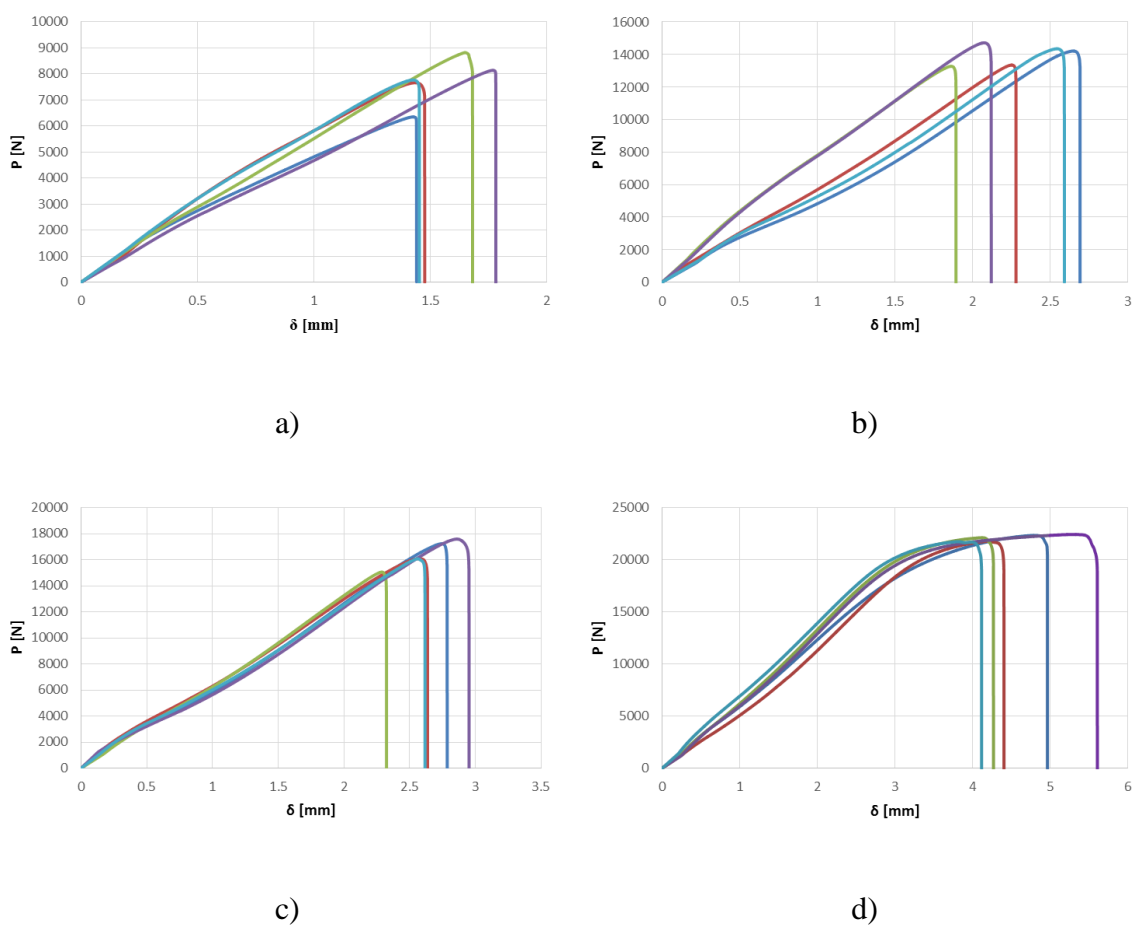


Figura 31 – Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente utilizando o adesivo Sikaforce® 7888, com valores de  $L=12,5$  mm (a),  $L=25$  mm (b),  $L=37,5$  mm (c) e  $L=50$  mm (d)

Este adesivo tem comportamento não linear na proximidade de  $P_{\text{máx}}$ , devido à elevada plasticidade que possui. Para o caso em que  $L=50$  mm esta não linearidade é bem evidente. Tal como para os restantes adesivos, ocorrem pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina e questões da amarração dos provetes e existe

também uma boa repetibilidade das curvas. De evidenciar que o aumento do  $P_{\text{máx}}$  face ao  $L$  para este adesivo neste caso específico é superior aos restantes, como se consta na Tabela 11.

Tabela 11 – Variação do  $P_{\text{máx}}$  para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7888

$L$ [mm]	12,5	25	37,5	50
$P_{\text{máx}}$ médio [N]	8099,4	13311,4	17427,8	22097,0
Desvio padrão	523,9	53,9	252,1	314,6
Aumento $P_{\text{máx}}$ [%]	-	64,4	30,9	26,8

### 3.1.5.3 Cargas de rotura

Neste capítulo é feita uma análise detalhada dos valores de  $P_{\text{máx}}$  para cada valor de  $L$  estudado. É também apresentado o desvio padrão de cada configuração de junta, para visualização da dispersão dos valores de  $P_{\text{máx}}$ . O aumento de  $P_{\text{máx}}$  em função do  $L$  é quase linear para o adesivo Sikaforce® 7888, como se pode constar na Figura 32.

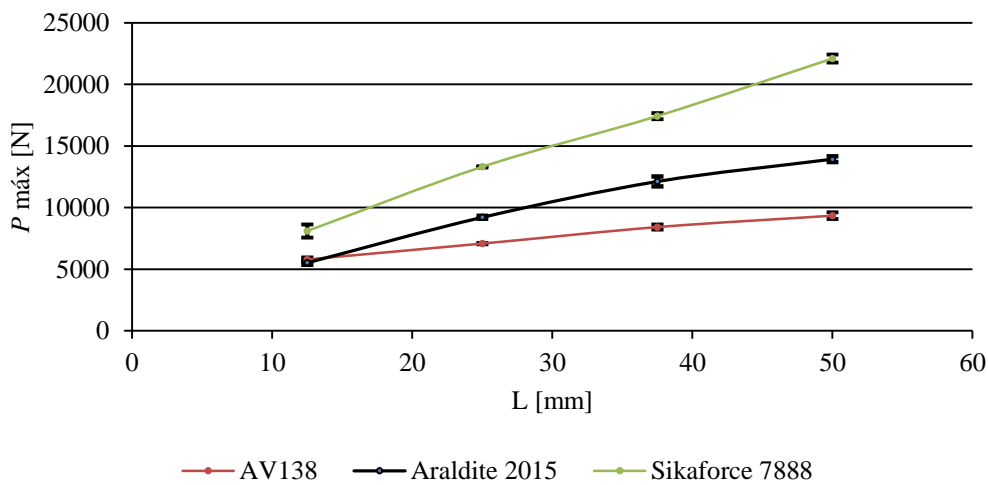


Figura 32 –  $P_{\text{máx}}$  em função de  $L$  para cada tipo de adesivo

Para o adesivo Araldite® AV138 o aumento percentual da  $P_{\text{máx}}$  com  $L$  não é muito significativo. O aumento percentual varia entre os 22,2% entre valores de  $L$  de 12,5 mm e 25 mm, e 10,99% entre valores de  $L$  de 37,5 mm e 50 mm. Para  $L=50$  mm o  $P_{\text{máx}}$  é de 9342,21 N. Observa-se que o valor de  $P_{\text{máx}}$  para o adesivo Araldite® 2015 é inferior ao adesivo Araldite® AV138 para  $L=12,5$  mm. No entanto, com o aumento de  $L$ , rapidamente o valor de  $P_{\text{máx}}$  das juntas coladas com o Araldite® 2015 se torna superior. O aumento

percentual para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 é bastante superior ao observado para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 e chega a rondar os 66,79% entre os dois valores de  $L$  mais pequenos. O valor de  $P_{\text{máx}}$  para  $L=50$  é de 13927,85 N. O adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, embora tenha um aumento percentual próximo ao adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 para os diferentes valores de  $L$ , possui uma resistência mais elevada desde o valor de  $L=12,5$  mm, o que se reflecte num conjunto de valores bastante mais elevados para todos os valores de  $L$  estudados. O valor de  $P_{\text{máx}}$  que este adesivo suporta é de 22096,96 N ( $L=50$  mm).

#### 3.1.5.4 Análise dos dados obtidos

Após realização dos ensaios experimentais verifica-se que o aumento da  $P_{\text{máx}}$  com  $L$  varia consoante o adesivo. Estes apresentam um comportamento diferente entre os 3 adesivos, sendo os resultados de  $P_{\text{máx}}$  bastante dependentes das propriedades dos adesivos, tais como rigidez, resistência e ductilidade. A distribuição de tensões é afectada pela rigidez do adesivo. De facto, para um adesivo de baixa rigidez a distribuição de tensões é mais uniforme em comparação com um adesivo mais rígido [11]. Comparativamente aos outros dois adesivos, o aumento de  $P_{\text{máx}}$  para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 não é tão acentuado. O aumento de  $L$  não tem um impacto muito relevante quando se usa este adesivo devido à sua fragilidade. De facto, esta característica faz com que, quando as tensões limites do adesivo são atingidas nas extremidades da sobreposição, se dê a rotura catastrófica da junta devido à ausência de capacidade de plastificação do adesivo [80]. Para  $L=12,5$  mm este adesivo apresenta um valor de  $P_{\text{máx}}$  ligeiramente superior ao do Araldite<sup>®</sup> 2015 pois, valores de  $L$  reduzidos, as distribuições de tensões são mais constantes ao longo da camada do adesivo, o que faz com que um adesivo com maior resistência, embora frágil, apresente maior resistência do que um adesivo dúctil, mas com resistência inferior [90]. No entanto, apesar de conter algumas propriedades mecânicas inferiores às do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, este possui propriedades de tenacidade que o definem como sendo um adesivo dúctil e que o tornam capaz de suportar cargas superiores para valores de  $L$  acima de 12,5 mm. Com o aumento de  $L$ , observa-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  mais notório para o Araldite<sup>®</sup> 2015, porque nestas condições as distribuições de tensões passam a apresentar maiores gradientes de tensões [43]. Com  $L=50$  mm os valores do adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 superam em 49,1% os valores do Araldite<sup>®</sup> AV138. Um adesivo dúctil possui a vantagem de conseguir distribuir a carga de forma mais uniforme através do uso das regiões em que as tensões são tipicamente mais baixas. Por sua vez, num adesivo frágil a carga concentra-se nas extremidades da sobreposição sem que haja possibilidade de existir plastificação,

resultando numa tensão de corte média reduzida no momento da rotura [20]. Nestas condições, um adesivo com menor resistência mas dúctil atinge mais rapidamente a cedência nas extremidades da camada de adesivo. Por outro lado, também permite a plastificação destas zonas, o que faz com que a tensão de corte média seja superior à de um adesivo frágil, cuja junta fractura mal a resistência do adesivo é atingida nas extremidades da camada adesiva [91]. Os valores de  $P_{máx}$  do adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888 são bastante superiores aos restantes. Por ser um adesivo que combina propriedades de resistência dos epóxidos e ductilidade dos poliuretanos, este adesivo é mais favorável para valores de  $L$  tanto reduzidos (devido à resistência mecânica) como elevados (devido à ductilidade). Para este adesivo, quanto maior o valor de  $L$  mais acentuada é a capacidade da junta suportar elevados esforços de tracção. Independentemente do valor de  $L$  este adesivo apresenta valores superiores de  $P_{máx}$ . Face ao Araldite<sup>®</sup> 2015, para  $L=12,5$  mm o valor de  $P_{máx}$  é superior em 46,7% e para  $L=50$  mm é cerca de 58,7%. Essa melhoria de resultados para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 é mais notória para  $L=50$  mm, atingindo uma diferença de 136,5%. Para  $L=12,5$  mm a diferença é de 39,8%, menor do que para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015.

Com base nestes resultados e na impossibilidade de utilização de um adesivo que combine alta resistência e rigidez, que representa a melhor escolha (Sikaforce<sup>®</sup> 7888), a selecção do adesivo recai nos adesivos que combinam uma menor rigidez aliada a uma maior ductilidade, excepto em situações em que  $L$  é bastante reduzido, onde os adesivos rígidos também apresentam elevado desempenho. Para cargas não uniformes, como tensões internas térmicas, clivagem e arrancamento os adesivos dúcteis também apresentam melhores resultados [11]. Desta forma, constata-se que para valores de  $L$  pequenos o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 torna-se uma opção viável quando comparado com o Araldite<sup>®</sup> 2015. Embora o Araldite<sup>®</sup> 2015 seja mais dúctil, para pequenos valores de  $L$  este factor não tem muita influência. Para valores de  $L$  superiores a 12,5 mm a escolha do adesivo deve recair no Araldite<sup>®</sup> 2015. Se forem pretendidos valores de  $P_{máx}$  bastante elevados a única opção viável é a utilização do adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888. A escolha do melhor adesivo para uma junta deve ter em consideração todos estes factores. De salientar que os valores obtidos na Figura 32 foram de acordo ao esperado em função das características que os adesivos apresentam [92].



## 3.2 Método de Elementos Finitos

Neste capítulo é efectuada uma abordagem das condições de análise numérica impostas no *software* ABAQUS<sup>®</sup> para o método MDC e realizada uma análise de tensões de corte e de arrancamento das juntas para os diferentes adesivos e valores de  $L$  usados. Para além disso, são descritos os processos de determinação das propriedades coesivas e apresentados os modos de rotura numéricos para as diferentes configurações da junta. No final, é feita uma comparação de forma detalhada dos valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos numericamente com os obtidos experimentalmente.

### 3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica realizada teve como base o *software* ABAQUS<sup>®</sup>. Este *software* baseia-se no método de EF e a sua escolha recai pela possibilidade de utilização do módulo integrado de MDC para prever a resistência de JSS. Para entender melhor o comportamento destas juntas, antes do estudo de resistência foi realizada uma análise de tensões na camada adesiva. Usando o *software* ABAQUS<sup>®</sup>, os aderentes foram modelados como sólidos elasto-plásticos e o adesivo com elementos MDC, como representado na Figura 33. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões, com elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4 do ABAQUS<sup>®</sup>). Para os elementos MDC na camada do adesivo, apenas foi considerado um elemento na direcção da espessura do adesivo.

