



Simulação e validação do comportamento de juntas adesivas tubulares

DANIEL RODRIGUES BARBOSA

novembro de 2019

SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES

Daniel Rodrigues Barbosa

1120316

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



SIMULAÇÃO E VALIDAÇÃO DO COMPORTAMENTO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES

Daniel Rodrigues Barbosa

1120316

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador, INEGI

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela oportunidade que me concedeu, apoio, disponibilidade e incentivo que me prestou ao longo da realização desta dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pela oportunidade concedida para a realização desta tese e por todos os ensinamentos que me foram transmitidos ao longo da licenciatura e mestrado.

Aos meus amigos e família, em especial aos meus pais pelo apoio incansável e compreensão que me foram transmitidos.

Palavras Chave

Epóxido, Poliuretano, Juntas adesivas tubulares, Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo.

RESUMO

As uniões com ligações adesivas são um método cada vez mais utilizado na projeção e fabrico de estruturas mecânicas, por causa das vantagens significativas desta técnica em comparação com as ligações tradicionais. Entre as vantagens, destaca-se a redução de peso e possibilidade de unir diferentes materiais, incluindo compósitos, sem danificar as estruturas a ligar. Os adesivos comerciais variam desde resistentes e frágeis (por exemplo, Araldite® AV138) a menos resistentes e dúcteis (por exemplo, Araldite® 2015). Uma nova família de adesivos de poliuretano combina resistência e ductilidade (por exemplo, SikaForce® 7752).

Esta dissertação compara o desempenho à tração dos três adesivos supracitados, em juntas tubulares de alumínio (AW6082-T651), considerando a variação do comprimento de sobreposição (C_s). Esta comparação passa por elaborar uma análise numérica e um modelo físico criado e testado em laboratório. A análise numérica de modelos de dano coesivo (MDC) foi realizada para analisar as tensões de arrancamento (σ_y) e as de corte (τ_{xy}) na camada adesiva e para avaliar a capacidade MDC na previsão da resistência da junta.

No final, verifica-se que, apesar de haver uma dispersão considerável de valores máximos de rotura dos provetes testados, consegue-se provar que os valores numericamente calculados descrevem a realidade de forma precisa. Também é de salientar que as tensões de rotura obtidas experimentalmente para as juntas com o SikaForce® 7752 são superiores às calculadas numericamente, porque se utilizou uma lei coesiva triangular para modelar um adesivo marcadamente dúctil. Assim sendo, pode-se afirmar que os MDC são uma boa ferramenta para dimensionar e prever o comportamento de juntas adesivas.

KEYWORDS

Epoxy, Polyurethane, Tubular adhesive joints, Finite Element Method, Cohesive Zone Models.

ABSTRACT

Adhesive bonded joints are an increasingly used method in the design and manufacture of mechanical structures, because of the significant advantages of this technique compared to traditional bonds. Benefits include weight reduction and the ability to join different materials, including composites, without damaging the structures to be bonded. Commercial adhesives range from strong and brittle (e.g. Araldite® AV138) to less strong and ductile (e.g. Araldite® 2015). A new family of polyurethane adhesives combines strength and ductility (e.g. SikaForce® 7752).

This dissertation compares the tensile performance of the three abovementioned adhesives in aluminum tubular joints (AW6082-T651), considering the variation of the overlap length (C_s). This comparison involves elaborating a numerical analysis and a physical model created and tested in the laboratory. Numerical analysis of cohesive zone models (CZM) was performed to analyze peel (σ_y) and shear stresses (τ_{xy}) in the adhesive layer and to evaluate the CZM ability to predict joint strength.

In the end, it appears that, although there is a considerable dispersion of maximum failure values of the tested specimens, it can be proved that the numerically calculated values accurately describe reality. It should also be noted that the experimentally obtained failure strengths for the joints with the SikaForce® 7752 are higher than those calculated numerically, because a triangular cohesive law was used to model a markedly ductile adhesive. Therefore, it can be said that CZM is a good tool for design and predicting the behavior of adhesive joints.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bi-dimensional
3D	Tri-dimensional
AMFG	Adesivo de módulo funcionalmente graduado
CAX4	Elementos axi-simétricos deformáveis de 4 nós
CFG	Colagem funcionalmente graduada
CPU	<i>Central processing unit</i>
DCB	<i>Double-cantilever beam</i>
ENF	<i>End-notched flexure</i>
HRR	<i>Hutchinson-Rice-Rosengreen</i>
HSS	<i>High-speed steel</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
JTSS	Junta tubular de sobreposição simples
MATFAAG	Modelo aproximação da tensão de fadiga através do algoritmo genético
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Modelo de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
PCI	Peripheral component interconnect
PCB	<i>Printed circuit board</i>
PMMA	Polimetacrilato de metila
PVC	Policloreto de vinilo
S-N	<i>Stress-number of cycles</i> (tensão-vida)
TAST	<i>Thick adherend shear test</i>
TFVF	Técnica do fecho virtual da fenda

Lista de Unidades

$^{\circ}\text{C}$	Graus Celsius
$^{\circ}\text{F}$	Grau Farenheit
GPa	GigaPascal
kN	kiloNewton
m	metro
kPa	kiloPascal
MPa	MegaPascal
mm	milímetro
N	Newton
Pa	Pascal

Lista de Símbolos

δ	Tensão de tração
%	Porcentagem
θ_0	Rotação relativa dos aderentes na ponta da fenda
θ_p	Rotação relativa dos aderentes na linha de carga
®	Marca registada
a_0	Pré-fenda inicial
C_f	Profundidade da caixa
C_s	Comprimento de sobreposição
C_t	Comprimento total
C_{tg}	Comprimento total do substrato
D_{rel}	Diferença relativa
E	Módulo de Young
G_C	Tenacidade
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
k	Número de gerações

l	Comprimento de sobreposição
L	Comprimento de sobreposição
L_r	Posição do respiro
n	Tamanho da população
\varnothing_{eg}	Diâmetro externo do substrato exterior
\varnothing_{ep}	Diâmetro externo do substrato interior
\varnothing_{ig}	Diâmetro interno do substrato exterior
\varnothing_{ip}	Diâmetro interno do substrato interior
P	Carga
p_c	Probabilidade de transmissão
p_m	Probabilidade de mutação
$P_{máx}$	Carga máxima
P_u	Carga aplicada por unidade de largura
$P-\delta$	Força - deslocamento
t	Número de desenho das variáveis
t_A	Espessura de adesivo
x	Valor da ordenada em estudo
$\Delta P_{Máx}$	Variação de carga máxima
θ	Ângulo
δ_n^s	Deslocamento de tração de início de amaciamento
δ_s^s	Deslocamento de corte de início de amaciamento
δ_n	Deformação de tração
δ_s	Deformação ao corte.
ν	Coeficiente de Poisson
σ_{rr}	Tensão radial
σ_y	Tensão de arrancamento na direção y
σ_{zz}	Tensão axial
$\sigma_{\theta\theta}$	Tensão circunferencial
$\sigma-\varepsilon$	Tensão-Deformação

τ	Tensão de corte
τ_{rz}	Tensão de corte no plano rz
$\tau_{r\theta}$	Tensão de corte no plano r θ
τ_{xy}	Tensão de corte no plano xy
$\tau_{z\theta}$	Tensão de corte no plano z θ

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Exemplo de estrutura colada de geometria complexa (centro desportivo em Paris - França) [1]	4
Figura 2 – Ferramentas de pedra (segmentos) com adesivos de <i>Sibudu Cave</i> : (A) Segmentos com barro vermelho visível a olho nu na parte assinalada que devia estar colada(i). Imagens microscópicas do barro e resina na ferramenta (ii e iii); (B) Segmento com gorduras escuras na zona colada (i). Imagens microscópicas da gordura encontrada na ferramenta (ii-iv) [2]	9
Figura 3 - Aplicações de adesivos na indústria automóvel [11]	13
Figura 4 - Exemplos de ligações adesivas num avião [13]	13
Figura 5 - Comparação entre fuselagem de avião utilizando adesivos (à esquerda) [14] e a tradicional rebitada (à direita) [15]	14
Figura 6 - Exemplo de estrutura composta por laminado de madeira [17]	14
Figura 7 - Exemplo de reparação parcial de um dente [20]	15
Figura 8 - Aplicação de adesivo na reparação de um sapato [21]	15
Figura 9 - Processador de computador aberto [27]	16
Figura 10 - Tipos de carregamento elementar em ligação adesiva: (a.1) Esforço de Tração, (a.2) Esforço de Compressão, (b) Clivagem, (c) Esforço de Corte e (d) Arrancamento	16
Figura 11 - Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial (esquerda) e sob carregamento não axial (direita) [29]	17
Figura 12 - Distribuição da tensão de corte numa junta de sobreposição simples (JSS) [31]	18
Figura 13 - Distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento [31]	19
Figura 14 - Comparação entre adesivo frágil e tenaz [28]	19
Figura 15 - Modos de rotura em ligações adesivas [31]	20
Figura 16 - Comparação das curvas tensão de corte – deformação de corte típicas entre um adesivo frágil e um dúctil [36]	22
Figura 17 - Relação entre molhabilidade de uma superfície por um fluido e o ângulo de contacto [42]	25
Figura 18 - Influência do desalinhamento dos substratos numa junta de sobreposição simples [7]	28
Figura 19 - Representação da junta de sobreposição simples. (a) geometria estudada, (b) detalhe da zona central superior e (c) malha utilizada no estudo [48]	29
Figura 20 – Tensões de corte e de arrancamento no meio do adesivo e perto da interface adesivo-substrato para uma força aplicada de 1 MPa [48]	29
Figura 21 - Modelo e referenciais utilizados no cálculo de Nemes e Lachaud [51]	30

Figura 22 - Modelo 2D resultante do estudo de Labbé e Drouet [52]	31
Figura 23 - Diagrama de aplicação de algoritmo genético [52]	32
Figura 24 - Representação gráfica das soluções do estudo do algoritmo genético.	32
Figura 25 - Representação esquemática de uma junta tubular adesiva (a) -constituintes e (b) - elementos geométricos [47].	34
Figura 26 - Malha de elementos finitos axi-simétricos desenvolvida para o estudo parametrizado realçando em detalhe a forma de como a malha fina (na zona do adesivo) se funde com a malha mais grosseira dos substratos [47].....	34
Figura 27 – Secção e representação das variáveis da consideradas na análise de tensões de uma junta tubular de sobreposição simples [53].	35
Figura 28 - a) Configuração dos referenciais para deformações circunferenciais; b) - configuração deformada na secção axial de uma junta tubular de sobreposição simples sob o momento torsional aplicado C [53].	36
Figura 29 – Valores de Tensão de Corte máximos aplicados a uma junta tubular adesiva calculados a partir da degradação da resistência da junta à variação de temperatura com a variação do momento aplicado. (a) com IPCI9923; (b) com adesivo epóxico da Araldite® [57].	39
Figura 30 – Comparação de valores obtidos teoricamente com valores experimentais. (a) com IPCI9923; (b) com adesivo epóxico da Araldite® [57].	39
Figura 31 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [69]).....	42
Figura 32 – Modelo coesivo triangular [84, 85]	43
Figura 33 – Geometria do provete DCB [98].....	45
Figura 34 – Geometria do provete ENF [98].	46
Figura 35 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [121].	51
Figura 36 – Curvas tensão-deformação ($\sigma-\varepsilon$) da liga de alumínio AW6082-T651 [124].....	56
Figura 37 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ do adesivo Araldite® AV138 [124]	56
Figura 38 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ do adesivo Araldite® 2015 [126].....	58
Figura 39 – Curvas $\sigma-\varepsilon$ do adesivo SikaForce® 7752 [44].....	59
Figura 40 - Desenho de definição da geometria da junta [elaboração própria].	60
Figura 41 - Comparador analógico de Mitutoyo® da série 511 [129].	62
Figura 42 - Paquímetro analógico da Mitutoyo® da série 532 [130].	62
Figura 43 - Maquinagem exterior do provete com buril de pastilhas	62

Figura 44 - Utilização de comparador fixo em suporte de íman para verificar concentricidade do aperto.	63
Figura 45 - Furo inicial com broca HSS de $\varnothing 8$ mm.	63
Figura 46 – Aumento de furo com broca HSS de $\varnothing 12$ mm.	64
Figura 47 – Aumento de furo com broca HSS de $\varnothing 16$ mm.	64
Figura 48 - Retificação de cotas utilizando buril de pastilhas.	65
Figura 49 - Facejamento do substrato utilizando o buril de pastilhas.	65
Figura 50 - Verificação da espessura da parede do substrato utilizando um paquímetro digital da marca Mitutoyo®.	66
Figura 51 - Verificação do diâmetro interior de um substrato exterior utilizando um paquímetro da marca Mitutoyo®.	66
Figura 52 - Fixação do provete na fresadora e facejamento com fresa $\varnothing 20$ mm.	67
Figura 53 - Marcação de referência nos provetes.	68
Figura 54 - Pesagem e mistura de Araldite® AV138.	68
Figura 55 - Seringa de Araldite® 2015.	69
Figura 56 - Utilização de espátulas para espalhar o adesivo.	69
Figura 57 - Medição da junta obtida. Linha de referência feita com mais 5 mm do necessário.	70
Figura 58 - Alinhamento do provete para repousar durante o processo de cura.	70
Figura 59 - Máquina Shimadzu durante os ensaios de tração dos provetes.	71
Figura 60- Curvas $P-\delta$ de Araldite® AV138 com $C_s=20$ mm.	72
Figura 61- Curvas $P-\delta$ de Araldite® AV138 com $C_s=40$ mm.	73
Figura 62 - Curvas $P-\delta$ de Araldite® 2015 com $C_s=20$ mm.	74
Figura 63 - Curvas $P-\delta$ de Araldite® 2015 com $C_s=40$ mm.	74
Figura 64 - Curvas $P-\delta$ de SikaForce® 7752 com $C_s=20$ mm.	75
Figura 65 - Curvas $P-\delta$ de SikaForce® 7752 com $C_s=40$ mm.	76
Figura 66- Roturas registadas nos provetes de Araldite® AV138 com $C_s=20$ mm. Provede 2 apresenta rotura pelo substrato, os restantes rotura coesiva.	77
Figura 67 - Roturas registadas nos provetes de Araldite® AV138 com $C_s=40$ mm. Provedes 1 e 5 apresentam rotura pelo substrato, os restantes rotura coesiva.	77
Figura 68 - Roturas registadas nos provetes de Araldite® 2015 com $C_s=20$ mm. Provedes apresentam rotura coesiva.	78

Figura 69 - Roturas registadas nos provetes de Araldite® 2015 com $C_s=40$ mm. Provetes apresentam rotura coesiva.	78
Figura 70 - Roturas registadas nos provetes de SikaForce® 7752 com $C_s=20$ mm. Provetes apresentam rotura coesiva.	79
Figura 71 - Roturas registadas nos provetes de SikaForce® 7752 com $C_s=40$ mm. Provetes apresentam rotura coesiva.	79
Figura 72- $P_{m\acute{a}x}$ de cada configuração de provete.	80
Figura 73 - Modelos CAD de estudo de elementos finitos: a) modelo tridimensional reduzido; b) modelo bidimensional axi-simétrico equivalente [fotograma extraído do <i>software</i> Simulia ABAQUS®].	81
Figura 74 - Comparativo entre simulação 2D e simulação 3D (depois de corrigir valores de deslocamento).	82
Figura 75 - Escolha do tipo de elementos constituintes para estudo por MDC no ABAQUS®.	83
Figura 76 - Desenho bidimensional da junta em estudo no <i>software</i> ABAQUS® com $C_s=20$ mm.	84
Figura 77 - Representação das linhas de partição do modelo no ABAQUS®.	84
Figura 78 - Modelo geométrico de estudo no MDC do ABAQUS®.	84
Figura 79 - Menu de definição de incrementos no ABAQUS®.	85
Figura 80 - Menu do ABAQUS® par a definição das condições fronteira.	86
Figura 81 - Malha de MEF na zona de sobreposição do modelo criado em ABAQUS®.	87
Figura 82 - Exemplo de gradiente de cores para representar níveis de tensões no interior de uma junta criado pelo ABAQUS®.	88
Figura 83 – Lei coesiva triangular [135].	89
Figura 84 – MDC triangular [127].	89
Figura 85 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® AV138.	94
Figura 86 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® 2015.	94
Figura 87 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares com o SikaForce® 7752.	95
Figura 88 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® AV138.	96
Figura 89 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® 2015.	96
Figura 90 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares com o SikaForce® 7752.	97
Figura 91 – Gráficos comparativos de valores numéricos com práticos para o adesivo Araldite® AV138: (a) $C_s=20$ mm; (b) $C_s=40$ mm.	98
Figura 92 – Gráficos comparativos de valores numéricos com práticos para o adesivo Araldite® 2015: (a) $C_s=20$ mm; (b) $C_s=40$ mm.	98

Figura 93 – Gráficos comparativos de valores numéricos com práticos para o adesivo SikaForce® 2015: (a) $C_s=20$ mm; (b) $C_s=40$ mm.	98
--	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Ordem cronológica do aparecimento dos adesivos (adaptado de [6]).....	10
Tabela 2 - Quadro resumo das principais vantagens desvantagem da aplicação de juntas adesivas (adaptado de[7]).	12
Tabela 3 - Classificação de adesivos segundo a função (elaboração adaptada [31]).	21
Tabela 4 - Tipos de juntas adesivas (adaptado de [28]).	27
Tabela 5 - Parâmetros do MATAAG utilizado no estudo de Canyurt adaptado de [54]).	37
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [127]	57
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [126]	58
Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [44].....	59
Tabela 9 – Designação das cotas dos provetes e respetivos valores (em mm).....	60
Tabela 10 - Relações mássicas de mistura dos adesivos utilizados e quantidades utilizadas.....	69
Tabela 11 - Valores máximos de força ($P_{máx}$) [N] registados para cada provete de Araldite® AV138.	73
Tabela 12 - Valores máximos de força ($P_{máx}$) [N] registados para cada provete de Araldite® 2015.	75
Tabela 13 - Valores máximos de força ($P_{máx}$) [N] registados para cada provete de SikaForce® 7752.....	76
Tabela 14 - $P_{máx}$ Méd (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{Máx}$ [%]) em função de C_s para as seis configurações de juntas estudadas.....	80
Tabela 15 - Deslocamento a impor a cada adesivo calculado em função de C_s	86
Tabela 16 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [122].	91
Tabela 17 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [141],.....	92
Tabela 18 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [44]	92
Tabela 19 - Valores máximos para os adesivos estudados com $C_s=20$ mm e 40 mm.....	95
Tabela 20 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os adesivos estudados.	97
Tabela 21 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para cada adesivo estudado em função de C_s	99
Tabela 22 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ [N] experimentais e numéricos em função de cada adesivo e C_s	101

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Metodologia	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas.....	11
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas.....	12
2.1.3	Esforços em juntas adesivas.....	16
2.1.3.1	Esforço de tração/compressão.....	17
2.1.3.2	Corte.....	18
2.1.3.3	Clivagem	18
2.1.3.4	Arrancamento.....	19
2.1.4	Modos de rotura	20
2.1.5	Adesivos estruturais.....	21
2.1.5.1	Adesivos fenólicos	23
2.1.5.2	Adesivos acrílicos.....	23
2.1.5.3	Adesivos de poliuretano	25
2.1.5.4	Adesivos de poliimida	25
2.1.5.5	Adesivos epóxidos	26
2.1.6	Configurações possíveis de junta.....	27
2.2	Juntas adesivas tubulares	28
2.2.1	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de tração	29
2.2.2	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de torção	33
2.2.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga.....	36
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	39

2.3.1	Mecânica dos meios contínuos	40
2.3.2	Mecânica da fratura	41
2.3.3	Modelos de dano coesivo.....	42
2.3.3.1	Tipos de leis coesivas	43
2.3.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos	44
2.3.3.2.1	Método de definição individual dos parâmetros	46
2.3.3.2.2	Método inverso.....	47
2.3.3.2.3	Método direto.....	47
2.3.4	Mecânica do dano.....	49
2.3.5	Método dos Elementos Finitos Extendido	50
3	DESENVOLVIMENTO.....	55
3.1	Trabalho experimental	55
3.1.1	Descrição da geometria e materiais	55
3.1.1.1	<i>Substratos</i>	55
3.1.1.2	<i>Adesivos</i>	56
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	56
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	57
3.1.1.2.3	SikaForce® 7752	59
3.1.2	Geometria das juntas.....	60
3.1.3	Processo de fabrico	61
3.1.3.1	Maquinagem	61
3.1.3.2	Ligação adesiva.....	67
3.1.4	Ensaio das juntas.....	71
3.1.5	Resultados obtidos.....	71
3.1.5.1	Curvas força-deslocamento ($P-\delta$)	72
3.1.5.1.1	Araldite® AV138.....	72
3.1.5.1.2	Araldite® 2015.....	73
3.1.5.1.3	SikaForce® 7752	75
3.1.5.2	Modos de rotura.....	77

3.1.5.3	Resistência das juntas	80
3.2	Análise numérica	81
3.2.1	Condições da análise numérica	81
3.2.1.1	Modelo axi-simétrico como representação do modelo tridimensional.....	81
3.2.1.2	Descrição do processo de simulação	82
3.2.2	Modelo de dano coesivo triangular	88
3.2.2.1	Formulação do modelo	89
3.2.2.2	Determinação das propriedades coesivas	90
3.2.2.2.1	Araldite® AV138	91
3.2.2.2.2	Araldite® 2015.....	91
3.2.2.2.3	SikaForce® 7752	92
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	93
3.2.3.1	Tensões de arrancamento.....	93
3.2.3.2	Tensões de corte.....	95
3.2.4	Previsão da resistência.....	97
3.2.5	Análise dos resultados obtidos	99
4	CONCLUSÕES	105
5	BIBLIOGRAFIA	109

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Na necessidade de evolução do Homem, a sua melhor arma é a investigação e descoberta de novas tecnologias e processos fabricar e criar materiais que lhe permitam executar o que a sua mente alcança, tal como é possível ver na estrutura representada na Figura 1.

Com os avanços tecnológicos conseguidos pela Humanidade surgiu uma panóplia de processos de fabrico que foram estudados e afinados de forma a proporcionar a execução de peças e estruturas de forma mais rápida e rentável com propriedades cada vez melhores pois, numa estrutura, o desempenho não é fruto apenas das propriedades dos materiais utilizados, mas também das capacidades das suas ligações.

Por entre os processos de ligação mais usuais, tais como a soldadura e ligações aparafusadas, encontra-se a adesiva que tem por principais vantagens a conexão entre materiais de famílias opostas tais como metais a madeiras ou a polímeros sem prejudicar as propriedades dos componentes ligados e com ótimas capacidades de resistência à corrosão.

Como o surgimento de novas tecnologias são áreas em aberto apenas com o seu estudo é possível determinar os seus campos de utilização e formas de o tornar mais viável. Para que realizar um estudo mais aprofundado de novas tecnologias, é necessário recorrer à experimentação o que por vezes é desgastante tanto a nível temporal como económico. Em alternativa, e com o aparecimento de computadores cada vez mais capazes e *softwares* com códigos mais representativos da realidade a utilização de um estudo teórico traz benefícios pois é mais fácil estudar a influencia da alteração de apenas um parâmetro sem ter que refazer todo o processo do zero, no entanto, os programas de calculo utilizados necessita de validar os seus resultados pelo que são feitas em laboratório varias experiencias com geometrias simples e de fácil analise com ensaios precisos e rigorosos para que se possa validar e extrapolar os resultados obtidos e também melhorar o código e forma de calculo utilizados.

Ao longo desta dissertação, para estudar a veracidade dos resultados computacionais obtidos, utiliza-se uma geométrica básica (de fácil execução e repetibilidade) mas com um cálculo de complexa resolução e faz-se variar parâmetros como o tipo de adesivo.

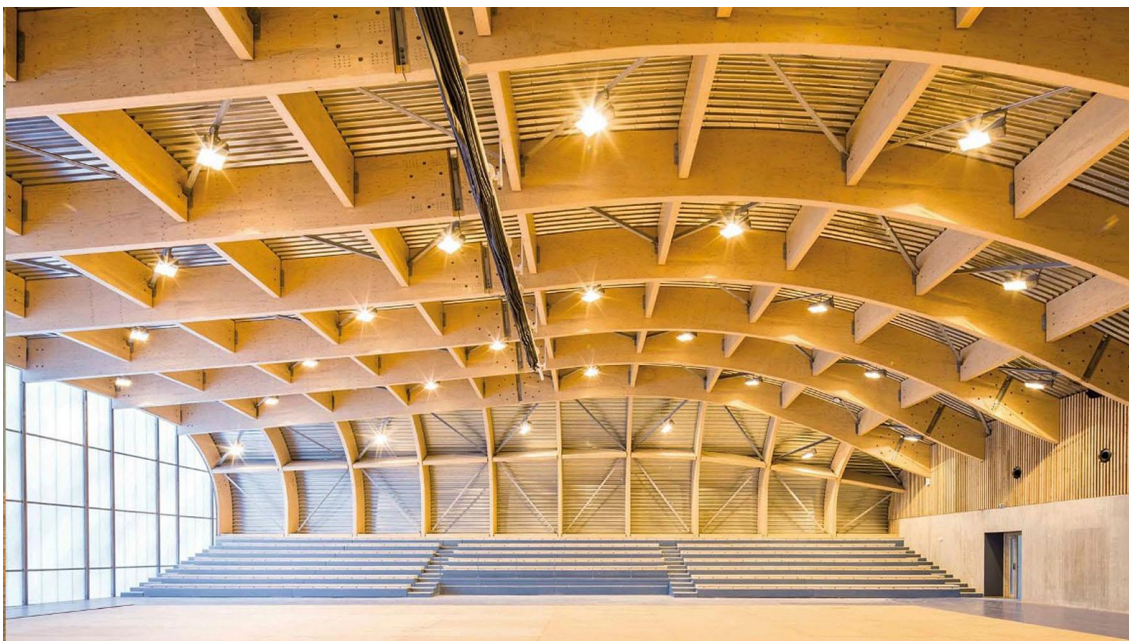


Figura 1 – Exemplo de estrutura colada de geometria complexa (centro desportivo em Paris - França) [1]

1.2 Objetivos

A finalidade deste estudo é a análise e comparação entre os resultados obtidos experimentalmente e os resultados obtidos numericamente utilizando juntas tubulares de sobreposição simples com comprimentos de sobreposição diferentes e três adesivos com propriedades e comportamentos à rotura distintos, utilizando substratos de alumínio. Com as conclusões retiradas pretende-se averiguar a capacidade de o *software* obter resultados representativos da realidade de forma a poderem ser extrapolados para outros casos, com geometrias e propriedades de adesivos distintas.

No desenvolvimento do trabalho experimental, serão abordadas várias etapas de maquinagem necessárias à fabricação dos provetes, técnicas de colagem e ensaios mecânicos destrutivos a fim de apurar a resistência de cada junta.

No estudo numérico utiliza-se o *software* Simulia ABAQUS® e as suas capacidades de analisar elementos finitos coesivos, para obter uma melhor aproximação do comportamento das juntas adesivas quando estas começam a romper.

1.3 Metodologia

De forma a ter melhor controlo sobre a organização do trabalho a ser desenvolvido optou-se pela divisão dos principais grupos de tarefas e distribuíram-se ao longo do tempo.

Os grupos de tarefas mais relevantes para a elaboração desta dissertação foram cinco e descrevem-se de seguida:

- Traçar um plano de trabalho que consiste na abordagem inicial onde foi discutido o tema e objetivo da tese, quais os pontos a abordar e ferramentas a utilizar;
- Preparação dos provetes na qual foram utilizadas técnicas de maquinagem e de tratamento superficial e forma a garantir uma homogeneidade de condições de ensaio;
- Cálculo numérico que decorria em paralelo com a preparação dos provetes e consistia em modelação, inserção de parâmetros e previsão de resultados.
- Ensaio experimentais e tratamento de resultados após a elaboração dos provetes e de feitos os cálculos numéricos é chegada a altura de transformar os resultados obtidos de forma a puderem ser facilmente comparados.
- Escrita da tese decorre ao longo de todo o processo de estudo e tem como objetivo registar todo o processo, assim como pesquisas sobre o assunto e conclusões retiradas.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo dedica-se à informação existente e publicada sobre juntas adesivas, bem como à explicação de termos teóricos e conclusões obtidos na comunidade científica, de forma a perceber melhor a importância dos fenómenos estudados.

2.1 Ligações adesivas

Com datação da Idade das Cavernas, há cerca de 70 000 anos, arqueólogos encontraram no sul de África ferramentas coladas, isto é, pedras coladas a pedaços de madeira utilizando resinas e barro vermelho. Estes componentes evidenciam a necessidade da Humanidade em unir diferentes materiais, e evolução na criação de novos adesivos, resultado da mistura de componentes, para obter produtos com melhor desempenho [1, 2]. Na Figura 2 pode-se ver uma análise microscópica dos segmentos encontrados.

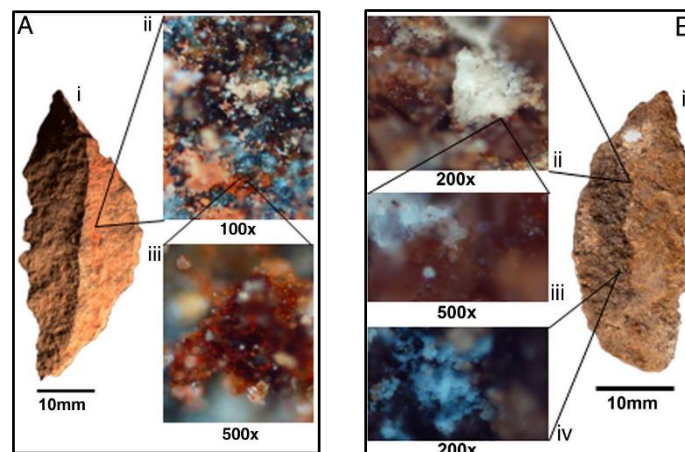


Figura 2 – Ferramentas de pedra (segmentos) com adesivos de *Sibudu Cave*: (A) Segmentos com barro vermelho visível a olho nu na parte assinalada que devia estar colada(i). Imagens microscópicas do barro e resina na ferramenta (ii e iii); (B) Segmento com gorduras escuras na zona colada (i). Imagens microscópicas da gordura encontrada na ferramenta (ii-iv) [2].

Com o decorrer dos tempos foram surgindo novas técnicas de ligação adesiva tendo sido encontrado o registo mais antigo do uso de calor para liquefazer o adesivo nos Alpes Austríacos, datado de 5200 anos atrás [3]. Mais tarde, há cerca de 3300 anos atrás, na Cidade de Thebas (Egito), encontraram-se gravuras descritivas de peças de caça em várias madeiras de sycamore, aparecendo representado na gravura o pote contendo adesivo e o respetivo pincel. Também na fabricação de papyrus era recorrente o uso processos de adesão em que canas de bambu eram cortadas de forma fina que ao serem sobrepostas e batidas com um maço, posteriormente banhadas com uma mistura de

farinha e água. Repetindo as etapas anteriores com as finas fatias de bambu colocadas numa direção perpendicular com as anteriores, era criada uma folha de cor castanho claro com boa consistência e resistência. Também foram encontrados vestígios de betumes e seivas como vedantes nos cascos de barcos que navegavam no mar mediterrâneo na época da Roma antiga. Mais tarde, no fabrico de ornamentação de igrejas também existem registos de utilização de pastas adesivas à base de queijo amassado com água e cal viva na união de tábuas de altares que criaram uma adesão tão eficaz que persistem até aos dias de hoje [4, 5].

