



Análise numérica de juntas adesivas tubulares sujeitas a um carregamento de torção

TIAGO JOSÉ DE SOUSA OLIVEIRA

novembro de 2019

ANÁLISE NUMÉRICA DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A UM CARREGAMENTO DE TORÇÃO

Tiago José de Sousa Oliveira

1120757

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ANÁLISE NUMÉRICA DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A UM CARREGAMENTO DE TORÇÃO

Tiago José de Sousa Oliveira

1120757

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 e coorientação da Mestre Mónica Glória Cardoso.

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Doutor João Augusto de Sousa Bastos

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientador

Mestre Mónica Glória Cardoso

Assistente Convidado, ISEP

Arguente

Doutora Ana Sofia Oliveira Queirós Ferreira Barbosa

Investigadora, INEGI

AGRADECIMENTOS

Apresento os meus sinceros agradecimentos ao meu orientador e coorientador da dissertação por todo o apoio, incentivo e conhecimento prestado durante a realização da dissertação

- Doutor Duarte Salgueiral Gomes Campilho (Orientador)
- Mestre Mónica Glória Cardoso (Coorientador)

Agradeço à minha família todo o apoio, à minha mãe por ser imensamente incansável, tolerante e paciente, ao meu pai por todo o sacrifício prestado e ao meu irmão por toda a ajuda, companheirismo e por ser um exemplo de dedicação.

- Maria Deolinda Guedes de Sousa Oliveira
- José Custódio Ramos de Oliveira
- José Manuel de Sousa Oliveira

Especial agradecimento a uma amiga muito especial pois sem ela nada disto teria ocorrido. Obrigado por tudo.

- Maria de Fátima Donas de Sá

Declarado ainda os meus agradecimentos às seguintes pessoas (ordem alfabética)

- Ana Sofia (Amigo)
- João Correia (Amigo)
- João Silva (Amigo)
- Nuno Rosa (Amigo)
- Sofia Meira (Amigo)

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas tubulares; Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Parâmetros geométricos; Adesivos estruturais; Junta tubular submetida a carregamento de torção.

RESUMO

Atualmente, o método de união com recurso a ligações adesivas tem ganho bastante presença na conceção de estruturas mecânicas nas mais variadas indústrias, principalmente na indústria aeronáutica e automóvel. Isto deve-se ao facto de tal método de união apresentar diversas vantagens relativamente a ligações mais tradicionais como a soldadura ou as ligações mecânicas. Entre as quais se destaca a redução de peso da estrutura, a maior facilidade da aplicação do adesivo, que permite a redução do tempo de fabrico e do custo, e a versatilidade do método, que possibilita a ligação entre diferentes materiais, incluindo compósitos, sem danificar as estruturas a ligar. O mercado de adesivos possui uma grande variedade de soluções, que podem usar adesivos resistentes e frágeis, como é o caso do Araldite® AV138, ou adesivos com menor resistência, mas dúcteis, como o Araldite® 2015. Existe também uma nova família de adesivos de poliuretano que combina elevada resistência com ductilidade (por exemplo, o SikaForce® 7752).

Esta dissertação compara o desempenho à torção dos três adesivos supracitados, em juntas tubulares de alumínio (AW6082-T651), considerando a variação dos parâmetros geométricos principais, comprimento de sobreposição (L_0) e espessura dos aderentes (t_p). De forma a realizar a previsão da resistência destas juntas utilizou-se o Método de Elementos Finitos (MEF) com o Modelo de Dano Coesivo (MDC), cuja análise recaiu sobre as tensões internas do adesivo, nomeadamente a análise às tensões de corte (τ_{xy}), o dano correspondente, a resistência do adesivo e energia dissipada na rotura.

O estudo numérico demonstrou grande influência do parâmetro geométrico. Verificase um acréscimo considerável de força máxima aplicada ($P_{máx}$) com o aumento de L_0 . As juntas com o adesivo Araldite® 2015 apresentaram a maior resistência. As juntas adesivas com menor resistência, e resultados inferiores na globalidade do estudo, são as que utilizam o SikaForce® 7752. Tais efeitos repetem-se considerando a variação de espessura do substrato interior (t_{si}), assim como a variação de espessura do substrato exterior (t_{se}). O Araldite® AV138, sendo dos adesivos estudados o mais frágil, apresenta os picos de tensões mais elevados, assim como resultados bastante favoráveis para valores de t_{si} e t_{se} reduzidos (1 mm).

KEYWORDS

Tubular adhesive joints; Finite Element Method, Cohesive Zone Models, Geometric Parameters; Structural adhesives; Tubular joint subjected to torsional forces.

ABSTRACT

Nowadays, the bonding method using adhesives has gained a lot of presence in the design of mechanical structures in the most varied industries, especially in the aeronautics and automobile industry. Such a method of joining has several advantages over more traditional methods such as welding or mechanical joining. These advantages include the weight reduction of the structure and the easiest application of the adhesive. In terms of manufacturing time and cost, this is a versatile method that enables the bonding of different materials, including composites, without damaging the structures to be bonded. The adhesives market has a wide variety of solutions in which strong and brittle adhesives such as Araldite® AV138 or lower strength but ductile adhesives such as Araldite® 2015 can be used. There is also a new family of polyurethane adhesives that combines high strength with ductility (for example SikaForce® 7752).

This dissertation compares the torsional performance of the three abovementioned adhesives, in aluminum tubular joints (AW6082-T651), considering the variation of the main geometric parameters, overlap length (L_O), bond thickness (t_p). In order to predict the strength, the Finite Element Method (FEM) was used with the Cohesive Zone Model (CZM), whose analysis based itself on the internal stresses of the adhesive, namely the analysis of shear stress (τ_{xy}), the corresponding damage, adhesive strength and energy dissipated at failure.

The numerical study showed a major influence depending on the geometric parameter. There is a considerable increase in P_{max} as L_O increases. Joints with Araldite® 2015 have the highest strength. The lower strength and lower overall results are the adhesive joints that use the SikaForce® 7752. These results are repeated considering the variation of t_{Si} and t_{Se} . The Araldite® AV138, being the most brittle of the studied adhesives, presents the highest stress peaks of all, as well as favorable results for reduced t_{Si} and t_{Se} values (1 mm).

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
AFG	Adesivo Funcionalmente Graduado
AL	Liga de alumínio
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
CFRV	Compósito Reforçado com Fibra de Vidro
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos Finitos
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
GAFSEM	Algoritmo Genético Modelo de Estimativa da Força de Fadiga
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de Sobreposição Dupla
JSS	Junta de Sobreposição Simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Estendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
PEEQ	<i>Plastic strain equivalent</i>
pH	Potencial Hidrogeniónico
PRF	Plástico Reforçado com Fibras

PVC	Policloreto de Vinilo
SDEG	<i>Stiffness Degradation</i>
SSE	<i>Sum of Squared Error</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>

Lista de Unidades

GPa	Gigapascal
kN	Quilonewton
kNm	Quilonewton-metro
kPa	Quilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton

Lista de Símbolos

a	Comprimento da fenda
B	Largura do substrato
d_{SE}	Diâmetro externo do substrato exterior
d_{SI}	Diâmetro externo do substrato interior
G_C	Tenacidade
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
h	Altura mínima do substrato

L_O	Comprimento de sobreposição
L_S	Comprimento dos substratos
L_T	Comprimento total da junta
$P_{m\acute{a}x}$	Força máxima aplicada
$P_{m\acute{a}x} M\acute{e}d$	Força máxima média
t	Espessura do substrato
t_A	Espessura do adesivo
t_m^0	Resistência em modo misto
t_P	Espessura do aderente
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
t_{Se}	Espessura do substrato exterior
t_{se}	Espessura do substrato exterior
t_{Si}	Espessura do substrato interior
t_{si}	Espessura do substrato interior
δ	Deslocamento
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Aumento percentual
σ_r	Tensão radial
σ_x	Tensão axial
σ_y	Tensão de arrancamento
σ_θ	Tensão radial
τ_{avg}	Tensão de corte média
τ_{xy}	Tensão de corte

E	Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de <i>Young</i>
ν	Coeficiente de Poisson

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Detalhes estruturais das ligação de diversos componentes do 1º jato comercial (de <i>Havilland Comet</i>) [10].	11
Figura 2 - Esquema de colagem das longarinas do avião de Havilland Comet: (A) colagem da longarina à pele, (B) reforço de colagem da longarina e (C) reforço da borda de colagem à pele [11].	11
Figura 3 - Zonas de aplicação de adesivo no BMW série 7 [12].	12
Figura 4 - Uso de adesivos na Construção Civil [17].	13
Figura 5 - Descrição esquemática de vários componentes eletrônicos com adesivos: (a) chip em substrato flexível, (b) chip em substrato de vidro, (c) chip em placa rígida [2].	14
Figura 6 - Esquema dos vários constituintes a ligar num sapato [11].	15
Figura 7 - Esforços típicos numa junta adesiva: a) compressão; b) tração; c) corte; d) arrancamento; e) clivagem. Adaptado de [7].	17
Figura 8 - Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de tração [20].	17
Figura 9 - Distribuição de tensão axial sob esforço de compressão [20].	18
Figura 10 - Distribuição de tensões de corte numa junta de sobreposição simples (JSS) [20].	18
Figura 11 - Distribuição da tensão, segundo o modelo analítico de Volkersen, numa JSS sujeita a esforços de corte [21].	19
Figura 12 – Gráfico comparativo do efeito do comprimento e da largura de sobreposição [1].	19
Figura 13 - Distribuição de tensões de clivagem numa junta adesiva [20].	19
Figura 14 - Distribuição de tensões de arrancamento numa junta adesiva [20].	20
Figura 15 – Representação esquemática dos modos de rotura em ligações adesivas (adaptado de [23, 24]).	21
Figura 16 – Representação de uma Rotura Coesiva na interface [25].	21
Figura 17 - Representação esquemática do modo de rotura adesiva numa junta de sobreposição simples [26].	22
Figura 18 – Representação de uma Rotura Mista [25].	23
Figura 19 - Representação esquemática do modo de rotura coesiva do aderente numa junta adesiva de sobreposição simples [26].	23
Figura 20 - Exemplo de configurações de juntas adesivas mais comuns [1].	24
Figura 21 - Exemplo de configurações de juntas topo a topo [7].	24
Figura 22 - Exemplo de modificações às juntas de sobreposição simples [20].	25

Figura 23 - Exemplo de cobre-juntas [20].	26
Figura 24 - Configurações possíveis para juntas tubulares: a) Ligações em varões; b) Ligações em tubos [20].	26
Figura 25 - Exemplos de juntas em T [7].	27
Figura 26 - Esquema para o modelo de Nayeb-Hashemi et al. [32].	33
Figura 27 - Esquema para o modelo de Pugno e Carpinteri [33].	33
Figura 28 - Desenho esquemático da junta tubular axialmente carregada com dimensões características e propriedades elásticas (espessura do adesivo mostrada exagerada) [34, 35].	35
Figura 29 - Esboço da geometria da junta 1 (a), com detalhes da porção de sobreposição (b) e da malha MEF (c) [34, 35].	35
Figura 30 - Contorno das tensões de corte (τ_{xy}) em aderentes e adesivo próximos da extremidade esquerda da sobreposição [34, 35].	36
Figura 31 - Gráfico de contorno de tensões axiais normais (σ_x) sobrepostas à configuração deformada ($x = 500$) da junta 1 [34-36].	36
Figura 32 - Distribuições de tensão normalizadas a meia espessura do adesivo dadas por elementos finitos (EF) para as cinco configurações de juntas adesivas estudadas [36].	37
Figura 33 - Ligações para: (a) amostras G1 e G2; (b) amostras G3 e G4; (c) provete G5; e (d) um quadro espacial de grande escala montado [37].	38
Figura 34 - Modelação EF: (a) Geometria geral; (b) Elementos de interface [37].	39
Figura 35 - Efeito do comprimento da ligação na capacidade conjunta [37].	40
Figura 36 - Geometria e configuração da junta tubular colada: (a) Vista isométrica e (b) vista longitudinal [38].	41
Figura 37 - Variações do índice de falha “e” na junção tubular sob carga axial ao longo da circunferência: (a) na interface do tubo interno e camada adesiva, (b) a superfície média da camada adesiva, e (c) na interface externa tubo e camada adesiva [38].	42
Figura 38 - Configuração esquemática de uma junta tubular colada. (a) Constituintes conjuntos, (b) Características geométricas [28].	44
Figura 39 - Malha de elemento finito simétrico desenvolvida para o estudo paramétrico mostrando como os aderentes de malha grossa estão conectados ao adesivo de malha fina [28].	44
Figura 40 - Comportamento totalmente plástico de dois comprimentos diferentes de sobreposição, L, do teste de torção estática, mostrando o número de amostras para cada comprimento [28].	45
Figura 41 - Dimensões básicas de junta de sobreposição simples [44].	46
Figura 42 - Malha de elementos finitos. Localizações de laminação [43].	46