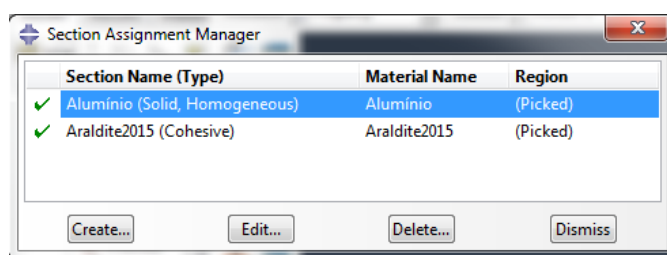
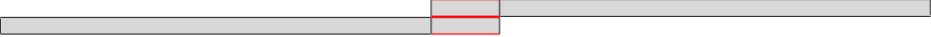




Figura 33 – Atribuição das características dos materiais no ABAQUS<sup>®</sup>

Para a análise de rotura por MDC foram consideradas não linearidades geométricas. As malhas para modelos de análise de tensões são bastante refinadas, com elementos na camada adesiva de dimensões 0,02 mm por 0,02 mm. Com este refinamento de malha é possível obter com alguma precisão as tensões de pico nas extremidades das zonas de sobreposição, teoricamente consideradas regiões singulares [43]. Ao longo da junta adesiva

existe uma variação das dimensões da malha, na qual esta é mais refinada na zona da camada adesiva e nas proximidades desta. Esta variação conforme a região da junta é exposta na Tabela 12, onde as linhas a vermelho são referentes às arestas nas quais foi definido um controlo de malha. A atribuição do número de elementos e do *bias ratio* (rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo) é dependente do valor de *L* da junta e foi considerada pela necessidade de obter uma precisão elevada dos valores obtidos.

Tabela 12 – Variação das dimensões da malha nas JSS

	<i>L</i> [mm]			
	12,5	25	37,5	50
Número de elementos	30	50	75	100
<i>Bias ratio</i>	5	5	5	5
				
Número de elementos	6	9	7	7
<i>Bias ratio</i>	8	3	4	4
				
Número de elementos	80	55	50	45
<i>Bias ratio</i>	20	20	20	20
				

As dimensões das malhas foram elaboradas com o efeito *bias* da seguinte forma: na região de  $L$  a malha foi construída a partir da região central do adesivo nos sentidos das bordas de  $L$  deste mesmo, como consta na Figura 34 destacado a vermelho.

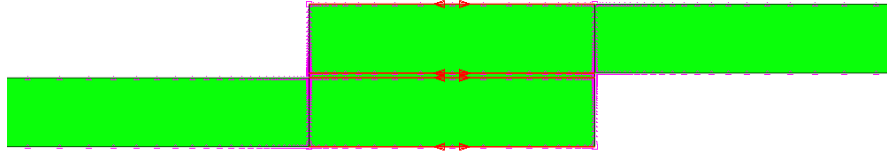


Figura 34 – Sentido do efeito *bias* da malha na região da sobreposição

Posteriormente, na região relativa ao comprimento dos aderentes que não estabelece contacto com o adesivo, a malha foi refinada de forma crescente no sentido da camada adesiva, como se verifica na Figura 35.



Figura 35 – Sentido do efeito *bias* da malha na região não ligada dos aderentes

Por fim, foi também aplicado refinamento crescente ao longo da espessura dos aderentes, como se demonstra na seguinte figura (Figura 36).

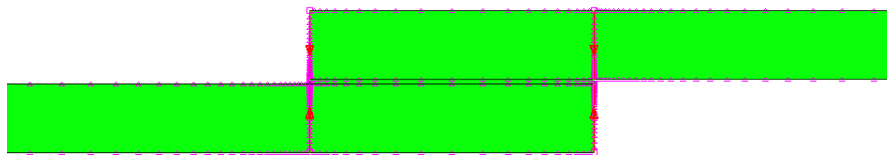


Figura 36 – Sentido do efeito *bias* da malha ao longo da espessura dos aderentes

É importante salientar que o efeito *bias* presente na Figura 34, Figura 35 e Figura 36 é apenas representativo, não correspondendo ao real número de elementos e efeito *bias* aplicado nos modelos de análise numérica e apresentado na Tabela 12.

As variações do número de elementos e do efeito *bias* na malha para as diferentes configurações de junta têm como intuito 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 tensões. No que diz respeito às condições fronteira, de forma a modelar as condições reais dos ensaios experimentais, uma das extremidades da junta foi encastrada, enquanto na extremidade oposta foi aplicada uma restrição vertical e um deslocamento de tracção. Na Figura 37 observam-se as condições de ensaio aplicadas no *software* ABAQUS®.



Figura 37 – Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos

Na análise MDC o adesivo foi modelado pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos, e uma lei de tracção-separação triangular incluindo a rigidez da camada adesiva [93]. O deslocamento aplicado nos modelos MDC varia consoante  $L$  e o tipo de adesivo usado, como consta na Tabela 13.

Tabela 13 – Deslocamentos aplicados nos modelos MDC do *software* ABAQUS®

Deslocamentos aplicados no método MDC			
$L$ [mm]	Araldite® AV138 [mm]	Araldite® 2015 [mm]	Sikaforce® 7888 [mm]
12,5	0,4	0,5	0,5
25	0,4	0,5	0,5
37,5	0,4	0,5	1
50	0,4	0,7	1

### 3.2.2 Análise de tensões das juntas

A análise de tensões das juntas adesivas baseia-se no estudo das tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e de corte ( $\tau_{xy}$ ) e é realizada no plano médio da espessura do adesivo. Esta análise tem como objectivo analisar de forma mais fundamentada os resultados obtidos numericamente. A obtenção dos gráficos envolveu um procedimento de normalização. Dividiram-se as tensões  $\tau_{xy}$  e  $\sigma_y$  pela tensão de corte média ( $\tau_{avg}$ ) para o valor de  $L$  respectivo. Um procedimento de normalização similar foi realizado para  $L$  ( $x/L$ ), em que  $x$  representa a distância desde a extremidade esquerda da camada do adesivo. O intervalo do gráfico é então dado por  $0 \leq x/L \leq 1$ . A análise comparativa dos diferentes valores de  $L$  é

referente às juntas coladas com o Araldite<sup>®</sup> 2015. Como se irá demonstrar posteriormente, as distribuições de tensões são similares, embora com gradientes ligeiramente superiores para as juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138. No entanto, para efeitos de análise, as curvas obtidas são representativas de todas as juntas.

### 3.2.2.1 Tensões de arrancamento

As distribuições de tensões  $\sigma_y$  em função de  $L$  são dadas pela Figura 38. Assim, de uma forma geral verifica-se que as tensões  $\sigma_y$  possuem uma magnitude inferior às tensões  $\tau_{xy}$ , excepto em zonas muito localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [94, 95]. Relativamente à distribuição de tensões  $\sigma_y$ , na região interior da camada do adesivo geram-se tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tracção. Este efeito está relacionado com a curvatura ou deformação transversal da junta, que é governada pela deformação dos aderentes, e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma. O aumento das tensões de tracção origina uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura [43, 54].

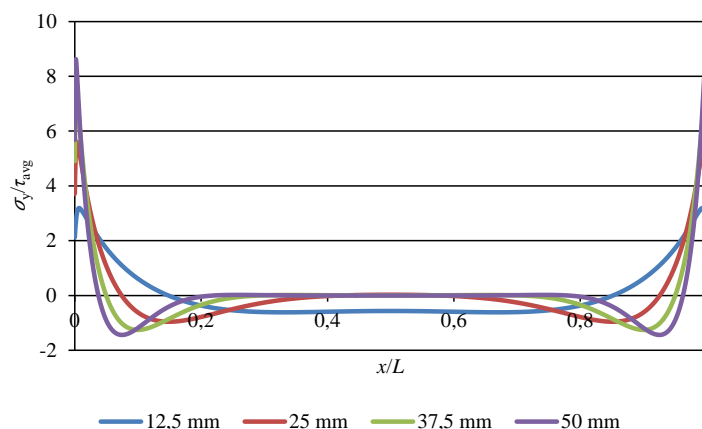


Figura 38 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 em função de  $L$

O estudo paramétrico de  $L$  mostrou que os picos de tensões  $\sigma_y$  ocorrem sempre nas extremidades de sobreposição. Para valores de  $L$  mais elevados, observam-se picos compressivos na proximidade das singularidades, que aumentam de magnitude com  $L$ . Ao mesmo tempo as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se

menos significativas. Esta tendência tende a reduzir com efeitos de arrancamento nas extremidades de  $L$  ou cancelar a propagação de dano após dano localizado nas zonas de singularidades [96], o que justifica algumas vezes que o valor de  $P_{\text{máx}}$  é obtido após a iniciação da fenda [97].

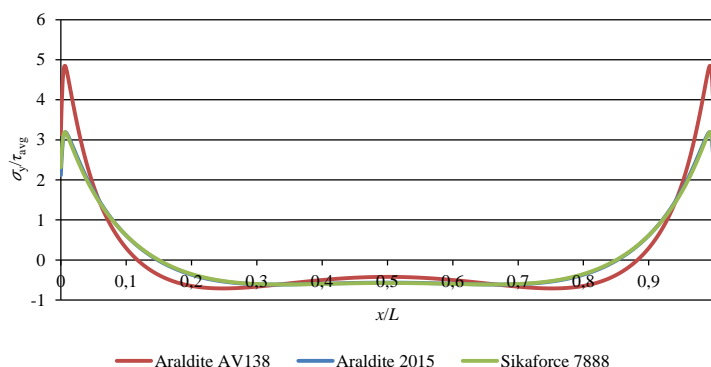


Figura 39 – Comparação das tensões  $\sigma_y$  entre os 3 adesivos para  $L=12,5$  mm

Na Figura 39 é feita uma comparação das tensões  $\sigma_y$  entre os três adesivos usados para  $L=12,5$  mm. Verifica-se que o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, comparativamente com os outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de  $x/L=0$  e  $x/L=1$ , que correspondem às extremidades de  $L$  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  $\sigma_y / \tau_{\text{avg}}$  para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 é de 4,85 enquanto para os adesivos Araldite<sup>®</sup> 2015 e Sikaforce<sup>®</sup> 7888 é de 3,19.

### 3.2.2.2 Tensões de corte

Tal como para a distribuição de tensões  $\sigma_y$ , na Figura 40 a distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  demonstra valores mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição [98, 99]. Isto deve-se à deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre dos aderentes e aumenta progressivamente até à extremidade oposta [11, 17, 100]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões  $\tau_{xy}$  apenas devido ao esforço de tracção aplicado na junta. Os gradientes de tensão  $\tau_{xy}$  aumentam com  $L$  devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos aderentes causados pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se empreguem

adesivos frágeis a resistência da junta é afectada pelo facto de as tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição [100]. 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 [43, 101]. Assim como para as tensões  $\sigma_y$ , na Figura 41 é feita uma comparação das tensões  $\tau_{xy}$  entre os três adesivos usados para  $L=12,5$  mm.

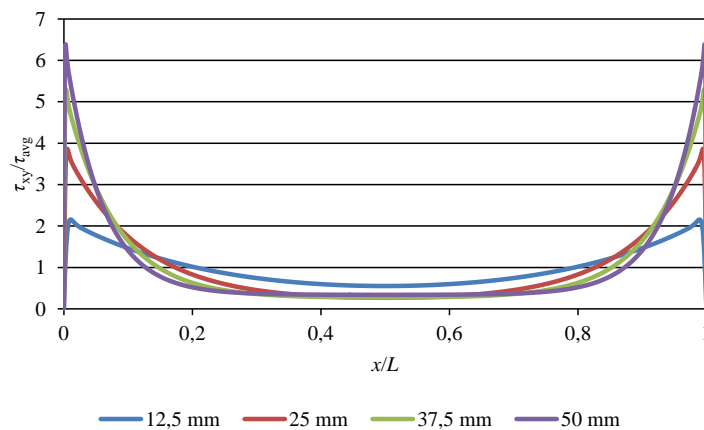


Figura 40 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 em função de  $L$

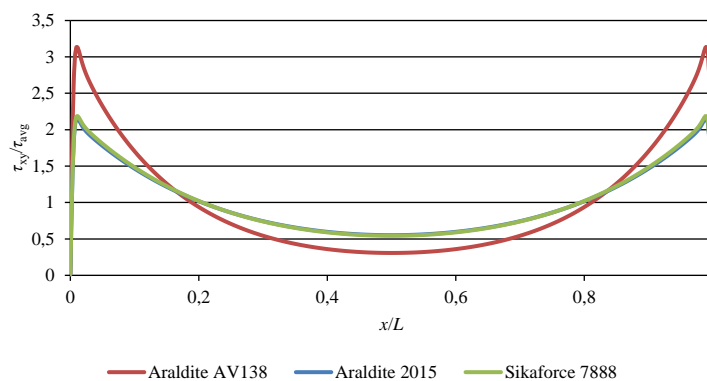


Figura 41 – Comparação das tensões  $\tau_{xy}$  entre os 3 adesivos para  $L=12,5$  mm

Nesta comparação constata-se novamente que o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 possui gradientes mais elevados comparativamente com os outros dois adesivos. O valor máximo de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  que este apresenta é de 3,13, enquanto para o Araldite<sup>®</sup> 2015 e Sikaforce<sup>®</sup> 7888 este é de 2,15 e 2,18, respectivamente.