Tabela 1 – Ordem cronológica do aparecimento dos adesivos (adaptado de [6]).

Década aproximada da disponibilidade comercial	Adesivo ou selante
Pré 1910	Cola a partir de ossos de animais Colas à base de peixe Adesivos de origem vegetal Argamassas a partir de pós finos compactados (barro, gesso e giz)
1910	Fenólicas formaldeídos Cola caseína
1920	Colas celulosas Resinas ALKYN Policloropropeno (neoprene) Adesivo de soja
1930	Ureia-formaldeído Fitas sensíveis à pressão Filmes de resina fenólica Colas para madeira em acetato de polivinilo
1940	Nitrilo-fenólico Borracha clorada Melamina formaldeído Vinilo-fenólico Acrílico Poliuretanos
1950	Epóxidos Cianocrilatos Anaeróbicos Ligas epóxido
1960	Poliamidas <i>Polibenzimidazole</i> <i>Poliquinoxaline</i>
1970	Acrílico de segunda geração Acrílico sensível à pressão Poliuretanos estruturais
1980	Endurecedor de resinas termoendurecíveis Epóxidos à base de água Adesivos de contacto à base de água Termoplásticos deformáveis e expandidos
1990	Epóxido modificado com poliuretano Termoplásticos curáveis
2000	Adesivos à base de água Adesivos de uma e duas partes sem solvente

No princípio do séc. XX o aparecimento e o avanço tecnológico nos adesivos sintetizados revelaram-se uma referência. Na Tabela 1 pode-se ver uma aproximação temporal, dividida em décadas, para o desenvolvimento dos adesivos [7].

Posto isto, é possível reter que o estudo das ligações adesivas é ancestral, no entanto, ainda existem várias incongruências quanto ao fenómeno da adesão e cálculo das suas capacidades.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

O estudo das juntas adesivas não é unívoco, no entanto existem alguns pontos universais, como por exemplo, os materiais chamados de adesivos estabelecerem interação intermolecular entre dois substratos e associar essa ligação à adesão. A definição do fenómeno de adesão varia entre autores, pois pode ser descrita como sendo o fenómeno interfacial de ligação entre duas superfícies ou a energia necessária para separar os dois substratos [8].

Quando comparados com os métodos mais tradicionais (soldadura, forjamento, aparafusamento, entre outros) as ligações adesivas apresentam grandes vantagens, destacando-se pela sua com a facilidade de fabrico, o que resulta em maiores cadências de produção e, conseqüentemente, custos mais reduzidos. Outras características dos adesivos são a boa resistência à fadiga e a facilidade de ligar materiais dissimilares e de geometrias complexas. Dado que o adesivo tende a espalhar-se na sua aplicação, permite uma distribuição mais uniforme de tensões, com uma ótima capacidade de absorção de choques e vibrações enquanto faz igualmente papel de vedante na ligação [9].

Por outro lado, os pontos fracos das juntas adesivas baseiam-se na necessidade de haver uma preparação e limpeza prévia das superfícies a colar e na utilização de geometrias que minimizem a formação de tensões localizadas. Acresce também o cuidado em realizar uma manutenção minuciosa, uma vez que alguns adesivos podem sofrer alterações na sua constituição sob condições extremas (calor e humidade, por exemplo). Este procedimento é difícil de efetuar já que as ligações são permanentes na maioria dos casos[9].

Na Tabela 2 pode-se ver de forma resumida uma comparação entre as principais vantagens e desvantagens do uso de ligações adesivas quando comparado com outros processos de ligação.

Tabela 2 - Quadro resumo das principais vantagens e desvantagens da aplicação de juntas adesivas (adaptado de [7]).

Principais vantagens	Principais desvantagens
Permite a ligação entre materiais similares ou diferentes	Considerações ambientais, de segurança e saúde importantes a ter em conta
Existe uma maior área de distribuição de tensões	As superfícies devem ser cuidadosamente limpas
Elimina vibrações e absorve choques	Temperatura de trabalho geralmente limitada a 350°F (177°C)
Providencia ótima resistência à fadiga	Tempo de vida útil determinado pelas condições ambientais
Permite ligar formas complexas e espessuras variáveis	Podem ser necessários longos períodos de cura
Minimiza ou previne corrosão galvânica entre metais dissimilares	Podem ser necessárias temperatura e pressão para o processo de cura
Apresenta contornos/acabamentos suaves	Inspeção difícil da junta terminada
Apresenta um ótimo rácio resistência-peso	Normalmente necessário controlo de processo rígido
Veda as juntas	É necessário possuir um certo grau de experiência já que alguns adesivos necessitam de condições muito específicas para a sua aplicação
Quando é necessário a aplicação de calor, o mesmo é demasiado baixo para afetar partes metálicas	
Custo tipicamente inferior às ligações mecânicas	

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Tal como referido nos pontos anteriores, as ligações adesivas são alvo de estudo pois são uma técnica de ligação cada vez mais relevante em áreas totalmente distintas. As indústrias que incentivam a investigação e revelam um aumento na utilização deste tipo de ligações são a aeroespacial, automóvel, construção, embalagem, têxtil, mobiliário, naval, medicinal, entre outras [7].

Na indústria automóvel, a aplicação de peças como o para-brisas através de ligações adesivas já existe há algumas décadas mas, com a evolução das técnicas e adesivos, cada vez mais componentes são fixos com ligações adesivas como tabliers, chassis, componentes de desgaste (calços de travão, prato de embraiagem) e até estruturas interiores e exteriores de camiões, dado que uma grande vantagem deste método é a ligação de materiais com propriedades muito distintas [10].

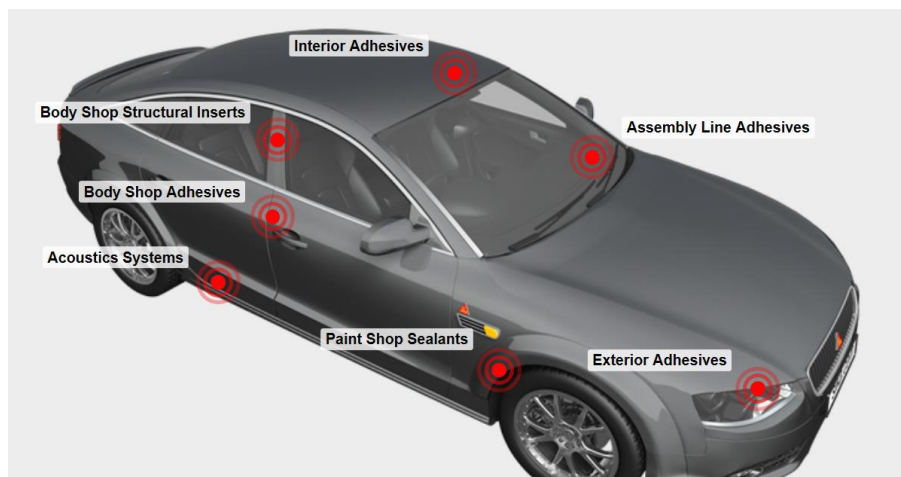


Figura 3 - Aplicações de adesivos na indústria automóvel [11].

Na indústria aeronáutica, a necessidade de diminuição de custos sem comprometer a integridade e a leveza das estruturas levou ao aparecimento de novos materiais sintéticos juntamente com a introdução de ligações adesivas, pois estes adesivos conseguem unir de forma eficaz materiais diferentes e com formas irregulares (Figura 4), melhorar a resistência à fadiga, além de serem mais económicos [12]. As combinações de todos estes fatores tornam-se numa solução ideal para este mercado. Assim, as aplicações destes adesivos dividem-se em duas funções principais: a estrutural, que permite a transmissão de esforços entre dois componentes, e a vedante, que protege as interfaces contra a corrosão. As ligações estruturais permitiram a construção de aviões mais leves, resistentes e duráveis, que se revelam ser um substituto melhor que os tradicionais rebites. Atualmente, a quantidade de rebites utilizados diminuiu drasticamente (Figura 5) [13].

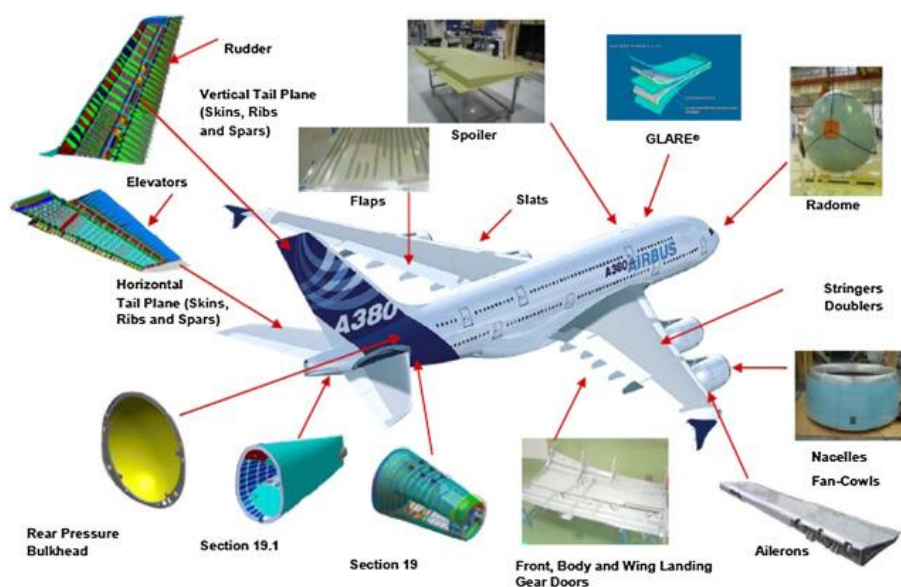


Figura 4 - Exemplos de ligações adesivas num avião [13].



Figura 5 - Comparação entre fuselagem de avião utilizando adesivos (à esquerda) [14] e a tradicional rebitada (à direita) [15]

Também na indústria madeireira e na construção civil os adesivos representam uma solução inovadora tanto a fornecer ligações como a selar estruturas. As edificações (moradias, fabricas, lojas, entre outras) e a engenharia civil compõem um dos maiores mercados dos adesivos dadas as grandes escalas do produto final [16]. Já na indústria madeireira, os adesivos são usados normalmente na colagem de madeira/lâminas de madeira, nos laminados decorativos, em vários tipos de artefactos e aglomerados, em painéis de madeira, em compósitos de madeira, entre outras aplicações [17]. Na construção civil, a madeira laminada encontra-se em diversas aplicações, como por exemplo: pertencer à parte estrutural, funcionar elemento decorativo, ajudar a aumentar a eficiência energética atuando como isolamento, entre outras [18]. A Figura 6 é um exemplo da aplicação de adesivos em madeiras que por sua vez foram utilizadas como elemento estrutural e decorativo do edifício.



Figura 6 - Exemplo de estrutura composta por laminado de madeira [17]

Dada a sua estável composição química e biocompatibilidade, os adesivos também são utilizados na medicina, como por exemplo em próteses dentárias, onde o adesivo substitui parcial ou integralmente o dente do paciente [19]. A Figura 7 é uma fotografia

tirada a um paciente no momento em que o seu dente, já tratado, recebe o adesivo para substituir a parte do dente nociva que havia sido extraída.



Figura 7 - Exemplo de reparação parcial de um dente [20].

Outra indústria que também é dependente dos adesivos é a indústria do calçado, pois os adesivos são um ingrediente intrínseco ao fabrico e/ou na reparação do calçado moderno. Os adesivos apresentam várias aplicações como a colagem de forros, solas ou plataformas, reforços, fixação de palmilhas. Quando combinados com processos de construção mais tradicionais como o uso de pregos, agrafos, costuras e tachas os adesivos ajudam a impermeabilizar e a fixar todos os componentes do calçado [10, 21, 22]. A Figura 8 ilustra uma aplicação prática do adesivo em que a sola do sapato é ligada adesivamente à vira.



Figura 8 - Aplicação de adesivo na reparação de um sapato [21].

O adesivo a utilizar depende também da função que o calçado possa vir a desempenhar e dos materiais constituintes.

Uma indústria mais recente que também é muito dependente dos adesivos é a indústria eletrónica. Na sociedade moderna encontra-se cada vez mais dependente desta indústria dada a sua vasta gama de aplicação no quotidiano. Nesta indústria os adesivos oferecem soluções que permitem satisfazer necessidades fundamentais em campos eletro-térmico-mecânico, que são necessários para garantir um funcionamento estável e fiável dos equipamentos [10].

Na indústria eletrônica, os adesivos são utilizados essencialmente na ligação de *chips* a placas, no processo chamado de *die-attach*, nas placas de circuitos impressos (*Printed circuit board* - PCB) e no fabrico de ligações periféricas universais que permitem ligar de forma rápida e eficiente diferentes modelos de um mesmo componente a uma base (*Peripheral Component Interconnect* - PCI), cada vez mais utilizada pela sua fácil reprodução em grande escala [23, 24]. Os *smartphones* vulgarmente utilizados são um bom exemplo de ligações adesivas aplicadas nos seus componentes eletrónicos (PCI e *chip*), e também possuem os seus ecrãs fixos de forma a proporcionar uma boa condutividade elétrica e ao mesmo tempo fornecer proteção dos componentes internos ao ambiente externo (poeiras, humidades, entre outros) que possam comprometer o bom funcionamento do equipamento [25]. Na Figura 9 pode-se ver um processador de computador moderno (*Central Processing Unit* - CPU) cuja proteção ligada por adesão foi removida, expondo assim os seus circuitos internos que pode-se ver cobertos por uma resina epóxi de cor natural esverdeada [26].



Figura 9 - Processador de computador aberto [27].

2.1.3 Esforços em juntas adesivas

No dia-a-dia, existem vários fatores que afetam a forma de como diferentes corpos interagem. No que diz respeito ao estudo das juntas adesivas, essas interações podem ser descritas como combinações de esforços mais simples de descrever e calcular [28].

Numa junta adesiva, os substratos podem estar sujeitos a esforços de compressão ou tração, corte, clivagem e arrancamento. Estes esforços encontram-se esquematizados na Figura 10.

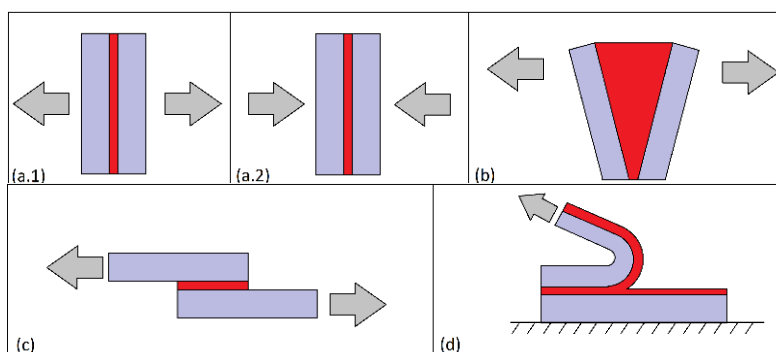


Figura 10 - Tipos de carregamento elementar em ligação adesiva: (a.1) Esforço de Tração, (a.2) Esforço de Compressão, (b) Clivagem, (c) Esforço de Corte e (d) Arrancamento.

2.1.3.1 Esforço de tração/compressão

Estes esforços caracterizam-se por aplicar carga numa direção normal ao plano que se pretende estudar. No entanto, apesar de serem esforços simétricos, exigem características específicas do elemento a estudar. Por exemplo, um elemento flexível (cabo) não pode ser sujeito a esforços de compressão. Quando se pretende estudar o efeito deste tipo de carregamento em juntas adesivas, o fabrico da mesma deve prestar especial atenção ao paralelismo entre os substratos e que o esforço seja aplicado exclusivamente numa direção perpendicular ao plano de estudo. À medida que se pretende aumentar a espessura de adesivo (t_A) o paralelismo dos substratos é cada vez mais difícil de garantir devido a variações de t_A . Por outro lado, esforços puramente normais ao plano de estudo são difíceis de encontrar, o que resulta numa distribuição de tensões desequilibrada [28].

No entanto, este tipo de problema pode ser atenuado quando é tido em conta no momento no projeto da junta e são aplicadas soluções como guias, de modo a garantir um carregamento perfeitamente axial. Outro aspeto a considerar é a rigidez dos substratos, pois estes devem ser capazes de manter a sua forma para garantir uma sollicitação uniforme da zona ligada. Na Figura 11 podemos ver a distribuição de tensões típica ao longo de uma junta sujeita a esforços de tração.

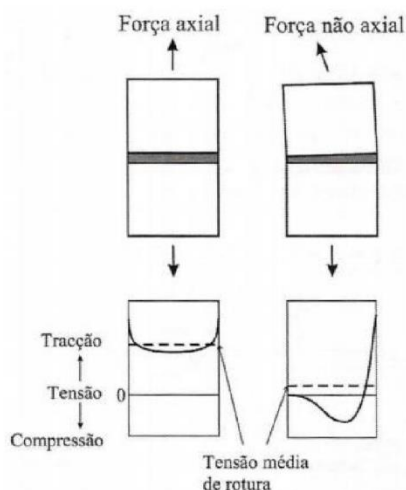


Figura 11 - Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial (esquerda) e sob carregamento não axial (direita) [29]

A compressão também de ser alinhada, tal como a tração, no entanto, se uma junta estiver sujeita a uma compressão pura não necessita de adesivo, pois os substratos descarregam toda a sua carga de uma forma direcionada no substrato oposto, não requerendo qualquer tipo de reação perpendicular à da aplicação da carga [28].

2.1.3.2 Corte

Estes esforços caracterizam-se por serem aplicados no plano do adesivo, isto é, resulta normalmente de um deslizamento entre os substratos ligados. Ao solicitar-se ao corte uma ligação, o esforço exercido é distribuído por todo o adesivo, fazendo com este tipo de ligação seja das ligações mais resistentes. Dada o processo de construção da junta, é relativamente fácil manter os substratos alinhados para uma distribuição de carga mais previsível. As juntas dependentes da resistência ao corte do adesivo são, de modo geral, fáceis de fabricar e mais vulgarmente utilizadas [28, 30].

Na Figura 12 encontra-se representada a forma de como a tensão de corte normalmente se distribui no seio de junta de sobreposição simples sujeita a corte puro.

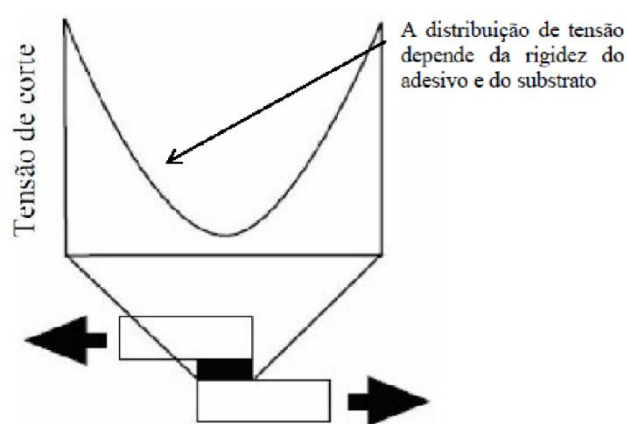


Figura 12 - Distribuição da tensão de corte numa junta de sobreposição simples (JSS) [31].

2.1.3.3 Clivagem

Este tipo de carregamento ocorre quando existem dois substratos rígidos e se aplica força perpendicularmente ao plano de união em apenas uma das extremidades de forma a separar os dois substratos. Como a área resistente fica reduzida (não é utilizada toda a área colada em simultâneo) este tipo de junta apresenta piores propriedades quando comparada com as juntas solicitadas ao corte, por exemplo.

Na Figura 13 pode-se verificar que, neste tipo de solicitação, a extremidade oposta ao carregamento em nada contribui para a resistência da junta, fazendo com que a extremidade mais próxima do carregamento seja a responsável pela resistência da junta. Uma forma de aumentar a resistência da junta é aumentar a área de superfície de ligação, o que torna esse tipo de junta menos viável economicamente [28, 30].

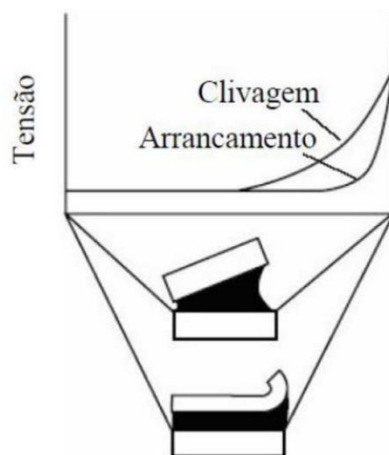


Figura 13 - Distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento [31].

2.1.3.4 Arrancamento

Este carregamento é em tudo semelhante à clivagem, com a nuance de que pelo menos um dos substratos é flexível, tornando assim a aplicação da carga numa área muito menor, o que resulta num aumento concentrado de tensão (Figura 13). Devido ao fenómeno de concentração de tensões, tanto a clivagem com o arrancamento são ligações de resistência inferior à solicitadas ao corte, sendo por isso tipos de junta a evitar. Dado o facto de que um ou os dois substratos são flexíveis, o ângulo entre eles pode ser muito superior ao da clivagem, resultando numa área de tensão cada vez menor. Uma propriedade do adesivo que possui grande impacto na distribuição da tensão e a consequente resistência da junta é a tenacidade (Figura 14) pois os adesivos frágeis e rígidos são mais propícios à propagação de fendas, que por sua vez representam concentrações de tensões. Por esse motivo, adesivos dúcteis e flexíveis são mais indicados para esta finalidade, pois apresentam deformações mais elevadas antes de atingir rotura, permitindo um maior afastamento entre os substratos e continuar a contribuir para a resistência total da junta [28, 30].

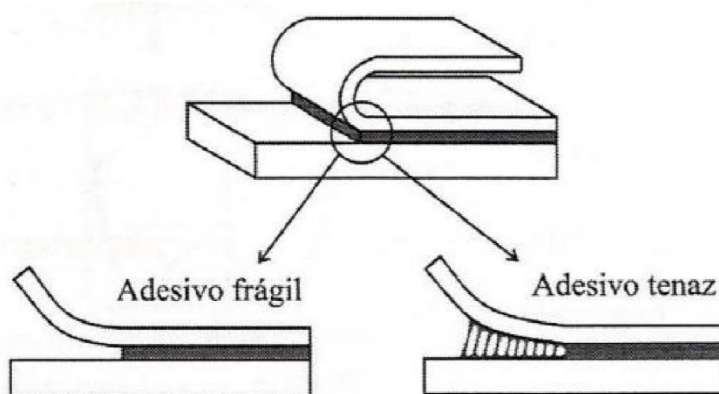


Figura 14 - Comparação entre adesivo frágil e tenaz [28].

2.1.4 Modos de rotura

Quando uma junta adesiva é sujeita a um determinado tipo de esforço aplicado, requer que a mesma transmita os esforços entre os dois substratos ligados, de forma a manter a integridade da estrutura. Para verificar o funcionamento dos adesivos recorre-se frequentemente a ensaios destrutivos (como por exemplo o ensaio de tração de provetes de JSS). De um modo geral, existem quatro tipos principais de rutura: coesiva, adesiva, mista e pelo substrato. Estes modos de rotura encontram-se representados esquematicamente na Figura 15 [31].

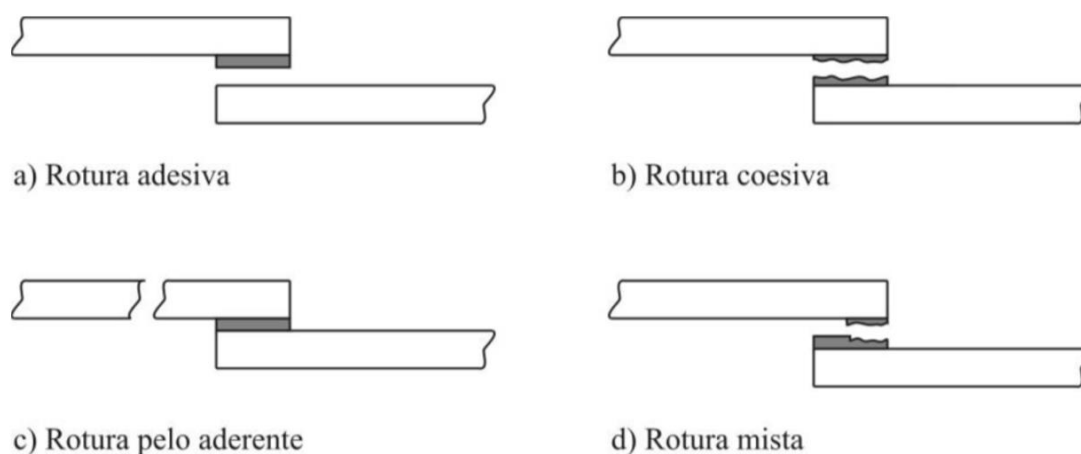


Figura 15 - Modos de rotura em ligações adesivas [31].

Quando se dá uma rotura adesiva, a rotura ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes (Figura 15-a)). Após ocorrer rutura verifica-se que a superfície de um substrato apresenta resíduos de adesivo enquanto a superfície do outro está ausente dos mesmos. Isto resulta muitas vezes de uma má preparação/limpeza das superfícies dos substratos. Contudo, alguns trabalhos feitos mais recentemente [32-35] mostram que existem variações de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo e que os valores máximos ocorrem junto da interface.

A rotura coesiva ocorre quando a resistência da ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte que a resistência interna do próprio adesivo (Figura 15-b)). É possível observar que, quando isto acontece, ambas as superfícies do substrato apresentam uma película de adesivo [31]. No entanto, algumas roturas são designadas de coesivas pois o parecem numa primeira análise, contudo, após uma inspeção mais rigorosa pode-se verificar a presença de uma película fina de adesivo no substrato. Por este motivo, muitos autores preferem o termo “rotura aparente na adesão” [31].

Dá-se o nome de rotura mista (Figura 15-d)) quando ocorre uma combinação de rotura adesiva com coesiva, em que principal motivo é a limpeza deficiente de uma dada região da superfície do substrato, ou então por defeito do próprio adesivo (prazo de validade ultrapassado, impurezas, etc.) [31].

Quando a resistência interna do aderente é inferior à do adesivo diz-se que ocorreu uma rotura pelo substrato (Figura 15-c), tanto no seu interior como na interface. Esta rotura também é designada de rotura coesiva do aderente ou substrato.

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos podem ser caracterizados de várias formas tais como a sua origem (natural, sintética ou semissintética), composição química, forma física, modo de aplicação e função.

Quando se caracteriza um adesivo através da sua função diz-se que se trata de um adesivo estrutural ou não estrutural, em função do seu desempenho.

A Tabela 3 mostra que existem várias famílias de adesivos, em que uma família se assume à priori como estrutural ou não estrutural através do seu material base.

Tabela 3 - Classificação de adesivos segundo a função (elaboração adaptada [31]).

Adesivos Estruturais		Adesivos Não estruturais	
Base	Combinação	Base	Combinação
Fenólicos	Fenólicos-vinílicos	Borrachas sintéticas	Silicone
	Fenólicos-nitrilo		Policloropreno e nitrilo
	Fenólicos-policloropreno		Polisulfureto
Acrílicos	Anaeróbicos	Poliésteres	
	Acrílicos modificados	Termofusíveis	
	Cianoacrilatos	Inorgânicos	
Poliuretano			
Poliimida			
Epóxido	Epóxido-poliamida		
	Epóxido-polisulfureto		
	Epóxido-fenólicos		
	Epóxido-poliuretano		
	Epóxido-nitrilo		
	Epóxido-vinilo		
	Epóxido-nylon		
	Epóxido-polisulfido		

Os adesivos estruturais, tal como o nome indica, são adesivos mais indicados para o fabrico das ligações de uma estrutura. No entanto pode-se utilizar adesivos não estruturais numa construção, apenas se desaconselha a sua aplicação em situações de grandes esforços ou longos períodos de tempo tornando-os mais indicados para reparações temporárias ou montagem ligeiras. Um exemplo de adesivo não estrutural são os termofusíveis, pela sua sensibilidade a diferenças de pressão e a emulsões de água, baixa resistência a temperaturas e agentes químicos e por possuir baixa resistência ao corte para a caracterização de adesivo estrutural ou não estrutural, pois este é o esforço mais comum de encontrar a solicitar um adesivo em funções [7, 28, 31]. Como a resistência ao corte é uma característica mensurável, definiu-se por convenção que um adesivo estrutural deve ser capaz de suportar esforços de corte superiores a 7 MPa [7]. Como estes adesivos apresentam grande capacidade de suportar e transmitir esforços, são normalmente utilizados em estruturas e contabilizados como parte integrante, podendo mesmo superar o desempenho dos materiais de base da estrutura ligada. Por este motivo, é cada vez mais vulgar utilizar uma junta adesiva a unir materiais como madeira, compósitos e até metais. Por se tratarem de elementos sujeitos a processos de cura, tendem a apresentar uma elevada resistência à maioria dos ambientes, daí ser de esperar que um adesivo estrutural possua uma vida igual ou superior à aplicação onde está inserido. Os adesivos estruturais são constituídos maioritariamente por resinas termoendurecíveis, pois passam por um processo de cura que os torna mais estáveis e incapazes de retomar a sua forma inicial nem de serem reutilizado sem passar por vários processamentos. Normalmente, as resinas de base são modificadas por resinas termoplásticas ou elastómeros e por cargas para conferirem determinadas propriedades ao adesivo final. As grandes famílias de adesivos estruturais são: os fenólicos, os acrílicos, os epóxidos, as poliimidas e os poliuretanos [36, 37]. Outra distinção a fazer em adesivos estruturais é a sua capacidade de deformar até à rotura. Um adesivo é designado de adesivo dúctil ou frágil, sendo designado de adesivo frágil se apresentar pouca deformação no momento que atinge a rotura ao contrário do que se processa nos adesivos dúcteis quando sujeitos a esforços semelhantes. A Figura 16 apresenta o comportamento característico destes dois tipos de adesivos.

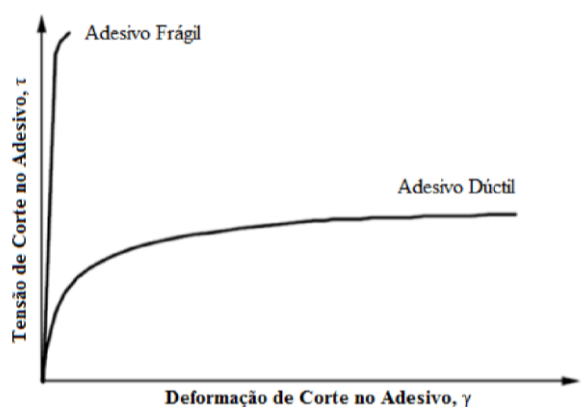


Figura 16 - Comparação das curvas tensão de corte – deformação de corte típicas entre um adesivo frágil e um dúctil [36].