Figura 43 - Modelos de elementos finitos das duas juntas adesivas [43].	47
Figura 44 - Comparação das distribuições de tensão dentro da camada adesiva obtida a partir do MEF e solução analítica de Zou e Taheri para (a) juntas de uma unha intactas e (b) uniões de encaixe intactas formadas com vários aderentes [43].	47
Figura 45 - Influência do uso de camadas extras de elementos na modelagem da distribuição de tensões dentro da camada adesiva da única volta intacta (a) e (b) juntas de encaixe [43].	48
Figura 46 - Configuração geométrica: (a) junta de sobreposição simples e (b) tubo compósito laminado [47].	49
Figura 47 - Capacidades de torque previstas com base nos critérios de falha com os dados experimentais [46].	50
Figura 48 - Comparação do resultado experimental, [49] e resultados GAFSEM baseados no efeito da rugosidade da superfície [48].	51
Figura 49 - Comparação do resultado experimental, [49] e os resultados do GAFSEM baseados no efeito da folga da união [48].	52
Figura 50 - Comparação dos resultados experimentais e dos resultados do GAFSEM com base no efeito da interferência [48].	52
Figura 51 - Comparação dos resultados obtidos da [49] e GAFSEM com base no efeito da temperatura [48].	52
Figura 52 - Carregamento de amostras de juntas se sobreposição tubulares [51].	54
Figura 53 - Confiabilidade do carregamento estático [51].	54
Figura 54 - Confiabilidade do carregamento dinâmico [51].	55
Figura 55 - 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 [16]).	59
Figura 56 - Modelo coesivo triangular [28, 29].	60
Figura 57 - Geometria do provete DCB [42].	62
Figura 58 - Geometria do provete ENF [42].	62
Figura 59 - 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) [65].	64
Figura 60 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [108].	68
Figura 61 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [108].	69
Figura 62 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 [108].	70
Figura 63 - Curvas σ - ϵ do adesivo SikaForce® 7752 [111].	71
Figura 64 - Configuração da geometria do provete [105].	72

Figura 65 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [105].....	74
Figura 66 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [105].	75
Figura 67 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [105].....	76
Figura 68 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [105].	78
Figura 69 - Lei coesiva triangular [114].	80
Figura 70 - MDC 2D com lei triangular [116].	81
Figura 71 - Atribuição dos respectivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®	85
Figura 72 - Desenho 2D de uma junta adesiva tubular no ABAQUS®.....	85
Figura 73 - Junta adesiva tubular em 3D modelada no ABAQUS® (partição observável na tubagem de maior diâmetro).	86
Figura 74 - Definição de incrementos para análise no <i>software</i> ABAQUS®.	87
Figura 75 - Representação das condições fronteira na simulação (encastramento).	88
Figura 76 - Representação das condições fronteira na simulação (rotação nula na extremidade do tubo com menor diâmetro).	88
Figura 77 - Representação das condições fronteira na simulação (ângulo de rotação).	89
Figura 78 - Representação do RP e respetiva ligação a vários pontos.	89
Figura 79 – Ilustração da malha refinada.	90
Figura 80 - Refinamento da malha nas arestas da tubagem.	90
Figura 81 - Refinamento da malha nas zonas de partição da tubagem.	91
Figura 82 - Malha refinada para: (a) análise de resistência e (b) análise de tensões.	91
Figura 83 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [105].....	93
Figura 84 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [105].....	95
Figura 85 - Curvas $P-d$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [105].	96
Figura 86 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [105].	96

Figura 87 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [105].	96
Figura 88 - $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [105].	99
Figura 89 - Comparação de curvas de t_{xy}/t_{avg} entre os modelos axissimétrico e tridimensional.	101
Figura 90 - Comparação entre L_0 para as distribuições das tensões τ_{xy} para os três adesivos utilizados nas juntas adesivas tubulares ((a) Araldite® AV138, (b) SikaForce 7752 e (c) Araldite® 2015) na condição $t_{Si}=t_{Se}=2$ mm.	103
Figura 91 – Ilustração a) diferença de diâmetro entre ambos os aderentes e b) respectivo gráfico ilustrativos dos efeitos resultantes nas tensões de corte nas extremidades.	104
Figura 92 – Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=20$ mm e para variação de t_{Si} .	105
Figura 93 - Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=20$ mm e para variação de t_{Se} .	105
Figura 94 - Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=40$ mm e para variação de t_{Si} .	106
Figura 95 - Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=40$ mm e para variação de t_{Se} .	106
Figura 96 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Se} .	107
Figura 97 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Si} .	108
Figura 98 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{Se} .	108
Figura 99 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{Si} .	109
Figura 100 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Se} .	109
Figura 101 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Si} .	110
Figura 102 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{Se} .	111
Figura 103 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{Si} .	111

Figura 104 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{SI}	112
Figura 105 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Se}	113
Figura 106 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{SI}	113
Figura 107 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{Se}	114
Figura 108 – Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=1$ mm (gráfico a) e para $t_{SI}=1$ mm (gráfico b).	115
Figura 109 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=2$ mm e para $t_{SI}=2$ mm.	115
Figura 110 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=3$ mm (gráfico a) e para $t_{SI}=3$ mm (gráfico b).	115
Figura 111 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=4$ mm (gráfico a) e para $t_{SI}=4$ mm (gráfico b).	116
Figura 112 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso e para $t_{Se}=5$ mm (gráfico a) e para $t_{SI}=5$ mm (gráfico b).	116
Figura 113 - Energia dissipada em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{SI}=t_{Se}$ de 2 mm.	117
Figura 114 - Energia dissipada em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{Se} de 2 mm e t_{SI} de 3 mm.	117
Figura 115 - Energia dissipada em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{Se} de 2 mm e t_{SI} de 4 mm.	117
Figura 116 - Energia dissipada em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{Se} de 2 mm e t_{SI} de 5 mm.	118
Figura 117 - Energia dissipada em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{Se} de 3 mm e t_{SI} de 2 mm.	118
Figura 118 - Energia dissipada em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{Se} de 4 mm e t_{SI} de 2 mm.	118

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo do tipo de adesivos usados no sapato da Figura 6 [11]	16
Tabela 2 - Dimensões características, propriedades elásticas e carga das cinco juntas usadas como estudos de caso (o número de dígitos significativos para os raios a_1 e a_2 é necessário para fornecer o valor correto da espessura do adesivo η) [34, 35].....	35
Tabela 3 - Propriedades da liga de alumínio AW6082-T651 [107].	67
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [109].	69
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [110].....	70
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [111].	72
Tabela 7 - Cotas dos provetes e respectivos valores (em mm) [105].	73
Tabela 8 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138 [105].	75
Tabela 9 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015 [105].....	76
Tabela 10 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 [105].	77
Tabela 11 - $P_{máxMéd}$ [N] e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares [105].	78
Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [107].	83
Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [123].	83
Tabela 14 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [111].	84
Tabela 15 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [105].....	94
Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [105].	95
Tabela 17 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0 [105].....	98
Tabela 18 – Valores de $P_{máx}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respectiva diferença relativa [105].	100
Tabela 19 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{se} de 1 mm.	120
Tabela 20 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{si} de 1 mm.....	120
Tabela 21 – Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{si}=t_{se}$ de 2 mm.	120
Tabela 22 – Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{si}=t_{se}$ de 3 mm.	121

Tabela 23 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{Si}=t_{Se}$ de 4 mm.....	121
Tabela 24 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{Si}=t_{Se}$ de 5 mm.	121

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	9
2.1.2.1	Indústria aeronáutica.....	10
2.1.2.2	Indústria automóvel.....	11
2.1.2.3	Indústria naval	12
2.1.2.4	Construção civil.....	13
2.1.2.5	Indústria eletrónica.....	14
2.1.2.6	Indústria do calçado.....	14
2.1.3	Esforços em juntas adesivas.....	16
2.1.3.1	Tração	17
2.1.3.2	Compressão	17
2.1.3.3	Corte	18
2.1.3.4	Clivagem.....	19
2.1.3.5	Arrancamento	19
2.1.4	Modos de rotura	20
2.1.4.1	Rotura coesiva	21
2.1.4.2	Rotura adesiva	22
2.1.4.3	Rotura mista	22
2.1.4.4	Rotura do substrato ou rotura coesiva do aderente	23
2.1.5	Configurações possíveis de junta	24

2.1.5.1	Juntas topo a topo	24
2.1.5.2	Chanfro interior	24
2.1.5.3	Sobreposição simples	25
2.1.5.4	Sobreposição dupla.....	25
2.1.5.5	Chanfro exterior.....	25
2.1.5.6	Cobre-junta	25
2.1.5.7	Tubular.....	26
2.1.5.8	Juntas em T	27
2.1.6	Tipos de adesivos	27
2.1.6.1	Adesivos epóxicos.....	27
2.1.6.2	Adesivos fenólicos.....	28
2.1.6.3	Adesivo acrílicos.....	29
2.1.6.4	Adesivos à base de resorcinol-formol.....	30
2.1.6.5	Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida	30
2.1.6.6	Adesivos de poliuretano	30
2.2	Juntas adesivas tubulares	30
2.2.1	Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração.....	34
2.2.1.1	Estudo 1	34
2.2.1.2	Estudo 2	38
2.2.1.3	Estudo 3	41
2.2.2	Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção.....	43
2.2.2.1	Estudo 1	43
2.2.2.2	Estudo 2	45
2.2.2.3	Estudo 3	49
2.2.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga	51
2.2.3.1	Estudo 1	51
2.2.3.2	Estudo 2	53
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	55
2.3.1	Mecânica dos meios contínuos	56

2.3.2	Mecânica da fratura	57
2.3.3	Modelos de dano coesivo.....	58
2.3.3.1	Tipos de leis coesivas	59
2.3.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	60
2.3.3.3	Mecânica do dano.....	62
2.3.3.4	Método de Elementos Finitos Estendido.....	63
3	DESENVOLVIMENTO	67
3.1	Validação experimental.....	67
3.1.1	Materiais utilizados	67
3.1.1.1	Substratos	67
3.1.1.2	Adesivos	68
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	68
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	69
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	71
3.1.2	Geometria das juntas	72
3.1.3	Resultados obtidos	73
3.1.3.1	Araldite® AV138	74
3.1.3.2	Araldite® 2015	75
3.1.3.3	SikaForce® 7752.....	76
3.1.4	Comparação de resultados.....	78
3.1.5	Modelo de dano coesivo	79
3.1.6	Leis coesivas para simulação do adesivo.....	82
3.1.6.1	Araldite® AV138.....	82
3.1.6.2	Araldite® 2015	83
3.1.6.3	SikaForce® 7752.....	83
3.1.7	Condições da análise numérica	84
3.1.8	Análise de tensões na junta.....	92
3.1.8.1	Tensões de arrancamento	92
3.1.8.2	Tensões de corte.....	94

3.1.9	Previsão da resistência por MDC.....	95
3.1.10	Discussão dos resultados obtidos.....	97
3.1.11	Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais	99
3.2	Trabalho numérico.....	101
3.2.1	Geometrias analisadas	102
3.2.2	Análise de tensões na junta.....	102
3.2.2.1	Tensões de corte.....	102
3.2.2.2	Tensões de arrancamento	107
3.2.3	Estudo da variável de dano	107
3.2.3.1	Araldite® AV138.....	107
3.2.3.2	Araldite® 2015	109
3.2.3.3	Sikaforce® 7752	112
3.2.4	Previsão da resistência	114
3.2.5	Previsão da energia dissipada	116
3.2.6	Previsão da deformação à torção.....	119
3.2.7	Análise dos resultados obtidos.....	122
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	127
5	REFERÊNCIAS.....	131

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As tecnologias têm evoluindo com uma capacidade e velocidade nunca vista na história humana. Torna-se necessário acompanhar os tempos atuais no que diz respeito a novos desenvolvimentos. O crescente investimento na implementação das ligações adesivas, nas mais diversas indústrias, é prova que este pode ser um mercado de grande sucesso a médio/longo prazo. No entanto, a aplicação das ligações adesivas ainda incide numa utilização algo limitada, uma vez que as uniões mais comuns de aplicar continuam a ser entre componentes retilíneos. Desta forma, é necessário um investimento para que este género de juntas consiga abranger uma maior gama de aplicações. Entre estas encontram-se as ligações tubulares, onde o uso de adesivos continua escasso, apesar de todas as vantagens associadas.

Uma vez que as ligações adesivas revelam ótimas aptidões para união de componentes estruturais, além de vantagens, nomeadamente a redução de peso da totalidade da estrutura, torna-se necessário facultar dados referentes à quantificação das forças e tensões presentes neste tipo de ligação, de acordo com os comportamentos caracteristicamente diferenciados das diversas juntas adesivas possíveis. Assim sendo, é necessária a implementação de ferramentas que permitam a realização de tais projetos. Na análise deste tipo de juntas, está a ser cada vez mais comum a utilização do Método de elementos finitos (MEF). Este método tem revelado as suas aptidões como ferramenta bastante versátil, com precisão bastante elevada, e de uso tanto em modelos simples como nos mais complexos.