### 3.2.3 Modelo de dano coesivo

Como abordado no capítulo 2.3.3, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos entre nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até atingir um pico de carga e subsequente a degradação deste até ocorrência de rotura. Na Figura 11 é apresentada a lei de tracção-separação triangular em modo puro e misto que foi utilizada neste trabalho. A formulação seguida neste trabalho é a apresentada no capítulo 2.3.3.1, no que concerne aos critérios de iniciação do dano e rotura.

#### 3.2.3.1 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tracção e corte é necessário conhecer  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tracção [96, 102]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [103, 104, 105]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

##### 3.2.3.1.1 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. [90]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fractura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente ao mais indicado, e foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tracção e corte através de ensaios de tracção e de corte (*Thick adherend shear test* (TAST)), respectivamente, 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 tracção e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com  $L=20$  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 tracção e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido [80] conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 14 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [80].

Tabela 14 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com  $t_A$  de 0,2 mm [80]

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

### 3.2.3.1.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo do Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior [90] por um método inverso para a determinação de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Num estudo anterior [106] é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  através de ensaios DCB e ENF, respectivamente, 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 tracção 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 respectivo de caracterização à fractura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo.

Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com  $t_A$  de 0,2 mm [106]

$E$ [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 15 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto [106]. Os valores de  $E$  e  $G$  foram

determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [107] e ensaios TAST, respectivamente [108].

### 3.2.3.1.3 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 de tracção ou dados pelo fabricante, respectivamente. Para os valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ , foram utilizados valores obtidos por ensaios DCB e por ENF, pela respectiva ordem. A generalidade dos valores das propriedades presentes na Tabela 16 foram obtidos experimentalmente no trabalho de Neto [87], à excepção de  $G$ ,  $t_s^0$  e  $G_{IC}$ . Para  $G_{IC}$  não foi utilizado o valor apresentado por [87], devido à obtenção de roturas parcialmente adesivas, indicativas de uma medição incorrecta desse valor. Em alternativa, foi utilizado o valor obtido por [109], 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 [87], os valores de  $E$  e  $t_n^0$  foram obtidos por ensaios de adesivos de tracção, 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  $\delta$  até ocorrer a rotura e posteriormente tratados no *software* Microsoft Excel®. No mesmo trabalho [87],  $G_{IC}$  foi obtido por provetes DCB de aço segundo a norma ASTM D3433-99.

Tabela 16 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7888 com  $t_A$  de 0,2 mm [87]

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

### 3.2.4 Modos de rotura

Após a realização dos ensaios através do *software* ABAQUS® verificou-se que existiu deformação plástica nas juntas coladas com a totalidade dos adesivos. No entanto, a deformação plástica foi mais evidente nos adesivos mais dúcteis, como era espectável, devido aos valores mais elevados de  $P_{máx}$  que estas juntas atingem. Da mesma forma, para as juntas coladas com um dado adesivo, a deformação plástica aumenta com o valor de  $L$ . Na Tabela 17 é feita uma comparação entre os valores da deformação plástica obtidos

numericamente para os diferentes valores de  $L$  e adesivos com a existência ou não de deformação plástica visível por inspeção visual dos provetes após rotura.

Tabela 17 – Comparação da deformação plástica numérico-experimental

$L$ [mm]	Deformação plástica máxima - numérico			Deformação plástica - experimental		
	Araldite® AV138 [%]	Araldite® 2015 [%]	Sikaforce® 7888 [%]	Araldite® AV138	Araldite® 2015	Sikaforce® 7888
12,5	0	0	0	Não existe	Não existe	Existe
25	0	0,105	0,344	Não existe	Não existe	Existe
37,5	0	0,249	0,758	Não existe	Existe	Existe
50	0,0679	0,413	1,43	Não existe	Existe	Existe

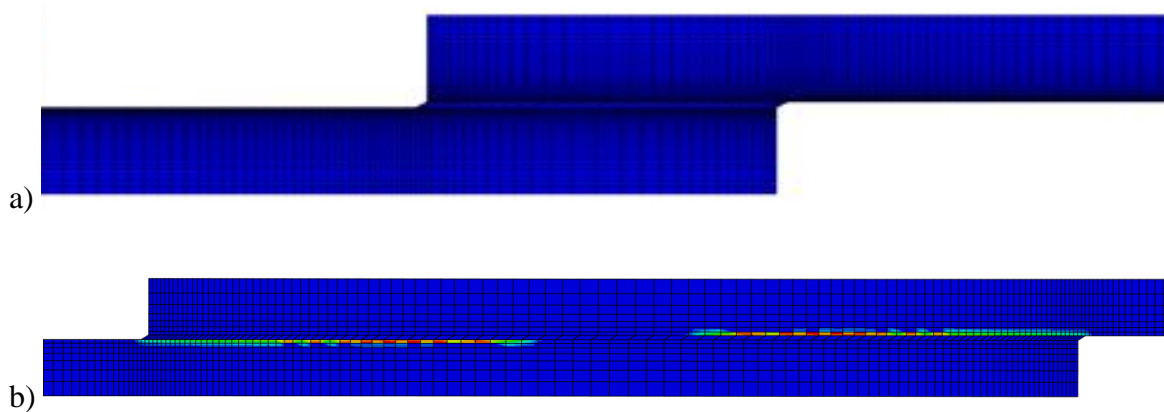


Figura 42 – Constatação da não existência de deformação plástica para as juntas com  $L=12,5$  mm (a) e a existência de deformação plástica para as juntas com  $L=50$  mm (b) nas juntas em que se empregou Araldite® AV138

Para os modelos numéricos relativos ao adesivo Araldite® AV138 verificou-se que só existiu deformação plástica para  $L=50$  mm, embora esta seja extremamente reduzida. Isto pode ser observado na Figura 42 onde em (a) se mostra os aderentes após rotura para  $L=12,5$  mm e em (b) para  $L=50$  mm. Nos ensaios experimentais não se constou visualmente qualquer deformação em ambos os aderentes. Pode-se então concluir que a reduzida deformação numericamente existente para  $L=50$  mm não é visível ao olho humano.

No adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015, os valores da deformação plástica obtidos numericamente são nulos apenas para  $L=12,5$  mm (Figura 43 (a)). Para  $L=25$  mm a deformação é de 0,105% e para  $L=50$  mm atinge 0,413% (Figura 43 (b)). Nos ensaios realizados experimentalmente essa deformação torna-se visível apenas para quando  $L=37,5$  mm, que numericamente corresponde ao valor da deformação de 0,249%. Esta incapacidade de visualização para  $L=25$  mm deve-se essencialmente ao reduzido valor de deformação plástica nos aderentes.

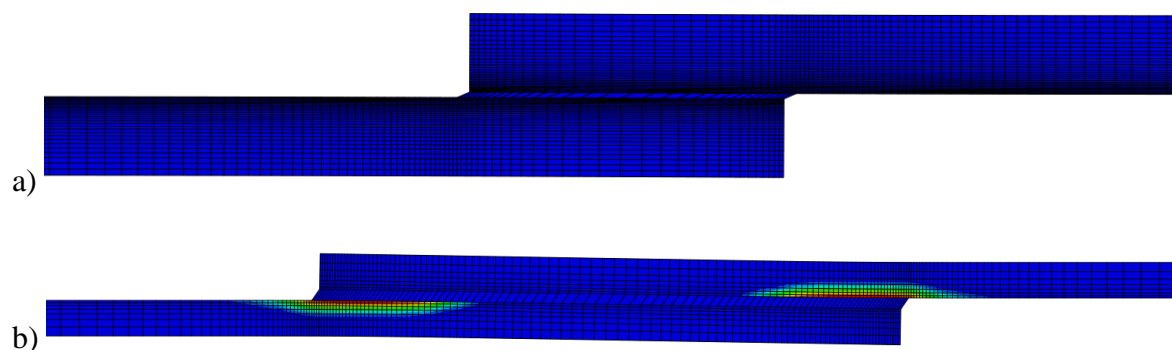


Figura 43 – Constatação da não existência de deformação plástica para as juntas com  $L=12,5$  mm (a) e a existência de deformação plástica para as juntas com  $L=50$  mm (b) nas juntas em que se empregou Araldite<sup>®</sup> 2015

Tal como sucedeu com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015, numericamente o Sikaforce<sup>®</sup> 7888 apresenta valores de deformação plástica a partir de  $L=25$  mm, embora com valores bastante superiores. Isto ocorre essencialmente devido às propriedades de resistência e ductilidade deste material, e respectivo valor mais elevado de  $P_{máx}$ , o que faz com que a deformação plástica atinja valores superiores. Para  $L=25$  mm a deformação plástica é de 0,344% e quando  $L=50$  mm, Figura 44 (b), o seu valor é de 1,43%. Na Figura 44 (a), observa-se que numericamente a junta colada com  $L=12,5$  mm não regista deformação plástica. Nos ensaios experimentais constou-se visualmente deformação plástica na totalidade dos aderentes, embora para  $L=12,5$ mm, Figura 28 (a) esta seja bastante reduzida. De salientar que na Figura 42 (b), Figura 43 (b) e Figura 44 (b) as deformações plásticas concentram-se nas extremidades de  $L$ , sendo responsáveis pela criação de rótulas plásticas que são responsáveis pela diminuição da resistência da junta [51].

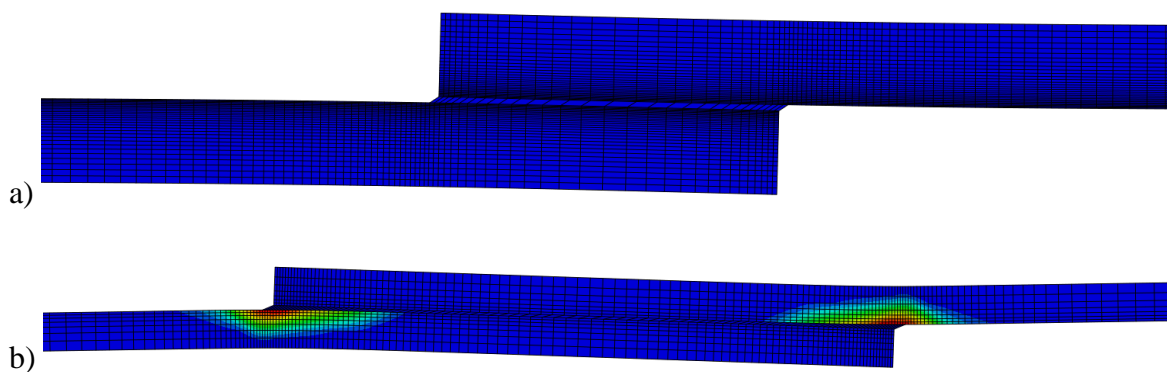


Figura 44 – Constatação da não existência de deformação plástica para as juntas com  $L=12,5$  mm (a) e a existência de deformação plástica para as juntas com  $L=50$  mm (b) nas juntas em que se empregou Sikaforce<sup>®</sup> 7888

### 3.2.5 Previsão da resistência

Na análise numérica por MDC a camada adesiva foi modelada por uma abordagem contínua, e os aderentes foram considerados materiais elástico-plásticos. Em todas as simulações, a iniciação de dano ocorreu nas extremidades de sobreposição da junta propagando-se para a região interior da ligação adesiva [75]. Na Figura 45 é feita uma comparação das curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC para as juntas em que se empregou o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e  $L=37,5$  mm (Figura 45 a) e para as juntas em que se empregou o Sikaforce<sup>®</sup> 7888 e  $L=50$  mm (Figura 45 b).

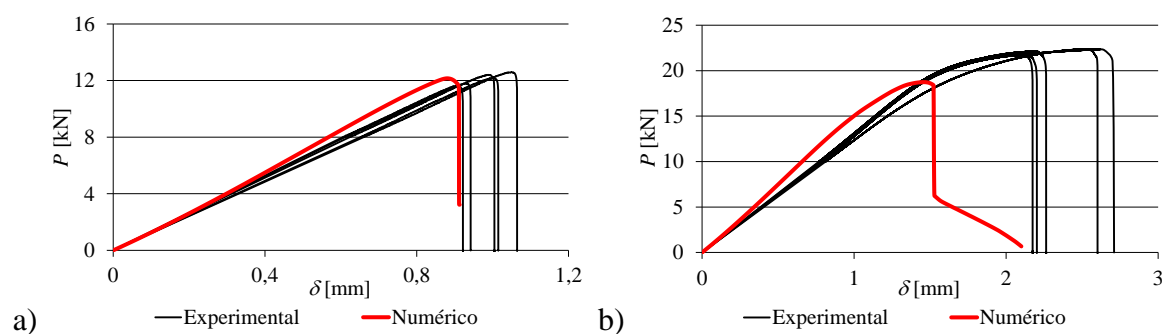


Figura 45 – Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e  $L=37,5$  mm (a) e para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888 e  $L=50$  mm (b)

A correlação geral é bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se emprega os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015, em relação a  $P_{\text{máx}}$ , rigidez ou

deslocamento de rotura. Para o Sikaforce<sup>®</sup> 7888, os resultados experimentais superam os numéricos, sendo este facto abordado mais à frente nesta tese.

Para melhor compreensão do processo de dano, a variável de dano SDEG nos elementos coesivos da camada adesiva foi traçada em função de  $x/L$  para diferentes configurações de junta. O parâmetro SDEG corresponde à degradação da rigidez da lei MDC em modo misto, como consta na Figura 11. Até ao início do amaciamento de tensões no material tem-se que  $SDEG=0$  e no momento em que a rotura está completa atinge-se  $SDEG=1$ . A Figura 46 representa SDEG em função de  $L$  para o instante de  $P_{máx}$  das juntas (a) e no instante da rotura do primeiro elemento MDC nas extremidades de  $L$  (b). De salientar que em (a) e (b) apenas estão traçadas as linhas para  $L$  mínimo e máximo, ou seja, para  $L=12,5$  mm e  $L= 50$  mm.