2.1.5.1 Adesivos fenólicos

Estes adesivos são termoendurecíveis resultantes da reação química entre fenol (um álcool derivado do benzeno), ou um derivado, com um aldeído (como por exemplo o formaldeído – um gás derivado do metanol). Estes tipos de adesivos são comercializados sob a forma de filme ou em solução, e a sua aplicação implica um processo de cura que é feita a uma temperatura mínima que ronda os 170°C, a pressões elevadas (300 kPa a 700 kPa) numa prensa a quente ou em autoclave, de forma a evitar o aparecimento de vazios na zona da colagem. Como o processo de cura tem tendência a libertar substâncias voláteis, é comum substituir este tipo de adesivos por adesivos epóxicos. Inicialmente, este tipo de adesivo destinava-se à colagem de madeira, que posteriormente passou a ser utilizado em metais. De forma geral, os adesivos fenólicos apresentam um baixo custo e possuem boa resistência mecânica e boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais, pois a sua aplicação resulta de um processo de estabilização química e não de uma conformação dependente da temperatura. Para minimizar as suas vulnerabilidades como a baixa resistência à corrosão por solventes, grande fragilidade e baixa resistência a vibrações e ao impacto, começou-se a combinar as resinas fenólicas com outras resinas que ajudem a colmatar estes pontos fracos, como a resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno). Nestes adesivos fenólicos modificados o processo de cura efetua-se a quente e sob pressão [31].

Os principais adesivos fenólicos são os seguintes:

- » **Fenólico-vinílico;**
- » **Fenólico-policloropreno;**
- » **Fenólico-nitrílico.**

2.1.5.2 Adesivos acrílicos

Os adesivos acrílicos têm por base polimetacrilato de metila (PMMA), que é um polímero sintético facilmente atravessado pela luz no espectro visível, de baixo custo, e fácil processamento, que o torna uma boa solução para diversas aplicações.

Como se pode ver na Figura 17, em 1930 os químicos Rowland Hill e John Crawford descobriram o PMMA. No entanto, só na década de 70, é que o PMMA começou a ter aplicações mais práticas, como janelas, cúpulas de aeronaves e periscópios de submarinos [38].

Antes deste desenvolvimento mencionado, os adesivos acrílicos tratavam-se na verdade de soluções dissolvidas em solvente específico. Estes adesivos eram utilizados na união de alumínio (portas e janelas). A partir de então, foram realizados vários, resultando nos sofisticados adesivos acrílicos existentes hoje no mercado [39].

Os adesivos acrílicos dividem-se nos adesivos anaeróbicos, cianoacrilatos e os acrílicos modificados [31]:

- » **Anaeróbicos:** normalmente são comercializados sob a forma de um líquido tixotrópico e podem ser curados à temperatura ambiente, e dadas as suas propriedades são também considerados de fácil utilização. O processo de cura dá-se de forma rápida quando os adesivos acrílicos anaeróbicos se encontram num ambiente isento de oxigénio, tornando-os ideais para aplicações de juntas, fixação de ligações aparafusadas ou fixação de rolamentos. Possuem uma resistência mecânica variável, podendo aproximar-se da dos adesivos epóxicos, uma boa resistência a solventes e temperatura máxima de utilização próxima dos 230°C. Como a sua cura é normalmente feita sob pressão (para facilitar a eliminação do oxigénio) e apresentam uma baixa tensão de superfície (facilitando a sua adesão a praticamente todas as superfícies) tornam-se indicados para a colagem de diversos materiais de difícil adesão com o acetato, o nylon e o policloreto de vinilo (PVC). [31, 40, 41]. Na Figura 17 podemos ver o problema que existe quando a tensão de superfície do substrato é inferior à do adesivo, o que faz com que o adesivo tenda a formar uma bolha ao invés de molhar o substrato [42].
- » **Cianoacrilatos:** são vulgarmente conhecidos como “supercolas” ou “cola tudo”. A sua comercialização é normalmente feita na forma líquida sem solventes e consistem em adesivos de cura instantânea, que permite colagens muito rápidas. O processo de cura destes adesivos é influenciado pela humidade, pelo teor em pH do meio e pela espessura da junta adesiva. A humidade e a presença de grupos aniónicos são os principais responsáveis pelo rápido processo de cura destes adesivos. Apresentam excelente resistência à tração, mas baixa resistência ao arrancamento, fragilidade e custo elevado. Devido à sua baixa viscosidade, conseguem penetrar de forma eficaz em fendas (compreendidas entre os 0,015 mm e os 0,5 mm) e espalhar-se facilmente em superfícies rugosas, tornando-os adequados para colar pequenas partes de plásticos e borrachas. A sua temperatura de trabalho pode variar entre os -60°C e os +260°C [31, 40, 43].
- » **Acrílicos modificados:** Estes adesivos apresentam um processo de cura rápida à temperatura ambiente e alta resistência (20-35 MPa), sendo indicados para operações altamente automatizadas. Possuem uma boa resistência ao arrancamento, impacto e ao corte numa ampla gama de temperaturas dependendo da modificação que se faz através da adição de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Estes adesivos demonstram uma boa resistência à alta humidade, baixa contração durante o processo de cura e permitem ligações fortes (sem exigência de preparações de superfícies dos substratos muito cuidadas) e podem ser aplicados para unir uma grande variedade de materiais (especialmente os plásticos e metais). As suas principais desvantagens baseiam-se na baixa resistência mecânica, resultante da

exposição do adesivo a elevadas temperaturas, e elevada flamabilidade [31, 44, 45].

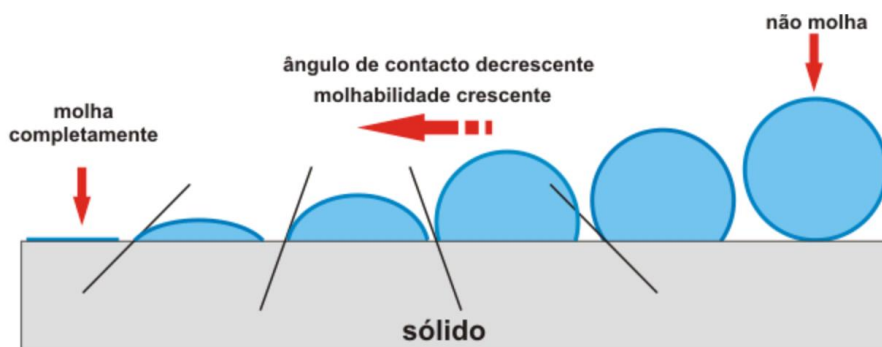


Figura 17 - Relação entre molhabilidade de uma superfície por um fluido e o ângulo de contacto [42].

2.1.5.3 Adesivos de poliuretano

Os adesivos de poliuretano são maioritariamente utilizados sob a forma expandida de cura lenta à temperatura ambiente (tempo que pode atingir as 24h até ficar completa) quando são misturados os seus dois constituintes. Após iniciada a cura, este tipo de adesivos apresenta uma grande expansão volumétrica e uma boa adesão a uma ampla gama de superfícies (principalmente metálicas). Quando se combina estas características com boa resistência ao arrancamento, bom comportamento em ambientes adversos, grande tolerância a vibrações e choques e a produtos químicos e abrasivos obtém-se num ótimo adesivo a ser aplicado em estruturas para auxiliar e preencher espaços ocultos e de difícil acesso. Apesar de ser um adesivo estrutural apresentam uma baixa resistência (tensão de cedência de cerca de 20 MPa) quando comparado com outros adesivos estruturais. Estes adesivos geralmente não recebem grande destaque porque são utilizados em aplicações de menor importância (dada a sua baixa resistência mecânica), mas ocupam a maior parte do mercado. São muito utilizados em juntas náuticas, juntas de dilatação em edifícios e sistemas de ventilação e ar condicionado [31, 40].

2.1.5.4 Adesivos de poliimida

Os adesivos de poliimida são adesivos estruturais com propriedades mecânicas baixas (na mesma grandeza que os poliuretanos) com um processo de cura longo, difícil, complexo e dispendioso (quando comparados com outros adesivos), pois requerem vários patamares de pressão e de temperaturas na ordem dos 200°C a 400°C, tornando o seu manuseio difícil e pouco prático. No entanto, estes adesivos respondem de forma eficaz a aplicações em que a temperatura elevada pode comprometer a integridade da junta adesiva, pois são capazes de manter as suas propriedades praticamente inalteradas até temperaturas por volta dos 300°C. Entre estas características é de

salientar a sua elevada rigidez e consequente fragilidade associada, criando assim uma ligação adesiva sensível a choques e vibrações [31, 40].

2.1.5.5 Adesivos epóxicos

Os adesivos epóxicos apresentam uma grande variedade de aplicações pois tratam-se de termoendurecíveis (também denominados termofixos) que ao serem comparados com adesivos e resinas termoplásticos apresentam ótimas resistências mecânica, química e um módulo de elasticidade elevado. Por natureza do termoendurecível, a sua cura resulta da mistura de dois elementos, a resina de base e o endurecedor, que podem ser comercializados como um só componente (quando o endurecedor vem pré misturado com a resina sob a forma de líquidos, pastosos, gel, pós, barras, pastilhas ou filmes) ou dois ou mais componentes (em que o endurecedor, a resina e outros componentes apresentam formas líquidas, pastosas ou gelatinosas). Para melhor adequar o adesivo ao seu propósito é facilmente modificado através da adição de outras resinas (como por exemplo poliamida, fenólico, entre outros), através da composição do endurecedor ou da adição de cargas (como fibra de vidro ou carbono para aumentar a resistência à tração, ou elastómeros como poliuretano ou nitrilo para aumentar a tenacidade). Para que se realize a cura não existe uma necessidade de pressão, podemos usar temperatura que tem grande influência no processo podendo uma alteração de 10°C representar uma redução para metade do tempo de cura. Nos adesivos epóxicos comercializados com dois ou mais componentes também é muito comum encontrarem-se endurecedores misturados com catalisadores e outros componentes de forma criar uma reação exotérmica durante a processo de cura, fornecendo assim o calor necessário à formação do adesivo de forma mais fácil rápida e controlada, diminuindo o tempo de espera entre o início do fabrico da junta e a sua utilização. Entre as suas modificações é de salientar no ramo das propriedades mecânicas a utilização de endurecedores de poliamida que permitem um bom comportamento do adesivo a temperaturas na ordem dos -200°C. Visto que o adesivo epóxico resulta da reação entre de dois ou mais elementos, é importante garantir que a mistura é feita nas proporções corretas e de forma homogénea. Por esse motivo, os adesivos epóxicos comercializados sob a forma de um só componente tendem a apresentar melhores resultados, pois a sua mistura é feita pelo fabricante num ambiente controlado de forma a garantir as melhores propriedades do adesivo. Mais recentemente, com a necessidade de elementos mais leves e resistentes na indústria dos transportes, aprofundou-se uma forma de criar elementos com grandes inércias (que conferem elevada rigidez à estrutura) capazes de manter a leveza. Assim, as estruturas sanduíches respondem a essa necessidade, utilizando núcleo ocos como “colmeia de abelha” (*honeycomb*) em que várias folhas metálicas são unidas com finas películas de adesivo (filme de adesivo) [31, 40, 46].

Os principais tipos de adesivos epóxicos que se podem encontrar hoje no mercado são:

- » **Epóxico-fenólico;**
- » **Epóxico-polisulfido;**
- » **Epóxico-poliamida;**
- » **Epóxico-nitrilo;**
- » **Epóxico-poliuretano.**

2.1.6 Configurações possíveis de junta

Dada a diversidade de utilizações de adesivos, o método de emprego varia dependendo da sua função, adaptando-se ao objetivo pretendido, o que resulta em várias configurações de junta. Por entre a panóplia de juntas existentes, é mais comum encontrar os tipos da Tabela 4.

Tabela 4 - Tipos de juntas adesivas (adaptado de [28]).

TIPO DE JUNTA	REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA
Sobreposição simples	
Sobreposição dupla	
Chanfro exterior	
Chanfro interior	
Degrau	
Junta de ressalto	
Cobre-junta	
Cobre-junta duplo	
Topo a topo	
Tubular	
Arrancamento	

As juntas de sobreposição são as mais usadas pois são as mais fáceis de conceber, são aplicáveis em situações em que os aderentes são finos e a junta está maioritariamente sujeita a esforços de corte. Mais evidente nas juntas de sobreposição simples, uma vez que os aderentes não estão no mesmo plano, é gerado um momento fletor que cria esforços de clivagem/arrancamento, que comprometem o funcionamento da ligação adesiva (ver Figura 18).

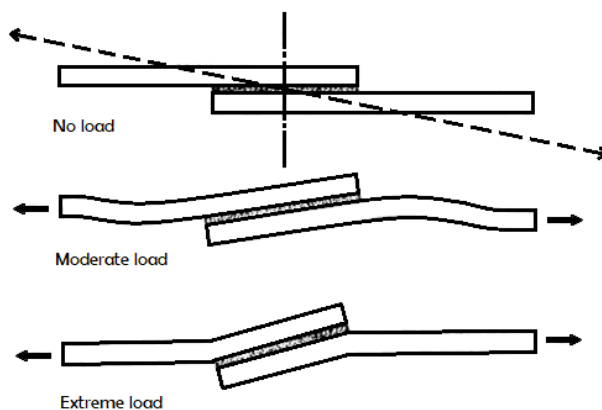


Figura 18 - Influência do desalinhamento dos substratos numa junta de sobreposição simples [7].

Para tentar anular este efeito, foram pensadas várias formas de anular este momento gerado pelo desalinhamento dos substratos, aparecendo assim juntas de sobreposição dupla, com chanfros e com cobre junta.

A análise deste fenómeno conduziu ao aparecimento de juntas descritas anteriormente para tentar maximizar a resistência da junta adesiva, aparecendo assim juntas de degrau (modificação de juntas de chanfre interior), entre outras.

No entanto, é possível verificar pelos esquemas da Figura 18 que existe uma lacuna em juntas para transmissão de momentos torsores, o que levou ao aparecimento de juntas tubulares que suportam os mesmos esforços que outras configurações acrescidas do momento torsor solicitando o adesivo apenas ao corte.

2.2 Juntas adesivas tubulares

No presente, é muito comum utilizar-se ligação adesiva entre elementos cilíndricos, pois este tipo de elemento é bastante usado na indústria. E a utilização de adesivos para fazer a ligação entre este tipo de elementos é cada vez mais usual pelo facto de apresentar boas propriedades mecânicas (a destacar o elevado rácio peso/potencia) e muito boa a resistência à corrosão. Por isso, o estudo e previsão do comportamento desta solução tem tomado um peso cada vez mais significativo [47].

2.2.1 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de tração

Como as juntas tubulares apresentam soluções que podem facilmente ser implementadas no cotidiano devido à particular geometria dos substratos, estas têm sido alvo de vários estudos, sendo de salientar o estudo de Cognard et al. [48] em 2010, cujo objetivo foi utilizar um *software* de elementos finitos para conseguir estudar e otimizar uma junta adesiva através de um modelo 3D (representação esquemática na Figura 19), com destaque para as solicitações aplicadas ao adesivo.

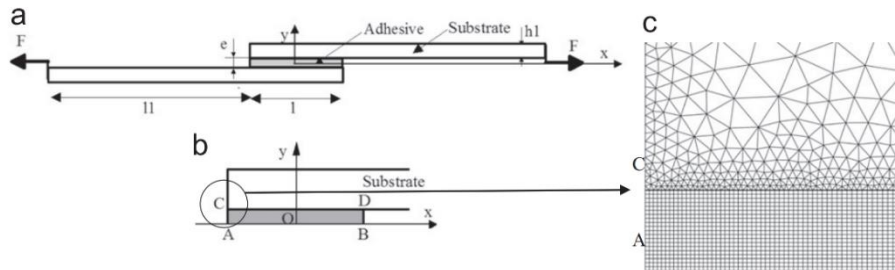


Figura 19 - Representação da junta de sobreposição simples. (a) geometria estudada, (b) detalhe da zona central superior e (c) malha utilizada no estudo [48].

Para tal simularam-se várias juntas com comprimentos de sobreposição diferentes ($l=25$ mm, $l=50$ mm, $l=75$ mm e $l=100$ mm) e chegou-se à conclusão que os valores máximos da tensão circunferencial ($\sigma_{\theta\theta}$) são obtidos perto das arestas livres onde cerca de 40% da carga é aplicada (Figura 20).

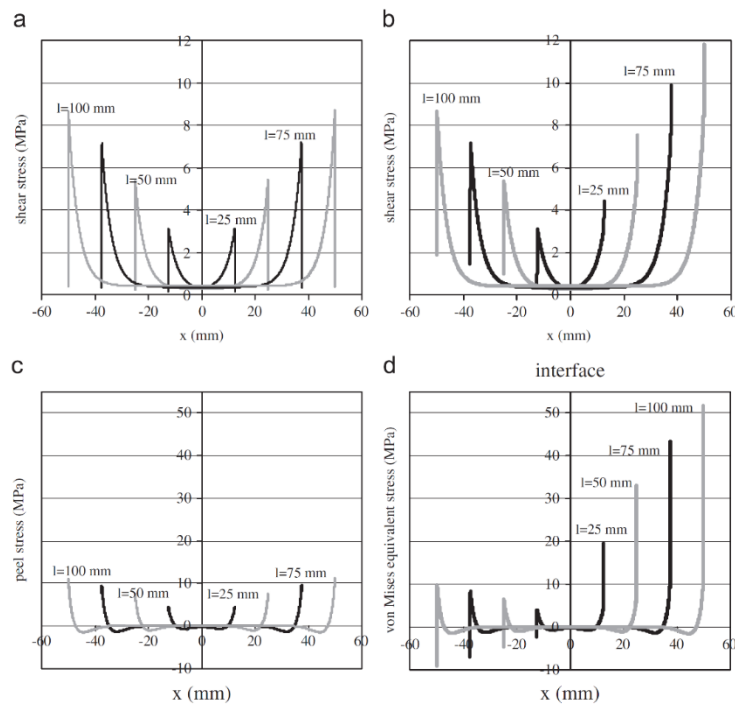


Figura 20 – Tensões de corte e de arrancamento no meio do adesivo e perto da interface adesivo-substrato para uma força aplicada de 1 MPa [48].

No que diz respeito à tensão de corte no plano r - z (τ_{rz}) no adesivo, observa-se dois pontos de concentrações de tensões equidistantes das arestas livre e que o valor máximo é aproximadamente 8% da carga aplicada. As distribuições de tensões $\sigma_{\theta\theta}$ e a forma da distribuição de tensões τ_{rz} são fortemente influenciadas pela σ_{rr} . Também se concluiu que a tensão circunferencial tem um maior impacto na resistência da junta de que a tensão de corte (no conjunto) e depois de serem analisadas sugerem que a configuração da junta e a influência dos parâmetros geométricos e físicos conseguem aproximar as tensões no modelo de elementos finitos estudado.

Em 2012, Nemes e Lachud [49] dedicaram-se a um estudo mais teórico e numérico das juntas adesivas de sobreposição simples, ao contrário da aproximação de elementos finitos que tem tomado cada vez mais peso nos estudos realizados atualmente, com o objetivo de estudar o impacto que a introdução de tensões radiais no cálculo da previsão de resistência da junta. Esse estudo tomou por base o modelo de cálculo desenvolvido por Shi e Cheng [50] que prevê a energia potencial absorvida resultante da distribuição de tensões por uma junta tubular adesiva [50] e que mais tarde foi simplificado por Nemes e seus colaboradores [51] através da implementação de pressupostos e implementação de cálculo variacional com o objetivo de conseguir fazer um pré-dimensionamento de juntas tubulares adesivas de sobreposição simples [51]. Este estudo utilizou o referencial representado na Figura 21 e assumiu que:

- A simetria da revolução implica que a tensão de corte seja nula ($\tau_{r\theta} = \tau_{z\theta} = 0$);
- A tensão axial no adesivo pode ser ignorada ($\sigma_{zz}^{(c)} = 0$);
- A tensão axial σ_{zz} é uma função que depende apenas de da variável z .

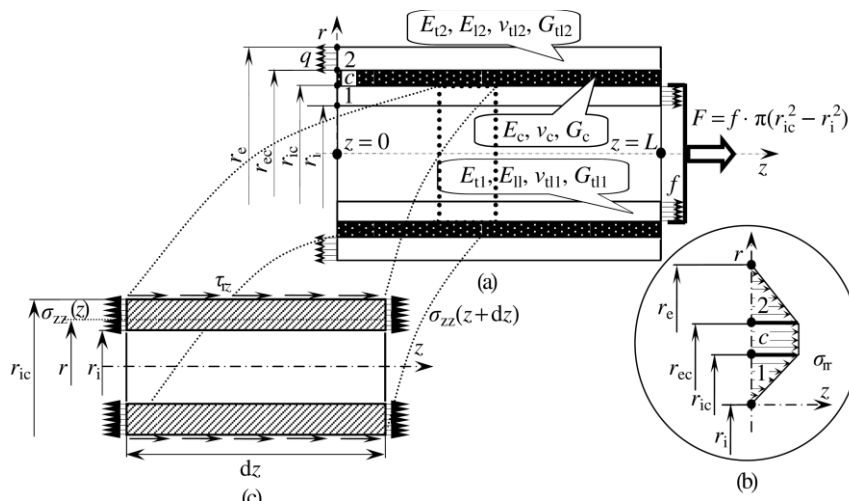


Figura 21 - Modelo e referenciais utilizados no cálculo de Nemes e Lachud [51].

Posto isso verificou-se que o campo de tensões fica então reduzido a aos seguintes componentes:

- No tubo interior (1)

$$\sigma_{zz}^{(1)}(z), \tau_{rz}^{(1)}(r, z), \sigma_{\theta\theta}^{(1)}(r, z), \sigma_{rr}^{(1)}(r) \quad (1)$$

-No adesivo (c)

$$\sigma_{\theta\theta}^{(c)}(z), \tau_{rz}^{(c)}(r, z), \sigma_{rr}^{(c)} = \text{constante} \quad (2)$$

-No tubo exterior (2)

$$\sigma_{zz}^{(2)}(z), \tau_{rz}^{(2)}(r, z), \sigma_{\theta\theta}^{(2)}(r, z), \sigma_{rr}^{(2)}(r) \quad (3)$$

As equações de equilíbrio de um volume elementar de uma junta tubular em função do comprimento são:

$$\frac{\partial}{\partial r} [r\sigma_{rr}^{(i)}] + \frac{\partial}{\partial z} [r\tau_{rz}^{(i)}] = \sigma_{\theta\theta}^{(i)} \quad (4)$$

$$\frac{\partial}{\partial r} [r\tau_{rz}^{(i)}] + \frac{\partial}{\partial z} [r\sigma_{zz}^{(i)}] = 0 \quad (5)$$

Esse estudo acabou por propor um novo modelo teórico para calcular tensões em juntas cilíndricas que se baseia na aplicação do cálculo variacional aplicado à energia potencial da junta.

Em 2012, Labbé e Drouet [52], realizam um estudo que se foca na otimização de juntas tubulares sujeitas a carga axial. Neste trabalho foram consideradas três etapas para se determinar a geometria ideal da junta tubular adesiva. A primeira etapa consiste numa análise de EF aplicada a cargas axiais de valor unitário e geometrias axi simétricas, desta forma a puderam realizar o estudo simplificando o esquema a um modelo 2D, em que o valor das tensões se torna irrelevante pois pretende-se avaliar apenas a distribuição de tensões. A segunda etapa consiste no estudo e na influência dos parâmetros representados na Figura 22.

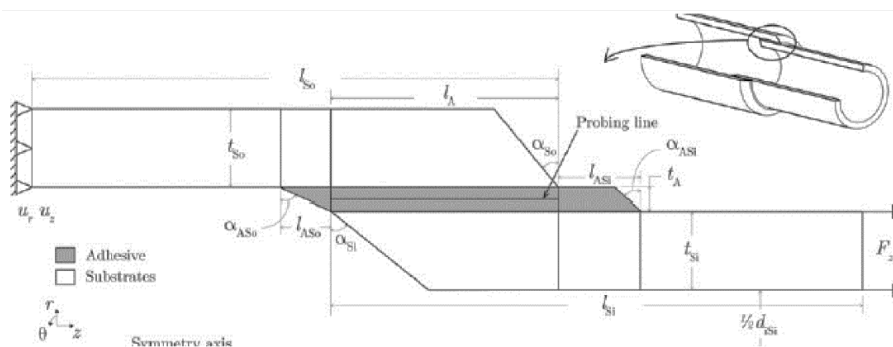


Figura 22 - Modelo 2D resultante do estudo de Labbé e Drouet [52]

Com a variação dos parâmetros e sua consequência na distribuição de tensões no adesivo é possível identificar o parâmetro geométrico de maior impacto na resistência da junta tubular adesiva.

A terceira etapa consiste num processo de otimização que passa por um processo evolutivo até atingir uma solução. Na Figura 23 é possível ver a base do algoritmo

genético, no qual se baseia esta etapa, em que a população do estudo passa por várias mutações até atingir uma solução ótima.

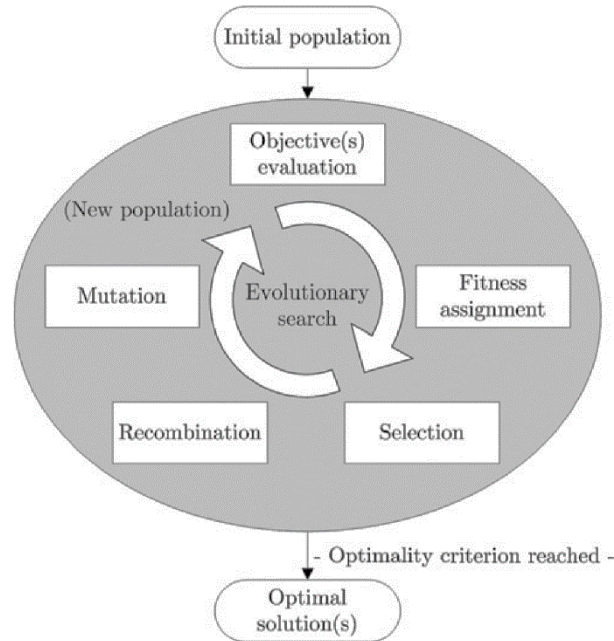


Figura 23 - Diagrama de aplicação de algoritmo genético [52].

Este processo possui, porém, um ponto negativo pois procura uma solução ótima que pode ser parcial ou global, isto é, o método aplicado passa por fazer pequenos incrementos sequencias (de adição ou subtração, dependendo do objetivo) a um parâmetro de estudo e verificar a sua influência no resultado final. A solução ótima surge quando um máximo/mínimo é atingido sendo a solução imediatamente anterior e posterior à obtida de pior resultado. No entanto, este pode ser um ótimo local e não a solução ótima para o problema inicial. A Figura 24 representa graficamente a aplicação de um algoritmo genético a um problema salientando a diferença entre uma solução ótima global e parcial.

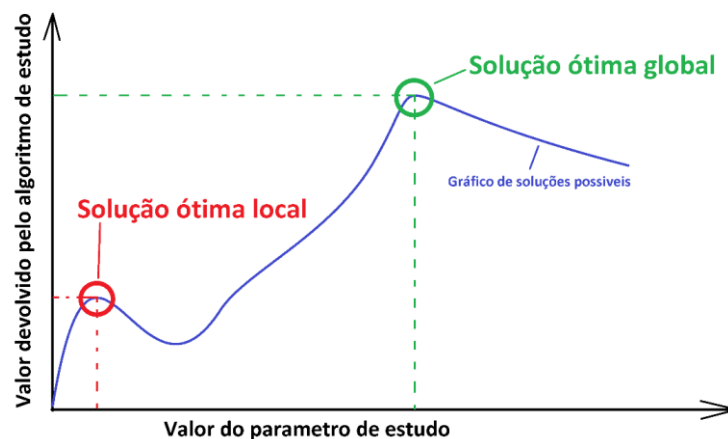


Figura 24 - Representação gráfica das soluções do estudo do algoritmo genético.

Para avaliar a aplicação deste método de três etapas, Labbé e Drouet [52] estudaram uma junta tubular adesiva de sobreposição simples com o objetivo de determinar um compromisso ideal entre a redução de massa (material utilizado) e a resistência que a junta oferece para uma aplicação deste tipo de juntas a veículos de transporte terrestre.

Depois de analisarem os resultados, verificam-se que todas as variáveis dimensionais têm influência significativa sobre o perfil de distribuição de tensões no adesivo, exceto quando o ângulo de chanfro da extremidade do substrato se encontrava compreendido entre 0° e 45° . Na etapa de otimização, realizaram quatro estudos com objetivos diferentes (para diferentes valores ideais de resistência ou peso) para conseguir realçar o conflito entre a leveza da junta e a sua resistência mecânica (quanto mais leve a junta menor será a sua resistência). Em todos os casos, o processo de otimização encontrou mais de 25 configurações ótimas que representam o melhor compromisso entre os objetivos. Das configurações de juntas ótimas obtidas conclui-se que as soluções otimizadas são caracterizadas por um comprimento elevado da ligação adesiva, uma fina camada de adesivo e um grande diâmetro interno do substrato e uma relação quase linear entre as espessuras dos substratos.

Este procedimento, que pode ser estendido a outros campos de aplicação, revela-se uma ferramenta valiosa no projeto de juntas tubulares adesivas de sobreposição simples submetidas a uma carga axial pois permite correlacionar a geometria ótima da junta.

2.2.2 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de torção

Para estudar a resistência ao corte puro tangencial em juntas tubulares adesivas aplica-se um momento torsor nos aderentes, tal como se pode ver, por exemplo, no trabalho de Hosseinzadeh et al. [47], em que foi elaborada uma investigação experimental e computacional combinada para estudar a resposta torsional de juntas tubular adesivas com substratos de aço. Na Figura 25 pode-se ver os constituintes e os parâmetros a ter em conta nesta análise em que foram avaliados diferentes comprimentos de sobreposição (L). As juntas apresentaram respostas muito dissimilares, resultando em vários valores de resistência última. Estes valores obtidos, embora não esteja de acordo com os resultados das análises elásticas anteriormente elaboradas, foi ainda confirmado por uma série de análises de elementos finitos elasto-plásticos. Na Figura 26 pode-se ver a malha de elementos axi-simétricos aplicada. A estratégia para definir o modelo de plasticidade, que foi baseada no ajuste dos parâmetros do modelo de plasticidade de Ramberg-Osgood. Foi verificado que o modelo de plasticidade desenvolvido poderia simular o comportamento das juntas com vários comprimentos com boa precisão. O modelo de plasticidade permitiu obter uma melhor compreensão da distribuição de tensão dentro da junta, bem como do modo de rotura.