No âmbito das técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo (MDC) são uma ferramenta de grande importância e popularidade, uma vez que combinam os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos de forma a conjugar o desempenho das juntas adesivas. Com estas ferramentas, é possível a modelação de juntas adesivas para os mais variados tipos de adesivos, substratos e configurações de junta. Como tal, a utilização desta técnica numérica que, atualmente, constitui a melhor alternativa para o estudo e previsão da resistência de juntas adesivas, começa a atingir uma dimensão global de implementação.

1.2 Objetivos

Esta dissertação pretende realizar um estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de torção. Foram criadas juntas adesivas tubulares em liga

de alumínio e unidas por três adesivos distintos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752). O estudo vai consistir principalmente na elaboração das análises numéricas no ABAQUS® por MDC dos modelos das respectivas juntas adesivas. Com este método é possível simular o ensaio mecânico à torção real, e desta forma obter dados fiáveis. Posteriormente os dados recolhidos serão tratados com o auxílio do Microsoft® Excel. Deste modo, é pretendido registar as tensões de arrancamento (σ_y) e as tensões de corte (τ_{xy}) de forma a avaliar de que forma estas se distribuem pelas juntas adesivas. Além disso, é pretendido obter as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para cada junta adesiva e os respetivos valores de força máxima aplicada ($P_{máx}$) de forma a obter as curvas de resistência e a energia dissipada da análise numérica. Assim é esperado verificar a capacidade das várias juntas adesivas de forma a obter uma configuração, relativamente às alterações geométricas registadas, o mais ideal possível de modo a suportar esforços de torção.

1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho realizado, esta dissertação foi dividida em 4 capítulos distintos.

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

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, que faz a introdução à temática das ligações adesivas. São abordados temas como os diferentes tipos de uniões, os vários tipos de juntas, os adesivos estruturais, as vantagens, desvantagens, aplicações, modos de rotura, os métodos mais importantes para a determinação das propriedades dos adesivos, e ainda os tipos de esforços aplicados em juntas adesivas tubulares. Numa parte final deste capítulo são abordados alguns estudos relativos a juntas adesivas tubulares de forma a melhor enquadrar o estudo realizado.

O início do capítulo 3 aborda a validação dos resultados numéricos relativamente aos experimentais. A segunda parte deste capítulo corresponde ao estudo paramétrico numérico realizado no *software* ABAQUS®. Aqui serão apresentados os resultados obtidos e respetiva análise. Por fim será realizada uma análise das distribuições de tensões, da previsão de resistência e da previsão da energia dissipada para as variações geométrica efetuadas nas juntas.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas, assim como uma referência a possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo dedica-se a uma exposição das características das juntas adesivas. Para tal, serão abordados tópicos tais como; as aplicações em que tais ligações são utilizadas, as suas características, possíveis configurações que podem adotar, e serão também abordados, os esforços e modos de rotura. Será ainda apresentado um pequeno resumo dos principais adesivos estruturais utilizados para o tipo de ligação em questão.

Numa fase intermédia do capítulo será abordado com maior pormenor o foco principal do estudo, as ligações adesivas tubulares. Neste capítulo serão abordados estudos que incidem no tema em questão referindo tipos de carregamentos/esforços e respetivos efeitos nas ligações adesivas tubulares, com ênfase nos diversos parâmetros que influenciam o comportamento de uma ligação adesiva.

Neste mesmo capítulo é apresentada uma breve descrição dos métodos analíticos mais comuns que se aplicam ao caso estudado, assim como os métodos numéricos, uma vez que estes últimos podem servir como alternativa aos ensaios/testes, pelo facto de obterem resultados próximos dos reais. Com uma simulação é possível evitar custos acrescidos ao proceder à averiguação da validade/fiabilidade das ligações adesivas, quando sujeitas a um carregamento.

2.1 Ligações adesivas

Os materiais designados de adesivos podem ser definidos como um material polimérico capaz de promover a união entre dois substratos e com capacidade suficiente para resistir à sua separação, pela ação combinada de diferentes forças: forças adesivas (adesão) e forças coesivas (coesão) [1]. Atualmente, o uso de adesivos é cada vez mais importante e comum, existindo inúmeros tipos de adesivos que, consoante as suas características, serão utilizados para distintas funções [2].

A adesão é um tema que frequentemente provoca interpretações diferentes por autores de diferentes áreas, pois trata-se de um tópico altamente interdisciplinar. O termo adesão pode referir-se tanto às forças intermoleculares que atuam numa interface, causando a adesão, como também pode ser usado como referência à energia necessária para romper uma ligação adesiva [3].

A união por intermédio de um adesivo é geralmente designada por junta colada, junta adesiva ou simplesmente ligação adesiva. Os constituintes estruturais da junta que são ligados por meio de um adesivo são denominados substratos ou aderentes. Substratos

é o nome designado antes de ocorrer a ligação, e o termo aderente é a designação conferida após a colagem. Na prática, ambos os termos são usados sem distinção.

Existem vários tipos de adesivos e diversos critérios para os agrupar. Ao consultar a bibliografia é possível observar que os adesivos são classificados segundo a sua natureza, tipo de estrutura molecular, composição química, modo de apresentação, modo de aplicação, modo de endurecimento, tipo de aderente em que podem ser aplicados, custo, desempenho ou função, entre outras categorias. De seguida serão abordadas algumas características das juntas adesivas [1].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

O requisito fundamental de qualquer junção entre dois ou mais componentes é a de transmitir a carga de forma eficaz e, em muitos casos, esta função deve ser invisível. Ou seja, a junta não é vista pela estrutura geral.

No caso das ligações adesivas é necessário um projeto cuidadoso das juntas, tendo sempre em consideração fatores para maximizar os benefícios oferecidos pelo uso do adesivo e também evitar roturas prematuras.

A tecnologia das juntas adesivas está cada vez mais generalizada em aplicações industriais, nomeadamente a indústria automóvel, a aeronáutica e a civil. Estas têm vindo a substituir os chamados métodos convencionais (exemplo: juntas aparafusadas, rebitadas, soldadas, entre outros). O uso de adesivos concede maior facilidade de fabrico, o que implica maiores cadências de produção e, dessa forma, menores custos associados. Um dos requisitos essenciais das juntas adesivas é a capacidade de estas suportarem as cargas estáticas e dinâmicas definidas no projeto da junta, em condições de serviço, durante o seu ciclo de vida.

De certa forma as debilidades do uso de adesivos incidem na necessidade de um cuidado acrescido no que diz respeito à preparação superficial dos substratos. A limpeza prévia das superfícies a colar é de extrema importância, assim como a utilização de geometrias que minimizem a formação de tensões localizadas. Outro ponto fraco consiste no facto dos adesivos, após a colagem, poderem sofrer alterações na sua constituição sob condições extremas (temperatura elevadas e humidade, entre outros) [4].

Os membros estruturais de uma junta adesiva, os quais são ligados entre si pelo adesivo, são designados por substratos ou aderentes. O termo substrato é geralmente utilizado para designar os componentes da junta antes de efetuada a ligação adesiva.

Este processo de ligação consegue conferir vantagens significativas quando usado eficientemente, contudo também apresenta certas desvantagens. De seguida serão descritas, de forma resumida, as vantagens e desvantagens da utilização deste tipo de ligação estrutural.

As principais vantagens das juntas adesivas são [5]:

- Distribuição e redução mais uniforme de tensões;
- Capacidade de amortecimento de vibrações;
- Possibilidade de ligação de materiais diferentes;
- Ligação eficiente de chapas (espessuras finas);
- Projeto mais flexível;
- Estruturas com contornos complexos;
- Contacto contínuo entre superfícies;
- Redução de custos (possibilidade de automatização);
- Estruturas mais leves;
- Resistência elevada à fadiga;
- Incremento da rigidez e também do isolamento acústico;
- Permite ligar e vedar em simultâneo, eliminando a possibilidade de desenvolvimento de corrosão que pode ocorrer numa montagem mecânica.

Mesmo apresentando as vantagens indicadas, as juntas adesivas não são perfeitas. De seguida encontram-se apresentadas as desvantagens mais relevantes [5]:

- Necessário prever e projetar a junta de modo a evitar esforços de arrancamento, clivagem e impacto;
- Não utilizar geometrias propícias a tensões localizadas;
- Durabilidade limitada em condições extremas;
- Fraca resistência à temperatura e ao fogo;
- Tempo de ligação (endurecimento);
- Necessidade de uma cuidada preparação de superfícies;
- Controlo de qualidade e segurança mais difíceis;
- Inexistência de critério de dimensionamento;
- Fraca resistência ao arrancamento;
- Fraca resistência à propagação de fendas de alguns adesivos;
- Processo tipicamente irreversível;
- Resistência e durabilidade fortemente dependentes das condições de processamento;
- Flamabilidade e toxicidade de alguns adesivos.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As ligações adesivas ao longo do tempo tornaram-se numa referência relativamente às ligações mecânicas. Os adesivos estruturais são utilizados quando é necessário unir peças rígidas de uma forma resistente. Estes têm capacidade de ligar diversos materiais, como por exemplo, o vidro, o metal, o plástico, entre outros, o que os torna quase perfeitos para as mais variadas áreas.

As aplicações mais comuns acentuam-se em áreas como a indústria aeronáutica (pioneira na utilização de adesivos), a indústria naval, a indústria automóvel e cada vez mais a construção civil.

2.1.2.1 Indústria aeronáutica

Se existe um responsável pela inovação, utilização e desenvolvimento de adesivos estruturais, esse é sem dúvida alguma a indústria aeronáutica. Desde o início do século XX que aeronaves utilizam adesivos nas suas estruturas. Inicialmente, os adesivos eram baseados em caseína (polímero natural derivado do leite), contudo estes adesivos baseados em produtos naturais sofriam de problemas de fraca durabilidade, principalmente quando submetidos a ambientes húmidos. A absorção de água fazia com que o adesivo se deteriorasse. A partir da década de 1940, desenvolvimentos durante a Segunda Guerra Mundial introduziram os adesivos sintéticos poliméricos, com características que lhes permitiram superar os problemas até então encontrados nas juntas adesivas baseadas em produtos naturais [6].

Os adesivos são utilizados há bastante tempo na construção de aviões e cada vez mais têm vindo a ganhar espaço na indústria, visto serem uma excelente alternativa aos fixadores mecânicos (rebites ou parafusos) utilizados antes da sua introdução. Uma junta adesiva permite melhor distribuição de tensões e diminuição das concentrações de tensões que surgem com o uso de parafusos ou rebites. Além disso tornam a aeronave mais leve, reduzem os custos de produção e melhoram a resistência dos seus componentes [7].

Após a Segunda Guerra Mundial praticamente todas as aeronaves militares e comerciais projetadas na Europa confiavam significativamente nas ligações adesivas para o processo de montagem. O *Havilland Comet* (Figura 1, Figura 2), o primeiro transporte a jato comercial, voou pela primeira vez em 1951. Este utilizou extensivamente o adesivo Redux para ligar grande parte da sua estrutura. A colagem de Redux foi usada para unir fuselagem estreita, longarinas, entre muitos outros componentes [8].

Além do referido uso de adesivos na aeronáutica, estes continuam a ser bastante apelativos pois tornaram possível a ligação de componentes de alumínio e compósitos. A sua boa resistência à fadiga faz, ainda, com que sejam muito utilizados no fabrico das pás de helicópteros [7, 9].

Os adesivos são uma parte importante do modo de vida atual em pleno século XXI. Sem a sua existência não seria possível construir aviões capazes de transportar centenas de passageiros assim como centenas de quilos de carga para qualquer parte do mundo, de forma rápida e cómoda com uma frequência que, hoje em dia é considerada normal.

Atualmente, a quantidade de adesivos que são utilizados na aeronáutica é vasta sendo que, de acordo com as suas propriedades, cada um é utilizado de forma distinta.

Devido às condições extremas a que normalmente os aviões estão expostos, para a sua construção são usados adesivos acrílicos, devido à sua alta resistência ao arrancamento e à humidade. Estes estão encarregues de fixar as chapas metálicas e plásticas (asas e fuselagem de aviões). Na colagem dos vidros são utilizados adesivos de poliuretano [7].

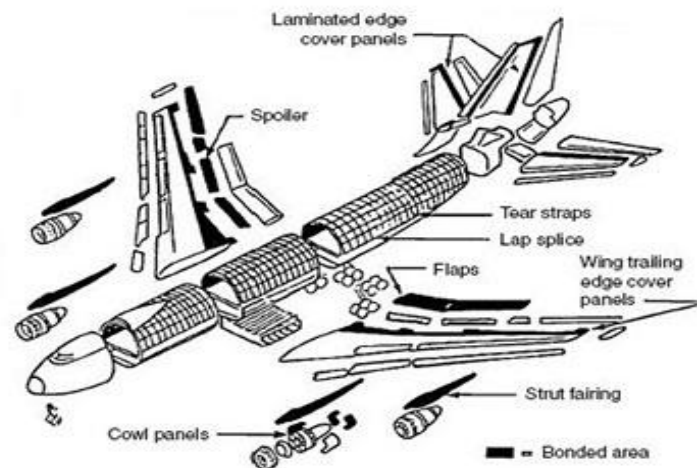


Figura 1 – Detalhes estruturais das ligações de diversos componentes do 1º jato comercial (de Havilland Comet) [10].