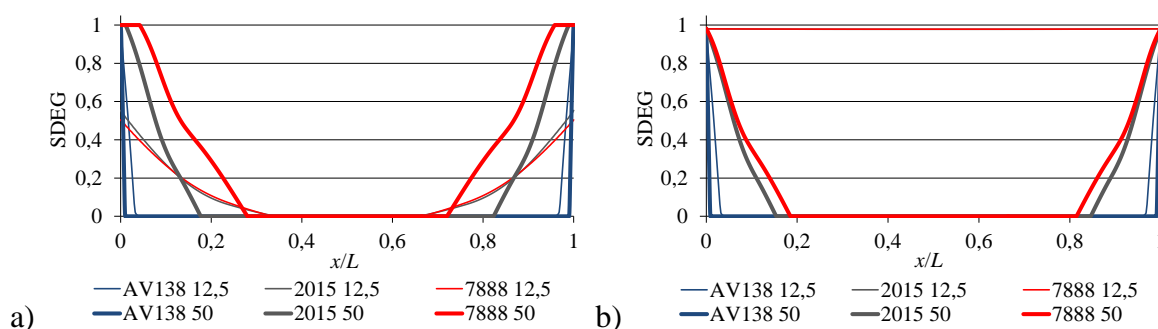


Figura 46 – Variável de dano em função de  $L$  para o instante de  $P_{máx}$  das juntas (a) e no instante da rotura do primeiro elemento MDC nas extremidades de  $L$  (b)

Na Figura 46 verifica-se que, independentemente do adesivo, o dano estende-se por uma área mais alargada para  $L=12,5$  mm, porque o gradiente das tensões de  $\tau_{xy}$  (que governam o processo de rotura) é menor para  $L$  reduzidos. Comparando os três adesivos usados, verifica-se que a curva da variável de dano se torna mais plana ao longo de  $L$  para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e Sikaforce<sup>®</sup> 7888 devido à capacidade de plastificação e redistribuição de tensões destes adesivos. Para o Sikaforce<sup>®</sup> 7888 e  $L = 50$  mm,  $P_{máx}$  ocorre com o dano total de 8,4% de  $L$ , devido à grande ductilidade do adesivo. Este valor é de 2,0% para o Araldite<sup>®</sup> 2015 e quase nulo para a Araldite<sup>®</sup> AV138. Considerando o instante da rotura do primeiro elemento do MDC (Figura 46 (b)), verifica-se que as curvas têm um comportamento idêntico às observadas na Figura 46 (a), excepto nas juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e Sikaforce<sup>®</sup> 7888 com  $L=12,5$  mm. Nestes casos, uma vez que o dano é mais nivelado ao longo de  $L$ , após se atingir o  $P_{máx}$ , a variável de dano tende a ficar

uniforme em todo o  $L$ . A rotura completa do adesivo sucede quando o adesivo está perante condições idênticas de dano. A Figura 47 demonstra a variável de dano em função de  $\delta$  para o Araldite® AV138 com  $L=12,5$  mm (a) e  $L=50$  mm (b).

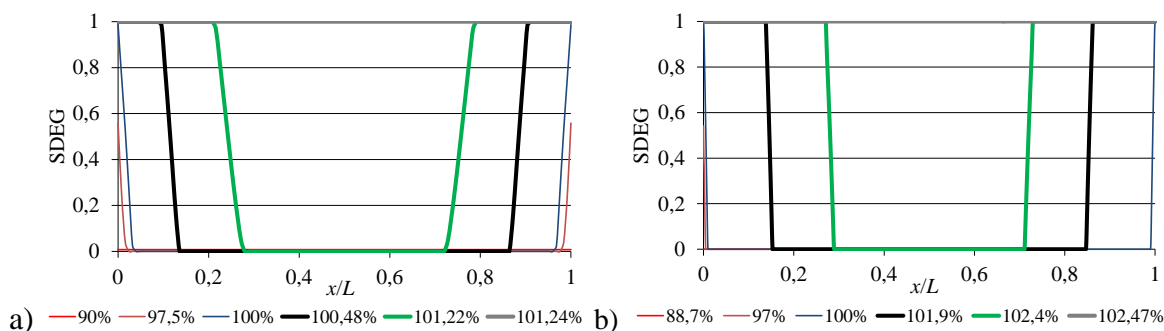


Figura 47 – Evolução da variável de dano com  $\delta$  para o adesivo Araldite® AV138 para  $L=12,5$  (a) e  $L=50$  mm (b)

As percentagens descritas na Figura 47 referem-se à proporção de  $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}} \times 100$  [%], onde  $\delta_{P_{\text{máx}}}$  é o deslocamento que corresponde a  $P_{\text{máx}}$ . Devido à fragilidade do adesivo Araldite® AV138, a variável de dano avança muito depressa com o carregamento aplicado, passando da inexistência de dano para ocorrência de dano total num curto espaço. Por outro lado, mais uma vez devido ao carácter frágil do adesivo,  $P_{\text{máx}}$  ocorre com uma plastificação mínima nas extremidades de  $L$ , o que resulta num pequeno aumento  $P_{\text{máx}}$  com o aumento de  $L$ , conforme se visualiza na Figura 49. Na Figura 47 (b), inclusivamente, é impossível diferenciar os estados de dano até  $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}} = 100\%$  por causa da pequena porção de sobreposição normalizada em que o dano ocorre. Além disso, é possível detectar que o processo de rotura ocorre muito rapidamente (de  $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$  a 101,24%, para  $L=12,5$  mm, e de 100% a 102,47% para  $L=50$  mm).

Tal como para o adesivo Araldite® AV138, na Figura 48 é feita uma análise da evolução da variável de dano em função de  $\delta$  para o adesivo Sikaforce® 7888 com  $L=12,5$  mm (a) e  $L=50$  mm (b). Comparativamente com o Araldite® AV138, constata-se que a evolução do dano é mais gradual ao longo de  $L$ , devido à elevada ductilidade deste adesivo. Para o instante de  $P_{\text{máx}}$  (que corresponde a  $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}=100\%$ ), observa-se que aproximadamente 35% da sobreposição ( $L= 12,5$  mm) e 44% da sobreposição ( $L= 50$  mm) está na região elástica do adesivo, enquanto a parte restante (nas extremidades de sobreposição) está completamente sobre amaciamento ( $L=12,5$  mm) ou em amaciamento com uma pequena porção de rotura nas extremidades da sobreposição ( $L= 50$  mm). O processo de rotura torna-se mais gradual, e isto é visível com os valores de  $\delta/\delta_{P_{\text{máx}}}$  que correspondem a uma

camada de adesivo totalmente danificada (cerca de 200% para  $L=12,5$  mm e de 125% para  $L=50$  mm). A variação de inclinação das curvas para  $L=50$  mm, mais propriamente no centro da região danificada, está relacionada com a plastificação dos aderentes na região próxima das extremidades de  $L$ , que aumenta a taxa de dano naquela região.

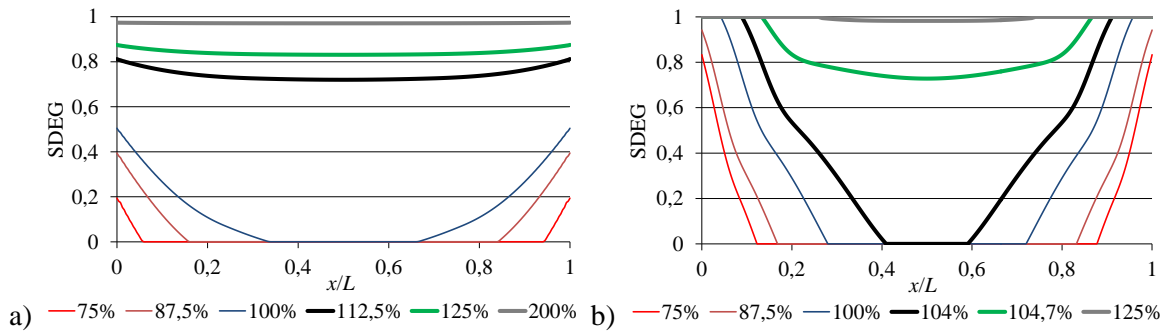


Figura 48 – Evolução da variável de dano com  $\delta$  para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888 para  $L=12.5$  (a) e  $L=50$  mm (b)

Na Figura 49 é feita uma comparação da  $P_{m\acute{a}x}$  dos 3 adesivos em função de  $L$  com os valores experimentais (com os respectivos desvios padrão) e os valores numéricos obtidos pelo MDC.

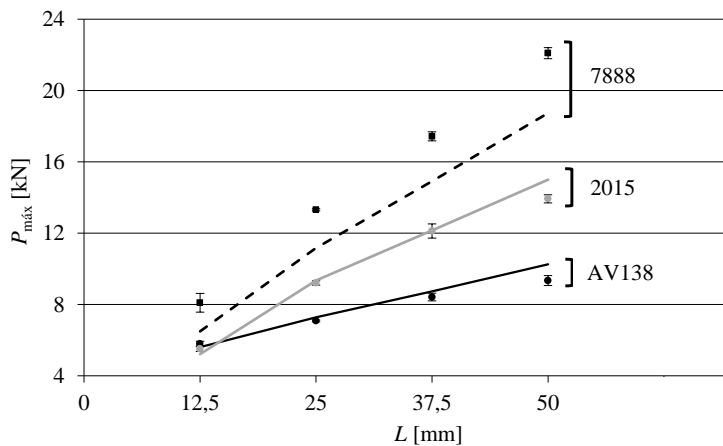


Figura 49 – Comparação dos resultados obtidos experimentalmente e numericamente pelo MDC para os 3 adesivos

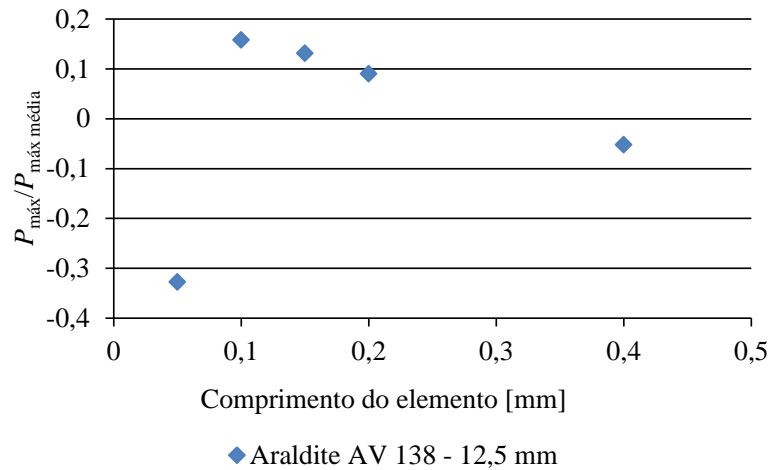
Observando a Figura 49 verifica-se que os valores numéricos e experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L$  são muito próximos para as juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 e Araldite<sup>®</sup> AV138. Para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, o  $P_{m\acute{a}x}$  obtido



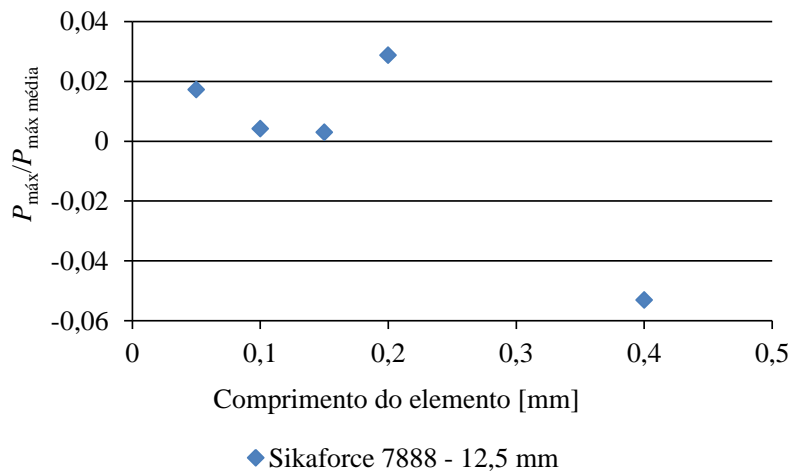
numericamente é bastante inferior ao obtido experimentalmente, embora a variação existente seja quase constante para cada valor de  $L$ . O erro máximo existente foi de 9,8% para o Araldite® AV138, de 7,7% para o Araldite® 2015 e 19,7% para o Sikaforce® 7888. Conclui-se que este método numérico é então bastante preciso para adesivos frágeis e moderadamente dúcteis [80]. Por sua vez, para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7888 os valores experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  diferem claramente daqueles obtidos pelo MDC, e esta diferença está relacionada com a elevada plasticidade deste adesivo, que o torna desajustado para modelação segundo a lei triangular considerada nesta análise. Em função das características do adesivo, seria mais adequada uma lei trapezoidal [12]. Apesar de a lei aplicada não ser adequada para a totalidade dos adesivos, esta permite obter uma noção geral do comportamento das juntas adesivas.

Para além desta análise, foi realizado um estudo sobre o efeito do refinamento da malha na previsão do  $P_{m\acute{a}x}$ . Neste estudo consideraram-se as juntas em que se empregou o adesivo Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7888 com  $L= 12,5$  mm. Foi utilizado um valor constante de altura dos elementos (0,2 mm) e um comprimento que variou entre 0,05 e 0,4 mm para ambos os adesivos. Os resultados finais apresentam um desvio máximo de  $P_{m\acute{a}x}$  média (valor médio de  $P_{m\acute{a}x}$  para os diferentes refinamentos de malha) para a totalidade dos diferentes tamanhos de malha de 0,06% para Sikaforce® 7888 e 0,33% para Araldite® AV138. O desvio existente está demonstrado na Figura 50.