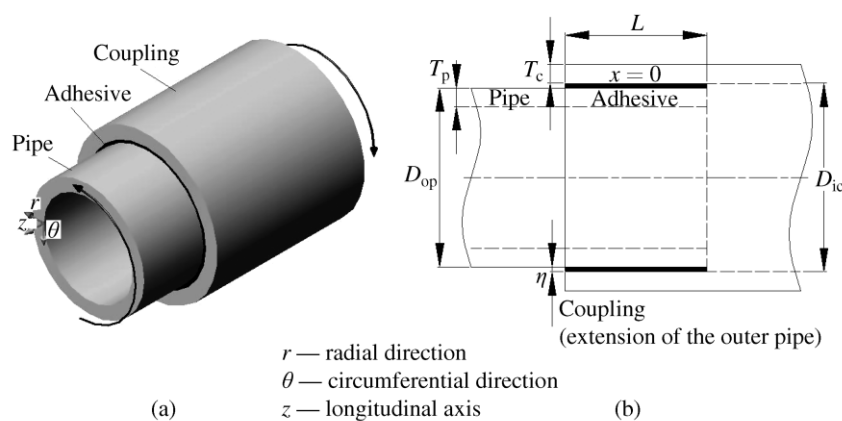


Figura 25 - Representação esquemática de uma junta tubular adesiva (a) -constituintes e (b) - elementos geométricos [47].

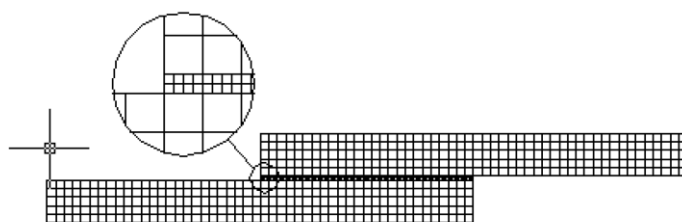


Figura 26 - Malha de elementos finitos axi-simétricos desenvolvida para o estudo parametrizado realçando em detalhe a forma de como a malha fina (na zona do adesivo) se funde com a malha mais grosseira dos substratos [47].

Os resultados mostraram que a resistência da junta é altamente dependente da energia absorvida pela mesma. Por outras palavras, à medida que o comprimento aumenta, a junta continua a absorver energia apesar mesmo depois de ter passado para o regime totalmente plástico (caso os seus constituintes o tenham). A partir dos resultados experimentais e do MEF, pode-se concluir que, ao determinar a vida de fadiga para diferentes comprimentos de sobreposição, não se pode confiar apenas no valor máximo de tensão desenvolvido na junta, visto que a tensão máxima foi similar em todas os comprimentos de sobreposição testados. Como a capacidade estática mudou à medida que o comprimento da sobreposição se alterou também a resistência da junta sob carga variável deve ser uma função da capacidade estática final da junta. Além disso, para determinar a vida à fadiga da junta sob carga torsional repetitiva, é aceite dizer que a carga cíclica aplicada seria proporcional à resistência última estática da junta determinada sob carga de torção, ao contrário da que foi determinada sob carga de tração. As conclusões anteriormente referidas são alvo de estudo para verificar experimentalmente que se aplicam as juntas tubulares ligadas com adesivos reforçados com fibras. Além de que o comportamento à fadiga das juntas também está é estudado tanto experimentalmente quanto computacionalmente. O objetivo final das investigações foi gerar critérios de projeto robustos e verificados para avaliar a

capacidade ótima de juntas tubulares sujeitas a torção tanto em condições de carga estática quanto variável.

Posteriormente, em 2014, Spaggiari e Dragoni [53] desenvolveram um estudo para explorar uma abordagem analítica através do controlo absoluto do cenário de junta tubular de sobreposição simples sujeita à torção, onde apenas existem tensões de corte. A configuração tubular é bastante comum em aplicações industriais, especialmente nos sistemas de transmissão de energia de pesados veículos rodoviários. Além disso, esta configuração elimina os picos de tensão de arrancamento e concentra-se apenas num tipo de carga externa, como por exemplo, o binário aplicado. O presente trabalho não considera apenas a aplicação de um módulo de colagem funcionalmente graduada (CFG), mas também conta com a variação da espessura do adesivo ao longo junta, a fim de fazer uma modificação mais aprofundada da rigidez da junta. Esta topologia é bastante simples de ser obtida com um ligeiro afunilamento interno ou externo dos aderentes e ajuda a minimizar picos de tensão. O trabalho primeiro desenvolve as equações que regem a distribuição das tensões de corte no adesivo e, ao forçar a tensão de corte a ser constante ao longo da direção axial, descobre em que consiste o perfil de rigidez ao longo da junta. Os resultados mostram que uma solução para a forma do gradiente da distribuição ideal de rigidez é obtida em função dos parâmetros elasto-geométricos da junta. Consequentemente foram elaborados trabalhos para desenvolver uma análise mais genérica de estruturas que relacione a rigidez torsional com a tensão de corte, de forma a poder calcular todas as formas de tensão de corte possíveis de uma só vez.

A junta tubular de sobreposição simples (JTSS) encontra-se representada na Figura 27. O alvo de estudo é um provete constituído por dois aderentes constituídos por um material isotrópico de comportamento linear elástico ligados por um adesivo, e sujeito a um momento torsor (representado com a letra C na Figura 27). Os aderentes não possuem restrições e podem ser feitos de materiais diferentes, enquanto a camada de adesivo é formulada sob a hipótese de ter uma espessura negligenciável para não haver variações de tensões na direção radial. Esta última suposição implica uma distribuição linear do deslocamento no adesivo na direção radial.

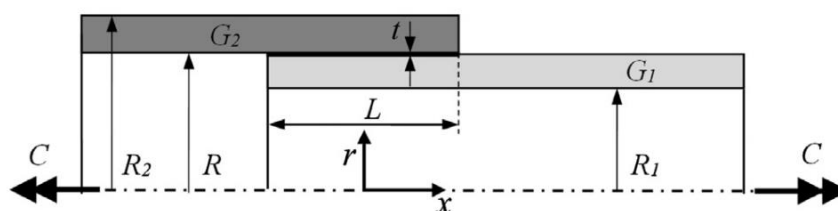


Figura 27 – Secção e representação das variáveis da consideradas na análise de tensões de uma junta tubular de sobreposição simples [53].

Foi realizada uma análise de tensões considerando uma porção elementar da junta, como mostrado na Figura 28. A configuração indeformada é relatada na Figura 28-a), enquanto a deformação da junta após as aplicações do momento torsional é representada na Figura 28-b). A ação do momento torsesor aplicado conduz a uma deformação de corte diferencial no adesivo ao longo da coordenada axial.

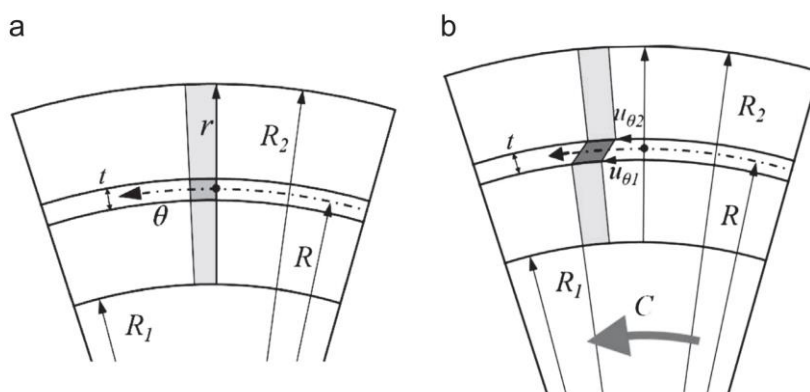


Figura 28 - a) Configuração dos referenciais para deformações circunferenciais; b) - configuração deformada na seção axial de uma junta tubular de sobreposição simples sob o momento torsional aplicado C [53].

Foi concluído, através de uma análise de tensões, que o adesivo de módulo funcionalmente graduado (AMFG) tem a capacidade teórica de alterar suas propriedades elásticas em função do reforço dentro da linha de adesão. Esta capacidade pode ser explorada para diminuir as concentrações típicas de tensão que surgem nas extremidades da camada adesiva devido à diferença de rigidez do adesivo e dos aderentes. A hipótese subjacente é a possibilidade de alterar o módulo de corte do adesivo “ad libitum” dentro da linha de adesão. Então, é possível obter tensões de corte constantes no adesivo para maximizar a capacidade de carga e calcular a distribuição ideal da rigidez do adesivo, incluindo também a espessura do adesivo. O principal resultado foi a definição da equação analítica para a rigidez adesiva não dimensional necessária para obter uma tensão de corte constante no adesivo em função dos parâmetros elasto-geométricos da junta. Além disso, foram fornecidas algumas considerações sobre a influência da rigidez dos aderentes e a distribuição da posição de pico por gráficos, que podem ser usados para adequar a distribuição de reforços.

2.2.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

Em 2004, Canyurt [54] tentou estimar a tensão de fadiga em juntas tubulares adesivas utilizando o modelo aproximação da tensão de fadiga através do algoritmo genético (MATFAAG). Este algoritmo é conhecido como algoritmo genético pois baseia-se na mesma filosofia que Darwin utilizou quando elaborou a sua teoria sobre sobrevivência das espécies melhor adaptadas. Nesta teoria, o código genético das espécies evolui de forma a adequar e a desenvolver as características dos indivíduos para assegurar a sua sobrevivência ao meio que o rodeiam. Na Figura 23 pode-se observar um diagrama que

ordena de forma simplificada o processo de aplicação do algoritmo genético. Neste estudo Canyurt pretende encontrar equações que descrevam a evolução da desenvolvida pelo adesivo num conjunto de juntas tubulares (população) sujeito a esforços cíclicos modificando as condições ambientais, neste caso a rugosidade da superfície, a espessura de adesivo, comprimento de sobreposição, o material dos aderentes e a temperatura de forma a determinar qual o efeito que cada parâmetro tem sobre a resistência à fadiga.

Para dar início ao estudo e formular um ponto de partida, Canyurt baseou-se nos resultados do estudo de Sekercioglu [55] sobre o comportamento de juntas adesivas sujeitas a esforços variáveis e a modificações individuais de rugosidade superficial, espessura de adesivo, comprimento de sobreposição e material do aderente, e aplicou-os a juntas adesivas tubulares. O efeito da temperatura sobre o adesivo e posteriormente resistência da junta foram retirados o livro de Loctite Handbook [56]. As equações do MATFAAG foram definidas para o uso do adesivo Loctite® 638 e L igual ao diâmetro, de 30 mm. Para a realização do estudo através do MATFAAG foram definidos pelo utilizador os parâmetros definidos na Tabela 5.

Tabela 5 - Parâmetros do MATAAG utilizado no estudo de Canyurt adaptado de [54]).

Parâmetro	Valor
Tamanho da população (n)	80
Número de geração (k)	250
Número de desenho das variáveis (t)	21 (quadrática) – 26 (cúbica)
Probabilidade de transmissão (pc)	0,8
Probabilidade de mutação (pm)	0,02

Chegou-se à conclusão de que é possível aplicar uma adaptação computacional do algoritmo genético a componentes cilíndricos ligados com adesivos sob cargas dinâmicas. Posteriormente, comparando os resultados obtidos numericamente com os experimentais de Sekercioglu [55] e Loctite Handbook [56], concluiu-se que:

(a) A maior dimensão da análise devido à adição de variáveis não implica um aumento proporcional do esforço computacional. O número de análises de função depende diretamente do tamanho da população. Nos modelos quadrático e cúbico experimentados neste trabalho, para um tamanho populacional de 80, foram necessárias aproximadamente 250 interações.

(b) O MATFAAG pode ser usado como solução alternativa e técnica de estimativa para as técnicas de estimativa disponíveis. É de natureza exequível fornecer muitas soluções quase ótimas para estimar a resistência à fadiga. Portanto, o modelo MATFAAG pode

ser usado como uma técnica de estimativa eficiente para prever a resistência à fadiga da junta tubular adesiva usando materiais de como aço, bronze e alumínio. O modelo MATFAAG diz que qualquer tipo de representação matemática pode ser resolvido usando a abordagem de algoritmos genéticos, desde que a representação da função seja adequada.

(c) Os resultados obtidos do MATFAAG indicam que não há relação significativa entre os parâmetros do projeto, a rugosidade da superfície, as folgas de ligação, a interferência de montagem, o material dos substratos e a temperatura.

(d) Os resultados do MATFAAG são comparáveis aos dados experimentais.

Em 2010, Hwang e Lee [57] verificaram que a maioria dos estudos em juntas adesivas se foca na evolução do comportamento do adesivo com a variação da temperatura, e decidiram estudar a influência deste parâmetros nas características de fadiga de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples. Determinou-se então a resistência estática e a vida à fadiga (número de ciclos) das juntas tubulares adesivas com aderentes de aço submetidos à temperatura ambiente. Em seguida, as relações entre os parâmetros de curvas de tensão-vida (isto é, curvas S-N) e a tensão estática em juntas tubulares adesivas de sobreposição simples foram obtidas a partir de resultados experimentais. Além disso, foi desenvolvido um modelo de previsão de vida à fadiga para as juntas tubulares adesivas de sobreposição simples, relacionando a tensão estática à temperatura ambiente e a temperatura elevada com os parâmetros das curvas S-N à temperatura ambiente de dois adesivos com base de epóxido, um adesivo da Araldite® e outro o IPCO 9923.

A análise dos provetes à torção estática com variação da temperatura aumentando a temperatura a uma velocidade de 5°C/min permitiu concluir que o adesivo epóxido da Araldite® diminuiu a sua resistência de 42,6 MPa a 25°C para 26,3 MPa a 80°C, que corresponde a uma degradação de 38%. Contudo, a tensão de corte estática da junta tubular adesiva de sobreposição simples com o adesivo epóxido IPCO9923 diminuiu de 25,8 MPa a 25°C para 3,4 MPa a 60°C, o que corresponde a 88% de degradação.

Para testar a resistência de juntas tubular adesivas de sobreposição simples submetidas à fadiga, aplicou-se uma frequência de solitação de 2000 rpm e obtiveram-se os gráficos da Figura 29, relacionando o momento máximo que a junta suporta com a temperatura.

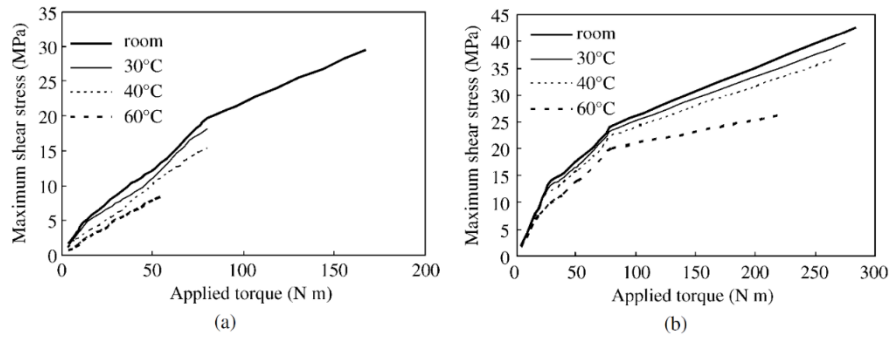


Figura 29 – Valores de Tensão de Corte máximos aplicados a uma junta tubular adesiva calculados a partir da degradação da resistência da junta à variação de temperatura com a variação do momento aplicado. (a) com IPCI9923; (b) com adesivo epóxico da Araldite® [57].

Com esta informação, e estimando a resistência à fadiga de juntas tubulares adesivas de sobreposição simples, criaram-se os gráficos da Figura 30, em que se pode comparar a previsão que Hwang e Lee [57] com os valores experimentais obtidos.

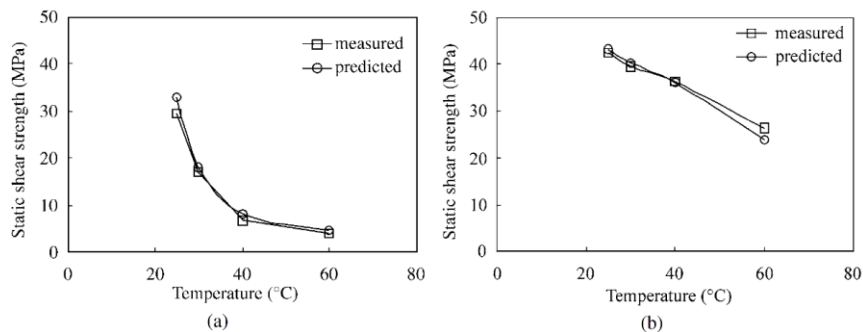


Figura 30 – Comparação de valores obtidos teoricamente com valores experimentais. (a) com IPCI9923; (b) com adesivo epóxico da Araldite® [57].

Posto isso, chegou-se à conclusão que o modelo desenvolvido para estimar a vida de fadiga para as juntas tubulares adesivas de sobreposição simples pode ser usado para prever com bastante precisão a vida à fadiga a temperaturas elevadas, baseando-se na resistência à fadiga à temperatura ambiente e na relação entre a resistência ao corte estático à temperatura ambiente e a temperaturas elevadas.

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, tudo isto relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas atrás. As duas

metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [58], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [59] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [60], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho virtual da fenda (TFVF). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [61]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento contínuo.

2.3.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [58], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [62] usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os

mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de LO. Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [63]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [60], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.3.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [64]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [65] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [66]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [67] e por Rice [68] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [69], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

2.3.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [70] e Dugdale [71], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [72].

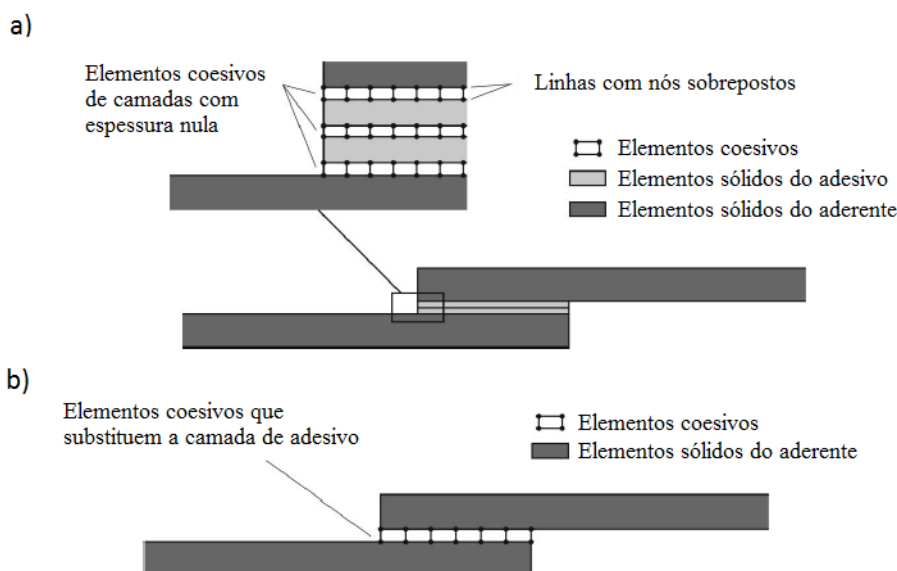


Figura 31 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [69])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [73]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas

são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 31), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [74], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [75].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [76]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [77].

2.3.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [78], triangular [79], exponencial [80], polinomial [81] e trapezoidal [75]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [82].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [83]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [84] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 32).

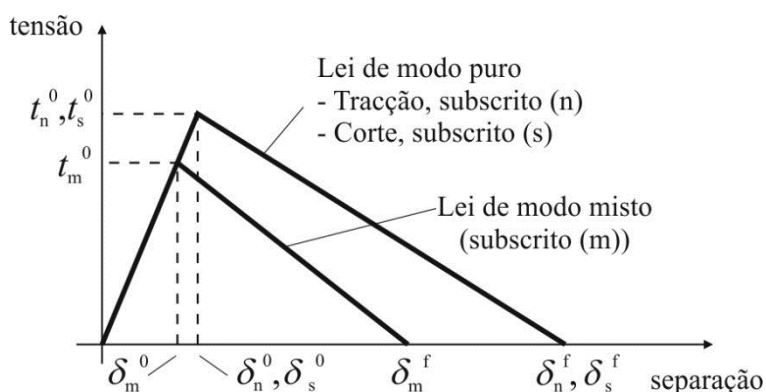


Figura 32 – Modelo coesivo triangular [84, 85]

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [86].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [87] e modo II [88].

2.3.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [89]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [90], alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados [75, 91].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devidos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [92]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [93]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [94]. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [92], pela diferenciação

das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{IC} e G_{IIC} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{IC} e G_{IIC} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{IC} e G_{IIC} .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{IC} e G_{IIC} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{IC} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{IC} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- J [95]. Rice [68] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{IC} em provetes DCB através do método de integral- J , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [96]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{IC} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [88]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [97], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 33. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

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

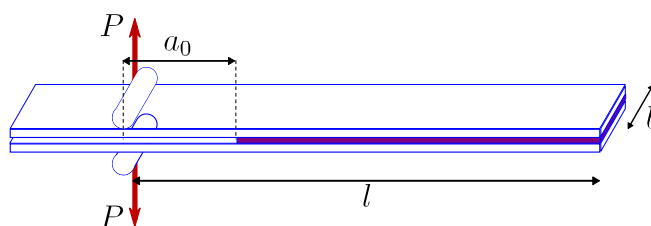


Figura 33 – Geometria do provete DCB [98].

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 34). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2l$) [99]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{IC} por esta medição [100].

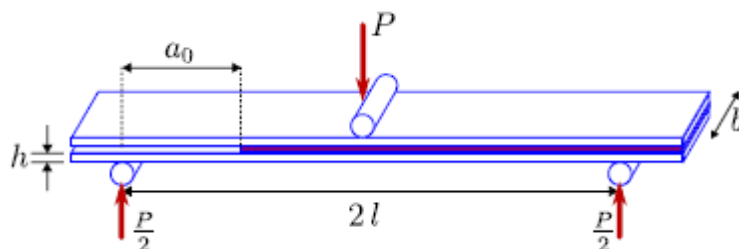


Figura 34 – Geometria do provete ENF [98].

2.3.3.2.1 Método de definição individual dos parâmetros

Este método começa pela escolha da forma da lei coesiva a utilizar para o material (neste caso adesivo), em função do seu comportamento conhecido [94]. De seguida, calcula-se separadamente cada um dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios apropriados. Segundo este método, pelo menos um dos parâmetros das leis coesivas é obtido por consideração das propriedades do adesivo como material maciço. Assim, esta técnica pode por exemplo envolver a utilização de propriedades de adesivo maciço como aproximação para os valores de t_n^0 e t_s^0 . No entanto, como os parâmetros coesivos dependem da espessura de adesivo (t_A) e espessura do substrato, sempre que for aplicada esta aproximação, são esperados desvios entre a previsão quantitativa dos parâmetros coesivos e o comportamento real da ligação adesiva [101]. No trabalho de Campilho et al. [86], t_n^0 e deslocamento de tração de início de amaciamento (δ_n^s) foram obtidos a partir da curva tensão – deformação (σ - ϵ) de provetes de adesivo maciço, tendo em consideração o trabalho de Andersson e Stigh [102], onde se observou que t_n^0 é da mesma ordem de grandeza da resistência à tração medida em testes de adesivo maciço, e também que δ_n^s e deslocamento de corte de início de amaciamento (δ_s^s) não influenciam significativamente os resultados numéricos. Por outro lado, o valor de t_s^0 foi estimado a partir de t_n^0 , considerando o critério de von Mises para materiais isotrópicos. Devido à baixa influência nos resultados, δ_s^s foi definido considerando que a lei coesiva ao corte idêntica à da lei de tração. Os valores de G_{IC} e G_{IIC} foram estimados a partir de testes DCB e ENF, respetivamente. Para uma avaliação do efeito das aproximações feitas anteriormente, os autores também levaram a cabo uma análise de sensibilidade

numérica, cujos resultados mostraram que os valores de δ_n^s e δ_s^s das leis MDC de juntas adesivas não têm influência visível no modo de rotura e resistência das juntas.

2.3.3.2.2 Método inverso

O método inverso é um processo iterativo que consiste em ajustar os dados obtidos nas simulações de MEF aos dados obtidos experimentalmente, até se obter uma boa concordância entre os dois por variação de parâmetros coesivos. Este método necessita inicialmente de uma reprodução precisa da geometria da junta adesiva e utiliza leis coesivas aproximadas, com base no comportamento típico do material a ser simulado. Ao contrário do método de definição individual dos parâmetros, o método inverso fornece uma estimativa mais precisa do comportamento do adesivo nas condições reais em que este vai ser aplicado [103]. Para a determinação de leis coesivas de adesivos, o procedimento habitual consiste na utilização de valores de G_{IC} ou G_{IIC} obtidos em ensaios de fratura (DCB ou ENF, respetivamente) como parâmetros de entrada da lei coesiva respetiva, e posterior utilização de valores aproximados de t_n^0 ou t_s^0 para a iniciação do processo iterativo de tentativa e erro. A estimativa destes é então realizada por algumas iterações numéricas até se alcançar uma previsão precisa dos dados experimentais. O método inverso utiliza padrões de ajuste iterativo como as curva-R [104], o perfil de abertura de fenda [105] ou, mais habitualmente, a curva $P-\delta$ [106].

2.3.3.2.3 Método direto

O método direto é um método que permite obter de forma exata as leis coesivas de um material ou uma junta adesiva, uma vez que estas são estimadas a partir dos dados experimentais de testes de fratura, tais como o DCB ou ENF [92]. Estes ensaios permitem obter os valores de G_I (tração) ou G_{II} (corte) em função do deslocamento relativo na extremidade da fenda (δ_n para a tração ou δ_s para corte). As leis coesivas pelo método direto são determinadas pelas curvas $G_I-\delta_n$ ou pelas curvas $G_{II}-\delta_s$, cuja diferenciação permite obter as leis coesivas em tração ou em corte, respetivamente.

No âmbito da utilização do método direto em tração pelo ensaio DCB, Stigh et al. [96], em trabalho realizado baseando no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que, para as camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas. Assim, o integral- J pode ser calculado ao longo dum caminho arbitrário que contorna a fenda. Para o ensaio de DCB, aplicado o conceito do balanço energético e da teoria das vigas para determinar a taxa de libertação de energia em Modo I, G_I , tem-se que

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + P\theta_0 \quad \text{ou} \quad G_I = P\theta_p, \quad (7)$$

em função da carga aplicada por unidade de largura (P_u), módulo de Young dos aderentes (E), rotação relativa dos aderentes na ponta da fenda (θ_0) e rotação relativa dos aderentes na linha de carga (θ). Campilho et al. [107], em trabalho realizado com base na equação fundamental do integral- J definida por Rice [68], chegaram à equação **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** para determinar o valor de G_{IC} , que permite obter a expressão da lei coesiva

$$G_I = \int_0^{\delta_n^f} t_n(\delta_n) d\delta_n, \quad (8)$$

sendo δ_n e δ_n^f a abertura da fenda atual e de rotura, respetivamente, medidas em α_0 , e t_n a tensão normal de tração aplicada. Por diferenciação da expressão **Erro! A origem da referência não foi encontrada.** obtém-se a lei coesiva à tração

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_I}{\partial \delta_n}. \quad (9)$$

Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir a relação de P , a , δ_n e θ_0 . Para efeitos de cálculo de G_{IC} , considera-se o valor de patamar da curva G_I - δ_n .

Para a fratura em modo II pelo ensaio ENF, está disponível uma formulação de cálculo de G_{IIc} pelo método do integral- J [91]. O valor do integral- J é dado por

$$G_{II} = \frac{9}{16} \frac{(P_u a)^2}{E h^3} + \frac{3}{8} \frac{P_u \delta_s}{h}. \quad (10)$$

Pela avaliação do integral- J ao longo de um caminho exterior à zona de processo de fratura, pode-se escrever

$$G_{II} = \int_0^{\delta_s^f} t_s(\delta_s) d\delta_s, \quad (11)$$

onde δ_s e δ_s^f são, respetivamente o deslocamento atual em corte na ponta da fenda e o deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda. Mais uma vez pela diferenciação da expressão anterior obtém-se

$$t_s(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (12)$$

A expressão obtida indica que é possível obter a relação entre tensão de corte (t_s) e δ_s , ou seja, a lei coesiva em corte do adesivo, por diferenciação da curva de G_{II} em função do valor medido durante o ensaio de δ_s . O comportamento observado em ensaio

consiste numa curva crescente de $G_{II}=f(\delta_s)$ até um patamar, que ocorre aquando do início da propagação da fenda e corresponde a $G_{II}=G_{IIc}$, e cuja diferenciação resulta diretamente na lei coesiva experimental para a camada de adesivo. Assim, o procedimento do ensaio consiste em medir a relação de P , a e δ_s .

2.3.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [108] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [109] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [72].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [110]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [111] ou do número de ciclos para análises de fadiga [112, 113]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [114].

Hua et al. [115] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [116] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido

atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.3.5 Método dos Elementos Finitos Extendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [117]. Belytschko e Black [118], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [119]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [120].

Campilho et al. [121] utilizou o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 35). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do

comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

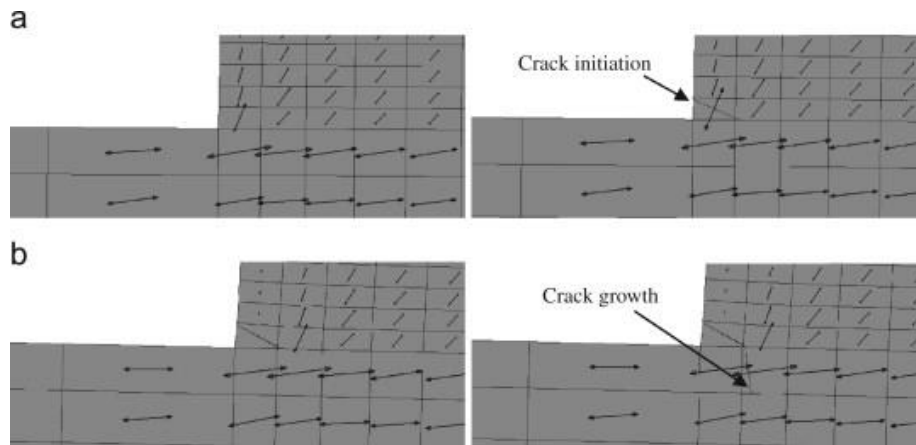


Figura 35 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [121].

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

A fim de estudar o comportamento de uma junta tubular adesiva, decidiu-se criar uma série de ensaios de tração, com provetes ligados com adesivos de diferentes propriedades e alteração de parâmetros de geometria. Desta forma consegue-se recolher uma série de dados que serão muito úteis para uma posterior comparação com cálculo numérico, que é feito através do *software* Simulia ABAQUS® (Dassault Systèmes). Esta comparação servirá para poder validar ou descartar os resultados de previsão numérica.

3.1.1 Descrição da geometria e materiais

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais usados no trabalho experimental, mais propriamente os substratos e os adesivos. Estes materiais devem ser adequados aos processos de fabrico escolhidos e fornecer informação relevante sobre o comportamento de juntas tubulares adesivas, que pela sua geometria se tornaram alvo de estudo.

3.1.1.1 Substratos

Os substratos de todas as juntas adesivas concebidas e estudadas são em liga de alumínio, nomeadamente a liga AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção 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 [122], onde foram obtidas as seguintes propriedades: resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração de 21,70±4,24%.