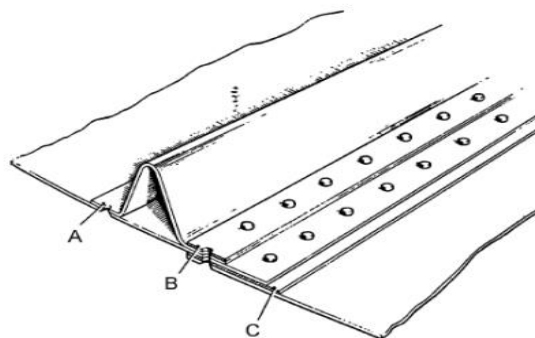


Figura 2 - Esquema de colagem das longarinas do avião de Havilland Comet: (A) colagem da longarina à pele, (B) reforço de colagem da longarina e (C) reforço da borda de colagem à pele [11].

2.1.2.2 Indústria automóvel

Na indústria automóvel um dos principais objetivos é a otimização do rendimento energético dos veículos, devido à preocupação com o meio ambiente. O peso é um dos principais fatores que contribuem para tal, pois um menor peso implica um menor consumo de combustível, que por sua vez vai originar menor emissão de poluentes para a atmosfera. Hoje em dia os benefícios do uso de adesivos na construção das estruturas automóveis são [5]:

- Estrutura mais leve;
- Resistência elevada no caso de acidente;
- Processos robustos e seguros;

- Melhor *design* de superfícies.

Tipicamente os adesivos são utilizados na oficina em ligações de flanges, para prevenção de vibrações e ainda em ligações híbridas (por exemplo ligações de materiais diferentes).

Os adesivos que entram na estrutura da carroçaria têm requisitos muito específicos e exigentes [6]:

1. Têm de criar adesão numa variedade de materiais, entre os quais aço galvanizado, galvanizado a quente ou galvanizado por imersão e ainda serem capazes de ligar folhas de alumínio;
2. O adesivo deve suportar as condições agressivas induzidas pelo banho alcalino na altura de pré-tratamento à qual a carroçaria vai ser submetida;
3. Necessitam de resistir a temperaturas num espectro de 160°C até aos 220°C, durante períodos entre os 15 e os 30 min. De notar que as propriedades de cura dos adesivos devem ser adaptadas às condições específicas da linha de produção;
4. Pelo facto de todos os adesivos da carroçaria serem aplicados diretamente na superfície do metal, a resistência à corrosão é crucial.

Um exemplo de um automóvel cujo uso de juntas adesivas seja considerável é o BMW série 7. Este utiliza na totalidade da sua estrutura mais de 10 kg de adesivo estrutural. Na Figura 3 estão representadas as zonas de aplicação do adesivo num BMW série 7 [11].



Figura 3 - Zonas de aplicação de adesivo no BMW série 7 [12].

2.1.2.3 Indústria naval

Na indústria Naval, a utilização de plásticos e compósitos é cada vez mais prevalente. O reduzido peso e resistência à corrosão fizeram com que estes ganhassem rapidamente lugar nesta indústria. Desta forma, a popularidade do uso de adesivos deve-se também, pelo facto de os materiais compósitos e os adesivos serem duas tecnologias bastante associadas. A utilização de adesivos estruturais é a forma mais eficaz de unir materiais compósitos.

Nesta indústria o principal foco da aplicação de adesivos é nas juntas estruturais entre grandes peças, como o casco e convés, reforços, anteparas, entre outros.

Os materiais usados em aplicações marinhas variam muito, mas na maioria dos casos as juntas adesivas são entre duas peças de PRF (matriz de poliéster, resina de viniléster ou epóxi) ou entre FRP (material compósito constituído por uma matriz polimérica reforçada com fibras) e alumínio de classe marinha (AlMg3, AlSi1Mg) [5].

Estruturas sandwich são bastante comuns nas aplicações navais. Neste caso o material do núcleo é tipicamente PVC reticulado ou balsa de grãos [5].

2.1.2.4 Construção civil

A área de construção civil é considerada como o segundo maior mercado de polímeros [13], sendo então natural o uso prevalente de adesivos em situações de construções e edificações. Nesta indústria, os adesivos têm uma grande aplicação no interior de edifícios, peculiarmente com propósitos decorativos tais como a aplicação de azulejos e mosaicos no chão e paredes, na instalação de portas e janelas, revestimento térmico, entre outros. Contudo, também têm um papel no que diz respeito a aplicações exteriores como pontes, postes, painéis, caixilharias, instalação de granitos e outras pedras, coberturas flexíveis entre outros. Neste último caso, as exigências que os mesmos devem cumprir são superiores [14]. Os adesivos nesta área são utilizados na conceção de juntas metálicas estruturais fortes e em revestimentos protetores duradouros [14]. Dados de mercado apontam que a construção civil é o sector com o crescimento mais acelerado no que diz respeito ao uso de adesivos [15].

As ligações adesivas além de serem consideradas um processo amigável ao meio ambiente, por não conterem componentes tóxicos, também reduz significativamente (até 60%) a utilização de pregos ou parafusos e ainda reduz os riscos de fendas. Geralmente os adesivos são dielétricos e, por isso, evita-se a corrosão eletrolítica entre metais diferentes. Os adesivos proporcionam também menor esforço e menos ruído durante a instalação [16]. A Figura 4 representa um exemplo do uso de adesivos na construção civil.



Figura 4 - Uso de adesivos na Construção Civil [17].

2.1.2.5 Indústria eletrônica

O desenvolvimento dos adesivos foi de grande importância para a indústria eletrônica devido à possibilidade de implementação dos mesmos em sistemas eletro-termo-mecânicos, de forma a manter a sua performance e proporcionar proteção às ligações elétricas. Inicialmente existiu uma certa resistência por parte da indústria eletrônica em incorporar compostos orgânicos de forma permanente nos sistemas funcionais. Contudo, o desafio de reduzir os custos de produção para produtos orientados ao consumidor levou a que estes fossem mesmo utilizados.

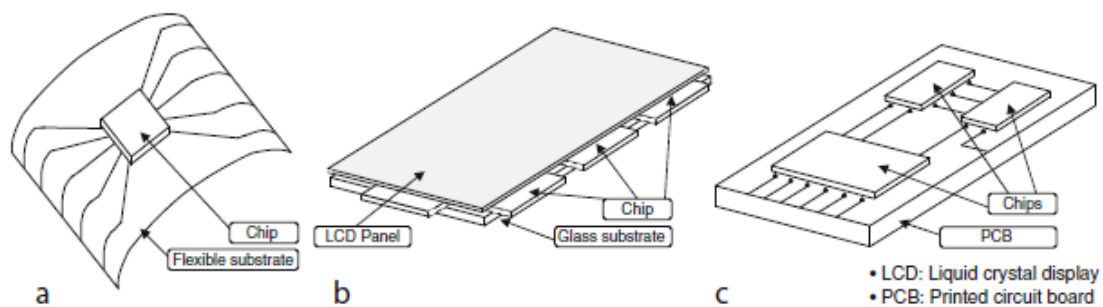


Figura 5 - Descrição esquemática de vários componentes eletrônicos com adesivos: (a) chip em substrato flexível, (b) chip em substrato de vidro, (c) chip em placa rígida [2].

Na indústria eletrônica existe uma técnica designada por *flip chip*, esta consiste na ligação direta de diferentes tipos de componentes eletrônicos através de um condutor de solda, aplicados em dispositivos como telemóveis, cartões inteligentes e componentes automóveis [18]. A Figura 5 ilustra imagens esquemáticas de tais componentes eletrônicos.

Nesta indústria os adesivos podem ser classificados em duas categorias, os condutores e os isoladores. Os adesivos condutores são geralmente utilizados para unir outros componentes condutores do circuito elétrico, enquanto o adesivo isolante tem como função proteger circuitos abertos ou cabos elétricos. Os adesivos são bastantes uteis na indústria eletrônica, não só pelas fortes ligações formadas, mas também pela facilidade de adesão de pequenos componentes em materiais metálicos, cerâmicos ou mesmo materiais inorgânicos [19].

2.1.2.6 Indústria do calçado

A aplicação de adesivos na indústria do calçado proporciona diversas vantagens. Desde meados de 1950 que a indústria do calçado utiliza adesivos como alternativa a métodos como a costura ou a pregagem da sola através de agrafos ou mesmo de pregos. Este método, além de juntas mais flexíveis e homogêneas, permitiu também produzir calçado esteticamente mais apelativo de uma forma mais simples e rápida.

Existem vários modelos de sapatos, como por exemplo, sapatos comuns usados no dia a dia, sapatos de desporto comuns e de alta competição, sapatos que são denominados de calçado de segurança, normalmente usados em trabalhos que podem pôr em risco a segurança do operador, entre outros. O tipo de adesão vai variar com o tipo de calçado. Um sapato desportivo, por exemplo, é extremamente exigente quanto à sua ligação, pois deve ter baixo peso, alto desempenho sobre esforços de impacto e flexão, conforto e alta durabilidade. Os sapatos de segurança são os mais exigentes no que toca à sua adesão pois têm de trabalhar na presença de solventes, temperaturas elevadas, e necessitam ainda de apresentar alto desempenho sobre esforços, tudo isto durante longos períodos.

Na produção do calçado, a união entre a parte superior do calçado e a sola é a mais crítica. Na situação em que a aderência entre a parte superior do sapato e a sola não é suficiente para que este cumpra as regras de qualidade exigidas, o sapato deverá ser costurado.

Na Figura 6 é possível observar o esquema dos vários componentes de um sapato, onde estão exemplificadas as várias partes constituintes que carecem de ser unidas.

Objetivos futuros consistem em remover os solventes das aplicações adesivas, tornando assim o processo mais amigável para o meio ambiente [2, 5].

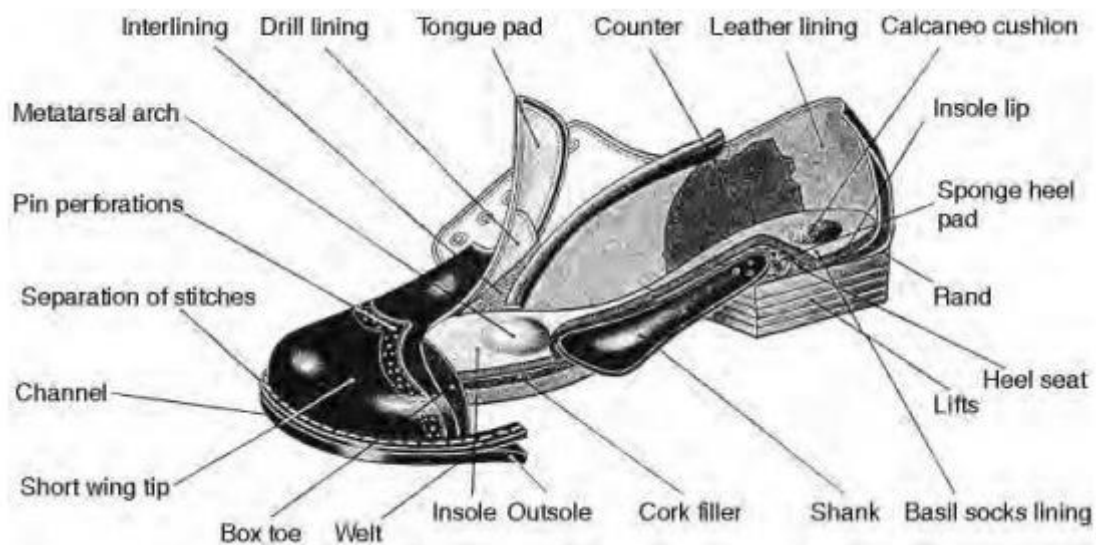


Figura 6 - Esquema dos vários constituintes a ligar num sapato [11].

No caso do sapato representado na Figura 6 são utilizados vários tipos de adesivos para cada tipo de operação de fabrico. Estes encontram-se representados na Tabela 1.

Tabela 1 - Exemplo do tipo de adesivos usados no sapato da Figura 6 [11]

Tipo de operação no sapato	Tipo de adesivo
Montagem	<i>Cement</i> (adesivo de borracha)
Cobertura Lateral	<i>Polyurethane</i>
Ligação da lateral à sola	<i>Polyester hot-melt</i>
Ligação da “box toe”	<i>Polyamide hot-melt</i>
Ligação das almofadas	<i>Waterborne polyurethane</i>
Ligação das “lifts”	<i>Polyester hot-melt</i>
Ligação das “socks lining”	<i>Polychloroprene</i>
Ligação da parte superior à sola	<i>Polychloroprene</i>

2.1.3 Esforços em juntas adesivas

A concentração de tensões pode determinar a resistência máxima de uma junta. Desta forma, torna-se importante conhecer os tipos básicos de carregamento para um correto projeto de junta [1]. Numa junta adesiva existem distribuições de tensões uniformes e não uniformes. Contudo, é raro observar-se uma distribuição de tensões uniforme quando é aplicada uma força externa. Na maioria dos casos, observa-se uma distribuição de tensões não uniforme [20].