Este comportamento já era esperado, pois a insensibilidade dos resultados com o refinamento da malha é uma característica dos MDC [110], uma vez que o crescimento do dano é determinado por um critério energético, baseado na tenacidade à fractura do material. Uma vez que a energia necessária para a propagação se estende por um comprimento não desprezável da camada de adesivo, em oposição ao uso de um valor discreto de tensão/deformação máxima como acontece com critérios da resistência de materiais, os resultados são independentes do refinamento da malha desde que seja utilizado um refinamento mínimo [51].



a)



b)

Figura 50 – Desvio máximo de  $P_{\max}$  em função do comprimento dos elementos do adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 (a) e para o Sikaforce<sup>®</sup> 7888 (b)

### 3.3 Método de Elementos Finitos Extendido

Neste último capítulo é efectuada a previsão das juntas adesivas pelo MEFE, começando por uma abordagem das condições de análise numérica impostas no *software* ABAQUS<sup>®</sup> para o MEFE. São determinadas as propriedades de dano, em função dos critérios de iniciação de dano seleccionados para a análise, e é feita uma comparação dos resultados obtidos numericamente por estes critérios com os resultados experimentais, para os diferentes adesivos usados. Com este estudo, é analisada a capacidade do MEFE na previsão da resistência das juntas, em função das características de cada um dos adesivos. São igualmente definidas as principais desvantagens do mesmo. Por fim, é efectuada uma análise da influência da dimensão da malha no adesivo nos valores de  $P_{\max}$ .

### 3.3.1 Condições da análise numérica

Tal como para a método MDC, na análise numérica pelo MEFE para a previsão da resistência de JSS foi usado *software* ABAQUS®. Este *software* possui um módulo integrado de MEFE e os diferentes critérios introduzidos previamente no capítulo 2.3.5 vão ser todos testados neste trabalho. No *software* ABAQUS® os elementos da junta adesiva (adesivo e aderentes) foram modelados como sólidos e apenas o adesivo usou uma formulação enriquecida para simulação do início e propagação do dano. Na Figura 51 visualizam-se as propriedades dos elementos modelados no ABAQUS® pelo MEFE.

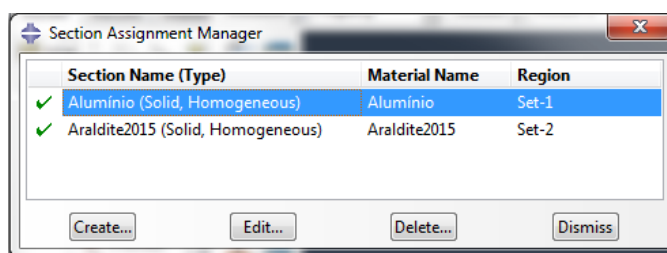


Figura 51 – Propriedades dos elementos segundo o MEFE

Assim como para o MDC, no MEFE foram consideradas não linearidades geométricas no sentido de simular com precisão as deformações longitudinal e transversa nos modelos numéricos. O refinamento das malhas para os modelos numéricos, independentemente do critério utilizado, é idêntico ao usado no MDC. A malha foi construída por uma fila de elementos na camada adesiva de dimensões 0,2 mm por 0,2 mm, sendo desta forma possível obter algum grau de precisão de  $P_{\max}$  pelo MEFE [43]. O refinamento da malha dos modelos foi idêntico ao utilizado na análise numérica pelos MDC, cujos valores de *bias* e o número de elementos estão apresentados na Tabela 12. Na elaboração das malhas para os diferentes provetes e critérios, foram considerados e aplicados os mesmos passos seguidos no MDC, como consta na Figura 34, Figura 35 e Figura 36. No *software* usado, a modelação das juntas foi feita em duas dimensões. As condições impostas coincidem com as condições reais do ensaio experimental, onde uma das extremidades da junta foi fixada, enquanto na extremidade oposta é aplicada uma restrição vertical e um deslocamento de tracção, que varia consoante o adesivo e o critério aplicado. A variação do deslocamento é apresentada na Tabela 18 consoante o tipo de adesivo e critério do MEFE.

Tabela 18 – Deslocamentos de tracção aplicados para os diferentes critérios do método MEFE no software ABAQUS®

	L [mm]	$\delta$ [mm]		
		Araldite® AV138	Araldite® 2015	Sikaforce® 7888
MAXE	12,5/25/37,5/50	0,2	0,2	1,5
MAXS	12,5/25/37,5/50	0,2	0,2	1,5
MAXPE	12,5/25/37,5/50	0,2	0,2	1,5
MAXPS	12,5/25/37,5/50	0,2	0,2	0,2
QUADE	12,5/25/37,5/50	0,2	1	1,5
QUADS	12,5/25/37,5/50	0,2	0,2	1,5

### 3.3.2 Modelo de dano utilizado

Enquanto a formulação teórica do MEFE utilizada neste trabalho foi definida anteriormente no capítulo 2.3.5, no presente ponto pretende-se descrever o modelo de dano utilizado e as propriedades dos adesivos utilizadas para o estudo de MEFE. O MEFE considera que os materiais assumem um comportamento inicial linear elástico. O início da degradação é simulado através de critérios de iniciação de dano. Os critérios de iniciação de dano podem ser baseados nas tensões e deformações principais máximas (exemplo dos critérios MAXPS e MAXPE, respectivamente), sendo comparados com respectivos valores limites dos adesivos. Conforme apresentado no capítulo 2.3.5, existe a possibilidade de considerar critérios distintos: nos critérios MAXS e MAXE a iniciação do dano tem lugar quando os valores de tensões normal ou de corte atingem os valores limites, respectivamente, e nos critérios QUADS e QUADE o dano inicia quando o valor de  $f$  no critério respectivo atingir a unidade. Neste trabalho, foram testados estes seis critérios. As leis tracção-separação simulam a degradação do material que pode ser linear ou exponencial. Neste trabalho foi escolhida uma lei de degradação linear entre as tensões ou deformações (dependendo do critério utilizado) e deslocamentos, com uma redução proporcional das tensões transmitidas em função dos deslocamentos, até se dar a rotura completa. A propagação de fendas tem lugar perpendicularmente às tensões ou deformações principais máximas, no caso dos critérios MAXPS e MAXPE, respectivamente. Para os restantes critérios, como será detalhado posteriormente, será possível escolher a direcção de propagação de dano entre as duas direcções principais locais dos elementos enriquecidos [111].

### 3.3.2.1 Determinação das propriedades de dano

Na análise do método MEFE com recurso ao *software* ABAQUS<sup>®</sup>, para além de  $E$ ,  $G$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ , para os diferentes critérios torna-se necessário conhecer os valores de  $\sigma_{m\acute{a}x}$  e de  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ . Independentemente do tipo de adesivo,  $\sigma_{m\acute{a}x}$  foi igualado à tensão de rotura à tracção e  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  foi igualado à deformação de rotura à tracção, pela proximidade das suas características. Algumas destas propriedades foram determinadas pelo fabricante e outras, como o caso de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ , foram estimadas na referência [112] para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138. O módulo  $G$  foi estimado pela Lei de Hooke para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888.

#### 3.3.2.1.1 Araldite<sup>®</sup> AV138

Para a lei de degradação linear das juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores que constam na Tabela 19.

Tabela 19 – Parâmetros utilizados para a análise MEFE para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138

$E$ [MPa]	4890	$G_{IC}$ [N/mm]	0,2
$G$ [MPa]	1560	$G_{IIC}$ [N/mm]	0,38
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	39,45	$\varepsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	1,21
$t_n^0$ [MPa]	39,45	$\varepsilon_n^0$ [%]	1,21
$t_s^0$ [MPa]	30,2	$\varepsilon_s^0$ [%]	7,8

Para a iniciação da fenda na camada adesiva, nos critérios baseados nas tensões (MAXPS, MAXS e QUADS) usaram-se os valores das propriedades  $\sigma_{m\acute{a}x}$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  do Araldite<sup>®</sup> AV138, enquanto para os critérios de deformação (MAXPE, MAXE e QUADE) foram usados os valores de  $\varepsilon_{m\acute{a}x}$ ,  $\varepsilon_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$ .

#### 3.3.2.1.2 Araldite<sup>®</sup> 2015

Tal como sucedeu para o Araldite<sup>®</sup> AV138, para a lei de degradação linear das juntas coladas com o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores das propriedades presentes na Tabela 21 conforme o critério a usar. Os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão ( $\sigma_{m\acute{a}x}$  e  $t_s^0$ ) são inferiores aos do Araldite<sup>®</sup> 2015, enquanto para os critérios de deformação os valores das propriedades ( $\varepsilon_{m\acute{a}x}$  e  $\varepsilon_s^0$ ) aumentam.

Tabela 20 – Parâmetros utilizados para a análise MEFE para o adesivo Araldite® 2015

$E$ [MPa]	1850	$G_{IC}$ [N/mm]	0,43
$G$ [MPa]	650	$G_{IIC}$ [N/mm]	4,7
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	21,63	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	4,77
$t_n^0$ [MPa]	21,63	$\epsilon_n^0$ [%]	4,77
$t_s^0$ [MPa]	17,9	$\epsilon_s^0$ [%]	43,9

### 3.3.2.1.3 Sikaforce® 7888

No Sikaforce® 7888 verifica-se que os valores das propriedades usadas nos critérios de deformação são bem mais elevados. As propriedades avançadas deste adesivo permitem que este possua valores mais elevados das propriedades para os critérios de tensão. Estas propriedades e respectivos valores estão presentes na Tabela 21.

Tabela 21 – Parâmetros utilizados para a análise MEFE para o adesivo Sikaforce® 7888

$E$ [MPa]	1890	$G_{IC}$ [N/mm]	1,18
$G$ [MPa]	710	$G_{IIC}$ [N/mm]	8,72
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	28,60	$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	43,0
$t_n^0$ [MPa]	28,60	$\epsilon_n^0$ [%]	43,0
$t_s^0$ [MPa]	20	$\epsilon_s^0$ [%]	100

### 3.3.3 Previsão da resistência

Embora a propagação de dano em modo misto nas juntas seja uma limitação intrínseca à utilização do MEFE, este foi usado para estudar o comportamento das juntas, no sentido de aferir as potencialidades deste método. Em relação aos critérios de iniciação de dano, conforme já referido estes baseiam-se em tensões ou deformações para a sua avaliação e, como tal, prevê-se que uma das principais desvantagens que apresenta seja a dependência do refinamento da malha [69]. Relativamente aos critérios MAXPE e MAXPS, estes baseiam-se apenas na utilização de um parâmetro (deformações e tensões principais máximas, respectivamente), o que não é representativo do processo de fractura de camadas adesivas finas, devido ao efeito condicionante imposto pelos aderentes rígidos na proximidade da fenda [12]. De facto, ao analisar o processo de fractura em juntas adesivas, deve ser simultaneamente considerado o comportamento à tracção e ao corte, de forma a

originar o aparecimento e a propagação de dano em modo misto. Durante a propagação segundo estes dois critérios, a fenda segue uma direcção ortogonal da direcção de tensão/deformação principal na extremidade da fenda [113]. No trabalho [80] verificou-se que ambos os critérios não são os mais adequados para juntas adesivas com propagação de fenda em modo misto, pois as condições impostas em modo misto podem levar ao crescimento de fendas até à interface entre o adesivo e o aderente e respectiva propagação para o interior dos aderentes, não reflectindo desta forma o comportamento real de JSS. Desta forma, o MEF torna-se viável em ligações adesivas para identificar o local de iniciação do dano e para prever as respectivas cargas o que, consoante as características do adesivo, pode ou não ser um método aproximado para previsão da resistência das juntas. No entanto, não é tida em consideração a possibilidade de crescimento do dano em modo misto ou ao longo das interfaces entre materiais diferentes.

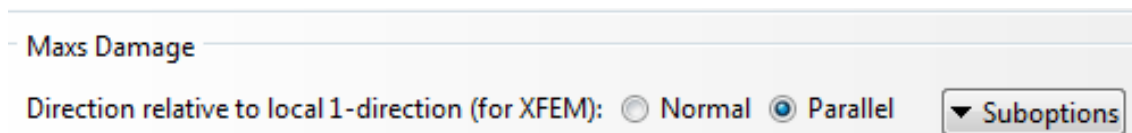


Figura 52 – Selecção da direcção de propagação da fenda para o critério MAXS

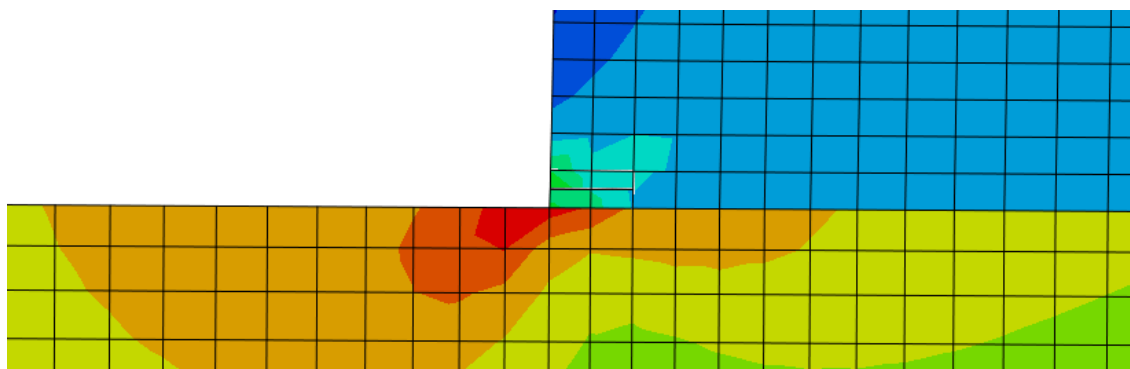


Figura 53 – Direcção de propagação da fenda na junta adesiva

Ao contrário destes dois critérios, os critérios MAXS, MAXE, QUADS e QUADE permitem a escolha da direcção de crescimento do dano, entre normal e paralela à direcção local 1 e 2 dos elementos finitos enriquecidos que compreendem o adesivo, o que nos modelos numéricos corresponde a uma propagação horizontal (no alinhamento da camada adesiva) ou vertical. No *software* ABAQUS®, dada a disposição dos elementos finitos, é possível escolher a direcção de crescimento, como consta na Figura 52.