Na Figura 36 é possível observar as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio, que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [122]. Está representada também a aproximação numérica usada nos modelos MDC [123].

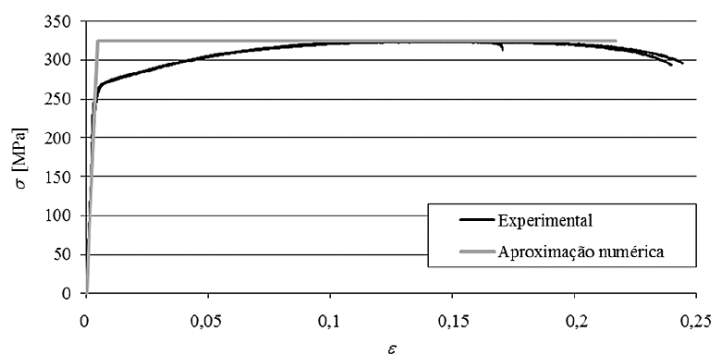


Figura 36 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [124].

3.1.1.2 Adesivos

De forma a promover a união entre os substratos, foram selecionados três tipos de adesivos para as juntas adesivas tubulares: Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite® 2015 (adesivo epóxico dúctil), e SikaForce® 7752 (adesivo poliuretano estrutural, combina alta ductilidade e resistência moderada).

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 com o endurecedor HV 998 é um sistema epóxico bi-componente que, quando combinado, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. É um adesivo frágil. A combinação dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/40 g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso ao uso de uma espátula [125]. Este adesivo é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [126].

As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 37. Estas curvas foram obtidas experimentalmente. As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 6.

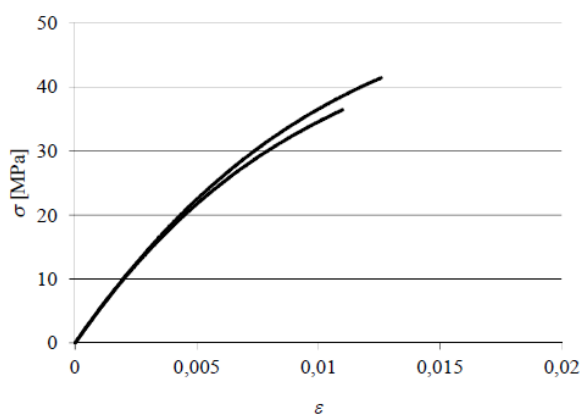


Figura 37 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [124]

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [127]

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

^a valor do fabricante

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural bi-componente, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [126].

O Araldite® 2015 é fornecido em cartuchos, possui dois componentes, e a sua cura é efetuada à temperatura ambiente. A sua razão de aplicação é de 50 g/50 g, sendo a mistura realizada por um bico e aplicado por meio de uma pistola de aplicação [125].

As curvas σ - ε de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 38. As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 7.

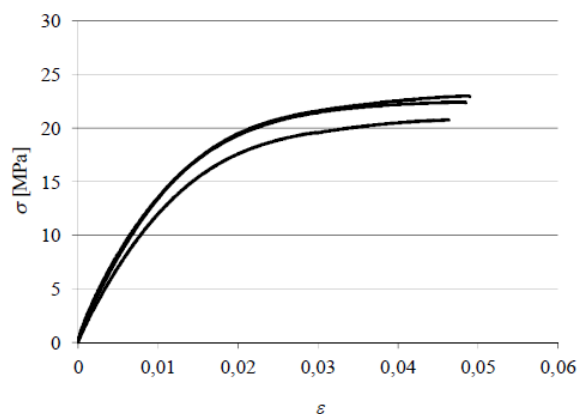
Figura 38 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [126]

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [126]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coeficiente de Poisson, ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$14,60 \pm 1,30$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,90 \pm 1,80$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$43,90 \pm 3,40$
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$

^a valor do fabricante

Comparando os valores da Tabela 6 com os valores da Tabela 7, verifica-se que a deformação de rotura ao corte do adesivo Araldite® 2015 é quase seis vezes superior ao valor apresentado para o adesivo Araldite® AV138. No entanto, a tensão de rotura ao corte do adesivo Araldite® AV138 é praticamente o dobro da registada para o adesivo Araldite® 2015.

3.1.1.2.3 SikaForce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor (FRW L60). A sua relação de mistura em peso é de 5 para 1. Trata-se de um adesivo dúctil que, comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, é o que apresenta a menor resistência ao corte e à tração. Na Figura 39 estão representadas as curvas σ - ε do adesivo e na Tabela 8 as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo.

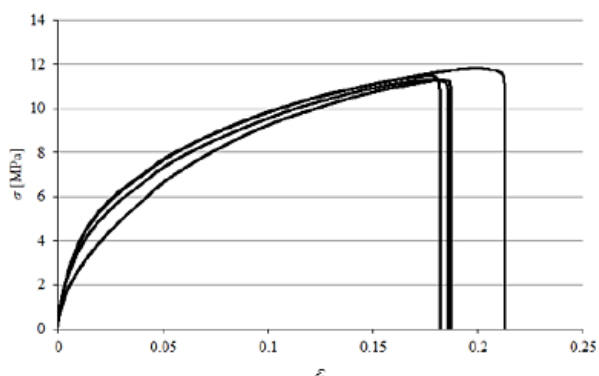


Figura 39 – Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [44]

Tabela 8 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [44]

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de Young, E [MPa]	493,81 ± 89,6
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24 ± 0,5
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,49 ± 0,3
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	19,18 ± 1,4
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	187,75 ± 16,4
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16 ± 1,1
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17 ± 0,6
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	54,82 ± 6,4
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	2,36 ± 0,2
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41 ± 0,5

^a valor do fabricante

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas com este adesivo seja elevada, pois o mesmo combina uma resistência muito aceitável

com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são esperadas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [128].

3.1.2 Geometria das juntas

Na Figura 40 e na Tabela 9 estão representadas respetivamente, a configuração e a designação das cotas utilizadas dos provetes.

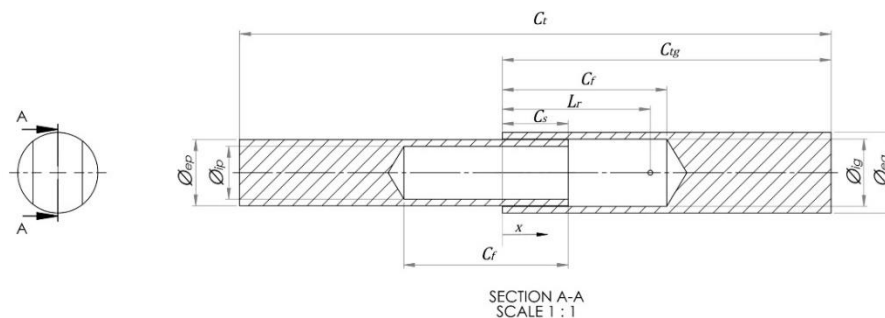


Figura 40 - Desenho de definição da geometria da junta [elaboração própria].

Tabela 9 – Designação das cotas dos provetes e respetivos valores (em mm).

Designação	Dimensões [mm]	
Comprimento de sobreposição, C_s	20	40
Comprimento dos substratos, C_{tg}	120	120
Comprimento total da junta tubular, C_t	220	200
Diâmetro externo do substrato interior, \varnothing_{ep}	20,0	20,0
Diâmetro externo do substrato exterior, \varnothing_{eg}	24,4	24,4
Diâmetro interno do substrato interior, \varnothing_{ip}	16	16
Diâmetro interno do substrato exterior, \varnothing_{ig}	20,4	20,4
Espessura do adesivo, t_A	0,2	0,2
Profundidade da caixa, C_f	50	50
Posição do respiro, L_r	45	45

Os provetes utilizados possuem uma forma cilíndrica oca com as extremidades maciças ligeiramente facejadas para facilitar a fixação do provete durante o ensaio de tração. A espessura do adesivo (t_A) é a mesma para todas as amostras (0,20 mm). Os diâmetros interiores e exteriores dos substratos (\varnothing_{ip} , \varnothing_{ig} , \varnothing_{ep} e \varnothing_{eg}) também são constantes em todos os provetes independentemente do comprimento de sobreposição que o provete possa ter. O comprimento total de cada substrato (C_{tg}) tem o valor de 120mm. Os

substratos possuem um furo com profundidade (C_f) de 50 mm permitindo criar uma junta tubular na zona de estudo em que ambos os tubos possuem a mesma espessura de parede (2 mm). Foram concebidas dez amostras para cada um dos três adesivos em estudo, cinco delas com um comprimento de sobreposição (C_s) de 20 mm e as restantes cinco com 40 mm. O valor do comprimento total (C_t) da amostra em estudo depende de C_s . No momento da concepção dos provetes verificou-se a necessidade de criar um furo de respiro de forma a aliviar a pressão do ar preso no interior da junta quando se faz deslizar um substrato pelo outro. Este furo deve ter a dimensão menor possível e estar afastado da zona ligada (C_s) para ter o menor impacto possível na resistência da junta que pode conduzir a uma diminuição da resistência do substrato, provocando a uma rotura precoce levando todo o provete a ser excluído dos resultados.

3.1.3 Processo de fabrico

A forma de fabricar as juntas testadas tem que atender a necessidade de garantir de forma rigorosa as dimensões de estudo. Escolhe-se assim a maquinaria para fabricar os provetes em alumínio e, após a maquinaria, a colagem foi feita utilizando gabaris de montagem e pequenos fios calibrados para assegurar que a geometria da junta obtida tem as dimensões e folgas corretas.

Para iniciar o fabrico da junta encomendou-se o material (AW6082-T651) maciço sob a forma de um redondo com $\varnothing 25$ mm com 120 mm de comprimento para os substratos exteriores e $\varnothing 20$ mm com 120 mm para o fabrico dos substratos interiores. Esta encomenda foi feita tendo em conta a que se pretendia estudar o efeito do adesivo no seio de dois provetes com diferentes diâmetros e parede 2 mm.

Definiu-se que seriam necessários dois tipos de provetes, os interiores e os exteriores em que o processo de fabrico dos dois provetes seria idêntico modificando apenas os diâmetros das partes obtidas.

3.1.3.1 Maquinagem

Antes de se iniciar o processo de maquinaria é necessário ter em consideração as normas de segurança de forma a minimizar a probabilidade de acontecerem acidentes com feridos. Por este motivo, usa-se sempre equipamento de proteção para o operador que passa pela utilização de bata, luvas, óculos, botas de biqueira e palmilha reforçada.

Para além do equipamento de proteção, é necessário também equipamento de medição (comparador micrométrico, representado na Figura 41, e paquímetro, representado na Figura 42).



Figura 41 - Comparador analógico de Mitutoyo® da série 511 [129].

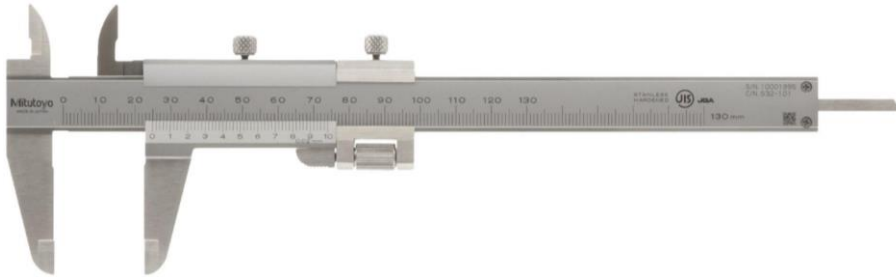


Figura 42 - Paquímetro analógico da Mitutoyo® da série 532 [130].

Para dar início à maquinagem, é necessário retificar o exterior de forma a garantir que a superfície de aperto do provete durante todo o processo de maquinagem é cilíndrica (Figura 43).

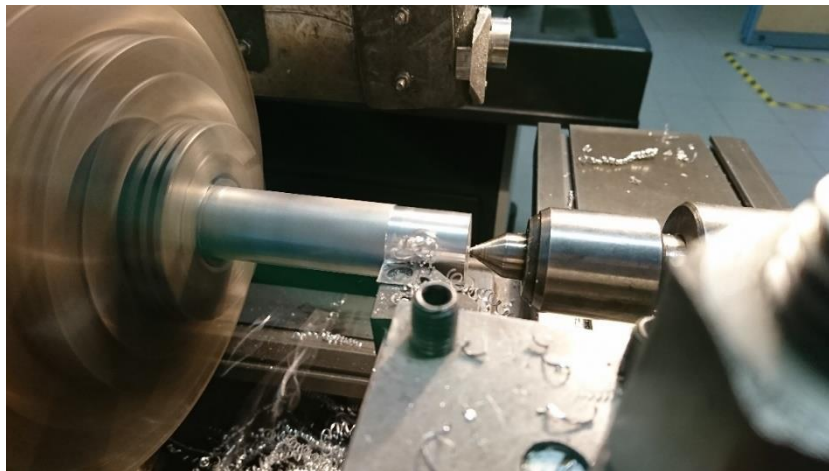


Figura 43 - Maquinagem exterior do provete com buril de pastilhas .

Como a zona de parto na bucha do torno não pode ser torneada, é necessário virar o provete ao contrário. Para garantir que os apertos ficaram concêntricos, uma parte previamente maquinada fica por fora da bucha e é utilizado um comparador para verificar o posicionamento do aperto (Figura 44).

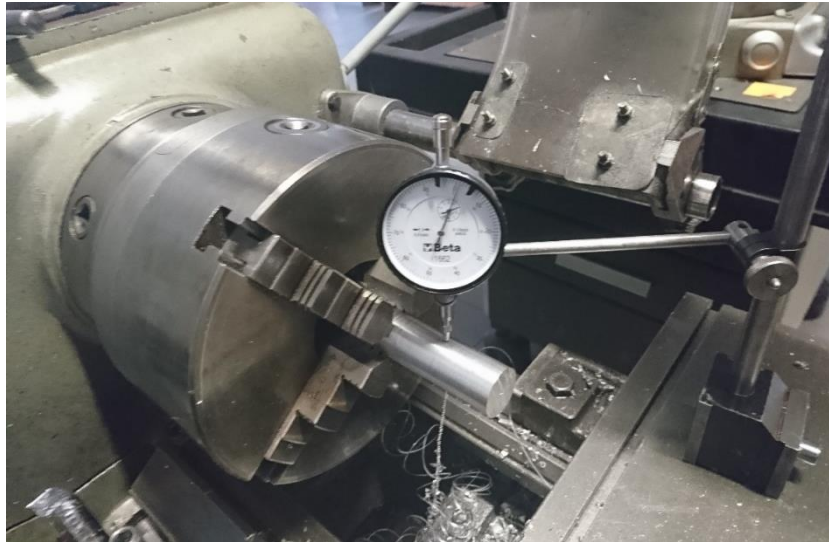


Figura 44 - Utilização de comparador fixo em suporte de ímã para verificar concentricidade do aperto.

Tendo verificado e retificado a cota exterior, $\varnothing 24,2$ mm para o substrato exterior e $\varnothing 20,0$ mm para o substrato interior, inicia-se o fabrico das caixas de forma a obter uma secção tubular.

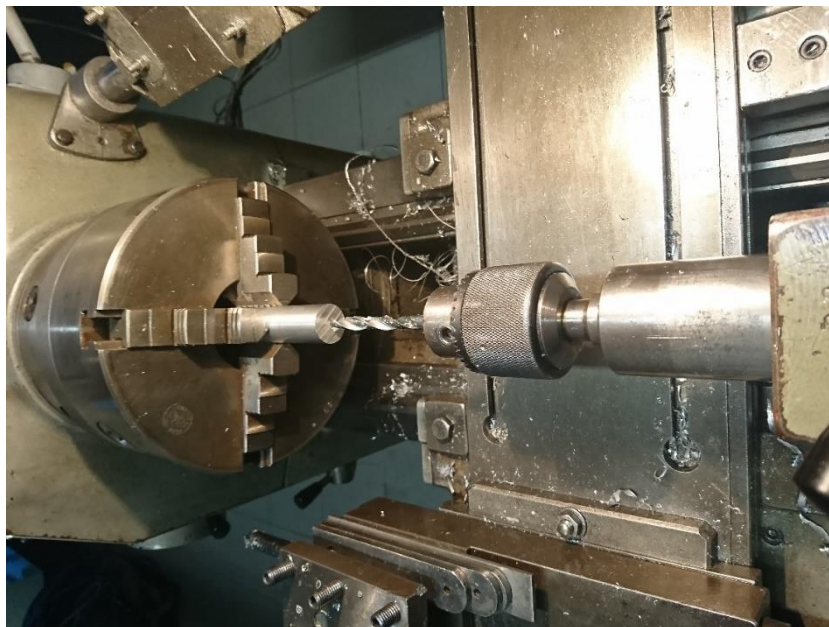


Figura 45 - Furo inicial com broca HSS de $\varnothing 8$ mm.

Sendo o substrato maciço, inicia-se o fabrico do furo através de uma utilização sequencial de brocas com diâmetros diferentes e no final utiliza-se um buril de pastilhas para retificar a cota interior. Nas imagens que se seguem pode-se ver a sequência de etapas para o fabrico do furo começando pelo furo inicial com uma broca de aço rápido (HSS que deriva do inglês "*high speed steel*") de $\varnothing 8$ mm (Figura 45), seguida de outras duas brocas HSS com $\varnothing 12$ mm (Figura 46) e $\varnothing 16$ mm (Figura 47). No final utiliza-se o

buril de pastilhas (Figura 48) para retificar o diâmetro do furo que apesar de não possuir capacidade de perfuração poder ser utilizado para facejar o topo dos substratos (Figura 48 e Figura 49). O facejamento dos substratos, para além de garantir o rigor geométrico, permite retificar a profundidade do furo e ter uma face para se utilizar como referência no momento de fabrico da junta.

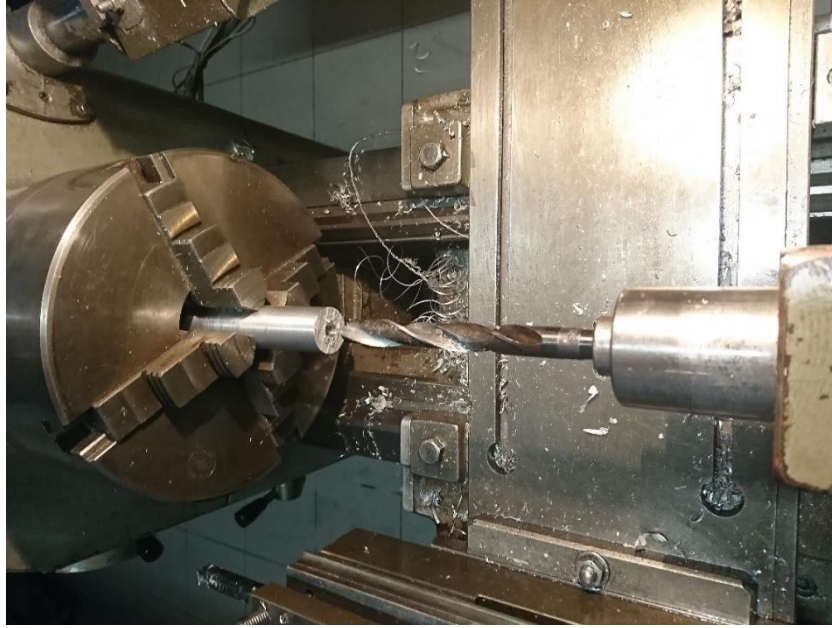


Figura 46 – Aumento de furo com broca HSS de $\varnothing 12$ mm.

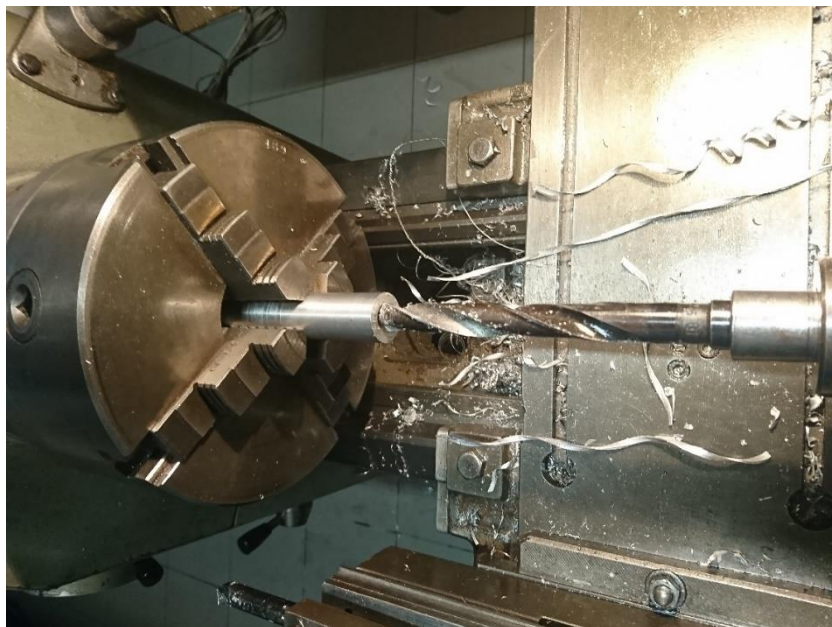


Figura 47 – Aumento de furo com broca HSS de $\varnothing 16$ mm.

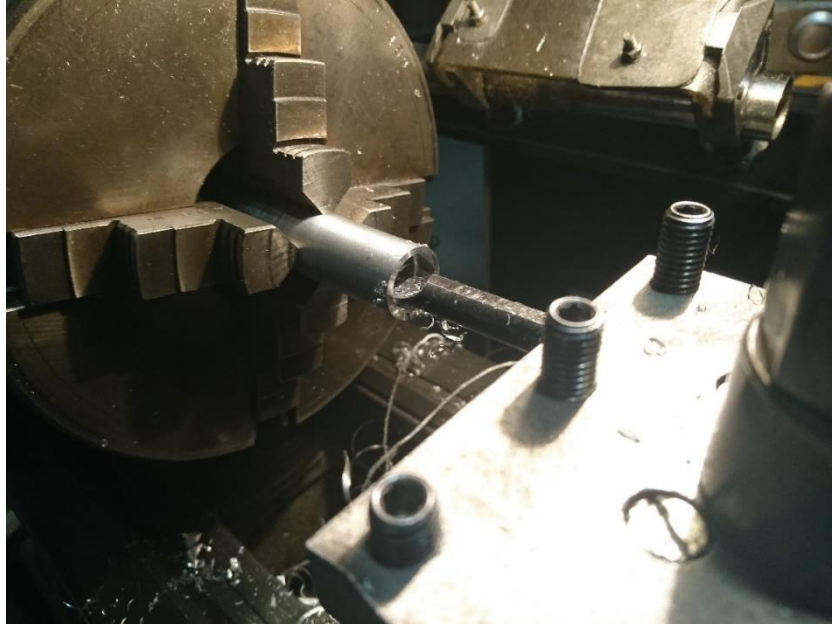


Figura 48 - Retificação de cotas utilizando buril de pastilhas.

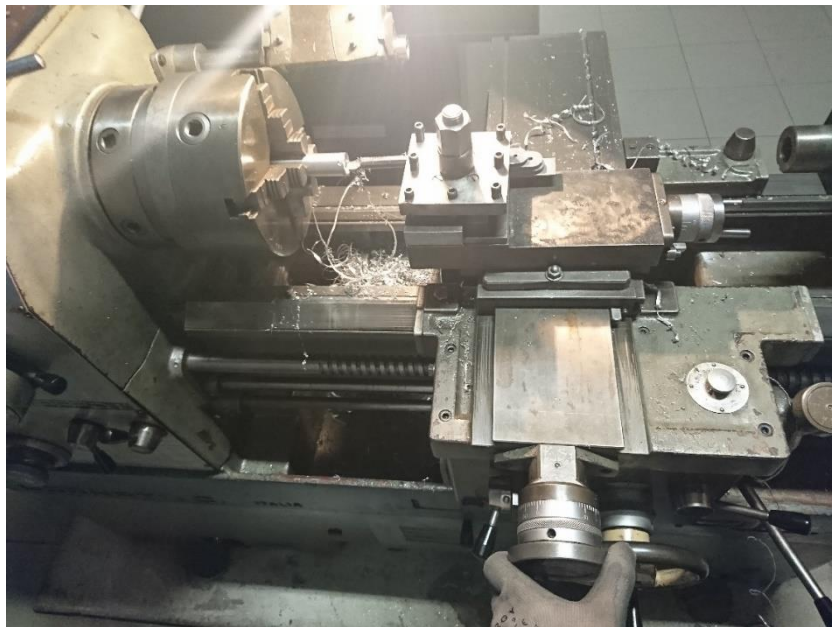


Figura 49 - Facejamento do substrato utilizando o buril de pastilhas.

No final da maquinação é necessário proceder ao controlo dimensional antes de poder aceitar o substrato para ser utilizado na experiência. Na Figura 50 e Figura 51 é possível ver a utilização de um paquímetro digital da série 500 da marca Mitutoyo® para medir com uma resolução de 0,005 mm as cotas mais importantes dos substratos.

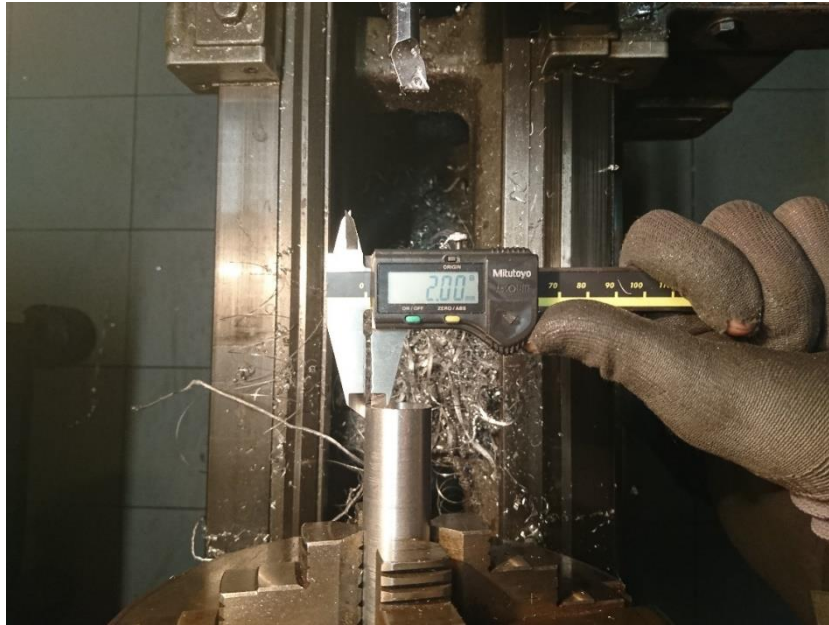


Figura 50 - Verificação da espessura da parede do substrato utilizando um paquímetro digital da marca Mitutoyo®.



Figura 51 - Verificação do diâmetro interior de um substrato exterior utilizando um paquímetro da marca Mitutoyo®.

Findadas todas as etapas de torno, os substratos seguem para a fresadora para se poder facejar as amarras dos provetes.



Figura 52 - Fixação do provete na fresadora e facejamento com fresa $\varnothing 20$ mm.

Na Figura 52 pode-se ver os substratos fixos na mesa da fresadora. Ao fixar os substratos desta forma pode-se facejar os dois lados sem ser necessário reapertar e assim garantir o paralelismo entre as faces de aperto.

3.1.3.2 Ligação adesiva

Como o objetivo deste estudo incide sobre a previsão da resistência da ligação adesiva, os substratos depois de maquinados são ligados adesivamente. O processo de adesão inicia-se com a preparação das superfícies a serem ligadas. Para tal, os substratos são submetidos a granalhagem com alumina. Em seguida passa-se para a limpeza dos substratos com acetona para tirar qualquer resíduo que tenha ficado na superfície tanto de óxidos e alumina meios solto como de gordura que possa restar do processo de maquinagem. No final dos provetes prontos reúne-se o material necessário:

- Equipamento de proteção (luvas, óculos, batas, mascaras);
- Toalhas de papel;
- Substratos;
- Adesivos;
- Calibres (fio com $\varnothing 0,2$ mm para garantir espessura de adesivo);
- Fita-cola;
- Calços (para manter os substratos alinhados durante o processo de cura);
- Balança;
- X-ato, fresadora de mão e/ou espátulas para remoção de excessos;
- Tesoura;
- Régua;

- Recipiente para a mistura (copos de plástico descartáveis);
- Caixote para eliminação de resíduos.

Após a reunião de todo o material necessário e dos utilizadores devidamente protegidos, começa-se pela preparação dos substratos, em que estes passam por medições, são etiquetados e são feitas as marcações de referência para a ajudar a montar os provetes referindo quais os provetes que terão um C_s de 20 mm e de 40 mm.



Figura 53 - Marcação de referência nos provetes.

Com os substratos devidamente alinhavados segue-se a preparação do adesivo. No caso do adesivo AV138, o adesivo e o endurecedor (HV998) são pesados e misturados nas respetivas proporções mássicas (Figura 54). No caso do Araldite® 2015, o fabricante fornece o adesivo e endurecedor numa bisnaga que faz a mistura ao retirar o adesivo (Figura 55). Para o adesivo SikaForce® 7752 é feito um procedimento idêntico ao do Araldite® AV138.



Figura 54 - Pesagem e mistura de Araldite® AV138.



Figura 55 - Seringa de Araldite® 2015.

Na Tabela 10 ficaram registadas as relações mássicas e as quantidades produzidas para fabricar os provetes.

Tabela 10 - Relações mássicas de mistura dos adesivos utilizados e quantidades utilizadas.

Adesivo	Relação mássica (resina/endurecedor)	Forma de mistura	Quantidade produzida
Araldite® 2015	100 g/100 g	Bisnaga (fabricante)	80 g
Araldite® AV138	100 g/40 g	Manual	100 g
SikaForce® 7752	100 g/20 g	Manual	100 g

Com o adesivo devidamente preparado, segue-se a aplicação nos substratos e espalha-se com a ajuda de espátulas, tal como é possível ver na Figura 56.

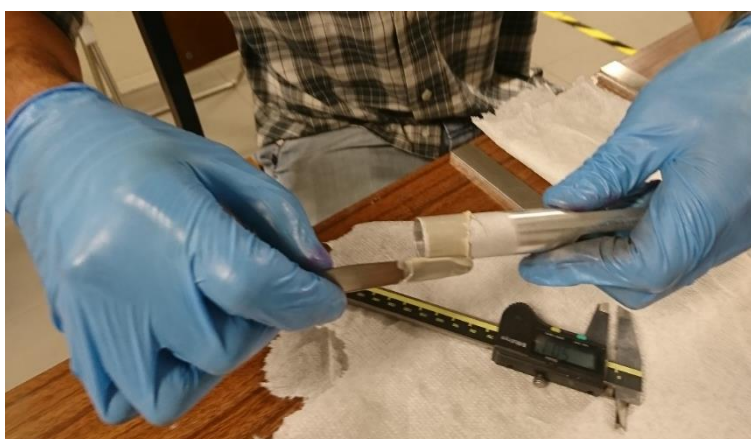


Figura 56 - Utilização de espátulas para espalhar o adesivo.