As solicitações externas podem produzir concentrações de tensões em determinados pontos da área colada, que podem ultrapassar largamente a tensão média de rotura da junta. Tais concentrações de tensões são muitas vezes inesperadas e cabe ao engenheiro de projeto tentar minimizar ou circundar este obstáculo [20].

Os cinco tipos de esforços mais importantes a que uma junta adesiva é submetida encontram-se ilustrados na Figura 7, e são: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento.

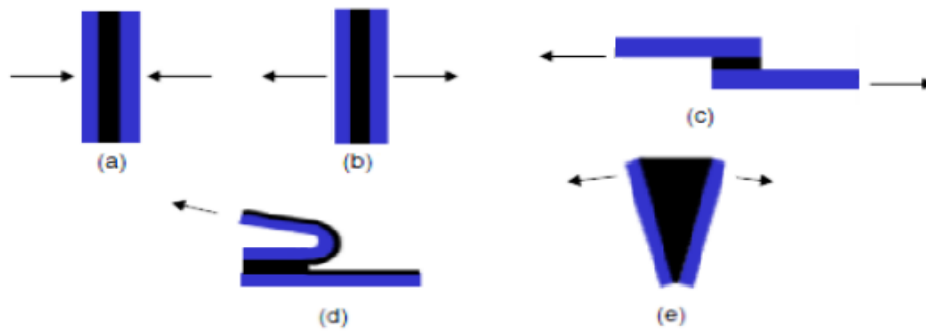


Figura 7 - Esforços típicos numa junta adesiva: a) compressão; b) tração; c) corte; d) arrancamento; e) clivagem. Adaptado de [7].

2.1.3.1 Tração

Estas tensões desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de colagem. Neste caso, a distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é uniforme. Se bem que, nas juntas coladas a distribuição destas tensões não é uniforme, é comum surgirem picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição. Na Figura 8 está representada a distribuição de tensão axial numa junta adesiva submetida ao esforço de tração.

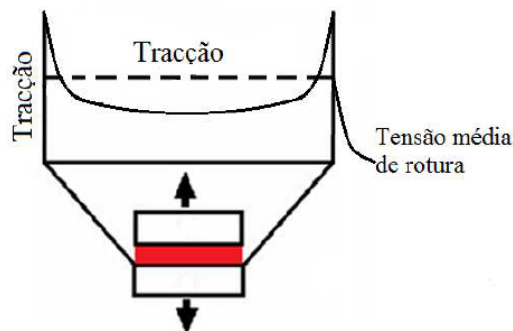


Figura 8 - Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de tração [20].

2.1.3.2 Compressão

Os esforços de compressão consistem em forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro. A distribuição da tensão pelo adesivo é constante, sendo que a única diferença para a tração é o sentido em que estas são aplicadas. Enquanto que nos esforços de tração o sentido da força é dirigido para o seu exterior, no caso das forças de compressão, este é dirigido para o interior.

Nas juntas adesivas é muito pouco provável que ocorra rutura na sua ligação quando sujeita a uma carga de compressão pois, na realidade, qualquer junta que esteja à compressão “pura” não necessita sequer de adesivo. Desde que a carga seja elevada o suficiente e a distribuição de tensões seja uniforme em toda a junta não haverá

movimentação por parte dos substratos. Na Figura 9 está representada a distribuição de tensão axial numa junta adesiva submetida ao esforço de compressão.

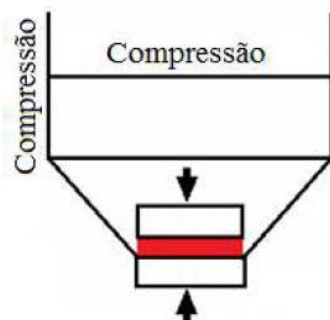


Figura 9 - Distribuição de tensão axial sob esforço de compressão [20].

2.1.3.3 Corte

As tensões de corte são geradas por forças aplicadas no plano da camada de adesivo e em sentidos opostos, o que provoca o deslizamento dos aderentes. No caso das juntas adesivas isto ocorre quando existe um carregamento que provoca o escorregamento entre os dois aderentes. Nesta situação, a totalidade da área de sobreposição contribui para a distribuição de tensões, o que permite aos substratos manterem-se facilmente alinhados. De acordo com estudos prévios, sabe-se que os adesivos funcionam melhor quando sujeitos a esforços de corte [20]. Na Figura 10 está representada a distribuição de tensões de corte numa junta adesiva de sobreposição simples.

Observando a Figura 11 verifica-se que as extremidades do provete estão sujeitas a tensões muito mais elevadas do que o centro da área da ligação. Esta situação ocorre devido ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição (L_0). Cada aderente vai sofrer deformação longitudinalmente a uma taxa crescente, desde uma extremidade à outra da sobreposição (modelo analítico de Volkersen [21]).

Na Figura 12 é possível observar que o aumento do L_0 provoca um aumento da resistência da junta. Contudo, devido ao efeito acentuado de deformação dos aderentes, este aumento ocorre a uma taxa decrescente.

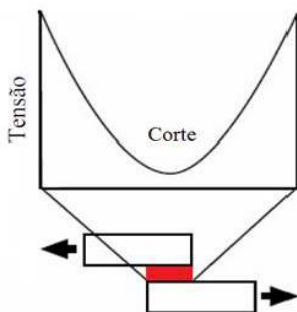


Figura 10 - Distribuição de tensões de corte numa junta de sobreposição simples (JSS) [20].

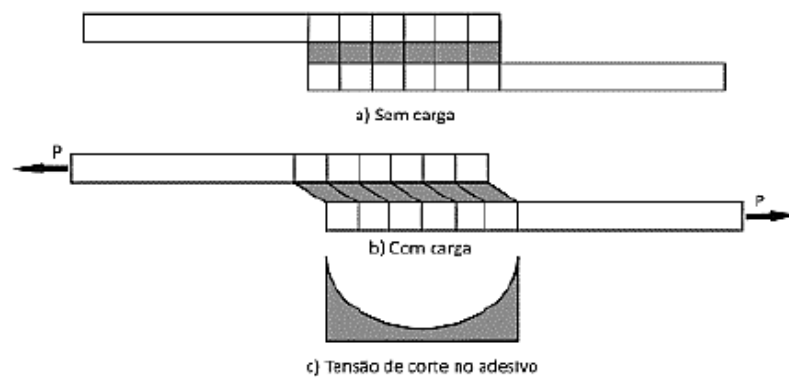


Figura 11 - Distribuição da tensão, segundo o modelo analítico de Volkersen, numa JSS sujeita a esforços de corte [21].

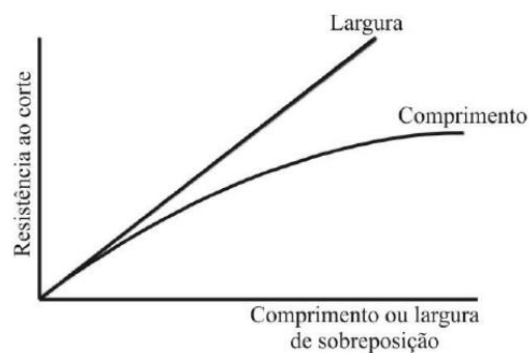


Figura 12 – Gráfico comparativo do efeito do comprimento e da largura de sobreposição [1].

2.1.3.4 Clivagem

A clivagem é provocada por forças de tração aplicadas na extremidade de uma junta rígida. No caso das tensões de clivagem ocorre uma concentração de tensões na extremidade da junta que está sujeita a forças de clivagem (Figura 13).

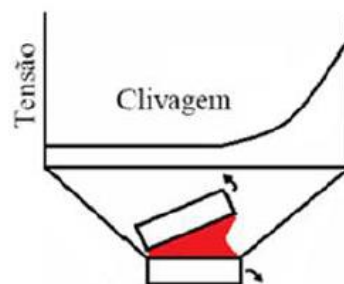


Figura 13 - Distribuição de tensões de clivagem numa junta adesiva [20].

2.1.3.5 Arrancamento

As tensões de arrancamento são bastante semelhantes às de clivagem. Contudo, neste caso, a diferença é de que pelo menos um dos aderentes envolvidos na ligação é flexível,

podendo assim sofrer deformação plástica sob a ação das forças aplicadas. Isto leva à concentração de forças de tração numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação.

De todas as tensões acima referidas aquelas que mais prejudicam as juntas adesivas são as de arrancamento e as de clivagem. Como tal, devem ser evitadas a todo o custo. Uma forma de o fazer é a utilização de configurações que suportem maioritariamente esforços de corte.

Segundo dados experimentais, um adesivo epóxico comum, quando solicitado a esforços de clivagem/arrancamento consegue suportar tensões a rondar os 0,35 N/mm. Mas quando é solicitado a tensões de corte (τ_{xy}) este é capaz de suportar tensões superiores a 14 MPa [20]. Na Figura 14 está representada a distribuição de tensão de arrancamento numa junta adesiva.

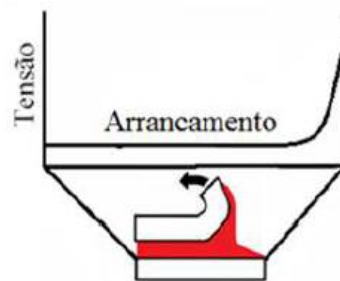


Figura 14 - Distribuição de tensões de arrancamento numa junta adesiva [20].

2.1.4 Modos de rotura

Uma ligação tem como objetivo a transmissão de esforços entre os dois componentes (substratos), mantendo assim a integridade da estrutura. Para tal, a estrutura necessita de se encontrar solicitada a um determinado tipo de esforços, sendo estes esforços estáticos e/ou dinâmicos, ou mesmo condições ambientais adversas, como humidade e temperatura. Como tal é necessário proceder a vários testes, denominados por ensaios destrutivos, de forma a verificar o comportamento dos adesivos e desta forma aferir o sucesso no fabrico deste tipo de ligações.

O modo de rotura é determinado, por 3 fatores: a qualidade da junta, a geometria da junta e o tipo de carregamento [1].

A norma ASTM D 5573 - 99 [22] classifica os modos de rotura em juntas de plástico reforçado com fibras (PRF), em sete modos de rotura. Contudo, aqueles que ocorrem com maior frequência em juntas adesivas são: a rotura coesiva, rotura adesiva, rotura mista e por fim a rotura do substrato (Figura 15) [1].

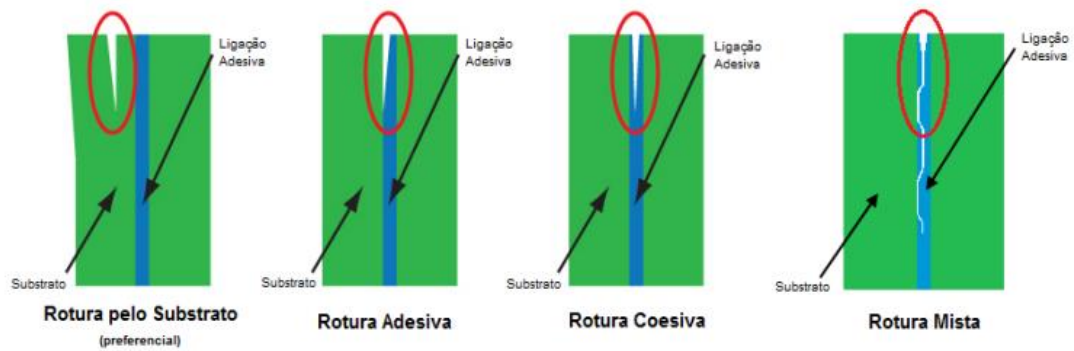


Figura 15 – Representação esquemática dos modos de rotura em ligações adesivas (adaptado de [23, 24]).

2.1.4.1 Rotura coesiva

Este tipo de rotura ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Nesta situação, caso tenha sido realizada uma boa preparação superficial, as superfícies de rotura encontram-se ambas cobertas por adesivo (Figura 16).

As possíveis causas para a ocorrência deste tipo de rotura são [24]:

- Desrespeito pelos tempos de cura do adesivo, especialmente em adesivos de 1 componente;
- Defeitos dentro do adesivo como bolhas, porosidades, entre outros;
- Submeter a ligação adesiva a tensões de trabalho superiores para as quais foi projetada;
- Defeitos na cura do adesivo;
- Fenómenos de envelhecimento na ligação adesiva.