Para estes 4 critérios, a direcção de propagação da fenda escolhida é paralela à direcção da camada do adesivo, como se visualiza na Figura 53. Escolheu-se esta direcção numa tentativa de modelar o crescimento da fenda ao longo da camada adesiva.

Apesar da possibilidade de induzir a propagação de fendas longitudinais, devido à propagação de dano predominantemente em corte, grande deflexão transversal e associadas rotações da camada adesiva, não foi possível modelar a propagação de fenda. Esta impossibilidade está relacionada a grandes dificuldades de convergência, mesmo após a aplicação de todas as ferramentas disponíveis no *software* [68].

Desta forma, para os seis critérios de iniciação de dano, a previsão da resistência de juntas pelo MEF limita-se a associar o  $P_{máx}$  ao ponto de iniciação da fenda. No trabalho [80], que diz respeito a JSS e dupla unidas por adesivos frágeis, foi realizado um estudo da influência da malha nos resultados obtidos, e constatou-se que a utilização de uma dimensão dos EF na camada de adesivo com o valor de  $t_A$ , fornece uma estimativa aproximada de  $P_{máx}$ . Neste trabalho, foi então seleccionada uma malha de 0,2 mm para os elementos finitos enriquecidos representativos da camada de adesivo. Os resultados mostram um comportamento distinto entre os critérios baseados em tensões e deformações, com os primeiros a subestimarem de forma significativa os valores obtidos experimentalmente de  $P_{máx}$ . As variações percentuais nestes casos são muito elevadas, atingindo uma variação máxima de 93,8% para o MAXPS (Figura 54 (a)), 93,2% para o MAXS (Figura 54 (b)) e 93,7% para o critério QUADS (Figura 54 (c)).

Esta grande diferença deve-se à existência da singularidade que faz com que as tensões limite dos adesivos sejam alcançadas muito rapidamente durante o processo de ensaio de tracção. Estes resultados são consistentes com trabalhos anteriores [80], onde os critérios baseados nas deformações demonstraram ser mais rigorosos do que os critérios baseados em tensões. Desta forma, apenas os critérios baseados nas deformações (MAXE, MAXPE e QUADE) são usados neste trabalho para prever a resistência das juntas adesivas. Para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, os resultados obtidos por estes critérios também diferem largamente dos obtidos experimentalmente, isto porque em situações em que se empreguem adesivos muito dúcteis os critérios não são viáveis. De facto, os valores dos resultados obtidos superam até cinco vezes os resultados obtidos experimentalmente.



## Previsão da Resistência

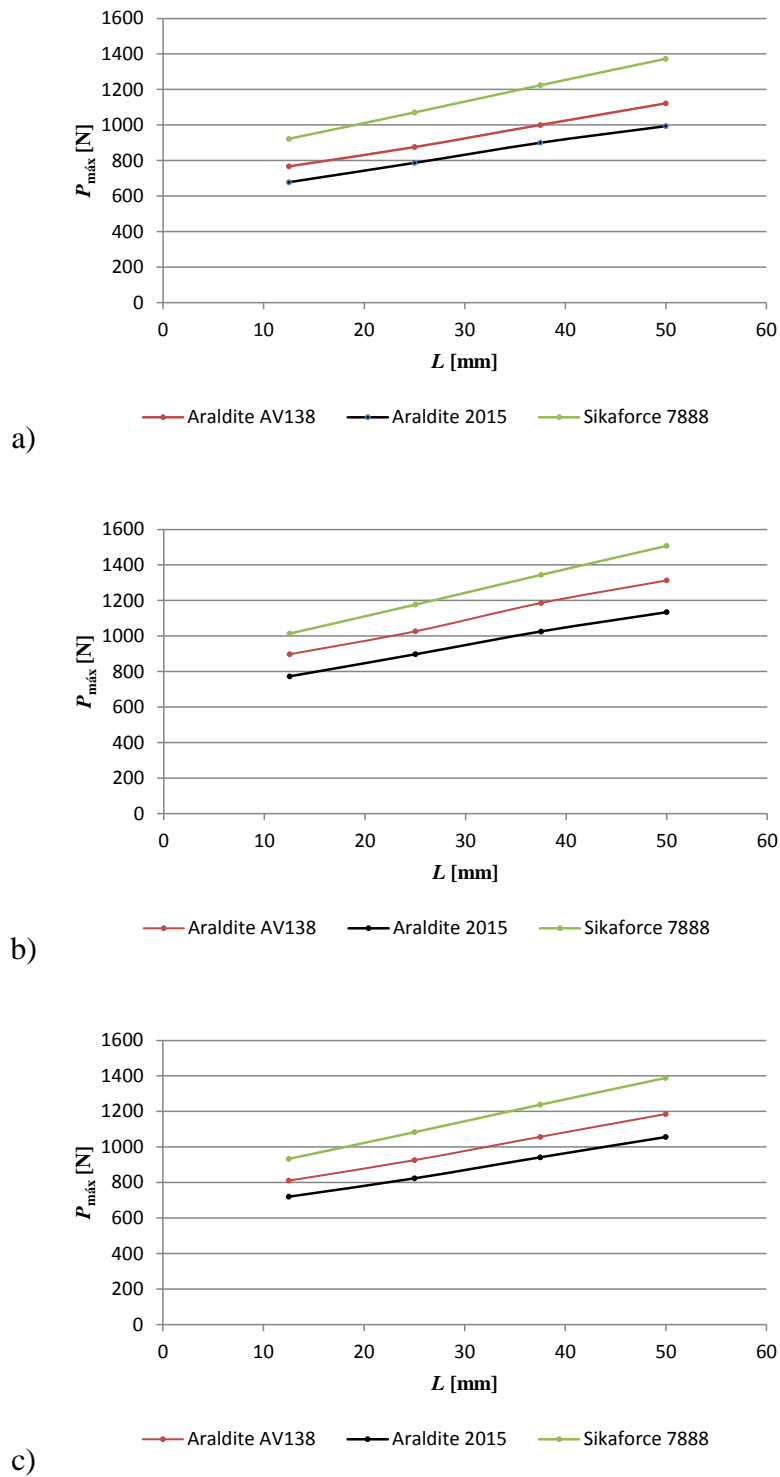


Figura 54 – Variação de  $P_{\text{máx}}$  em função de  $L$  para os critérios MAXPS (a), MAXS (b) e QUADS

(c)

Na Figura 55 é feita uma comparação dos resultados obtidos pelo MEFE com os experimentais pelos critérios MAXPE, MAXE e QUADE para as juntas coladas com os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e Araldite<sup>®</sup> 2015.

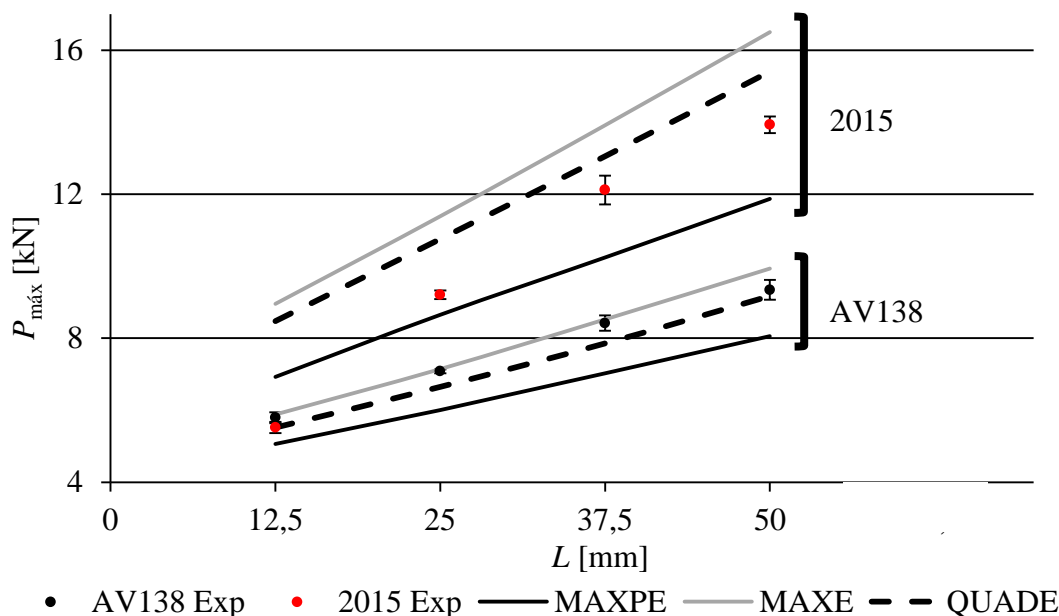


Figura 55 – Comparação dos resultados experimentais com os resultados obtidos pelo MEF para as juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015

Para estes adesivos, especialmente o Araldite® AV138, a carga de iniciação de fenda é um indicador aproximado de  $P_{máx}$ . A diferença máxima de  $P_{máx}$  entre os resultados experimentais com os obtidos pelo MEF para o adesivo Araldite® AV138 é de 16,6% para o critério MAXPE, 6,33% para o critério MAXE e 6,67% para o critério QUADE. Para o adesivo Araldite® 2015 a diferença é mais acentuada, cerca de 25,4% para o critério MAXPE, 62,1% para o critério MAXE e 53,5% para o critério QUADE. No entanto, para o Araldite® 2015, excluindo os resultados obtidos para  $L=12,5$  mm consegue-se melhorar substancialmente a aproximação obtida pelo MEF. Os resultados obtidos mostram que, para adesivos frágeis como o Araldite® AV138, a técnica adoptada é bastante precisa para simular o comportamento real das juntas adesivas. Para adesivos que possuem alguma ductilidade, como o Araldite® 2015, o MEF apresenta alguma precisão e para o caso do Sikaforce® 7888, em que a ductilidade é muito elevada, a avaliação da resistência da junta por este método não é recomendada.

Para ter uma noção do efeito real causado pela variação do refinamento da malha nos valores de  $P_{máx}$ , foi realizado um estudo que envolve os três critérios MAXPE, MAXE e QUADE para o adesivo Araldite® AV138 (adesivo frágil) e para o Sikaforce® 7888 (adesivo dúctil). O refinamento da malha nas JSS originou elementos do adesivo de

tamanho entre 0,02, 0,04, 0,1 e 0,2 mm. Na Figura 56 é feita uma demonstração da variação do refinamento da malha, onde as linhas a vermelho limitam a zona adesiva.

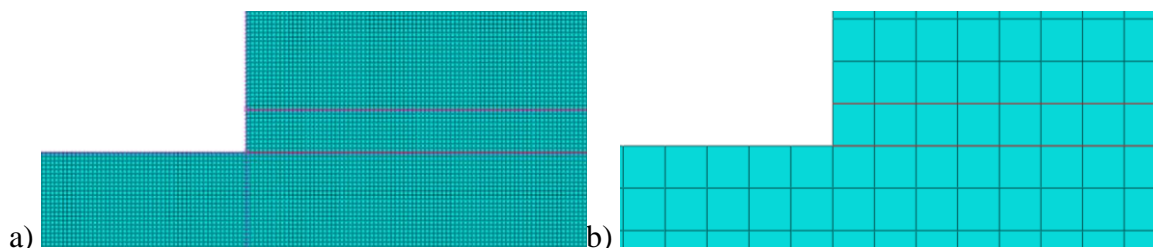


Figura 56 – Malha com elementos de dimensão 0,02 (a) e 0,2 mm (b)

Conforme o tipo de critério e tipo de adesivo, os deslocamentos impostos na extremidade da junta variam, sendo estes mais elevados para o adesivo mais dúctil. Na Tabela 22 constata-se esta variação de deslocamentos aplicados.

Tabela 22 – Variação dos deslocamentos aplicados com o refinamento da malha para os critérios baseados em deformações

	Tamanho do elemento [mm]	MEFE	
		$\delta$ Araldite <sup>®</sup> AV138	$\delta$ Sikaforce <sup>®</sup> 7888
MAXE	0,02/0,04/0,1/0,2	0,2	8
MAXPE	0,02/0,04/0,1/0,2	0,2	1,5
QUADE	0,02/0,04/0,1/0,2	1	8

Na Figura 57 visualiza-se os resultados do referido estudo para  $L=12,5$  mm e para os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e Sikaforce<sup>®</sup> 7888, na qual é feita uma comparação entre os diferentes critérios da estimativa de  $P_{m\acute{a}x}$  para cada um dos adesivos variando as dimensões da malha dos elementos enriquecidos representativos do adesivo.

Observando os resultados obtidos, constata-se que para os critérios baseados nas tensões quanto maior o tamanho da malha maior é o valor estimado de  $P_{m\acute{a}x}$ . Para o Araldite<sup>®</sup> AV138 a precisão é superior para o tamanho da malha de 0,2 mm. Isto sucede com praticamente todos os adesivos frágeis [80]. Para juntas adesivas coladas com o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, a precisão é mais reduzida e observou-se que a diferença para os valores experimentais aumenta com a ductilidade do adesivo.