No final de ter as zonas de ligação cobertas de adesivo, são colocados os fios de calibre para garantir uma espessura homogénea de adesivo quando se der o processo de cura.

Quando se dá a montagem do provete, evidencia-se a importância do furo para respiro. Como o filme de adesivo torna o provete 100% estanque ao ar, quando se montava o provete, o ar retido no interior era pressurizado e empurrava o provete interior para fora, tornando-se assim muito difícil garantir as dimensões da junta. Na Figura 57 é possível ver a medição para controlo dimensional da junta.



Figura 57 - Medição da junta obtida. Linha de referência feita com mais 5 mm do necessário.

Depois do provete montado, é deixado a repousar sobre calços retificados de forma a garantir que as amarras dos substratos ficam alinhadas (para melhor fixação na máquina de ensaio de tração) e que a junta não se deforma enquanto decorre o processo de cura do adesivo (Figura 58).



Figura 58 - Alinhamento do provete para repousar durante o processo de cura.

Como o excesso de adesivo arrastado pelos substratos resulta num volume de adesivo de dimensão difícil de controlar e não contabilizado na projeção da junta, este excesso é removido.

3.1.4 Ensaio das juntas

Para executar a recolha de dados experimentais realiza-se uma série de ensaios destrutivos nos provetes pelo que, antes de se iniciar qualquer recolha, é necessário atribuir a cada provete uma referência para identificação dos resultados.

Para fazer os ensaios, utilizou-se a máquina Shimadzu modelo AG-X 100 com uma célula de carga de 100 kN, à temperatura ambiente (cerca de 25°C) em controlo de deslocamentos. A velocidade de ensaio foi de 2 mm/min. A distância entre amarras foram 100 mm, e realizaram-se 5 ensaios para cada um dos 3 adesivos, para cada C_s perfazendo um total de 30 provetes.



Figura 59 - Máquina Shimadzu durante os ensaios de tração dos provetes.

Após submeter os provetes ao ensaios de tração, um de cada vez como se pode ver na Figura 59, a máquina regista os valores lidos que exporta para um ficheiro de texto que posteriormente é convertido para células de um ficheiro de Excel® para se realizar o processamento dos dados.

3.1.5 Resultados obtidos

Este subcapítulo dedica-se à análise dos valores registados durante os ensaios de tração dos provetes. Com os valores obtidos elabora-se a curva força-deslocamento ($P-\delta$), para cada tipo de provete através da média aritmética entre os diferentes provetes ligados adesivamente com o mesmo adesivo e C_s . Também se comparam os valores máximos

das forças registadas durante o ensaio de cada provete para se poder avaliar a força máxima ($P_{máx}$) e o desvio padrão.

3.1.5.1 Curvas força-deslocamento ($P-\delta$)

3.1.5.1.1 Araldite® AV138

Na obtenção das curvas $P-\delta$ a máquina regista apenas força exercida sobre o provete e o deslocamento da amarra. A Figura 60 e a Figura 61 correspondem às leituras registadas de força em função do deslocamento aplicado ao provete e na Tabela 11 registaram-se apenas o valor máximo da força suportada pelo provete. São também calculados os desvios padrões (reais e percentual) e a média da força máxima para cada configuração de provete. Nos valores registados para o Araldite® AV138 contabilizaram-se os provetes que romperam pelo substrato pois os valores registados são muito próximos dos valores obtidos quando se dá uma rotura pelo adesivo, podendo-se concluir que a resistência do provete se encontra muito próxima da resistência da junta.

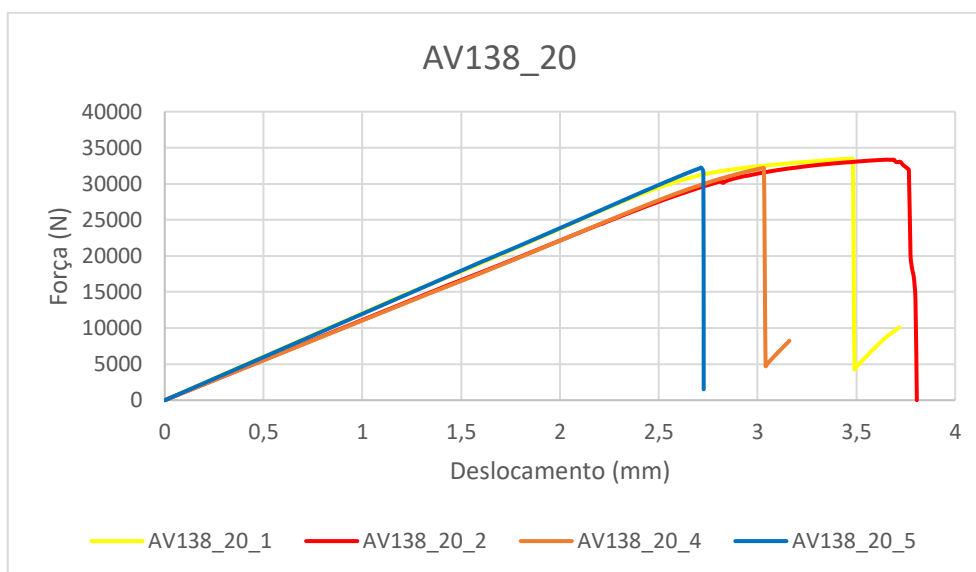


Figura 60- Curvas $P-\delta$ de Araldite® AV138 com $C_s=20$ mm.

Após uma análise do gráfico da Figura 60, correspondente aos provetes ligados com Araldite® AV138 para $C_s=20$ mm, nota-se a ocorrência de plastificação dos substratos nas amostras 1 e 2 (curva vermelha e amarela, respetivamente). Provavelmente este fenómeno deve-se ao facto de existir um excesso de adesivo na ligação que se terá infiltrado na provete e criado um reforço (excesso de adesivo) interferindo na geometria estudada, criando maior área de contacto e diminuindo os pontos de concentrações de tensão comuns nas arestas das geometrias solicitadas a esforços. As restantes amostras apresentam um comportamento linear até à rotura.

Na Figura 61, representação gráfica dos resultados obtidos nos ensaios dos provetes ligados com Araldite® AV138 com um $C_s=40$ mm, consegue-se evidenciar a plastificação

de todos os substratos testados. Nestes ensaios é de salientar a boa repetibilidade de resultados: curvas de rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento para os dois C_s . É de notar também que existem pequenas flutuações na rigidez elástica que podem dever-se à flexibilidade da máquina e a questões de aderência nas amarrações.

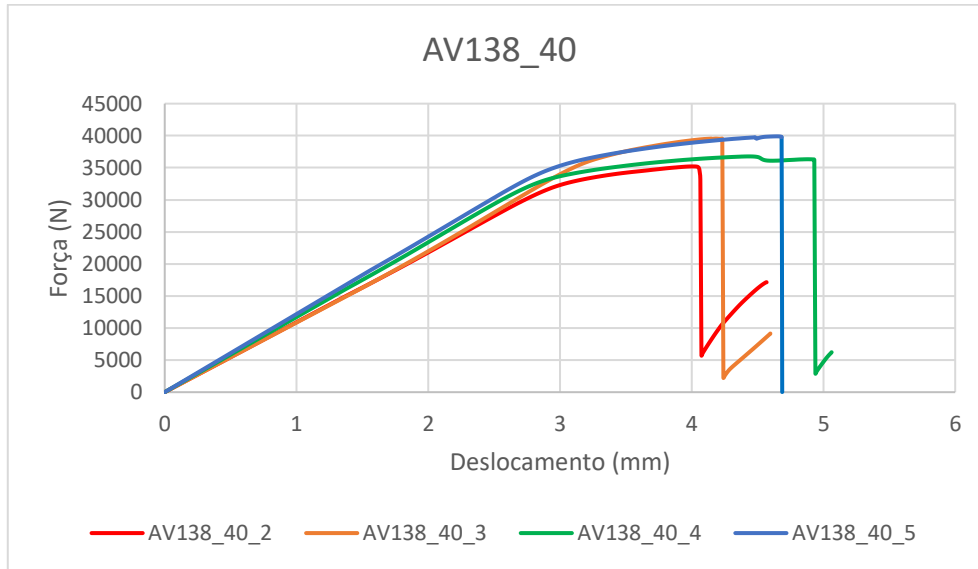


Figura 61- Curvas P - δ de Araldite® AV138 com $C_s=40$ mm.

Tabela 11 - Valores máximos de força ($P_{m\acute{a}x}$) [N] registados para cada provete de Araldite® AV138.

C_s [mm]	1	2	3	4	5	$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio Padrão	Desvio [%]
20	33468,2	33342,3	-	32162,6	32216,9	32797,5	609,7	1,86
40	-	35209,8	39546,9	36770,2	39902,1	37857,2	1951,1	5,15

Na análise da Tabela 11 verifica-se que existem provetes sem valor registado. Isto deve-se ao facto de apresentarem valores muito dispares da média, pelo que se decide excluir estes provetes dos cálculos por se considerar que estes foram fabricados com defeito.

Com a exclusão destes provetes defeituosos, verifica-se que o resultado obtido é repetível e que o desvio padrão é pequeno (1,86%) para $C_s=20$ mm e a ter a atenção para $C_s=40$ mm (5,15%). No entanto, este valor pode ser aceite se for considerado que existem alguns parâmetros reais, como constituição dos materiais, defeitos no fabrico dos provetes ou mesmo máquina de ensaios que podem contribuir para este valor de desvio.

3.1.5.1.2 Araldite® 2015

Na Figura 62 e Figura 63 estão representados os valores recolhidos nos ensaios de tração dos provetes ligados com Araldite® 2015 sobre a forma de curvas P - δ .

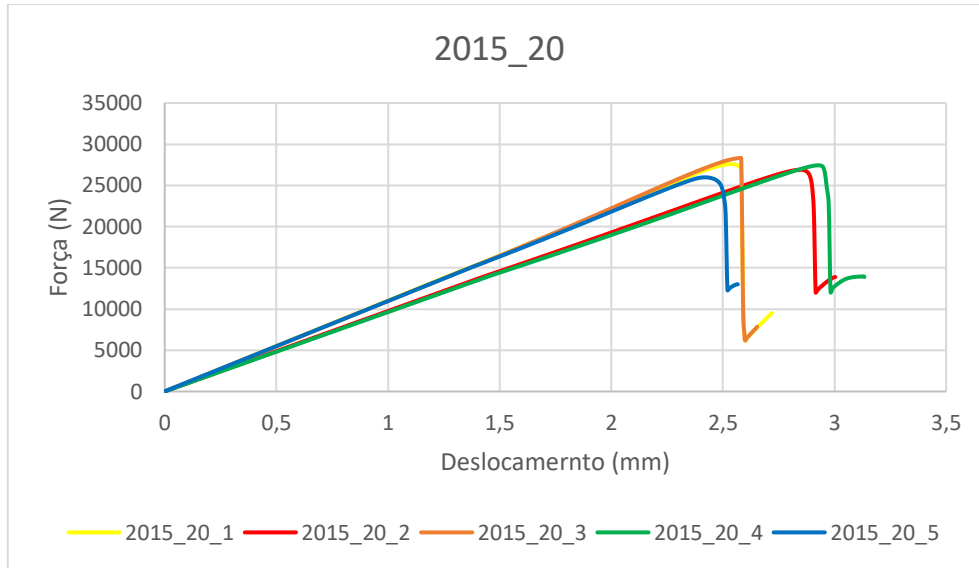


Figura 62 - Curvas $P-\delta$ de Araldite® 2015 com $C_5=20$ mm.

Na análise da Figura 62 verifica-se um comportamento linear dos provetes até à rotura.

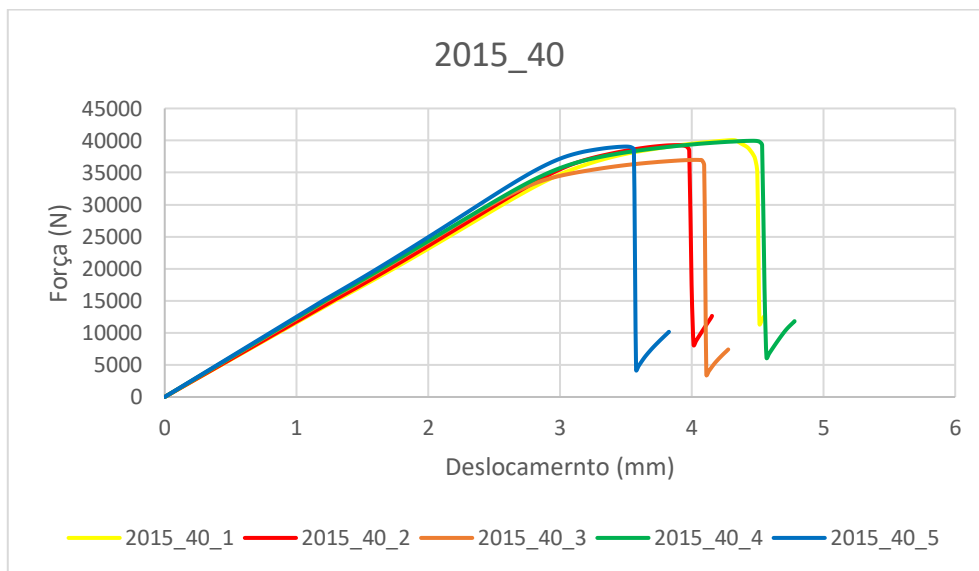


Figura 63 - Curvas $P-\delta$ de Araldite® 2015 com $C_5=40$ mm.

Já na Figura 63, para $C_5=40$ mm, verifica-se que os substratos plastificam antes de se dar a rotura. De um modo geral, pode-se dizer que a experiência apresenta resultados idênticos, isto é, o resultado é facilmente previsível.

Após analisar os diversos resultados do adesivo Araldite® 2015 (Tabela 12) verifica-se que este apresenta mais coerência em relação à dispersão dos valores obtidos. Quando comparado com os outros dois adesivos estudados registou um desvio percentual de apenas 2,84% para $C_5=20$ mm e 2,85% para $C_5=40$ mm. Para além de não ser um desvio significativo, foram considerados todos os provetes ensaiados, o que reforça a validade dos dados recolhidos. Também este adesivo apresenta uma pequena variação na rigidez

plástica da junta talvez por flexibilidade da máquina e/ou problema nas amarrações dos provetes.

Tabela 12 - Valores máximos de força ($P_{\text{máx}}$) [N] registados para cada provete de Araldite® 2015.

C_s [mm]	1	2	3	4	5	$P_{\text{máx}}$ Méd	Desvio Padrão	Desvio [%]
20	27576,1	26895,8	28306,9	27433,8	25979,6	27238,4	774,1	2,84
40	40062,5	39280,9	36980,6	39958,7	39051,2	39066,8	1112,2	2,85

3.1.5.1.3 SikaForce® 7752

Tal como os outros dois adesivos estudados, também o SikaForce® 7752 foi alvo de recolha de dados e de elaboração de curvas $P-\delta$ representadas na Figura 64 e na Figura 65.

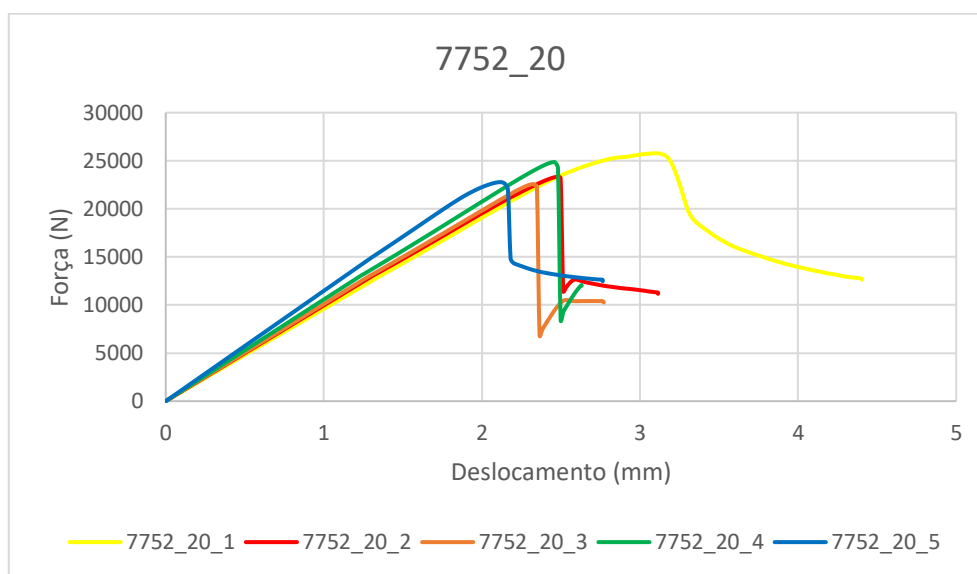


Figura 64 - Curvas $P-\delta$ de SikaForce® 7752 com $C_s=20$ mm.

Para os provetes com $C_s=20$ mm que originaram as curvas da Figura 64, verifica-se um comportamento linear até à rotura, com a exceção da amostra 1 (curva a amarelo). Esta última curva apresenta plasticidade dos substratos e um deslocamento até rotura superior às restantes amostras. Este fenómeno pode ter sido originado pela má construção da junta, nomeadamente deposição de adesivo no interior da junta adesiva.

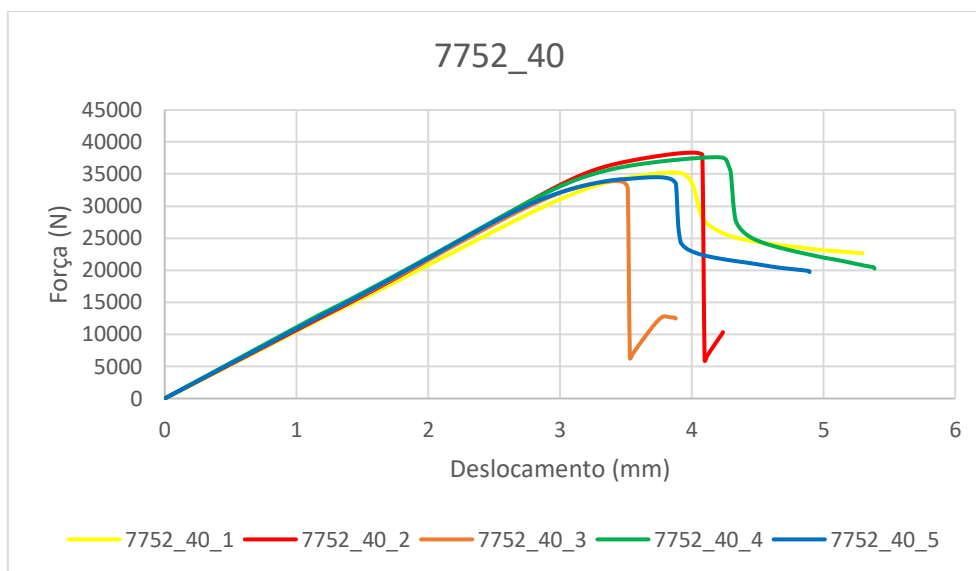


Figura 65 - Curvas $P-\delta$ de SikaForce® 7752 com $C_s=40$ mm.

Para os provetes com $C_s=40$ mm, cujos valores se encontram representados na Figura 65, observa-se plastificação de todos os substratos. A amostra 3 (curva laranja) apresenta uma deformação até à rotura inferior às restantes em estudo. Este fenómeno pode ser causado por minúsculas bolsas de ar no interior da camada de adesivo, uma má preparação da superfície de ligação, uma espessura de adesivo inferior à pretendida ou até uma mistura deficiente do endurecedor, que deram origem a pontos de menor resistência.

Na Tabela 13 encontram-se registados os valores máximos da força acompanhados dos respetivos desvios para os diferentes C_s estudados de juntas ligadas com SikaForce® 7752.

Tabela 13 - Valores máximos de força ($P_{m\acute{a}x}$) [N] registados para cada provete de SikaForce® 7752.

C_s [mm]	1	2	3	4	5	$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio Padrão	Desvio [%]
20	25776,6	23329,9	22552,7	24848,6	22774,0	23856,4	23856,4	5,24
40	35247,2	38345,6	33909,8	37634,2	34512,8	35929,9	1749,0	4,87

No entanto, a diferença não é elevada ao ponto de serem excluídos os provetes mencionados como tendo um comportamento díspar. Assim sendo, pode-se assumir que também ligações tubulares adesivas de sobreposição simples feitas com SikaForce® 7752 apresentam uma boa repetibilidade de resultados, tornando previsível o seu comportamento.

3.1.5.2 Modos de rotura

Com uma inspeção visual verifica-se que as roturas registadas foram coesivas no adesivo, o que garante que o adesivo é o elo mais fraco nos provetes e que os valores obtidos pertencem ao adesivo (alvo de estudo) e não aos substratos.



Figura 66- Roturas registadas nos provetes de Araldite® AV138 com $C_s=20$ mm. Provette 2 apresenta rotura pelo substrato, os restantes rotura coesiva.



Figura 67 - Roturas registadas nos provetes de Araldite® AV138 com $C_s=40$ mm. Provetes 1 e 5 apresentam rotura pelo substrato, os restantes rotura coesiva.



Figura 68 - Roturas registadas nos provetes de Araldite® 2015 com $C_s=20$ mm. Provetes apresentam rotura coesiva.



Figura 69 - Roturas registadas nos provetes de Araldite® 2015 com $C_s=40$ mm. Provetes apresentam rotura coesiva.



Figura 70 - Roturas registadas nos provetes de SikaForce® 7752 com $C_s=20$ mm. Provetes apresentam rotura coesiva.



Figura 71 - Roturas registadas nos provetes de SikaForce® 7752 com $C_s=40$ mm. Provetes apresentam rotura coesiva.

Na Figura 68, Figura 69, Figura 70 e Figura 71, em que estão registados todos os provetes depois de ensaiados com os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, pode-se ver o tipo de rotura que se verifica depois dos ensaios terminados em que nenhum provete apresenta rotura adesiva nem total nem parcial o que reforça o facto de que os valores obtidos foram fornecidos pelo adesivo e não por uma má construção. Findados os ensaios dos provetes ligados com o adesivo Araldite® AV138 tanto para um $C_s=20$ mm (Figura 66) como para $C_s=40$ mm (Figura 67) verifica-se que existe rotura pelos substratos. No entanto, o adesivo Araldite® 2015 com $C_s=40$ mm também apresenta valores de rotura muito próximos ao do Araldite® AV138, no entanto, estes não apresentaram rotura pelo substrato, o que indica que a rotura pelo substrato registada para Araldite® AV138 deve-se a defeitos no substrato provocados por má maquinagem, má conceção de junta ou inconsistência do material que deu origem ao substrato.

3.1.5.3 Resistência das juntas

Com os valores obtidos para as médias de $P_{m\acute{a}x}$ e respectivos desvios para cada um dos três adesivos e C_s conseguiu-se elaborar a Figura 72, em que se representam todos esses valores de forma gráfica, para mais fácil interpretação de resultados.

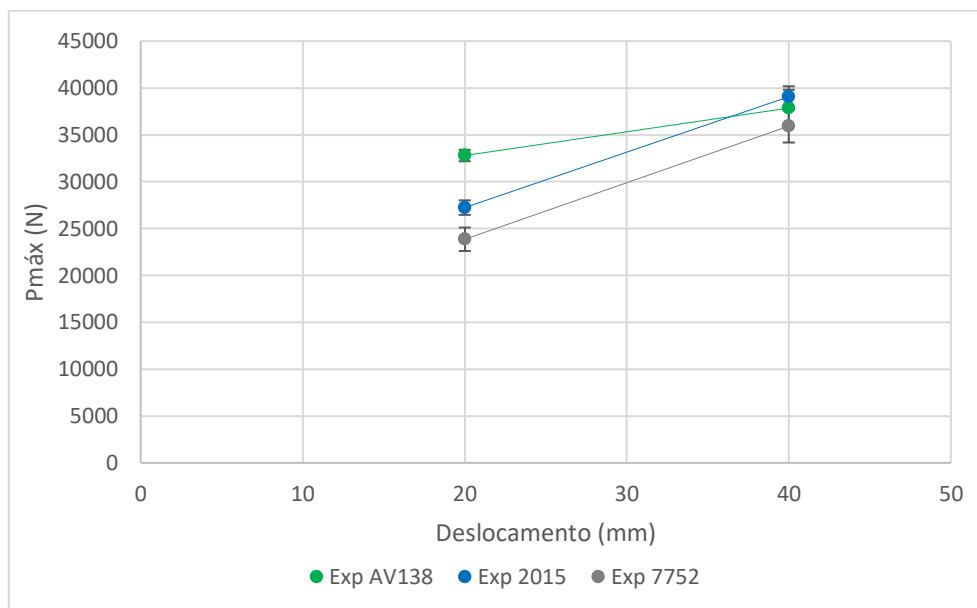


Figura 72- $P_{m\acute{a}x}$ de cada configuração de provete.

Na Tabela 14 estão presentes os valores médios da carga máxima em função de C_s e a evolução percentual dos mesmos de um $C_s=20$ mm para $C_s=40$ mm, para cada adesivo.

Tabela 14 - $P_{m\acute{a}x}$ Méd (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]) em função de C_s para as seis configurações de juntas estudadas.

Adesivo	$C_s=20$ mm	$C_s=40$ mm	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,4
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,4
SikaForce® 7752	23856,4	35929,9	50,6

Quando se compara os três adesivos para $C_s=20$ mm, verifica-se, que o Araldite® AV138, é o que suporta o maior carregamento (32797,5 N). Quando as juntas possuem $C_s=40$ mm, a $P_{m\acute{a}x}$ aumenta em cerca de 15,4% até 37857,2 N. Este aumento menos acentuado do Araldite® AV138 evidencia a sua fragilidade.

Ao analisar o adesivo Araldite® 2015 regista-se $P_{m\acute{a}x}=27238,4$ N para um $C_s=20$ mm. Contudo, ao aumentar o C_s de 20 mm para 40 mm, o aumento de resistência da junta é muito mais acentuado que o Araldite® AV138 pelo facto de este se tratar de um adesivo dúctil, elevando assim a $P_{m\acute{a}x}$ para 39066,8 N, o que representa um aumento percentual de 43,4%. Este nível de esforço é tão elevado para a junta em estudo que se regista a plastificação dos provetes.

Dos três adesivos em estudo o SikaForce® 7752 é o que apresenta maior aumento de percentual da resistência da junta, cerca de 50,6%, o que induz que se trata do adesivo mais dúctil em estudo. As cargas máximas registradas para $C_s=20$ mm rondam os 23856,4 N e 35929,9 N para $C_s=40$ mm. Apesar de ser o adesivo que apresenta maior evolução percentual da resistência, constata-se que o adesivo apresenta $P_{m\acute{a}x}$ inferiores comparativamente aos outros dois adesivos em estudo.

3.2 Análise numérica

O objetivo principal deste estudo relacionar é os valores obtidos experimentalmente com os valores obtidos através do cálculo numérico. Este estudo numérico a ser apresentado neste capítulo passa pela aplicação do MEF a um modelo geométrico, com características muito bem definidas, criado computacionalmente através do *software* Simulia ABAQUS®.

3.2.1 Condições da análise numérica

3.2.1.1 Modelo axi-simétrico como representação do modelo tridimensional

Inicialmente, cria-se uma réplica tridimensional dos provetes a testar. No entanto, este modelo necessita de um número muito elevado de elementos para poder criar a sua malha, o que impõe um esforço computacional enorme sobre a máquina. Posto isto, começou-se a busca de minimizar o esforço computacional sem comprometer o cálculo final dos resultados. Para iniciar essa redução, a zona de aperto das amarras é excluída, pois fica fora da zona de estudo e permite obter um provete totalmente cilíndrico, podendo substituir o modelo inicial por um modelo que representa apenas um quadrante do provete, que por sua vez foi reduzido a um modelo 2D axi-simétrico.

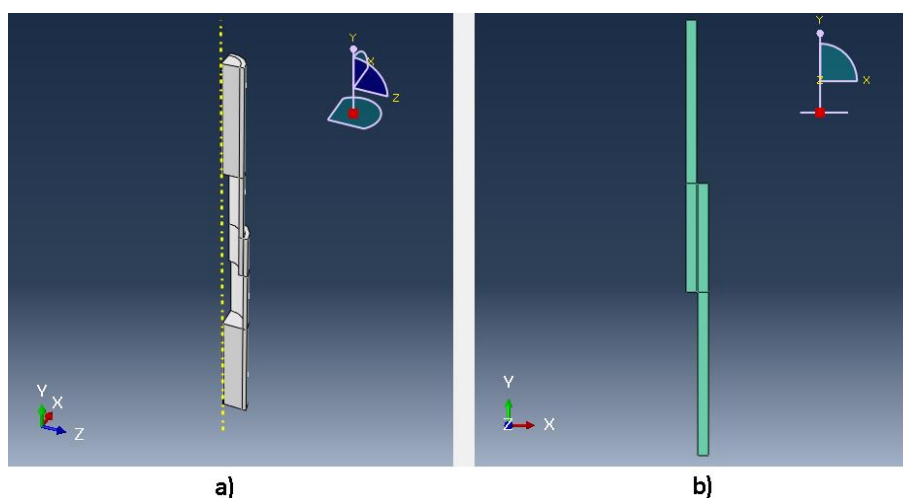


Figura 73 - Modelos CAD de estudo de elementos finitos: a) modelo tridimensional reduzido; b) modelo bidimensional axi-simétrico equivalente [fotograma extraído do *software* Simulia ABAQUS®].

Na Figura 73-a) encontra-se o modelo CAD reduzido a um quadrante. Este modelo é uma replica teórica da geometria estudada excluindo as amarras. Neste modelo, assume-se que as faces paralelas a xOy e yOz têm deslocamento nulo, pois o eixo de revolução do provete, quando este está sujeito um esforço de tração puro, não se move. Ao definir que o eixo permanece estacionário, consegue-se simular os esforços internos do provete, através das tensões que estas faces apresentam enquanto se consegue aliviar a carga de cálculo.

Na Figura 73-b) está representado o modelo 2D axi-simétrico, o mais simplificado possível, que fornece valores de tensões e deformações idênticos aos estudados tridimensionalmente. Desta forma, consegue-se simular de forma mais simples e eficaz a secção interveniente no estudo.

Na Figura 74 pode-se ver a comparação dos valores resultantes do estudo da redução de elementos tridimensionais para bidimensionais axi-simétricos. Quando é referido que o gráfico 3D foi corrigido, apenas se corrige o valor do deslocamento pois o deslocamento que este media contabilizava a deformação dos substratos nas zonas maciças (elementos excluídos após a redução), o que resultava num deslocamento superior proporcional ao comprimento total do provete.