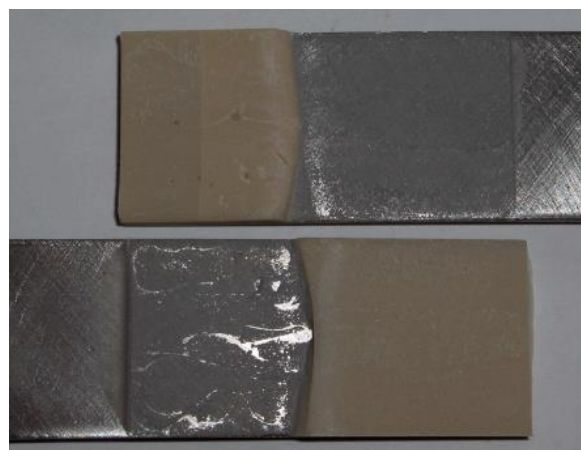


Figura 16 – Representação de uma Rotura Coesiva na interface [25].

2.1.4.2 Rotura adesiva

Esta rotura ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Neste tipo de rotura é possível verificar que a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo, enquanto que a superfície de rotura do outro aderente se apresenta coberta de adesivo. Normalmente isto ocorre devido a uma má preparação da junta. Porém, estudos mais recentes em juntas de sobreposição simples mostram que existe variação de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo. Isto pode explicar o aparecimento de uma rotura adesiva uma vez que os valores máximos das tensões ocorrem junto da interface. Na Figura 17 é possível observar uma representação esquemática do modo de rotura adesiva.

Algumas possíveis causas para a ocorrência deste tipo de rotura são[24]:

- Má seleção do adesivo, o que dificulta a adesão ideal do mesmo ao substrato;
- Fenómeno de envelhecimento entre adesivo e substrato;
- Má escolha da preparação superficial a efetuar, ou má execução da mesma;
- Aplicação do adesivo depois do tempo de manuseio já ter expirado, o que resulta num aumento de viscosidade, impedindo uma correta molhagem da superfície.



Figura 17 - Representação esquemática do modo de rotura adesiva numa junta de sobreposição simples [26].

2.1.4.3 Rotura mista

A rotura mista consiste numa combinação das roturas anteriormente mencionadas (rotura adesiva e rotura coesiva). É um modo de rotura caracterizado por diversas transições entre ambos os modos. Caso o dano seja adesivo, deve-se ao facto de a superfície estar degradada ou ter ocorrido uma má preparação superficial, traduzindo-se em forças de interface inferiores às forças internas do adesivo. Caso se verifica dano coesivo, a situação é contrária, logo, as forças de ligação na interface são superiores às forças de ligação internas do adesivo, ou seja, na interfase [25]. Na Figura 18 é possível observar um exemplo de uma rotura mista.



Figura 18 – Representação de uma Rotura Mista [25].

2.1.4.4 Rotura do substrato ou rotura coesiva do aderente

Este modo de rotura é o preferencial, pois demonstra que a junta foi corretamente projetada e concebida. Consiste na rotura coesiva do substrato e acontece quando as forças adesivas de ligação na interface adesivo-substrato e na interfase do adesivo são de maior magnitude comparativamente às forças de ligação do substrato. De notar que este modo de rotura dificilmente ocorre em materiais de elevada resistência. Na Figura 19 é possível observar a representação esquemática do modo de rotura coesiva do aderente numa junta adesiva de sobreposição simples.

Algumas possíveis causas para a sua ocorrência são [24]:

- Tensão de rotura do substrato pode ser menor que a tensão de rotura da ligação adesiva em geral;
- O substrato não foi corretamente dimensionado ou calculado para suportar a carga imposta;
- Ataque físico ou químico do substrato por soluções ácidas, alcalinas, ou mesmo pela própria corrosão, que deteriore a integridade do substrato ao nível das suas propriedades mecânicas.



Figura 19 - Representação esquemática do modo de rotura coesiva do aderente numa junta adesiva de sobreposição simples [26].

2.1.5 Configurações possíveis de junta

Segundo Petrie [20], quando um adesivo é solicitado a um esforço que esteja aplicado na direção em que o mesmo tenha maior resistência à rotura, a ligação adesiva é considerada como ideal.

Ao criar uma junta adesiva é necessário ter em conta que esta deverá ser concebida de forma a favorecer a distribuição de tensões. Para tal, é necessário ter em conta fatores como o alinhamento dos aderentes e o próprio custo de fabrico, entre outros. Neste capítulo serão abordadas as configurações de junta consideradas como as mais comuns em aplicações reais (Figura 20) [1].

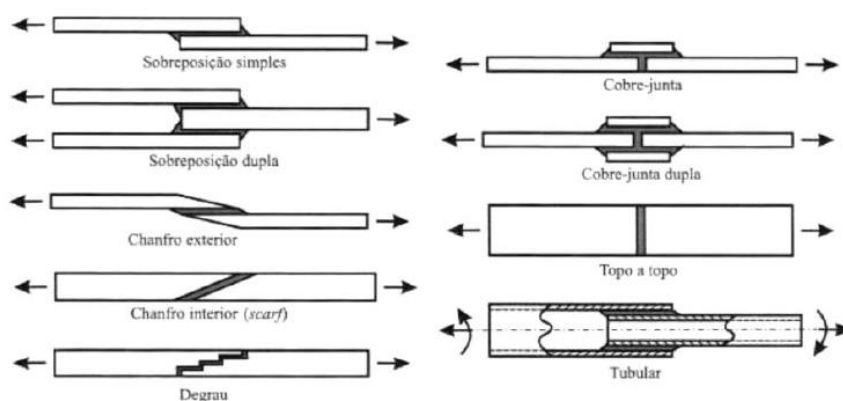


Figura 20 - Exemplo de configurações de juntas adesivas mais comuns [1].

2.1.5.1 Juntas topo a topo

Das várias configurações possíveis as de topo a topo são as mais simples de fabricar. Contudo, a sua eficácia é reduzida devido à concentração de tensões de arrancamento e corte nas extremidades. Além disso não permitem esforços de flexão, pois estes induzem esforço de clivagem no adesivo. No caso dos aderentes serem muito espessos, é possível realizar modificações nos aderentes da junta topo a topo, como indicado na Figura 21 [20].

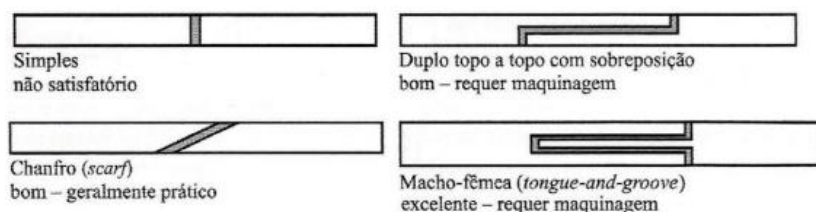


Figura 21 - Exemplo de configurações de juntas topo a topo [7].

2.1.5.2 Chanfro interior

Este tipo de junta produz a diminuição dos gradientes de esforço ao longo do adesivo, aumentando a sua resistência. Apresenta, no entanto, algumas desvantagens, como o

tempo de fabrico mais elevado, um processo de fabrico mais dispendioso e ainda a dificuldade em maquinar o chanfro.

2.1.5.3 Sobreposição simples

Junta bastante comum, que é usualmente utilizada em aplicações industriais devido à simplicidade de fabrico e ao facto de solicitar o adesivo maioritariamente ao corte. No entanto, registam-se efeitos de flexão, provocados pela aplicação da carga não centrada que originará o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo. Tal esforço de flexão origina tensões de arrancamento que diminuem a resistência da junta.

Tendo como objetivo a redução de tal efeito é possível executar algumas modificações às juntas, como exemplificado na Figura 22.

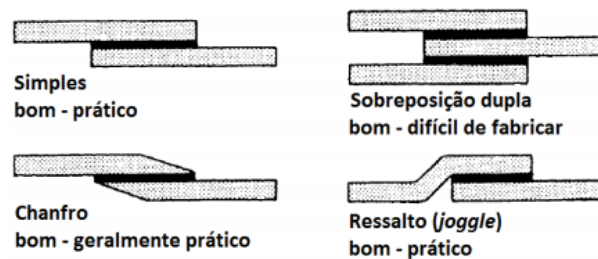


Figura 22 - Exemplo de modificações às juntas de sobreposição simples [20].

2.1.5.4 Sobreposição dupla

A junta de sobreposição dupla (JSD) apresenta uma configuração simétrica e permite melhorar um dos principais defeitos da junta de sobreposição simples, que é o efeito de flexão responsável pelas tensões de arrancamento que se vão fazer sentir na extremidade de sobreposição. No entanto, ainda se desenvolvem tensões de tração e compressão na linha de adesão, no caso de os substratos exteriores sofrerem flexão. Contudo, apresenta algumas desvantagens em relação às juntas simples, como maior tempo de produção e peso superior [27].

2.1.5.5 Chanfro exterior

Junta difícil de maquinar, que apresenta um tempo de fabrico elevado e um processo de fabrico mais caro. No entanto consegue diminuir os efeitos de arrancamento nas extremidades.

2.1.5.6 Cobre-junta

Na Figura 23 são apresentados os vários exemplos de cobre-juntas. Este tipo de junta apresenta resistência superior às juntas de sobreposição simples. Da mesma forma que as juntas de sobreposição simples são sujeitas a esforços de arrancamento. A cobre

juntar reduz o momento-fletor, sendo por isso preferível. Tal como as juntas de sobreposição simples, também estas podem sofrer modificações com o sentido de melhorar a sua eficiência, embora estas soluções necessitem de maquinagem dos substratos. A cobre-junta dupla é uma das formas de aumentar o rendimento da simples. Apresentando um tempo de fabrico mais elevado, esta permite uma redução significativa no aparecimento de esforços de flexão [20].

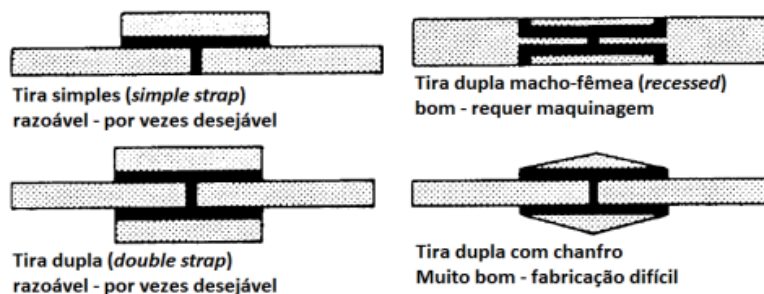


Figura 23 - Exemplo de cobre-juntas [20].

2.1.5.7 Tubular

Tipo de junta extremamente útil na ligação de tubagens e varões. São consideradas como uma solução vantajosa relativamente às juntas topo a topo, pelo facto de oferecerem uma maior área resistente e um decréscimo relativamente ao efeito de arrancamento, provocado pelos esforços de flexão. Requerem, no entanto maquinagem dos aderentes na maioria dos casos [20]. As cargas aplicadas neste tipo de ligação podem ser axiais ou de torsionais. Caso sejam axiais, ocorre uma maior concentração de tensões nas extremidades da área de sobreposição, tal como acontece nas juntas de sobreposição simples. No caso da torção, ocorre apenas o efeito de deformação diferencial tal como sucede das juntas de sobreposição simples ao corte [6]. Na Figura 24 é possível observar as configurações possíveis para juntas tubulares.

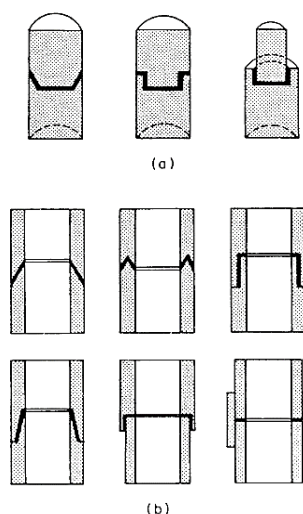


Figura 24 - Configurações possíveis para juntas tubulares: a) Ligações em varões; b) Ligações em tubos [20].

2.1.5.8 Juntas em T

Na Figura 25 é possível observar os exemplos de juntas em T representados. A junta em T trata-se de uma junta caracterizada por uma orientação perpendicular dos dois componentes ($\theta=90^\circ$), todavia algumas configurações podem ostentar um ângulo diferente deste. O carregamento pode ser transverso (T) ou normal (N), sendo que o segundo é mais adverso à ligação adesiva já que a junta apresenta menor resistência a esforços de tração. No entanto, se o esforço for de compressão, dificilmente haverá rotura do adesivo [6]. A junta em T é preferível devido à sua grande área de união e boa resistência em todas as direções [20].

As juntas em T têm como principal objetivo a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo.