## Previsão da Resistência

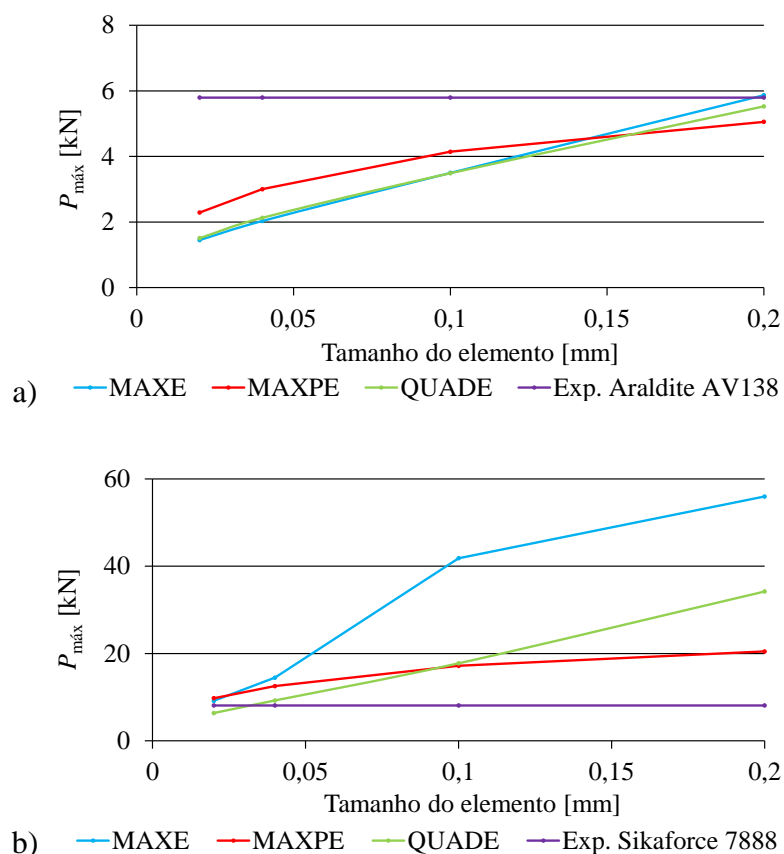


Figura 57 – Efeito do refinamento da malha pelos critérios MAXPE, MAXE e QUADE do MEFE na previsão de  $P_{m\acute{a}x}$  para as juntas coladas com os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 (a) e Sikaforce<sup>®</sup> 7888 (b)

Para além desse estudo, foi realizada uma análise idêntica para os critérios baseados em tensões que envolve os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 e Sikaforce<sup>®</sup> 7888. Nestes critérios os deslocamentos aplicados são constantes para cada tipo de adesivo, como se verifica na Tabela 23.

Tabela 23 – Variação dos deslocamentos aplicados com o refinamento da malha para os critérios baseados em tensões

	<b>MEFE</b>		
	Tamanho do elemento [mm]	$\delta$ Araldite <sup>®</sup> AV138	$\delta$ Sikaforce <sup>®</sup> 7888
MAXS	0,02/0,04/0,1/0,2	0,2	1,5
MAXPS	0,02/0,04/0,1/0,2	0,2	1,5
QUADS	0,02/0,04/0,1/0,2	0,2	1,5

Na Figura 58 é feita uma comparação entre os diferentes critérios para cada um dos adesivos variando as dimensões da malha.

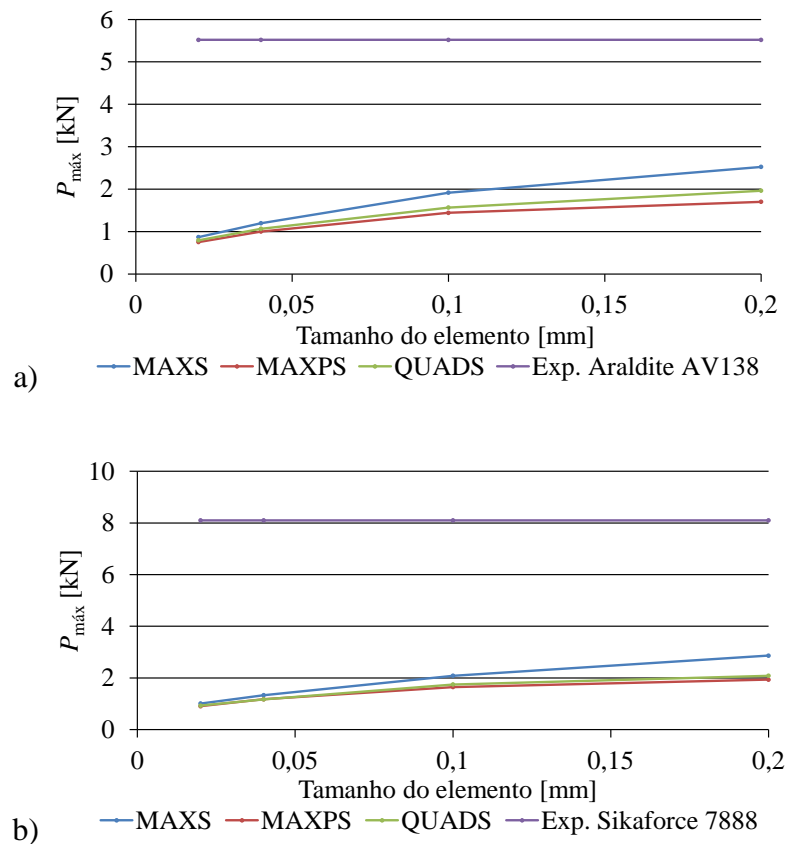


Figura 58 – Efeito do refinamento da malha pelos critérios MAXPS, MAXS e QUADS do MEFE na previsão de  $P_{m\acute{a}x}$  para as juntas coladas com os adesivos Araldite<sup>®</sup> AV138 (a) e Sikaforce<sup>®</sup> 7888 (b)

Tal como para o estudo dos critérios baseados em tensões, nestes critérios o aumento do tamanho dos elementos da malha gera um aumento de  $P_{m\acute{a}x}$ . Conclui-se que para adesivos dúcteis não existe tanta precisão, embora a diferença em valor absoluto não seja tão elevada como nos critérios baseados em deformações.



# 4 Conclusões

Este trabalho teve como objectivo principal verificar a adequação de duas ferramentas numéricas avançadas (MDC e MEFE) na previsão de resistência de juntas adesivas coladas com adesivos de diferentes características de resistência e ductilidade. Para o efeito, consideraram-se JSS com substratos de alumínio, com valores de  $L$  diferentes. Os três adesivos considerados variam desde um comportamento rígido e frágil (Araldite® AV138), passando por um adesivo com menor resistência mas ductilidade moderada (Araldite® 2015) até um adesivo de alta resistência e ductilidade (Sikaforce® 7888). Outro objectivo passa pela obtenção de resultados que permitam a análise comparativa dos diferentes tipos de adesivos em junta adesiva e a selecção do tipo de adesivo mais adequado a utilizar em JSS para diferentes configurações de junta.

Após a realização dos ensaios experimentais verificou-se que o aumento da  $P_{\text{máx}}$  com  $L$  é bastante dependente do tipo de adesivo usado. Comparativamente aos outros dois adesivos, o aumento de  $P_{\text{máx}}$  para o adesivo Araldite® AV138 é reduzido, devido à sua fragilidade. Para  $L=12,5$  mm este adesivo apresentou um valor de  $P_{\text{máx}}$  ligeiramente superior ao do Araldite® 2015 pois, para valores de  $L$  reduzidos, as distribuições de tensões têm gradientes reduzidos ao longo da camada do adesivo. Desta forma, o adesivo com maior resistência, embora frágil, apresentou maior resistência do que o adesivo mais dúctil, mas com resistência inferior. No entanto, apesar de ter uma resistência inferior ao do adesivo Araldite® AV138, o Araldite® 2015 possui ductilidade moderada, que o torna capaz de suportar cargas superiores para valores de  $L$  acima de 12,5 mm. Assim, com o aumento de  $L$ , observou-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  mais notório para o Araldite® 2015, porque nestas condições as distribuições de tensões passam a apresentar maiores gradientes de tensões. Os valores de  $P_{\text{máx}}$  do adesivo Sikaforce® 7888 são bastante superiores aos restantes. Por ser um adesivo que combina propriedades de resistência dos epóxidos com a ductilidade

dos poliuretanos, este adesivo é mais favorável para valores de  $L$  tanto reduzidos (devido à resistência mecânica) como elevados (devido à ductilidade).

Na previsão da resistência das juntas, foram testados os métodos MDC e MEFE. Um estudo inicial das distribuições de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  na camada de adesivo por elementos finitos permitiu uma justificação detalhada do comportamento dos adesivos. A modelação por MDC com uma lei de dano triangular mostrou ser bastante precisa para juntas onde se empregue adesivos frágeis e moderadamente dúcteis. Para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, a lei de dano triangular não revelou ser a mais adequada devido à grande ductilidade do adesivo, o que resultou numa subestimação da resistência das juntas. O erro máximo existente foi de 9,8% para o Araldite<sup>®</sup> AV138, de 7,7% para o Araldite<sup>®</sup> 2015 e 19,7% para o Sikaforce<sup>®</sup> 7888.

O estudo realizado sobre a dependência da malha neste método revelou que esta ferramenta numérica é bastante estável independentemente do tamanho da malha, devido ao facto de a rotura ser governada por parâmetros energéticos. Apesar de o desvio máximo de  $P_{\text{máx}} / \text{média}$  ser bastante reduzido, este é superior para o adesivo mais frágil (Araldite<sup>®</sup> AV138), com cerca de 0,33%. Para o Sikaforce<sup>®</sup> 7888 o desvio é de 0,06%, cerca de cinco vezes mais reduzido.

Por sua vez, a análise pelo MEFE revelou que a modelação da propagação do dano não é possível por causa de a rotura ocorrer predominante em modo de corte, o que faz com problemas numéricos de convergência associados impossibilitem a propagação de dano. Devido a esta limitação, a resistência da junta foi aproximada à carga corresponde à iniciação da fenda usando diversos critérios baseados em tensões e deformações limites. Foi considerado este procedimento com base em evidências anteriores de que esta metodologia permite obter valores aproximados desde que se utilize um tamanho do elemento do adesivo igual a  $t_A$ .

Os resultados obtidos mostraram que os critérios baseados em tensões subestimaram em larga medida os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}$ , o que mostra que estes não são adequados na previsão da resistência pelo MEFE. As variações percentuais relativamente aos valores experimentais são muito elevadas, atingindo uma variação máxima de 93,8% para o MAXPS, 93,2% para o MAXS e 93,7% para o critério QUADS. Por sua vez, os critérios baseados em deformações apresentam valores de  $P_{\text{máx}}$  aproximados para adesivos frágeis e



com alguma ductilidade. A diferença máxima de  $P_{\text{máx}}$  entre os resultados experimentais com os obtidos pelo MEFE para o adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138 é de 16,6% para o critério MAXPE, 6,33% para MAXE e 6,67% para o QUADE. Para o adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015 a diferença é mais acentuada, de cerca de 25,4% para o critério MAXPE, 62,1% para o MAXE e 53,5% para o QUADE. Para adesivos muito dúcteis (Sikaforce<sup>®</sup> 7888), os critérios não são adequados já que se observaram valores superiores em cerca de cinco vezes relativamente aos experimentais. O estudo realizado sobre a dependência da malha confirmou que  $P_{\text{máx}}$  varia significativamente com a mudança do refinamento da malha, sendo este factor uma limitação deste método.

Como resultado deste trabalho, pode-se concluir que foi possível avaliar em pormenor as potencialidades destas duas ferramentas numéricas na avaliação da resistência das juntas e proporcionar assim uma indicação sobre o comportamento de diferentes adesivos em JSS.

Como sugestões para trabalhos futuros, refere-se o uso de diferentes métodos numéricos aos utilizados neste trabalho. Em vez de uma lei triangular para o adesivo Sikaforce<sup>®</sup> 7888, poderia ser usada uma lei trapezoidal. 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 Documentais*

1. DeVries KL, Adams DO. Mechanical testing of adhesive joints. In: Pocius AV, Dillard DA (Editors). Adhesion Science and Engineering – I: The mechanics of adhesion. Elsevier, Amsterdam, 2002.
2. Pinto AMG. Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos. Tese Doutorado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2007.
3. Petrie EM. Handbook of adhesives and sealants. McGraw.Hill, New York, 2000.
4. Dilger K. Automobiles. In: Adams RD (editor). Adhesive bonding - Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2005.
5. Hentinen M. Boats and marine. In: Adams RD (editor). Adhesive bonding - Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2005.
6. Martín-Martínez JM. Shoe industry. In: Adams RD (editor). Adhesive bonding - Science, technology and applications. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2005.
7. Pate KD. Applications os adhesives in aerospace. In: Pocius AV, Chaudhury M (Editors). Adhesion Science and Engineering – II: Surfaces, Chemistry & Applications. Elsevier, Amsterdam, 2002.
8. da Silva LFM, Magalhães AG, Moura MFSF. Juntas adesivas estruturais. Publindústria, Porto, 2007.
9. 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.
10. da Silva LFM, Adams RD, Gibbs M. Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high temperature adhesives. Int J Adhes Adhes 24, 2004:69-83.
11. Adams RD, Comyn J, Wake WC, Structural adhesive joints in engineering. 2nd edn. Chapman & Hall, London, 1997.