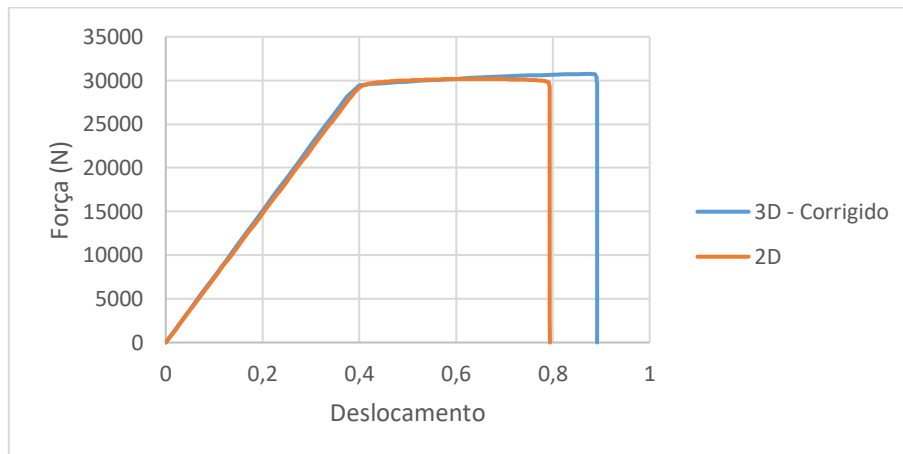


Figura 74 - Comparativo entre simulação 2D e simulação 3D (depois de corrigir valores de deslocamento).

3.2.1.2 Descrição do processo de simulação

O estudo numérico bidimensional axi-simétrico utilizado é repetido para as várias geometrias estudadas com variação apenas nas propriedades de acordo com as propriedades dos diferentes adesivos.

Este estudo é baseado no MEF através do *software* ABAQUS® que possui uma vasta biblioteca de elementos, uma grande aplicação em trabalhos na área da adesão e permite a aplicação do modulo integrado de MDC para prever a resistência de juntas tubulares adesivas. De seguida é descrito o procedimento de pré-processamento da

modelação em MEF, fazendo referência aos módulos de *software* de inserção de informação: *Part, Property, Assembly, Step, Load, Mesh, Job* e *Visualization* [131].

Começando pela escolha do tipo de elementos, utilizam-se elementos axi-simétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) de estado plano de deformação para descrever a resposta dos substratos e elementos coesivos axi-simétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para estudar o comportamento a camada do adesivo pois estes fornecem resultados precisos para este tipo de geometrias. Na Figura 75 está representado o menu de atribuição do tipo de elemento aos diversos materiais a usar.

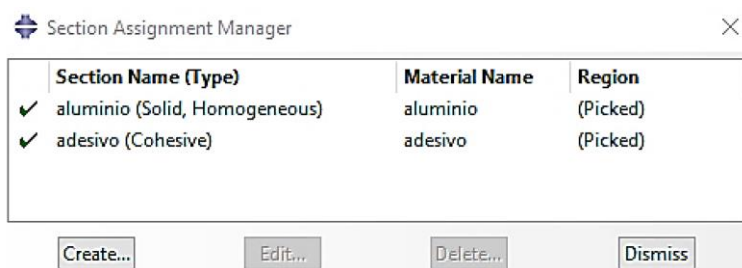


Figura 75 - Escolha do tipo de elementos constituintes para estudo por MDC no ABAQUS®.

O MDC usado é o modelo de dano triangular que está disponível no ABAQUS® (que se encontra descrito mais detalhadamente na secção 3.2.2) pois caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

É importante lembrar que as operações a realizar no ABAQUS® para a criação de uma JTSS tem que ser feita de forma sequencial, pois a informação é completada com base nas informações anteriores da forma que se passa a citar:

1ª Etapa – *Part*

Esta etapa é a responsável pela modelação geométrica da junta. Na Figura 76 encontra-se o desenho como representação simplificada do modelo. Na mesma figura é de salientar que o eixo (assinalado através de uma seta vermelha) é de extrema importância pois, tratando-se o modelo de uma representação axi-simétrica, a distância do modelo ao eixo irá ditar o diâmetro dos substratos.

Ainda nesta etapa são definidas as linhas de partição do modelo, elaboradas de forma a obter as quebras da Figura 77. Estas partições são criadas para posteriormente serem usadas como linha de descontinuidade de informação, isto é, os parâmetros dos dois lados das linhas de partição podem ser diferentes permitindo um melhor controlo sobre as propriedades e comportamento.

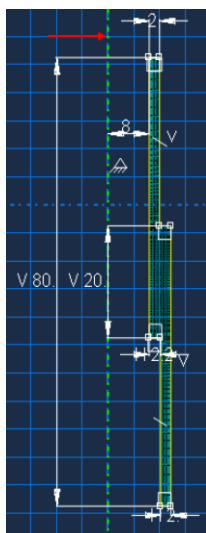


Figura 76 - Desenho bidimensional da junta em estudo no *software* ABAQUS® com $C_s=20$ mm.

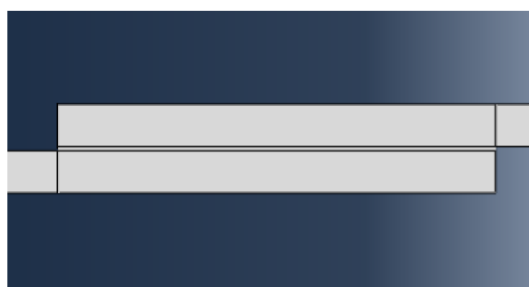


Figura 77 - Representação das linhas de partição do modelo no ABAQUS®.

Após o desenho e a atribuição das linhas de partição do modelo, obtém-se o modelo da Figura 78.



Figura 78 - Modelo geométrico de estudo no MDC do ABAQUS®.

2ª Etapa - *Property*

Esta etapa é responsável pela definição e atribuição das propriedades mecânicas às partições criadas na 1ª etapa, através do menu apresentado na Figura 75, em que as regiões a aplicar a propriedade são escolhidas entre as secções partidas do modelo. Na análise por MDC o adesivo é modelado pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos e uma lei de tração-separação triangular, incluindo a rigidez da camada adesiva. Os substratos são modelados como sendo alumínio em que é definida a sua rigidez e comportamento plástico para aferir se os substratos irão sofrer plastificação antes do adesivo atingir a rotura.

3ª Etapa - *Assembly*

Este passo é apenas uma passagem no processo de pré-processamento, pois o modelo de estudo é contruído como sendo uma peça única fabricada com várias secções de materiais diferentes. Por esse motivo pode-se avançar para a 4ª Etapa sem executar nenhuma ação.

4ª Etapa – *Step*

O *Step* é menu do ABAQUS® mais voltado para a computação e não tanto para o modelo. Na Figura 79 está representado o menu de edição do *Step* do ABAQUS® em que é possível definir a incrementação (número de máximo de incrementos, tamanho do incremento inicial e as dimensões que este pode tomar). Para evitar que durante a análise o estudo pare, decide-se tomar um valor elevado para o número de incrementos (10 000 incrementos). Considera-se também um tamanho de incremento inicial de 0,25%, e permitir-se que o *software* reduza o incremento para um valor próximo de zero quando estiver a calcular a propagação da fissura, ajudando a evitar problemas de convergência muitas vezes associados a este tipo de cálculo. Ainda nesta etapa definem-se os pontos de referência que mais tarde irão devolver os valores de deslocamento.

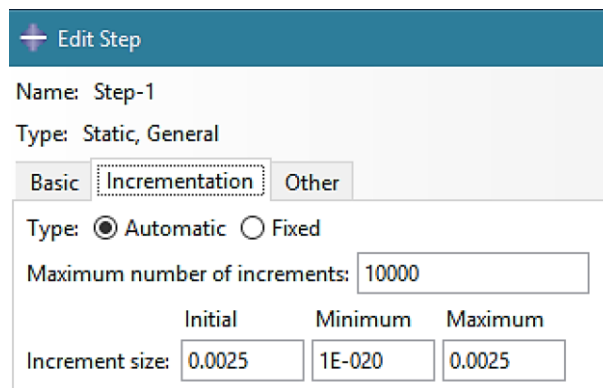


Figura 79 - Menu de definição de incrementos no ABAQUS®.

5ª Etapa – *Interaction*

A *interaction* é mais uma etapa em que só é necessário executar ações em conjuntos. Visto este modelo ser constituído por apenas uma parte não é necessário executar nenhuma ação.

6ª Etapa – *Load*

Como é pretendido calcular a resposta de uma geometria a uma carga, no menu *Load* é definida essa carga, todas as restrições que a peça sofre. Na Figura 80 é possível ver o menu do ABAQUS® que permite a seleção e a atribuição de condições fronteira, tanto de carga como de deslocamento.

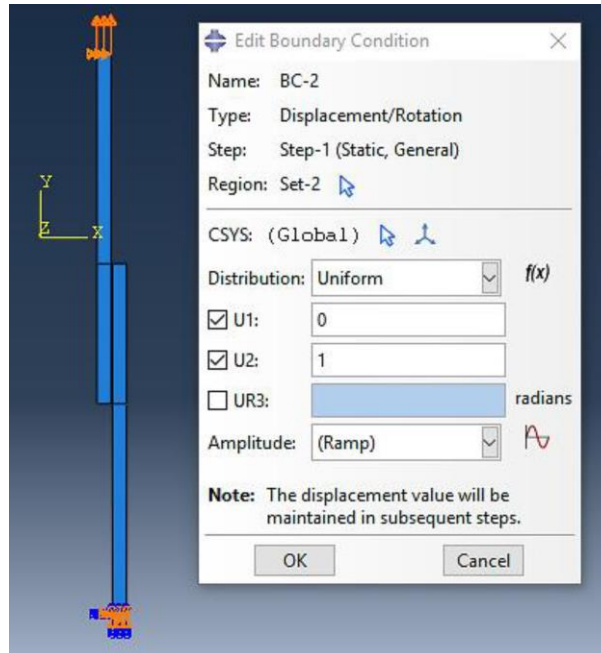


Figura 80 - Menu do ABAQUS® para a definição das condições fronteira.

Na Tabela 15 estão assinalados os valores de deslocamento a aplicar no modelo em função do adesivo e C_s estudado. Este deslocamento é aplicado a uma extremidade do provete em conjunto com uma restrição de deslocamento nulo na direção radial, enquanto a outra extremidade do provete é definida como sendo encastrada.

Tabela 15 - Deslocamento a impor a cada adesivo calculado em função de C_s .

Adesivo	C_s [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	0,45	0,35
Araldite® 2015	0,40	4,00
SikaForce® 7752	1,25	1,50

Após a análise da Tabela 15 nota-se uma discrepância elevada entre os valores impostos às juntas. Esta diferença resulta da verificação de ductilidade elevada do adesivo combinado com a falta de rigidez dos substratos perante a ligação adesiva formada. Estes fatores impõe uma necessidade de aumentar o deslocamento para que se dê a rotura total do provete. No entanto, para o adesivo Araldite® 2015 para um $C_s = 40$ mm o deslocamento imposto foi 4 mm. Este valor deve-se à ocorrência de plastificação do substrato menor.

7ª Etapa - *Mesh*

Com todos os parâmetros físicos de simulação definidos, é necessário definir os parâmetros numéricos. A *Mesh* é o nome dado à rede formada pelos nodos que discretizam a geometria em estudo em elementos finitos. A formulação da malha deve contar com vários fatores, sendo os principais a forma da geometria, a dimensão e a relevância para o estudo. Como o número de elementos tem um grande peso na velocidade de cálculo, criam-se malhas de dimensões variáveis para reduzir o número de elementos nas zonas menos relevantes ao estudo. Como é possível ver na Figura 81, a malha na zona do adesivo possui elementos mais pequenos do que as arestas livres do adesivo. Desta forma, é possível diminuir o número de elementos, mantendo uma malha com elevada resolução nas zonas de iniciação e propagação de fendas.



Figura 81 - Malha de MEF na zona de sobreposição do modelo criado em ABAQUS®.

8ª Etapa – *Job*

Com todos os parâmetros físicos e numéricos definidos avança-se para o menu *Job* para dar início ao cálculo. Nesta etapa insere-se o nome que se quer atribuir ao estudo e define-se a quantidade de recursos computacionais permitidos pela máquina que se quer dedicar à simulação. Quando os campos supramencionados estão preenchidos submete-se a simulação e aguardam-se os resultados. Até o cálculo terminar é possível acompanhar a evolução do mesmo em tempo real através do comando *Results* que remete para a etapa seguinte.

9ª Etapa – *Visualization*

Tal como o nome indica, este menu do ABAQUS® serve para visualizar os resultados resultantes do cálculo do modelo até então descrito. Enquanto decorre o cálculo, é possível ver a evolução incremento a incremento das tensões no interior da junta através de um esquema de cores, tal com representado na Figura 82, em que as zonas representadas a azul escuro são zonas de tensões mínimas de tensão e as zonas a vermelho são zonas mais solicitadas. As restantes cores representam níveis de tensão desenvolvidas pelo provete em resposta à solicitação da junta numa forma de gradiente entre o azul escuro e o vermelho.

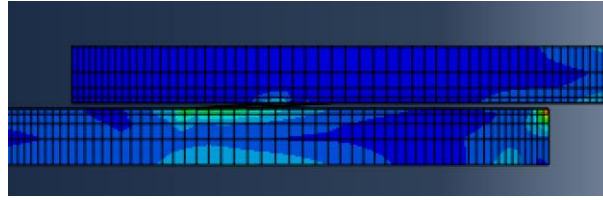


Figura 82 - Exemplo de gradiente de cores para representar níveis de tensões no interior de uma junta criado pelo ABAQUS®.

Quando a simulação termina, é necessário processar os de resultados para criar as curvas $P-\delta$. Através do *output* da criação de dados XY, somam-se todas as reações do encastramento que combinados com os valores de deslocamento resulta a pretendida curva $P-\delta$.

3.2.2 Modelo de dano coesivo triangular

O uso de MDC na análise de juntas adesivas requer uma lei constitutiva para descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de modo a obter resultados mais precisos, em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação [132]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o modelo triangular [79], o linear-parabólico [78], o exponencial [80], o polinomial [81] e o trapezoidal [133]. Devido a vários fatores, tais como a simplicidade, reduzido número de parâmetros a determinar e resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [134].

A Figura 83 exemplifica uma lei coesiva triangular. No ponto O, o material ainda não está em carga e não há separação. Ao longo da linha OA, o material encontra-se no domínio elástico. No ponto A (com a separação δ^0) a tração coesiva alcança o valor máximo admissível (resistência coesiva ou t^0). A seguir ao ponto A, o material começa a sofrer dano e a rigidez coesiva diminui (amaciamento do material). Num ponto genérico B (com separação δ) entre os pontos A e C, a trajetória do descarregamento é linear em direção ao ponto O. A rigidez coesiva cai assim do valor inicial K para K^δ e a tração admissível desce da resistência coesiva t^0 para o valor atual t . Quando a tração admissível cai para zero no ponto C (que corresponde à extremidade da fenda), a separação é igual a δ^f e ocorre a separação completa do material. Depois, outra fenda é nucleada ou a ponta de uma fenda existente avança. Qualquer ponto à frente de C (por exemplo o ponto D) está agora fora da zona coesiva e pertence às superfícies da fenda localizadas atrás da ponta da mesma [135].

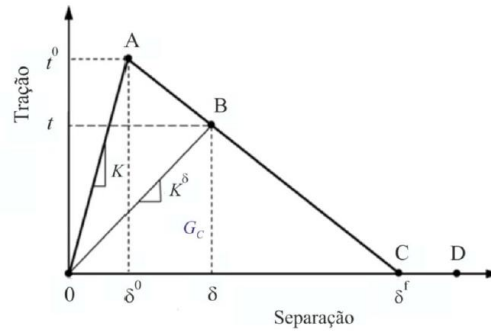


Figura 83 – Lei coesiva triangular [135].

A energia crítica coesiva ou tenacidade à fratura, G_c , que é dada pela área do triângulo, está relacionada com outros dois parâmetros através da relação de área $G_c = t^0 \times \delta^f / 2$. Assim, quaisquer dois dos três parâmetros (por exemplo t^0 e G_c) podem ser escolhidos como entradas para a lei coesiva triangular. Além dos dois parâmetros t^0 e δ^f , outro parâmetro tem de ser definido para descrever completamente a forma da lei coesiva triangular. Este parâmetro pode ser a rigidez coesiva inicial K ou a separação normal característica δ^0 , que corresponde à tração máxima. Estes parâmetros relacionam-se por $\delta^0 = t^0 / K$ [135].

3.2.2.1 Formulação do modelo

O modelo de dano triangular pode ser do tipo 2D ou 3D. No modelo 2D distinguem-se dois modos: o puro e o misto (Figura 84). O modo puro divide-se em modo I, em que a fenda abre por esforços de tração, e em modo II, em que a fenda desliza por esforços de corte [136]. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. No modo misto os modos puros I e II atuam simultaneamente, e são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar tração e corte [137].

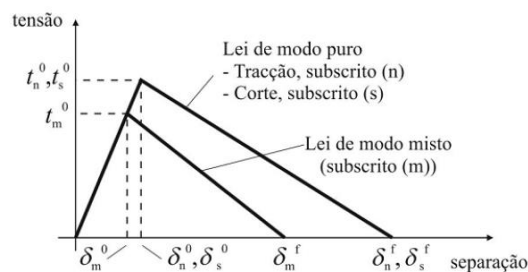


Figura 84 – MDC triangular [127].

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} (1), que relaciona as tensões e deformações em tração e corte nos elementos coesivos. A matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição está dependente da formulação utilizada:

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

No caso de a formulação ser local, os elementos coesivos são usados para simular fraturas de espessura nula. Nestas condições, os parâmetros de K_{COH} possuem valores extremamente elevados, tendo por finalidade não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [138]. Na formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para as ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (2), onde G é o módulo de elasticidade transversal:

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

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [137]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério da tensão nominal quadrática, expresso pela expressão (3):

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

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. A evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 84), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_m^f , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} [139]:

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

3.2.2.2 Determinação das propriedades coesivas

Para se poder caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário saber de antemão os valores de t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . Alguns trabalhos publicados anteriormente concluíram que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivos maciços [101, 102]. No entanto, quando se consideram juntas adesivas, as superfícies do adesivo possuem influencia das superfícies ligadas, restringindo as deformações e a propagação de fendas o que leva a diferenciar as propriedades do adesivo utilizado numa aplicação maciça do adesivo utilizado numa camada fina [140-142]. Por este motivo, é aconselhada a utilização de métodos de definição destes valores que descrevam o mais aproximado possível a utilização do adesivo.

3.2.2.2.1 Araldite® AV138

Para se determinar as leis coesivas para o adesivo Araldite® AV 138, num trabalho anterior, utilizou-se o método inverso [143]. Apesar de não haverem ensaios de caracterização à fratura, o procedimento de determinação das leis coesivas foi ligeiramente diferente do mais indicado. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de adesivo maciço e de corte designados por *Thick Adherend Shear Test* (TAST), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. Os parâmetros obtidos para descrever a resistência à tração e ao corte são inseridos no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $C_s=20$ 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 permitam descrever com alguma precisão os resultados experimentais. Os valores de G_{IC} e G_{IIC} obtidos foram subseqüentemente aplicados a todas as geometrias e adesivos testados com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e corte (TAST), respetivamente. No trabalho de Cornec [144] conclui-se que os parâmetros obtidos representam de forma fiel as propriedades do adesivo. Na Tabela 16 encontram-se apresentados os parâmetros utilizados na simulação da camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 16 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [122].

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
4890	1560	39,45	30,20	0,20	0,38
MPa				N/mm	

3.2.2.2.2 Araldite® 2015

Tal como para o adesivo Araldite® AV138, também as leis coesivas da camada de adesivo para o adesivo Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior, de Marques e da Silva [143], por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Neste caso, diferente do adesivo supramencionado, as leis coesivas foram basicamente determinadas utilizando ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF) para a estimação, respetiva, de valores de G_{IC} e G_{IIC} , usando um método ou teoria apropriados. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do respetivo

teste de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. Na Tabela 17 encontram-se apresentados os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva de modo misto [143]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [145] e ensaios TAST, respetivamente.

Tabela 17 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [141],

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
1850	650	21,63	17,90	0,43	4,70
MPa				N/mm	

3.2.2.2.3 SikaForce® 7752

A obtenção de propriedades coesivas para o adesivo SikaForce® 7752 é resultado de um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [146]. Neste trabalho utilizam-se os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos no trabalho de Azevedo [147], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [148] nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [148]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solicitação à tração, o valor de t_n^0 tem uma influência desprezável para variações de t_n^0 até 25 % do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [148], não foi considerada relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente [44, 148]. Na Tabela 18 encontram-se registados os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada do adesivo SikaForce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 18 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [44]

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
493,81	37,49	12,25	10,50	2,36	5,56
MPa				N/mm	

3.2.3 Análise de tensões na junta

A análise de tensões no interior de juntas tubulares adesivas é o resultado da comparação entre tensões de arrancamento (σ_y) e tensões de corte (τ_{xy}). Sendo o objetivo aferir a influência de C_s , esse mesmo parâmetro é alterado e registam-se os valores de σ_y e τ_{xy} . As distribuições de tensões são normalizadas por $\bar{\tau}_{avg}$, que é a média de todos os valores registados ao longo da junta adesiva ($0 \leq x \leq C_s$), em que x representa o valor da ordenada em estudo.

Neste capítulo é feita a comparação da distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e das tensões de corte (τ_{xy}) a meio da espessura do adesivo para as juntas adesivas tubulares. São considerados os diferentes valores de C_s de forma a compreender a forma como as mesmas variam em função deste parâmetro. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por $\bar{\tau}_{avg}$, que representa a média de valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de C_s . As figuras seguintes mostram as distribuições das tensões σ_y e das tensões τ_{xy} em função de x/C_s ($0 \leq x \leq C_s$).

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

As distribuições das tensões σ_y para as juntas tubulares adesivamente ligadas encontram-se representadas na Figura 85 para o adesivo Araldite® AV138, na Figura 86 para o adesivo Araldite® 2015 e na Figura 87 para o adesivo SikaForce®7752.

De um modo geral verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões σ_{xy} em toda a camada de adesivo, com exceção das extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria da junta [145, 149]. Na região central da camada do adesivo geram-se tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tração devido à curvatura ou deformação transversal da junta, que é regida pela deformação dos substratos e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma. As tensões σ_y originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à rotura prematura da ligação [138, 146]. As tensões σ_y na região central da sobreposição são aproximadamente nulas, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de C_s .

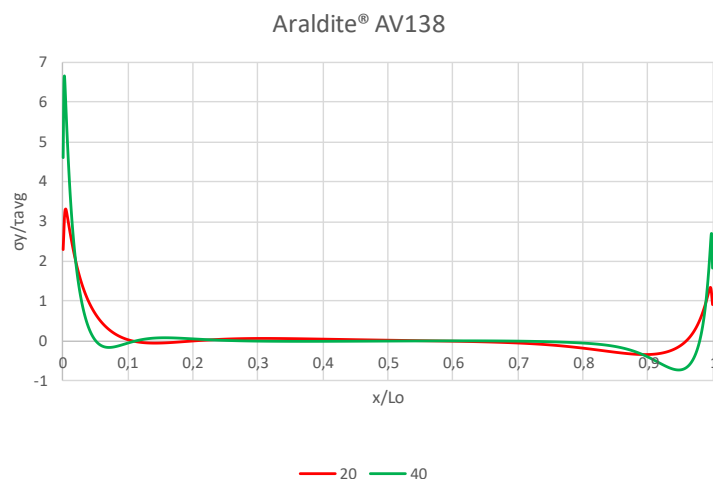


Figura 85 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® AV138.

Após uma análise dos gráficos representados na Figura 85, na Figura 86 e na Figura 87 verifica-se que, para valores de C_s mais elevados, existem picos compressivos próximos das extremidades, que aumentam de magnitude com C_s . Ao mesmo tempo, as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se menos significativas. Esta tendência tende a parar a propagação de dano após dano localizado nas zonas de singularidades [138], o que justifica algumas vezes que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ ser obtido após a iniciação da fenda [150]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de C_s deve reduzir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente para juntas com adesivos frágeis [151].

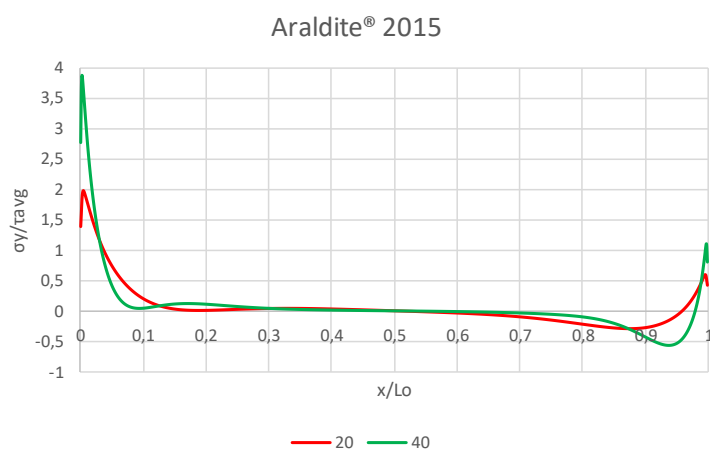


Figura 86 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® 2015.

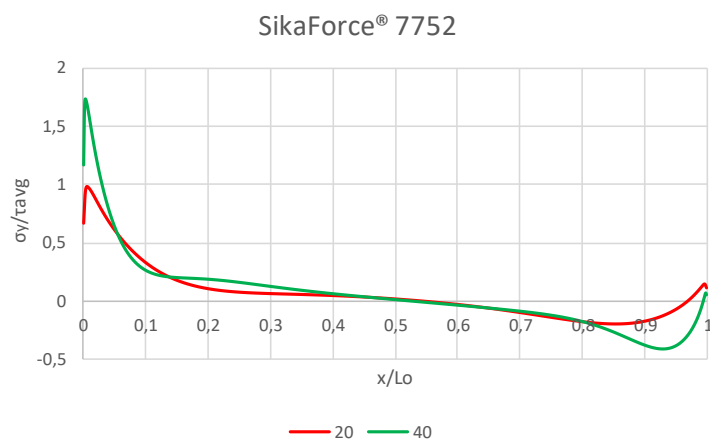


Figura 87 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares com o SikaForce® 7752.

A partir dos gráficos apresentados nas figuras supramencionadas é possível verificar que o adesivo Araldite® AV138, quando comparado com os outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de $x/C_s=0$ e $x/C_s=1$, que correspondem às extremidades de C_s na junta da camada de adesivo. Este adesivo possui uma rigidez elevada, o que origina estes picos de concentração de tensões mais elevados que podem levar à rotura prematura da junta. Na Tabela 19 estão presentes os valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função de C_s . É possível verificar que, tanto para $C_s=20$ mm como $C_s=40$ mm, o adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta picos de concentração de tensões mais elevados, quando comparado com os outros dois adesivos.

O SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os menores valores de σ_y/τ_{avg} . Estes resultados mostram-se lógicos e satisfatórios, pois este adesivo é o que apresenta menor rigidez. Como é possível observar na Figura 87, formaram-se picos de concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva claramente inferiores aos dos outros adesivos (Tabela 19).

Tabela 19 - Valores máximos para os adesivos estudados com $C_s=20$ mm e 40 mm.

Adesivo	C_s [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,30	6,65
Araldite® 2015	1,99	3,88
SikaForce® 7752	0,98	1,73

3.2.3.2 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 88, na Figura 89 e na Figura 90.

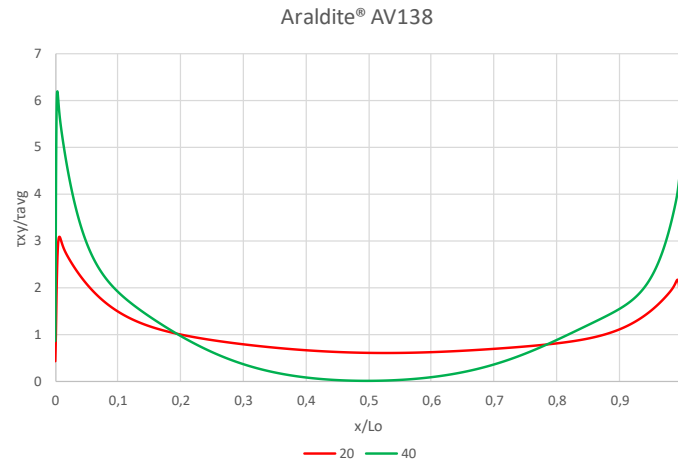


Figura 88 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® AV138.

Tal como para a distribuição de tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} demonstra valores mais reduzidos na região central de C_s e atinge o máximo nas extremidades da sobreposição [152]. Isto deve-se à deformação diferencial de cada um dos tubos ao longo da sobreposição, que é nula na sua extremidade livre e aumenta progressivamente até à extremidade oposta [62, 153, 154]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com C_s devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se empreguem adesivos frágeis a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição [154]. 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 [138, 155].

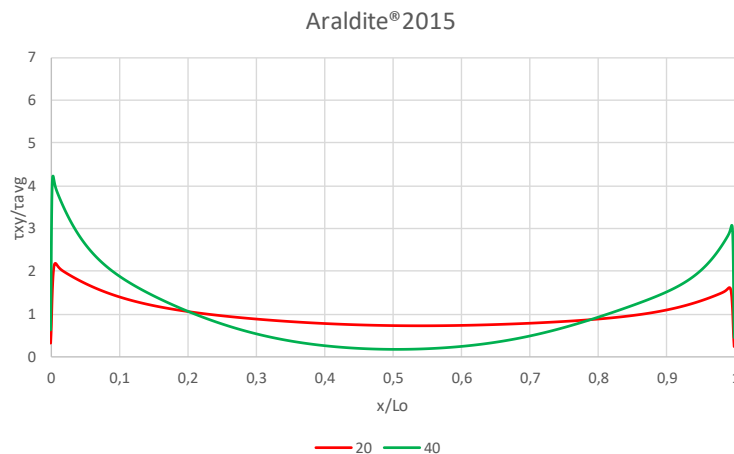


Figura 89 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares com o Araldite® 2015.

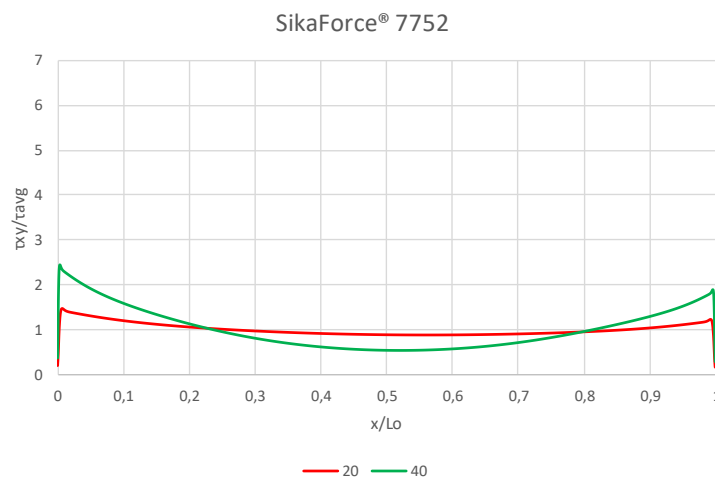


Figura 90 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares com o SikaForce® 7752.