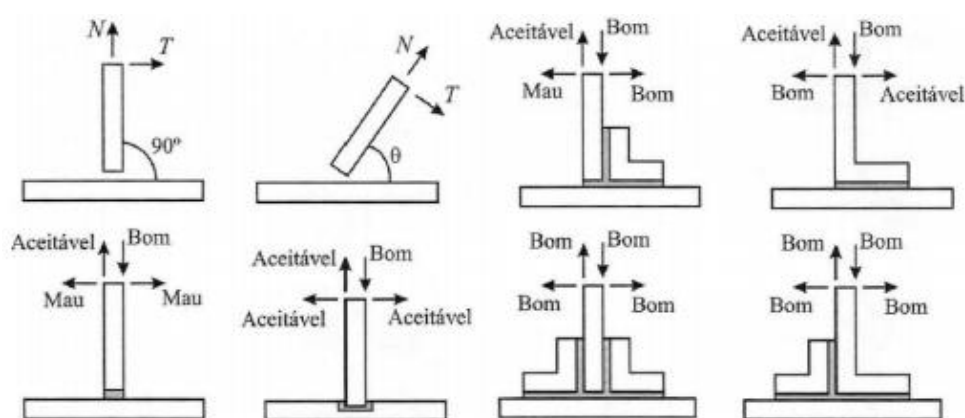


Figura 25 - Exemplos de juntas em T [7].

2.1.6 Tipos de adesivos

Os adesivos não estruturais geralmente não recebem grande destaque pois estão limitados a aplicações onde os esforços são relativamente baixos. Neste trabalho também não irá ser aprofundado o estudo deste tipo de adesivos, uma vez que o interesse é estudar a ligação estrutural.

Adesivos estruturais são adesivos de elevada resistência e desempenho, capazes de resistir a forças consideráveis. A sua resistência ao corte excede os 6,9 MPa, são capazes de suportar transmissão de esforços de dimensão considerável. Sob ação de cargas significativas não sofrem fluência e apresentam ainda boa resistência aos meios ambientes mais comuns [7]. Descrevem-se de seguida as diferentes famílias de adesivos estruturais.

2.1.6.1 Adesivos epóxicos

Estes adesivos são dos mais versáteis, possuem boa resistência química e mecânica, não produzem substâncias voláteis durante a cura, possuem baixa contração e, em juntas

convenientemente projetadas, formam ligações muito fortes e duráveis com a maioria dos materiais. São facilmente modificáveis, podem ser de uma parte ou de duas partes e podem ser líquidos, pastas ou sólidos. Contudo, apresentam fraca resistência ao arrancamento e baixa tenacidade.

O processo de cura destes adesivos não necessita da aplicação de pressão, pelo que basta o simples posicionamento das peças a serem coladas. As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser modificadas pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólico, entre outros) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo). Apresentam-se de seguida as principais combinações de adesivos epóxicos modificados.

- **Epóxido-poliamida** - Estes adesivos curam lentamente à temperatura ambiente (12 a 16 horas) e apresentam maior flexibilidade e uma resistência ao arrancamento significativamente maior que a dos adesivos epóxicos não modificados;
- **Epóxido-polisulfido** - Apresentam boa resistência química e flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas e boa resistência ao impacto, sendo vocacionados para aplicações sujeitas a choques e vibrações;
- **Epóxido-fenólicos** – Permitem a melhoria da resistência a altas temperaturas (175°C em trabalho contínuo, 260°C de trabalho intermitente). A resistência ao impacto e ao arrancamento é baixa e o custo é relativamente elevado;
- **Epóxido-poliuretano** - Concebidos com o objetivo de se obter um adesivo com uma resistência ao arrancamento idêntica à dos adesivos epóxido-poliamida, e uma boa resistência a choques e vibrações;
- **Epóxido-vinilo** – Apresentam boa resistência ao impacto e ao arrancamento. Contudo, a presença do vinilo no epóxido diminui a resistência a altas temperaturas;
- **Epóxido-nitrilo** - São adesivos com boa resistência ao arrancamento e permitem temperaturas de utilização entre -55°C e 120°C. Possuem grande aplicação na construção e manutenção de aviões comerciais a jato.

2.1.6.2 Adesivos fenólicos

Os fenólicos foram os primeiros adesivos estruturais para metais e têm uma longa história de sucesso na união de metais e madeira. Os adesivos fenólicos e os fenol-formaldeídos são usados principalmente para colar madeira.

São relativamente baratos e apresentam boa resistência ao calor e estabilidade dimensional. São utilizados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição.

Apresentam boa resistência a fungos e à água mesmo a altas temperaturas. Podem ser usados no exterior, e o processo de cura ocorre sob pressão e a altas temperatura (140°C).

Possuem certas limitações, como a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. Para resolver estes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastômero (nitrilo ou policloropreno). De seguida referem-se os principais adesivos fenólicos modificados:

- **Fenólicos-vinílicos** - Ostentam uma temperatura máxima de utilização de 130°C. Apresentam elevada resistência ao corte e ao arrancamento, sendo a sua resistência à fadiga boa devido às propriedades plastificantes da fase vinílica. São comercializados como emulsões e filmes ou sob a forma de dois componentes (líquido + pó);
- **Fenólicos com nitrilo** - Possuem características mecânicas ligeiramente inferiores aos adesivos fenólicos-vinílicos, mas apresentam uma melhor estabilidade térmica (podem ser utilizados em contínuo até a uma temperatura máxima de 160°C). São geralmente apresentados sob a forma de filme ou de líquido;

2.1.6.3 Adesivo acrílicos

Tipo de adesivo muito utilizado pela indústria mecânica, os adesivos Acrílicos são vulgarmente divididos em acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados.

- **Anaeróbicos** – Têm tido uma grande aplicação na indústria mecânica na ligação de peças de geometria cilíndrica. Normalmente apresentam-se como líquidos monocomponentes de fácil utilização que podem ser curados à temperatura ambiente. Também podem ser comercializados na forma de pastas ou líquidos tixotrópicos. Apresentam uma boa resistência a solventes, e uma resistência bastante variável. A sua temperatura máxima de utilização ronda os 150°C. Estes adesivos são aplicados na colagem de diversos materiais com o acetal, as poliolefinas, o nylon e o policloreto de vinilo (PVC), por exemplo;
- **Cianoacrilato** – Adesivos geralmente conhecidos como colas instantâneas, supercolas ou, ainda, por cola tudo. Permitem colagens muito rápidas e apresentam-se sob a forma de líquidos monocomponentes ou na versão tixotrópica sem solventes. O processo de cura neste caso é influenciado por 3 fatores: a humidade, o teor em pH do meio e a espessura da junta colada. A humidade e a presença de grupos aniónicos são os principais responsáveis pelo rápido processo de cura. São adesivos frágeis e de custo elevado que apresentam excelente resistência à tração, mas baixa resistência ao arrancamento;
- **Acrílicos modificados e metacrilatos** – Estes adesivos apresentam elevada resistência à humidade e ainda boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Permitem ligações fortes, tolerando uma preparação mínima das superfícies e podem ser aplicados para unir uma grande variedade de materiais (especialmente os plásticos e metais). Contudo, a baixa resistência mecânica a

altas temperaturas e a elevada flamabilidade são pontos negativos deste tipo de adesivos.

2.1.6.4 Adesivos à base de resorcinol-formol

Este adesivo é totalmente à prova de água (fria ou fervente), propriedade única no mercado. É também resistente a diversos solventes orgânicos e fungos. Por esse motivo, é especialmente indicado para colagens de materiais em trabalhos navais, aeronáuticos, hidráulicos e outros que poderão ser expostos à ação da água e intempéries (temperatura, chuva, vento, humidade, entre outros). Para a sua utilização, é obrigatório misturar a resina e o endurecedor. Na indústria das madeiras também são frequentemente usados os adesivos à base de ureia-formol, adesivos de contacto, adesivo à base de cianoacrilato e os adesivos vinílicos ou, como são mais conhecidos, cola branca.

2.1.6.5 Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida

Considerados adesivos para altas temperaturas devido à sua estabilidade a temperaturas elevadas (superiores a 200°C) a longo prazo. Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes. Todavia, são relativamente caros e difíceis de manusear. Requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada, pelo que a sua aplicação é complexa. Os adesivos de bismaleimida têm um processo de cura mais simples. Os adesivos de cianato de éster também apresentam elevadas performances a elevadas temperaturas.

2.1.6.6 Adesivos de poliuretano

Estes tipos de adesivos resultam da reação de um poliol (ou poliéter-poliol) com um isocianato. A cura processa-se lentamente à temperatura ambiente, mas podem ser elaborados de forma a abranger uma gama alargada de tempos de cura. A distância entre as superfícies a colar pode ir até os 25 mm. Apresentam boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações, boa tenacidade e bom comportamento quando sujeitos a intempéries. Estes adesivos podem apresentar uma resistência de rotura ao corte na ordem dos 20 MPa, possibilitando a utilização em aplicações estruturais [1].

2.2 Juntas adesivas tubulares

A procura extensiva por melhores propriedades dos materiais levou ao desenvolvimento de polímeros e compósitos capazes de competir com o reinado dos metais. Um elevado rácio peso/resistência faz com que, cada vez mais, estes materiais se tornem alternativa às tubagens metálicas. Uma vez que uma tubagem de um material compósito não pode ser ligada pela mesma maneira que uma metálica (através de soldadura), foi necessário

procurar alternativas. Como tal, a solução encontrada foi de utilizar os adesivos como principal meio de união.

Desde então várias investigações foram realizadas, por forma a estudar o comportamento deste tipo de juntas. É possível encontrar na literatura diversos estudos experimentais, analíticos e numéricos relativos a juntas tubulares sujeitas aos mais diversos carregamentos, para juntas tubulares de materiais poliméricos, compósitos ou mesmo metálicos. Este tipo de junta adesiva é bastante aliciante, principalmente nas indústrias automóvel e aeronáutica, por várias razões. Entre elas encontra-se o peso reduzido da junta, que vai reduzir o peso total da estrutura, o que leva a um menor consumo de combustível por parte do veículo. Menor peso também resulta em melhor controlo do veículo. Como se trata de junta adesiva é possível ligar materiais dissimilares. As juntas adesivas tubulares conseguem também suportar cargas elevadas e gerar uma boa distribuição de tensões, características consideradas ideais para superestruturas [28].

Os primeiros a analisar este tipo de junta adesiva foram Adams e Peppiatt [29] em 1977. Para tal foi levado a cabo um estudo em juntas elásticas isotrópicas sujeitas a cargas axiais e torsionais, utilizando elementos finitos axissimétricos, quadráticos e iso paramétricos. Os resultados da análise torsional foram validados a partir de uma solução em forma fechada. Este estudo deu asas a que muitos outros estudos se dedicassem à análise de juntas adesivas tubulares até aos dias de hoje [28].

Existem diversos modelos referentes a juntas tubulares sujeitas a esforços de tração. Neste capítulo vão ser identificadas alguns deles, desde os mais antigos até aos modelos atualmente impostos. Posteriormente será dado maior ênfase a alguns estudos referentes ao esforço aplicado às juntas adesivas tubulares.

Os trabalhos e respetivos modelos, analisados no estudo em questão, pertencem aos seguintes autores:

- Lubkin e Reissner (1956) [30];
- Shi e Cheng (1993) [31];
- Nayeb-Hashemietal (1997) [32];
- Pugno e Carpinter (2003) [33];
- Nemeş et al. (2006) [34], Nemeş e Lachaud (2009) [35].

- **Modelo de Lubkin and Reissner**

Lubkin e Reissner [30] estendem o estudo das juntas adesivas tubulares ao caso da modelação axissimétrica. A abordagem utilizada para a junta adesiva apresenta as seguintes hipóteses:

- Os aderentes (tubos) são submetidos a um esforço axial, esforço de corte e momento fletor. Como tal, a tensão axial não é constante ao longo da espessura;
- O adesivo é um meio elástico, na prática uma camada de mola, transmitindo esforços de corte (longitudinal) e de arrancamento (radial). Ambas as tensões são constantes sobre a espessura do adesivo e são uma função apenas da coordenada axial. Tensões de corte circunferenciais não são consideradas porque implicariam torção da junta;
- A cinemática dos tubos é expressa em termos de deslocamento axial (devido à tensão e flexão), deslocamento radial e rotação (devido à flexão);
- Devido à sua geometria axissimétrica, a rotação na zona de ligação é reduzida, pelo que não é necessário considerá-la na análise.

Numa fase final os autores concluíram que é possível obter uma solução por métodos convencionais, embora não apresentem resultados obtidos de forma explícita. Verificou-se que o campo de tensões é qualitativamente similar ao caso da junta de sobreposição simples, pois a distribuição de tensão é relativamente uniforme na parte central da sobreposição, apresentando picos de tensão nas extremidades. A distribuição de tensões obtida pode ser considerada como representativa da situação na espessura média do adesivo.

- **Modelo de Shi e Cheng**

Neste trabalho, o caso da junta tubular é abordado de uma perspectiva mais ampla. As hipóteses iniciais deste modelo são componentes de tensão expressos no referencial $r\theta z$, que são respetivamente a componente radial, circunferencial e axial.

Todos os componentes de tensão axissimétrica, nomeadamente a σ_r (normal radial), σ_θ (normal circunferencial), σ_z (normal, axial) e τ_{rz} (corte radial-axial) encontram-se presentes nos aderentes. A tensão σ_z no adesivo é insignificante.