12. 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.
13. da Silva LFM, Rodrigues T, Figueiredo MAV, de Moura M, Chousal JAG. Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength. *J Adhesion* 82, 2006:1091–1115.
14. Campilho RDSG, da Silva LFM. Joint design in natural fibre composites. In: Campilho RDSG (editor). *Natural fibre composites*. CRC Press. In press. 2014.
15. da Silva LFM, Adams RD. Effect of temperature on the mechanical and bonding properties of a carbon reinforced bismaleimide. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers*, 2008.
16. Crocombe AD. Global yielding as a failure criteria for bonded joints. *Int J Adhes Adhes* 9, 1989:145–153.
17. Volkersen O. Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonquerschnitten. *Luftfahrtforschung* 15, 1938:41–47.
18. Goland M, Reissner E. The stresses in cemented joints. *J Appl Mech* 66, 1944: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. *J Adhes Sci Technol* 15, 2001:1091–1101.
20. Adams RD, Peppiatt NA. Stress analysis of adhesive-bonded lap joints. *J Strain Anal* 9, 1974:185–196.
21. Comyn J. What are adhesives and sealants and how do they work? In: Adams RD (editor). *Adhesive bonding - Science, technology and applications*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2005.
22. Silva LFM, Magalhães AG, Moura MFSF. *Juntas adesivas estruturais*. Publindústria, Porto, 2007.
23. Fay PA. History of adhesive bonding. In: Adams RD (editor). *Adhesive bonding - Science, technology and applications*. Woodhead Publishing Limited, Cambridge England, 2005.
24. Moura MFSF, Morais AB, Magalhães AG. *Materiais Compósitos – Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. Publindústria, Porto, 2005:357:360.
25. Zhao X, Adams RD, da Silva LFM. Single lap joints with rounded adherend corners: Stress and strain analysis. *J. Adhes. Sci. Technol.* 25, 2011:819–836.

26. Adams RD, Harris JA. The influence of local geometry on the strength of adhesive joints. *Int.J. Adhes. Adhes.* 7, 1987:69–80.
27. Zhao X, Adams RD, da Silva LFM, Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction. *J. Adhes. Sci. Technol.* 25, 2011:837–856.
28. Ikegami K, Takeshita T, Matsuo K, Sugibayashi T. Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metal. *Int. J. Adhes. Adhes.* 10, 1990:199–206.
29. Adams RD, Harris JA. Strength prediction of bonded single lap joints by nonlinear finite element methods. *Int J Adhes Adhes* 4, 1984:65–78.
30. 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. *Int. J. Adhes. Adhes.* 29, 2009:621–632.
31. da Silva LFM, das Neves PJC, Adams RD, Spelt JK. Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: literature survey. *Int. J. Adhes. Adhes.* 29, 2009:319–330.
32. Clarke JD, Mcgregor IJ. Ultimate tensile stress over a zone: a new failure criterion for adhesive joints. *J. Adhes.* 42, 1993:227–245.
33. Williams ML. The stresses around a fault or crack in dissimilar media. *Bull. Seism. Soc. Am.*49, 1959:199–204.
34. Hutchinson JW. Singular behavior at the end of a tensile crack in a hardening material. *J. Mech.Phys. Solids* 16, 1968:13–31.
35. Rice JR, Rosengren GF. Plane strain deformation near a crack tip in a powerlaw hardening material. *J. Mech. Phys. Solids* 16, 1968:1–12.
36. Dillard DA, Singh HK, Pohlit DJ. Observations of decreased fracture toughness for mixed mode fracture testing of adhesively bonded joints. *J. Adhes. Sci. Technol.* 23, 2009:515–1530.
37. Xu JQ, Liu YH, Wang XG. Numerical methods for the determination of multiple stress singularities and related stress intensity coefficients. *Eng. Fract. Mech.* 63, 1999:775–790.
38. Groth HL. Stress singularities and fracture at interface corners in bonded joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 8, 1988:107–113.
39. Chen Z, Adams RD, da Silva LFM. The use of the J-integral to analyse adhesive bonds with and without a crack. *Int. J. Adhes. Adhes.* 31, 2011:48–55.

40. 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. *Int. J. Solids Struct.* 47, 2010:2445–2458.
41. Yang QD, Thouless MD. Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints. *Int. J. Fract.* 110, 2001:175–187.
42. Campilho RDSG, Pinto AMG, Banea MD, da Silva LFM. Optimization study of hybrid spot welded-bonded single-lap joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 37,2012:86-95.
43. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Compos. Sci. Technol.* 65, 2005:1948–1958.
44. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS, Morais JJJ. Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model. *J. Adhes. Sci. Technol.* 22, 2008:1565–1591.
45. Magalhães AG, de Moura MFSF, Gonçalves JPM. Evaluation of stress concentration effects in single-lap bonded joints of laminate composite materials. *Int. J. Adhes. Adhes.* 25, 2005:313–319.
46. Pinto AMG, Magalhães AG, Campilho RDSG, de Moura MFSF, Baptista APM. Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive. *J. Adhes.* 85, 2009:351–376.
47. Alfano G, Crisfield MA. Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *Int. J. Numer. Methods Eng.* 50, 2001:1701–1736.
48. Allix O, Corigliano A. Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens. *Int. J. Fract.* 77, 1996:111–140.
49. Chandra N, Li H, Shet C, Ghonem H. Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces. *Int. J. Solids Struct.* 39, 2002:2827–2855.
50. Chen J. Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models. *J. Thermopl. Compos. Mater.* 15, 2002:429–441.
51. Kafkalidis MS, Thouless MD. The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints. *Int. J. Solids Struct.* 39, 2002:4367–4383.
52. Liljedahl CDM, Crocombe AD, Wahab MA, Ashcroft IA. Damage modelling of adhesively bonded joints. *Int. J. Fract.* 141, 2006:147–161.

53. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *Int. J. Solids Struct.* 45, 2008:1497–1512.
54. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Domingues JJMS. Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes. *Int. J. Adhes. Adhes.* 29, 2009:195–205.
55. Khoramishad H, Crocombe AD, Katnam KB, Ashcroft IA. Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model. *Int. J. Fatigue* 32, 2010:1146–1158.
56. Daudeville L, Ladeveze P. A damage mechanics tool for laminate delamination. *Compos. Struct.* 25, 1993:547–555.
57. Kattan PI, Voyiadjis GZ. *Damage Mechanics with Finite Elements*. Springer, Heidelberg, 2005.
58. Raghavan PGS. A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial de-bonding. *Mech. Mater.* 37, 2005:955–977.
59. Wahab MMA, Ashcroft IA, Crocombe AD, Shaw SJ. Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics. *J. Adhes. Sci. Technol.* 15, 2001:763–781.
60. Imanaka M, Hamano T, Morimoto A, Ashino R, Kimoto M. Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive. *J. Adhes. Sci. Technol.* 17, 2003:981–994.
61. Bhattacharya B, Ellingwood B. Continuum damage mechanics analysis of fatigue crack initiation. *Int. J. Fatigue* 20, 1998:631–639.
62. Shenoy V, Ashcroft IA, Critchlow GW, Crocombe AD. Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue. *Eng. Fract. Mech.* 77, 2010:1073–1090.
63. Chen Z, Adams RD, da Silva LFM. Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion. *Eng. Fract. Mech.* 78, 2011:990–1007.
64. Mohammadi S. *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. Blackwell Publishing, New Jersey, 2008.
65. Belytschko T, Black T. Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing. *Int. J. Fract. Mech.* 45, 1999:601–620.

66. Moës N, Dolbow J, Belytschko T. A finite element method for crack growth without remeshing. *Int. J. Numer. Meth. Eng.* 46, 1999:131–150.
67. Abaqus<sup>®</sup> Documentation. Dassault Systèmes, Vélizy-Villacoublay. 2013.
68. da Silva LFM, Campilho RDSG. *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints – Springer briefs in applied sciences and technology.* Springer, Heidelberg, 2012.
69. Campilho RDSG, Banea MD, Chaves FJP, da Silva LFM. eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I. *Comput. Mater. Sci.* 50, 2011:1543–1549.
70. He X. A review of finite element analysis of adhesively bonded joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 31, 2011:248-264.
71. Hart-Smith LJ. Adhesive bonded single lap joints, NASA Contractor Report 112235, 1973.
72. Chai H. Shear fracture. *Int. J. Fract.* 37, 1988:137-159.
73. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Barreto AMJP, Morais JJJ, Domingues JJMS. Fracture behaviour of damaged wood beams repaired with an adhesively-bonded composite patch. *Compos.: Part A – Appl. Sci.* 40, 2009:852-859.
74. Woelke PB, Shields MD, Abboud NN, Hutchinson JW. Simulations of ductile fracture in an idealized ship grounding scenario using phenomenological damage and cohesive zone models. *Comput. Mater. Sci.* 80, 2013:79-95.
75. Campilho RDSG, Banea MD, Neto JABP, da Silva LFM. Modelling of single-lap joints using cohesive zone models: effect of the cohesive parameters on the output of the simulations. *J. Adhesion* 88, 2012:513-533.
76. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Ramantani DA, Morais JJJ, Domingues JJMS. Buckling behaviour of carbon-epoxy adhesively-bonded scarf repairs. *J. Adhes. Sci. Technol.* 23, 2009:1493-1513.
77. Ridha M, Tan VBC, Tay TE. Traction-separation laws for progressive failure of a bonded scarf repair of composite panel. *Compos. Struct.* 93, 2010:1239-1245.
78. Sharafisafa M, Nazem M. Application of the distinct element method and the extended finite element method in modelling cracks and coalescence in brittle materials. *Comput. Mater. Sci.* 91, 2014:102-121.
79. Campilho RDSG, Banea MD, da Silva LFM. Tensile behaviour of a structural adhesive at high temperatures by the extended finite element method. *J. Adhesion* 89, 2013:529-547.



80. Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, da Silva LFM, de Jesus AMP. Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling. *Int. J. Adhes. Adhes.* 31, 2011:363-372.
81. Sugiman S, Crocombe AD, Ashcroft IA. Modelling the static response of unaged adhesively bonded structures. *Eng. Fract. Mech.* 98, 2013:296-314.
82. de Sousa CG. Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição simples, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Tese em curso.
83. 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. *Int. J. Adhes. Adhes.* 31, 2011:363-372.
84. Moreira RDF. Estudo de reparações adesivas pela técnica de remedo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência. Tese Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.
85. 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. *Int. J. Adhes. Adhes.* 88, 2013:513-533.
86. Neto JABP, Campilho RDSG, da Silva LFM. Parametric study of adhesive joints with composites. *Int. J. Adhes. Adhes.* 37, 2012:96–101.
87. Neto JABP. Estudo paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito. Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
88. 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.
89. Harper CA. *Handbook of Plastics, elastomers and Composites* 4th edition. McGraw Hill Companies Inc., 2004.
90. Campilho RDSG, Pinto AMG, Banea MD, Silva RF, da Silva LFM. Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry. *J. Adhes. Sci. Technol.* 25, 2011:2351-2368.
91. L.F.M. da Silva, A. Öchsner, R.D. Adams (eds.), *Handbook of Adhesion Technology*. Springer, Heidelberg, 2011.
92. Adams RD, Comyn J, Wake WC, *Structural Adhesive Joints in Engineering*, 2<sup>nd</sup> edn. Chapman & Hall, London. 1997.

93. Fernandes TAB, Campilho RDSG, Banea MD, Silva LFM. Advanced numerical techniques for adhesive selection and strength prediction in single-lap bonded joints. Submetido para publicação na revista *Computacional Materials Science* 2014.
94. Radice J, Vinson J. On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation. *Compos. Sci. Technol.* 66, 2006:2528-2547.
95. Taib AA, Boukhili R, Achiou S, Boukehili H. Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 26, 2006:237-248.
96. Campilho RDSG. Modelação da execução de reparações em materiais compósitos. Tese Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2005.
97. Campilho RDSG. Repair of composite and wood structures. Tese Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2009.
98. Vable M, Maddi JR. Boundary element analysis of adhesively bonded joints. *Int. J. Adhes. Adhes.* 26, 2006:133-144.
99. Luo Q, Tong L. Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints. *Int. J. Solids Struct.* 44, 2007:2349-2370.
100. Grant LDR, Adams RD, da Silva LFM. Experimental and numerical analysis of single lap joints for the automotive industry. *Int. J. Adhes. Adhes.* 29. 2009:405-413.
101. Davis M, Bond D. Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs. *Int. J. Adhes. Adhes.* 19, 1999:91-105.
102. Pocius AV. *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*, 2nd Edition. 83, Hanser. 2002:311 – 319.
103. Andersson T, Stigh U. The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces. *Int. J. Solids Struct.* 41, 2004:413–434.
104. Leffler K, Alfredsson KS, Stigh U. Shear behaviour of adhesive layers. *Int. J. Solids Struct.* 44, 2007:530–545.
105. Hogberg JL, Stigh U. Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer. *Eng. Fract. Mech.* 73, 2006:2541–2556.

106. 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. *Int. J. Adhes. Adhes.* 28, 2008:419–426.
107. Marques EAS, Silva LFM. Joint strength optimization of adhesively bonded patches. *Int. J. Adhes. Adhes.* 84, 2008:917–936.
108. Campilho RDSG, Moura MFSF, Ramantani DA, Morais JLL, Domingues JJMS. Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single- and double-strap repairs. *Int. J. Adhes. Adhes.* 29, 2009:678–686.
109. 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.* 50, 2013:120-126.
110. Campilho RDSG, de Moura MFSF, Ramantani DA, Morais JLL, Domingues JJMS. Buckling strength of adhesively-bonded single and double-strap repairs on carbon-epoxy structures. *Compos. Sci. Technol.* 70, 2010:371-379.
111. Campilho RDSG, Banea MD, Silva LFM. Tensile Behaviour of a structural Adhesive at High Temperatures by the extended Finite Element Method. *The Journal of Adhesion.* 89, 2013:529-547.
112. Campilho RDSG, Banea MD, Pinto AMG, Silva LFM, Jesus AMP. Strength prediction of single-and double-lap joints by standart and extended finite element modelling. *Int. J. Adhes. Adhes.* 31, 2011:363-372.
113. Moës N, Belytschko T. Extended finite element method for cohesive crack growth. *Eng. Fract. Mech.* 69, 2002:813-833.