O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} observado foi para o Araldite® AV138 (Tabela 20). Este é o adesivo mais frágil dos três e, por esta razão, geram-se picos de concentração de tensões τ_{xy} muito elevados nas extremidades das juntas. Como tal, o valor de rigidez que apresenta pode condicionar a resistência da junta e conduzir a uma rotura prematura da mesma. O mesmo se verifica para o caso do Araldite® 2015. Contudo, como este adesivo apresenta uma rigidez inferior quando comparado ao Araldite® AV138, os picos gerados apresentam valores inferiores. Tal como sucedeu durante a análise de tensões ao arrancamento, o adesivo SikaForce® 7752 demonstrou ser o menos resistente, uma vez que os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} registados são os mais baixos, devido a um E inferior em relação aos outros adesivos (Tabela 20).

Tabela 20 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os adesivos estudados.

Adesivo	C_s [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,08	6,19
Araldite® 2015	2,19	4,24
SikaForce® 5572	1,46	2,43

3.2.4 Previsão da resistência

As previsões de $P_{m\acute{a}x}$ resultantes das análises por MDC devem ser comparadas com os resultados obtidos experimentalmente. Este capítulo visa fazer essa comparação de forma a efetuar a respetiva validação das propriedades obtidas nas análises numéricas. Segue-se a apresentação das curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC (Figura 91 para o adesivo Araldite® AV138, Figura 92 para o adesivo Araldite® 2015 e Figura 93 para o adesivo SikaForce® 7752).

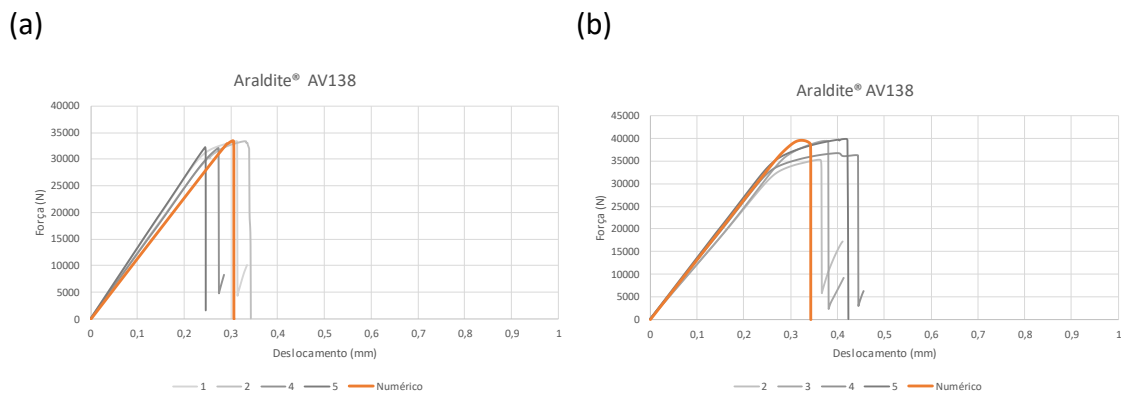


Figura 91 – Gráficos comparativos de valores numéricos com práticos para o adesivo Araldite® AV138: (a) $C_s=20$ mm; (b) $C_s=40$ mm.

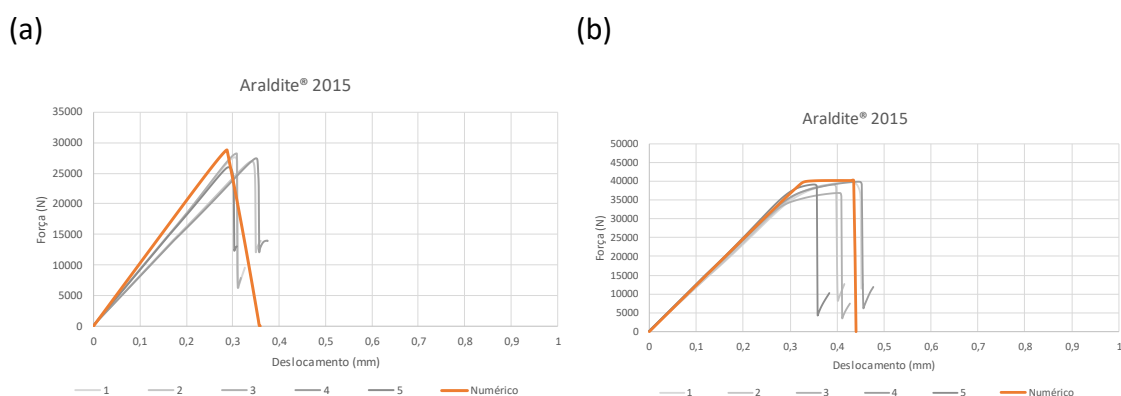


Figura 92 – Gráficos comparativos de valores numéricos com práticos para o adesivo Araldite® 2015: (a) $C_s=20$ mm; (b) $C_s=40$ mm.

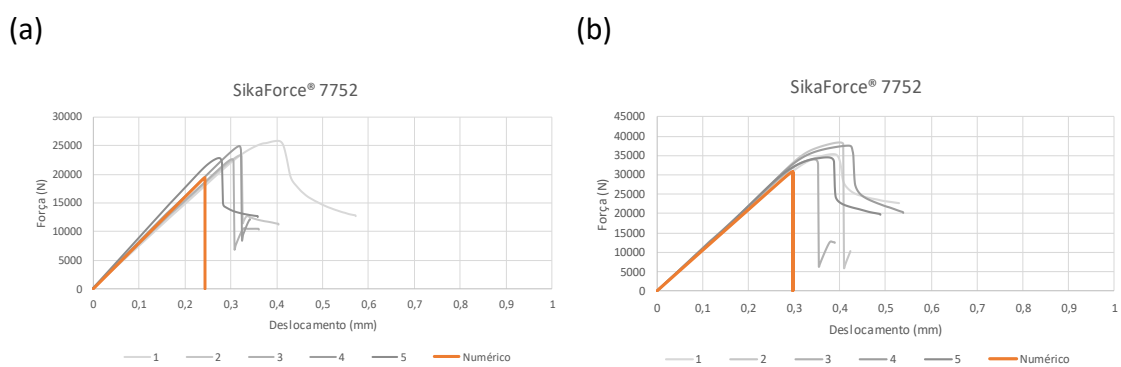


Figura 93 – Gráficos comparativos de valores numéricos com práticos para o adesivo SikaForce® 2015: (a) $C_s=20$ mm; (b) $C_s=40$ mm.

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se empregou os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 91 e Figura 92, respetivamente), em relação à $P_{máx}$, rigidez e deslocamento de rotura [123]. No caso do SikaForce® 7752 (Figura 93), uma vez que se trata de um adesivo muito dúctil, as leis triangulares do MDC subestimaram os

resultados experimentais [9]. Por esta razão, os resultados experimentais ($P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento) são um pouco maiores que os numéricos. Contudo, existe uma boa correlação das curvas obtidas experimentalmente para este adesivo.

3.2.5 Análise dos resultados obtidos

Com os resultados obtidos, verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 consegue uma resistência superior relativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752 para C_s reduzidos (Tabela 21).

Tabela 21 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada adesivo estudado em função de C_s

Adesivo	C_s [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	32797	37857
Araldite® 2015	27238	39067
SikaForce® 7752	23856	35930

Esta diferença é bem evidente para $C_s=20$ mm, cujo $P_{m\acute{a}x}\approx 33$ kN. Com o aumento de C_s (até 40 mm), o Araldite® 2015 passa a apresentar um comportamento superior ao do Araldite® AV138 devido à plastificação que ocorre antes da rotura. Desta forma, é possível que um adesivo dúctil apresente uma resistência similar à de um adesivo frágil mas mais resistente, devido à capacidade limitada de plastificação deste último mencionado [156]. Assim, o resistente, mas frágil Araldite® AV138 permite um valor mais elevado de $P_{m\acute{a}x}$ do que os restantes adesivos para $C_s=20$ mm. No entanto, a ductilidade característica do Araldite® 2015 permitiu um aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ de 43,4% de $C_s=20$ para 40 mm (como mencionado no capítulo 3.1.5) e, como tal, um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$, superando o $P_{m\acute{a}x}$ do Araldite® AV138. O SikaForce® 7752 combina uma resistência aceitável com alta ductilidade, e a rotura ocorre em condições que se assemelham à plastificação generalizada até grandes valores de C_s [155]. As juntas com este adesivo apresentam-se como sendo as menos resistentes, uma vez que tanto para $C_s=20$ mm como para $C_s=40$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ foi sempre inferior aos outros adesivos. Por outro lado, uma vez que se trata de um adesivo extremamente dúctil, o elevado aumento percentual (50,6%) permitiu uma grande subida de $P_{m\acute{a}x}$, aproximando-o dos restantes adesivos para $C_s=40$ mm.

Posto isto, verifica-se que o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, que são os adesivos mais dúcteis, apresentam aumentos percentuais elevados entre $C_s=20$ mm e 40 mm. Este comportamento provoca um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$, o que origina uma melhoria substancial do seu comportamento mecânico. Pelo facto de o Araldite® AV138 ser um adesivo frágil, a sua capacidade de plastificação é bastante limitada. Por esta razão, o seu aumento percentual foi de apenas 15,4%. Tal facto induziu uma rotura das

juntas praticamente no momento em que as tensões nas extremidades atingem o valor limite.

Os resultados das juntas adesivas tubulares apresentam diferentes tendências, dependendo das características dos adesivos (rigidez, resistência e ductilidade). O módulo de elasticidade (E) dos adesivos está intimamente relacionado com a sua rigidez e influencia a distribuição das tensões e consequentemente a resistência: um adesivo com menor valor de E tem uma distribuição de tensões mais uniforme (Figura 88, Figura 89 e Figura 90) [10]. No que diz respeito às tensões σ_y (Figura 85, Figura 86 e Figura 87), na extremidade da ligação próxima de $x/C_s=1$ registam-se picos de compressão [157]. Isto deve-se sobretudo à rotação da secção transversal nessa zona, que por se tratar de uma geometria tubular, traduz-se numa redução do diâmetro interior na extremidade do substrato interior [33, 136]. Com isto ocorre uma redução generalizada das tensões de pico σ_y para todos os valores de C_s [158]. Na região central os valores das tensões σ_y são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da sobreposição com o incremento de C_s .

No que respeita ao perfil de tensões τ_{xy} (Figura 88, Figura 89 e Figura 90), verificam-se picos de tensões τ_{xy} de maior magnitude na proximidade de $x/C_s=0$, ao passo que na extremidade oposta os picos de tensões τ_{xy} são menos preponderantes. Isto é decorrente da solicitação a que o substrato intermédio é sujeito, que se traduz na indução de cargas elevadas na proximidade de $x/C_s=0$ [156].

Dos três adesivos ensaiados, o Araldite® AV138 é aquele que apresenta maior valor de E . Por este motivo é que este adesivo apresenta os maiores picos de concentração de tensões, como se pode observar a partir dos perfis das tensões σ_y e τ_{xy} (Figura 85, Figura 86, Figura 87, Figura 88, Figura 89, Figura 90, Tabela 19 e Tabela 20). Este comportamento é mais evidente para valores de C_s mais elevados. A Figura 85, Figura 86, Figura 87, Figura 88, Figura 89 e Figura 90 mostram que os perfis das tensões σ_y e τ_{xy} tornam-se mais constantes com a redução de C_s , o que torna as sobreposições menores mais dependentes da resistência do adesivo. Por outro lado, um adesivo frágil sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona de ligação, enquanto os adesivos dúcteis permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, ao mesmo tempo que o interior da zona de ligação aumenta a sua contribuição para a resistência da junta [159].

Com isto, é possível aferir que o adesivo Araldite® AV138 é o que confere à junta adesiva tubular a maior resistência mecânica para C_s reduzidos. Por outro lado, trata-se de um adesivo frágil, ou seja, à semelhança dos gradientes de tensões σ_y , verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas. A fratura ocorre no momento em que é atingida τ e também devido à capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [154]. O adesivo Araldite® 2015, devido à menor rigidez, apresenta picos de tensões de magnitude inferior ao Araldite® AV138. Para além disto, a ductilidade característica deste adesivo permitiu uma distribuição

mais uniforme das tensões por toda a zona de sobreposição. O SikaForce® 7752 demonstrou ser o adesivo menos resistente dos três. A partir do perfil de tensões τ_{xy} da Figura 90 é fácil constatar uma boa uniformidade na distribuição de tensões, mais óbvia para valores de C_s inferiores (20 mm). Os picos de tensão gerados são muito reduzidos quando comparados com os dos outros adesivos, o que é benéfico à ligação adesiva, pois reduzem a probabilidade da mesma sofrer uma rutura prematura (desde que a carga aplicada esteja dentro dos limites de resistência do material).

Tabela 22 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] experimentais e numéricos em função de cada adesivo e C_s .

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
C_s [mm]	20	40	20	40	20	40
Experimental	32797	37857	27238	39067	23856	35930
Numérico	33568	39631	28897	40210	19455	30779
Diferença Relativa [%]	2,4	4,7	6,1	2,9	-18,4	-14,3

Quando se faz a análise experimental dos provetes, utilizando apenas ensaios de tração, é muito difícil descrever o comportamento do adesivo no interior da camada de ligação. Por esse motivo faz-se a análise numérica. No entanto, a análise numérica tem pouco valor se não for validada pelo ensaio experimental no plano de aplicação da junta. Assim sendo, realizaram-se as duas análises, experimental e numérica, uma para fornecer informação detalhada do comportamento do adesivo e outra para comparação de resistência última num plano real, resultando assim a Tabela 22. Na análise da Tabela 22 verifica-se que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a $P_{m\acute{a}x}$ são bem aproximados para as juntas adesivas tubulares com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Por outro lado, observa-se uma variação não desprezável para o adesivo SikaForce® 7752.

Para o adesivo Araldite® AV138, verificam-se valores de diferença relativa (D_{rel}) máxima bastante baixa de 4,7% para $C_s=40$ mm que representa uma diferença de 1,77 kN. Por este motivo, aceita-se a análise numérica como válida apesar dos valores ligeiramente superiores. Na Figura 91 pode analisar-se graficamente a diferença entre o comportamento real de cada provete e o numericamente calculado.

Para o adesivo Araldite® 2015, a D_{rel} máxima registada é de 6,1% para $C_s=20$ m, no entanto, sendo este valor equivalente à diferença entre $P_{m\acute{a}x}$ real de 27,2 kN e $P_{m\acute{a}x}$ numérico de 28,9kN. Tratando-se de uma diferença reduzida (1,7kN) toma-se a análise numérica como adequada ao estudo. Na Figura 92 pode analisar-se graficamente a diferença entre o comportamento real de cada provete e o numericamente calculado

Para o adesivo SikaForce® 7752, a D_{rel} é 18,4% quando $C_s=20$ mm e quando $C_s=40$ mm a D_{rel} é de 14,3% (sinal negativo apresentado na Tabela 22 é apenas para indicar que nesta

situação o $P_{m\acute{a}x}$ numérico é inferior ao experimental) estes valores não podem ser ignorados. Na Figura 93 pode analisar-se graficamente que a diferença entre o comportamento real de cada provete e o numericamente calculado apresentam formas inicialmente idênticas, mas $P_{m\acute{a}x}$ bem distintos. Este fenómeno verifica-se porque, no cálculo numérico de adesivos dúcteis com leis coesivas triangulares, existe uma redução imediata da tensão assim que é atingida a resistência coesiva [126]. Apesar de haver a consciência de que, em situações idênticas, as leis coesivas triangulares podem apresentar valores dispares da realidade decide-se avançar para o estudo desta junta com esta lei pois, em alguns trabalhos anteriores sobre a delaminação em compósitos mostraram que, apesar de pouco adequadas, os estudos numéricos utilizando estas leis permitiram obter aproximações grosseiras do seu comportamento desde que os valores de resistência coesiva (t_n^0 e t_s^0) e de tenacidade à fratura (G_{IC} e G_{IIC}) tenham sido estimados corretamente [160]. Assim sendo, tendo em conta os fatores envolvidos, os valores numericamente obtidos, são aceites como uma representação adequada do comportamento, apesar da discrepância de valores de $P_{m\acute{a}x}$.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Neste subcapítulo pretende-se aferir a validade dos resultados numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pela lei coesiva triangular, a partir da sua comparação com resultados experimentais.

Na tabela de comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos em função de cada adesivo e C_s estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos e está igualmente presente a diferença relativa, de forma a permitir uma maior facilidade na comparação dos mesmos.

Os gráficos comparativos de valores numéricos com práticos para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 demonstraram, de um modo geral, que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a $P_{m\acute{a}x}$ são muito próximos para as juntas adesivas tubulares testadas. Por outro lado, os gráficos comparativos de valores numéricos com práticos apresentam uma discrepância não desprezável para o adesivo SikaForce® 7752.

O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta as menores diferenças relativas entre os resultados experimentais e numéricos. Para $C_s=20$ mm a diferença relativa foi de 2,4% e, para $C_s=40$ mm, de 4,7%. Os valores numéricos são ligeiramente superiores aos experimentais, contudo, é uma diferença muito reduzida e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diferença percentual entre os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos de 6,1% para $C_s=20$ mm (com os valores obtidos pelo MDC superiores aos experimentais). Esta discrepância é aceitável pois é, de facto, muito reduzida, uma vez que $P_{m\acute{a}x}$ experimental ≈ 27 kN e $P_{m\acute{a}x}$ numérico ≈ 29 kN. Esta percentagem torna-se ainda mais reduzida para $C_s=40$ mm (2,9%). Posto isto, tal como sucedeu com o Araldite® AV138, apesar das pequenas diferenças observadas, aceitam-se os valores obtidos pelo MDC e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

No caso das juntas com o adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo método numérico são bastante inferiores. Isto acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva. No entanto, alguns trabalhos sobre delaminação em compósitos mostraram que leis coesivas pouco adequadas para modelar um determinado material ainda permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento, desde que os valores de resistência coesiva (t_{n0} e t_{s0}) e de tenacidade à fratura (G_{Ic} e G_{IIc}) tenham sido

estimados corretamente. Posto isto, a diferença entre os valores experimentais e do MDC para o SikaForce® 7752 é bastante evidente: 18,4% para $C_s=20$ mm e 14,3 para $C_s=40$ mm, com os valores experimentais superiores aos numéricos. Portanto, tendo em conta os fatores envolvidos, aceitam-se os valores obtidos numericamente, apesar da respetiva dispersão de valores.

Após esta análise, consideraram-se os resultados numéricos obtidos válidos e, como tal, adequados para serem utilizados como fonte de comparação para o estudo paramétrico.

Trabalhos futuros nesta área de interesse podem passar pelo estudo numérico de adesivos dúcteis como o SikaForce® 7752 utilizando leis coesivas mais indicadas, de forma a reduzir a diferença entre os valores de P numéricos e experimentais. Outro trabalho sugerido passará pela aplicação do cálculo numérico com geometrias diferentes e analisar teoricamente a influência de cada parâmetro modificado. Também nesta área se podem realizar estudo idênticos, mas solicitar o provete a ensaios de torção como substituto do ensaio de tração.

BIBLIOGRAFIA

5 BIBLIOGRAFIA

1. Wadley, L., *Compound-Adhesive Manufacture as a Behavioral Proxy for Complex Cognition in the Middle Stone Age*. *Current Anthropology*, 2010. **51**(S1): p. S111-S119.
2. Wadley, L., T. Hodgskiss, and M. Grant, *Implications for complex cognition from the hafting of tools with compound adhesives in the Middle Stone Age, South Africa*. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009. **106**(24): p. 9590-9594.
3. Sauter, F., et al., *Studies in organic archaeometry I: identification of the prehistoric adhesive used by the "Tyrolean Iceman" to fix his weapons*. *ARKIVOC*, 2000. **735**: p. 747.
4. Skeist, I., *Handbook of adhesives*. 2012: Springer Science & Business Media.
5. Monternot, H., D. Benazet, and H. Ancenay, *Guide du collage du CETIM*. 1978, Editions Lavoisier Paris.
6. Ebnesajjad, S., *Handbook of adhesives and surface preparation: technology, applications and manufacturing*. 2010: William Andrew.
7. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000: McGraw-Hill.
8. Schultz, J., et al., *Handbook of adhesive technology*. Marcel Decker, New York, 1994.
9. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015.
10. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
11. Sika^(r), *Solution finder*. 2017: automotive.sika.com.
12. Castro, M.I.T.P.P.B.I., *Adesivos Estruturais*. 2010, FEUP. p. 9.
13. Löbel, T., et al., *A hybrid bondline concept for bonded composite joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2016. **68**: p. 229-238.
14. AIRCRAFT, M., *Pre-molded panel bonded in place and ready for skin scarfing*. <http://www.mansbergeraircraft.com/mansberger%20aircraft%20composite%20repair%20gallery%20N4106G.html>.
15. Tornado144, *Vintage aircraft fuselage*. 2015, Dreamstime.
16. Vasconcelos Loureiro, A.M., S. Borschiver, and P.L.d.A. Coutinho, *Tendências Tecnológicas de Adesivos e Selantes Aplicados na Construção Civil*. *Journal of technology management & innovation*, 2009. **4**(2): p. 115-129.
17. Castilho, H. *USO DE MADEIRA NA CONSTRUÇÃO CIVIL*. 2017 [cited 2018 22-Jul-2018]; Available from: <http://henriquecastilho.com.br/blog/uso-madeira-construcao-civil/>.

18. Rewood. *MLC - Madeira Laminada Colada*. [cited 2018 22-Jul-2018]; Available from: https://www.aecweb.com.br/prod/e/mlc-madeira-laminada-colada_25120_19693.
19. Hirata, R., A.H. Mazzetto, and E. Yao, *Alternativas clínicas de sistemas de resinas compostas laboratoriais-quando e como usar*. J Bras Clin Estet Odontol, 2000. **4**(19): p. 13-21.
20. Dentistry, C.C. *A two-component adhesive system was applied on the dentin and on the enamel*. 2012 Janeiro.2019]; Available from: http://www.contempclindent.org/viewimage.asp?img=ContempClinDent_2012_3_5_82_95112_f6.jpg.
21. Klein, M.B. *The 3 Best Glues For Shoe & Boot Sole Repair*. 2019 [cited 2019 20.July]; Available from: <https://www.bustle.com/p/the-3-best-glues-for-shoe-boot-sole-repair-15777563>
22. Ventura, C. *Anatomia de um sapato*. 2010 18.Junho.2012; Available from: <https://shoecommittee.com/blog/2012/06/18/anatomia-de-um-sapato>.
23. Steigerwald, T.W. and L. Jones, *Printed circuit board (PCB) including channeled capacitive plane structure*. 1999, Google Patents.
24. Wood, A.G., W.M. Farnworth, and G.P. McGill, *Method for combining die attach and wirebond in the assembly of a semiconductor package*. 1991, Google Patents.
25. Lim, D.K., J. Allore, and M.J. Lombardi, *Screen Attachment in a Portable Electronic Device*. 2016, Google Patents.
26. PCBCart. *PCB Materials*. 2019 [cited 2019 29.Jully]; Available from: <https://www.pcbcarter.com/pcb-capability/pcb-materials.html>.
27. Gobor, A., *What is delidding?* 2016. p. Guide.
28. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria.
29. Souza, G.F.d.a.S., B.S.d., *Efeito do adesivo e do comporimento de sobreposição em juntas coladas*. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca: Rio de Janeiro, 2015.
30. Correia, A.C.M., *Estudo químico e envelhecimento higrotérmico de um adesivo de epóxido.: comportamento mecânico de juntas coladas*. 1993.
31. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007.
32. Vallée, T., J.R. Correia, and T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles—Part II: Strength prediction*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1915-1930.
33. Vallée, T., J.R. Correia, and T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1903-1914.
34. Gonçalves, J.P.M., *Contribuições para a análise numérica e experimental do comportamento de juntas de sobreposição simples*. 2000.
35. Goncalves, J., M. De Moura, and P. De Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(5): p. 357-365.

36. Almeida, S.A.d.C., *Análise computacional de juntas adesivas simples e duplas em materiais compósitos*. 2012.
37. Teixeira, L.M.B.S., *Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais*. 2000.
38. Ali, U., K.J.B.A. Karim, and N.A. Buang, *A Review of the Properties and Applications of Poly (Methyl Methacrylate) (PMMA)*. *Polymer Reviews*, 2015. **55**(4): p. 678-705.
39. Santos, D.J.d., *Estudo experimental da resistência mecânica de junções adesivas*. 2007, Universidade de São Paulo.
40. Esteves, J.L.S., *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. 1990.
41. Cautus. *Adesivos anaeróbicos e vedantes*. 2019 [cited 2019 30.July]; Available from: <https://cautus.pt/adesivos-anaer%C3%B3bicos-e-vedantes.html>.
42. Alhanati, L.S. *Conceitos básicos*. 2019 [cited 2019 20-Aug]; Available from: <https://www.alfaconnection.pro.br/fisica/fisicoquimica/tensao-superficial/conceitos-basicos/>.
43. Cautus. *Adesivos Cianoacrilatos*. 2019 [cited 2019 31.July]; Available from: <https://cautus.pt/adesivos-cianoacrilatos>.
44. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014.
45. Cautus. *Adesivo Acrílico estrutural*. 2019 [cited 2019 31.July]; Available from: <https://cautus.pt/adesivo-acr%C3%ADlico-estrutural>.
46. Santos, A.F., *Avaliação do comportamento mecânico de um adesivo estrutural epóxi utilizado na indústria automobilística*. 2005, Universidade de São Paulo.
47. Hosseinzadeh, R., K. Shahin, and F. Taheri, *A simple approach for characterizing the performance of metallic tubular adhesively-bonded joints under torsion loading*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007. **21**(16): p. 1613-1631.
48. Cognard, J.Y., H. Devaux, and L. Sohier, *Numerical analysis and optimisation of cylindrical adhesive joints under tensile loads*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2010. **30**(8): p. 706-719.
49. Nemes, O. and F. Lachaud, *Modeling of cylindrical adhesively bonded joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2009. **23**(10-11): p. 1383-1393.
50. Shi, Y. and S. Cheng, *Analysis of adhesive-bonded cylindrical lap joints subjected to axial load*. *Journal of engineering mechanics*, 1993. **119**(3): p. 584-602.
51. Nemeş, O., F. Lachaud, and A. Mojtabi, *Contribution to the study of cylindrical adhesive joining*. *International journal of adhesion and adhesives*, 2006. **26**(6): p. 474-480.
52. Labbé, S. and J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **33**: p. 26-35.
53. Spaggiari, A. and E. Dragoni, *Regularization of torsional stresses in tubular lap bonded joints by means of functionally graded adhesives*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014. **53**: p. 23-28.
54. Canyurt, O.E., *Fatigue strength estimation of adhesively bonded tubular joint using genetic algorithm approach*. *International journal of mechanical sciences*, 2004. **46**(3): p. 359-370.

55. Sekercioglu, T., *Investigations of adhesively bonded joints behaviour under dynamic loading*. 2001, Ph. D. Thesis, Pamukkale University, Denizli, Turkey, 2001 (in Turkish).
56. Loctite, C., *Loctite worldwide design handbook*. 2000, [Munich, Germany]: Loctite.
57. Hwang, H.Y. and D.G. Lee, *Temperature effects on the torsional fatigue characteristics of adhesively bonded tubular single-lap joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004. **18**(4): p. 413-425.
58. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. *Luftfahrtforschung* 15, 1938: p. 41-47.
59. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
60. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1984. **4**(2): p. 65-78.
61. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, 2012. **72**(7): p. 788-791.
62. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
63. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007. **26**(2): p. 183-201.
64. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
65. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
66. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1959. **49**(2): p. 199-204.
67. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1968. **16**(5): p. 337-342.
68. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. *Journal of Applied Mechanics*, 1968. **35**(2): p. 379-386.
69. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1991. **11**(4): p. 221-227.
70. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1959. **23**(3): p. 622-636.
71. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960. **8**(2): p. 100-104.
72. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004. **18**(1): p. 39-53.

73. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
74. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
75. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
76. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
77. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
78. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
79. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
80. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
81. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
82. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
83. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
84. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
85. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
86. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
87. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
88. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.

89. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive—an experimental study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
90. Jung Lee, M., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
91. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
92. Pandya, K.C. and J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
93. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
94. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
95. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adherent thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
96. Stigh, U., et al., *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
97. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
98. Gustafson, P.A. and A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
99. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13–14): p. 2065-2077.
100. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
101. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
102. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
103. Pardoën, T., et al., *Constraint effects in adhesive joint fracture*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005. **53**(9): p. 1951-1983.
104. Flinn, B.D., et al., *Fracture Resistance Characteristics of a Metal-Toughened Ceramic*. Journal of the American Ceramic Society, 1993. **76**(2): p. 369-375.
105. Mello, A.W. and K.M. Liechti, *The Effect of Self-Assembled Monolayers on Interfacial Fracture*. Journal of Applied Mechanics, 2004. **73**(5): p. 860-870.
106. Li, S., et al., *Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer–matrix composite*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(3–4): p. 537-549.

107. Campilho, R.D.S.G., et al., *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. Composites Part B: Engineering, 2013. **50**: p. 120-126.
108. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
109. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
110. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
111. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
112. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
113. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
114. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
115. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
116. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
117. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
118. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
119. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
120. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
121. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
122. Campilho, R.D., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
123. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.

124. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013.
125. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
126. Campilho, R.D., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
127. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
128. Fernandes, T.A., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
129. Mitutoyo, *Bore Gages- Series 511-Standard Type*. 2019, Mitutoyo.
130. Mitutoyo, *Vernier Caliper Series 532-with Fine Adjustment*. 2019, Mitutoyo.
131. de Sousa, C., et al., *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017. **231**(1-2): p. 210-223.
132. Pinto, A.M.G., et al., *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
133. Kafkalidis, M. and M. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
134. Liljedahl, C., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International journal of fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
135. Chen, X., *Numerical Study of Stable Tearing Crack Growth Events Using the Cohesive Zone Model Approach*. 2013.
136. Jousset, P. and M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
137. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
138. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
139. Da Silva, L.F. and R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012: Springer.
140. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
141. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.

142. De Moura, M., et al., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
143. Marques, E. and L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
144. Cornec, A., I. Scheider, and K.-H. Schwalbe, *On the practical application of the cohesive model*. Engineering fracture mechanics, 2003. **70**(14): p. 1963-1987.
145. Radice, J. and J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites science and technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
146. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
147. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014.
148. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of strain analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
149. Taib, A.A., et al., *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(4): p. 237-248.
150. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009.
151. Reis, P., F. Antunes, and J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Composite structures, 2005. **67**(1): p. 125-133.
152. Luo, Q. and L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(7-8): p. 2349-2370.
153. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
154. Grant, L., R.D. Adams, and L.F. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International journal of adhesion and adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
155. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International journal of adhesion and adhesives, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
156. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016.
157. Campilho, R., et al., *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008. **22**(13): p. 1565-1591.
158. Shishesaz, M. and N. Bavi, *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **27**(11): p. 1197-1225.
159. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal shear joints*. 1999.

-
160. Yang, Q. and B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. International Journal of Fracture, 2005. **133**(2): p. 107-137.