Embora os autores esclareçam que o método em questão produz soluções de forma fechada, não as relatam explicitamente. São dados resultados numéricos para dois exemplos correspondentes a casos de juntas envolvendo tubos finos e grossos, respetivamente.

- **Modelo de Nayeb-Hashemi, Rossettos e Melo**

O trabalho realizado por Nayeb-Hashemi et al. [32] teve como objetivo encontrar solução para a concentração de tensões em juntas tubulares sujeitas a um carregamento de fadiga, devido a esforços de tração e torção. Para tal basearam-se num modelo de corte (Figura 26). Para o caso em questão as hipóteses iniciais são as seguintes:

- Os aderentes são submetidos apenas a tração, causando assim uma constante tensão axial sobre a espessura;

- O adesivo é um meio elástico, que apenas transmite tensão de corte, que é uma função das posições axial e radial. Ou seja, não é constante ao longo da espessura.

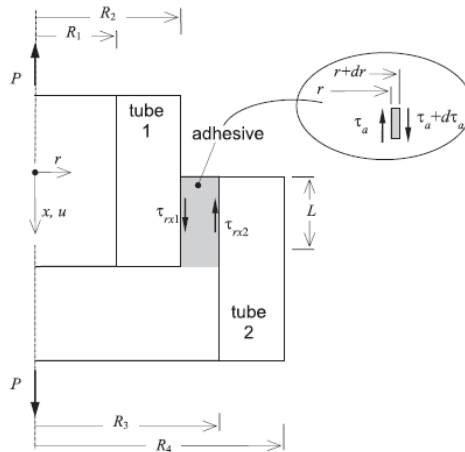


Figura 26 - Esquema para o modelo de Nayeb-Hashemi et al. [32].

- **Modelo de Pugno e Carpinteri**

O seguinte trabalho propõe uma solução para a junta tubular, novamente baseada em um modelo de corte, que então se aplica à otimização da geometria da junta (variação da seção transversal do tubo), para a análise da propagação de fendas e ainda para a sua detecção através da medição da frequência de vibração.

As hipóteses iniciais são:

- Os aderentes são submetidos apenas a tração, causando uma constante tensão axial sobre as espessuras;
- O adesivo é um meio elástico fino, portanto, o estado de tensão é considerado constante ao longo da sua espessura.

O esquema do modelo em estudo está representado na Figura 27.

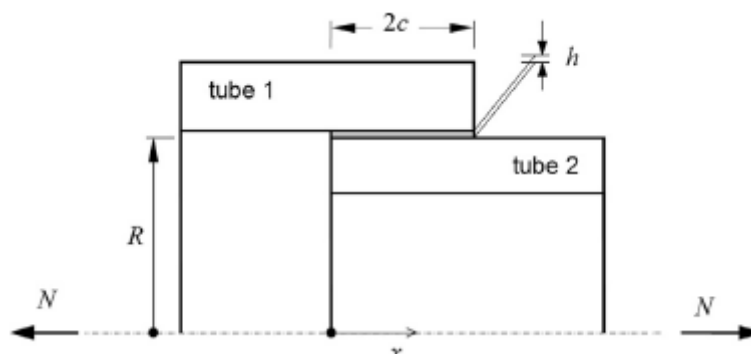


Figura 27 - Esquema para o modelo de Pugno e Carpinteri [33].

Quanto às tensões radiais (σ_r), circunferências (σ_θ) e axiais (σ_x) correspondentes, irão ser obtidas usando equações de elasticidade tridimensionais.

- **Modelo de Nemeş, Lachaud e Mojtabi; Modelos de Nemeş e Lachaud**

Ambos os trabalhos [34, 35] assumem um estado de tensão mais complicado nas partes (tubos e camada adesiva) da junta, assim como o comportamento elástico não isotrópico dos tubos. Os pressupostos básicos são os seguintes:

- Os aderentes são submetidos a uma tensão axial constante (originada pelo esforço de tração) ao longo da espessura, assim como a tensões de corte (longitudinal-radial) e circunferenciais, sendo que estas últimas são ambas variáveis ao longo da espessura;
- O adesivo é submetido a esforços de corte e circunferenciais, ao longo da espessura.

Comparando os resultados dos modelos com a análise pelo MEF nas cinco configurações é revelado que:

1. A tensão de corte é prevista corretamente na totalidade dos modelos;
2. Somente o modelo de Lubkin e Reissner fornece distribuições corretas para as tensões de arrancamento;
3. As tensões axiais e circunferenciais são próximas umas das outras e são cerca de metade das tensões de arrancamento.

2.2.1 Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração

2.2.1.1 Estudo 1

No projeto realizado por Nemeş et al. [34], o tratamento analítico parte das equações de equilíbrio geral em coordenadas cilíndricas. Durante o artigo não é dado nenhum detalhe específico, sendo que os autores mostram graficamente os resultados em termos de distribuições das várias tensões. É estudada a influência do L_0 , espessura e módulo de elasticidade (E) do adesivo, e ainda a relação entre módulos elásticos dos tubos.

Este modelo é mais tarde refinado por Nemeş e Lachaudin [35]. Estes autores incluem também na junta a tensão radial, que é assumida como constante no adesivo. Foi possível observar que este componente, ao ser adicionado, tem uma influência significativa nas distribuições das tensões de corte (longitudinal) e circunferencial. Nos resultados obtidos, a componente circunferencial é a mais significativa.

A configuração utilizada assim como as dimensões e propriedades elásticas estão representadas na Figura 28 e na Tabela 2, respetivamente.

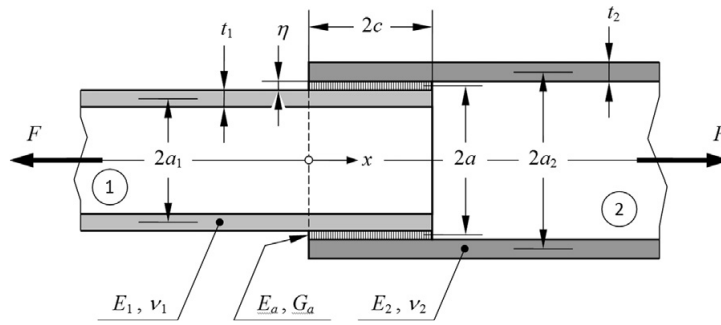


Figura 28 - Desenho esquemático da junta tubular axialmente carregada com dimensões características e propriedades elásticas (espessura do adesivo mostrada exagerada) [34, 35].

Tabela 2 - Dimensões características, propriedades elásticas e carga das cinco juntas usadas como estudos de caso (o número de dígitos significativos para os raios a1 e a2 é necessário para fornecer o valor correto da espessura do adesivo η) [34, 35].

No.	a_1 (mm)	t_1 (mm)	a_2 (mm)	t_2 (mm)	a (mm)	η (mm)	$2c$ (mm)	E_1 (GPa)	ν_1	E_2 (GPa)	ν_2	E_a (MPa)	G_a (MPa)	β	F (N)	τ_m (MPa)
1	48.625	2.5	51.375	2.5	50	0.25	25.0	200	0.3	200	0.3	1000	375	20	7854	1.0
2	22.375	5.0	27.625	5.0	25	0.25	10.0	80	0.3	80	0.3	1000	375	4	1571	1.0
3	4.625	0.5	5.375	0.5	5	0.25	5.0	200	0.3	200	0.3	1000	375	100	157	1.0
4	123.625	2.5	126.375	2.5	125	0.25	12.5	200	0.3	200	0.3	1000	375	20	9818	1.0
5	4.625	0.5	5.375	0.5	5	0.25	2.5	200	0.3	200	0.3	1000	375	100	78	1.0

Tais formatos foram escolhidas de forma a possibilitar explorar a mais ampla gama de configurações oferecidas no projeto [30] em termos de geometria e propriedades do material.

Apresenta-se agora a geometria geral utilizada Figura 29, onde é possível observar detalhes da malha criada para a realização do teste de MEF. Modelos similares foram usados para as restantes juntas.

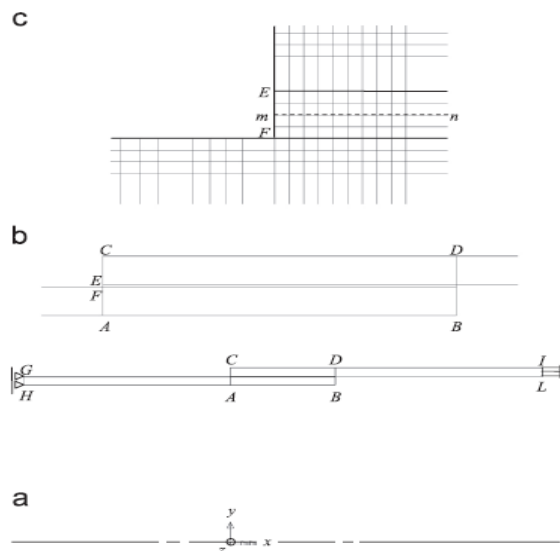


Figura 29 - Esboço da geometria da junta 1 (a), com detalhes da porção de sobreposição (b) e da malha MEF (c) [34, 35].

Na Figura 30 é possível observar a distribuição de tensões de corte (τ_{xy}) na região ampliada da junta próxima à extremidade esquerda da sobreposição. Na Figura 31 pode-se observar a distribuição das tensões axiais (σ_x) na configuração deformada da junta 1 (análise linear). Os deslocamentos são aumentados 500 vezes em relação aos valores reais.

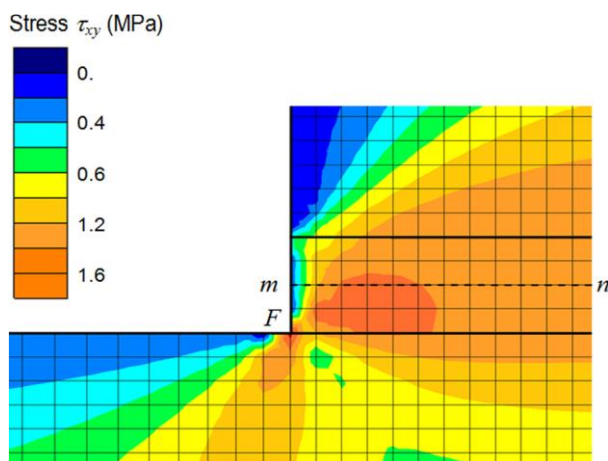


Figura 30 - Contorno das tensões de corte (τ_{xy}) em aderentes e adesivo próximos da extremidade esquerda da sobreposição [34, 35].

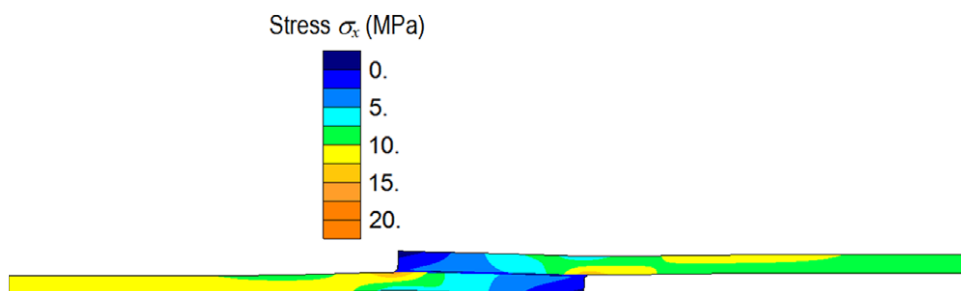


Figura 31 - Gráfico de contorno de tensões axiais normais (σ_x) sobrepostas à configuração deformada (x 500) da junta 1 [34-36].

Além dos resultados obtidos no trabalho de Lubkin e Reissner, foram utilizados os modelos analíticos de Nayeb-Hashemi et al. [32] e Pugno e Carpinteri [33] de forma a calcular o estado de tensão.

Na Figura 32 encontram-se representadas as distribuições de tensão normalizadas na espessura média do adesivo obtidas pelo MEF para as cinco juntas. Os resultados correspondentes do modelo de Lubkin e Reissner (L & R), para os casos de corte e arrancamento, encontram-se sobrepostos para comparação.

Neste trabalho, foram comparados cinco modelos da literatura com resultados de MEF, explicitamente gerados para uma variedade de configurações de juntas. Desta forma, as principais conclusões a que os autores chegaram são as seguintes:

- A tensão de corte é, na prática, avaliada corretamente por todos os modelos (existem algumas discrepâncias nos valores de pico);
- A tensão de arrancamento é somente calculada corretamente pelo modelo de Lubkin e Reissner [30], os restantes modelos prevêm um pico negativo no final do tubo interno;
- Os componentes de tensão axial e circunferencial são semelhantes, em termos de magnitude, além disso são cerca de metade da tensão de arrancamento;

De todos os modelos analisados o modelo de Lubkin e Reissner [30] é aquele que apresenta a melhor resposta e, portanto, merece ser desenvolvido para alcançar uma solução explícita de forma fechada.

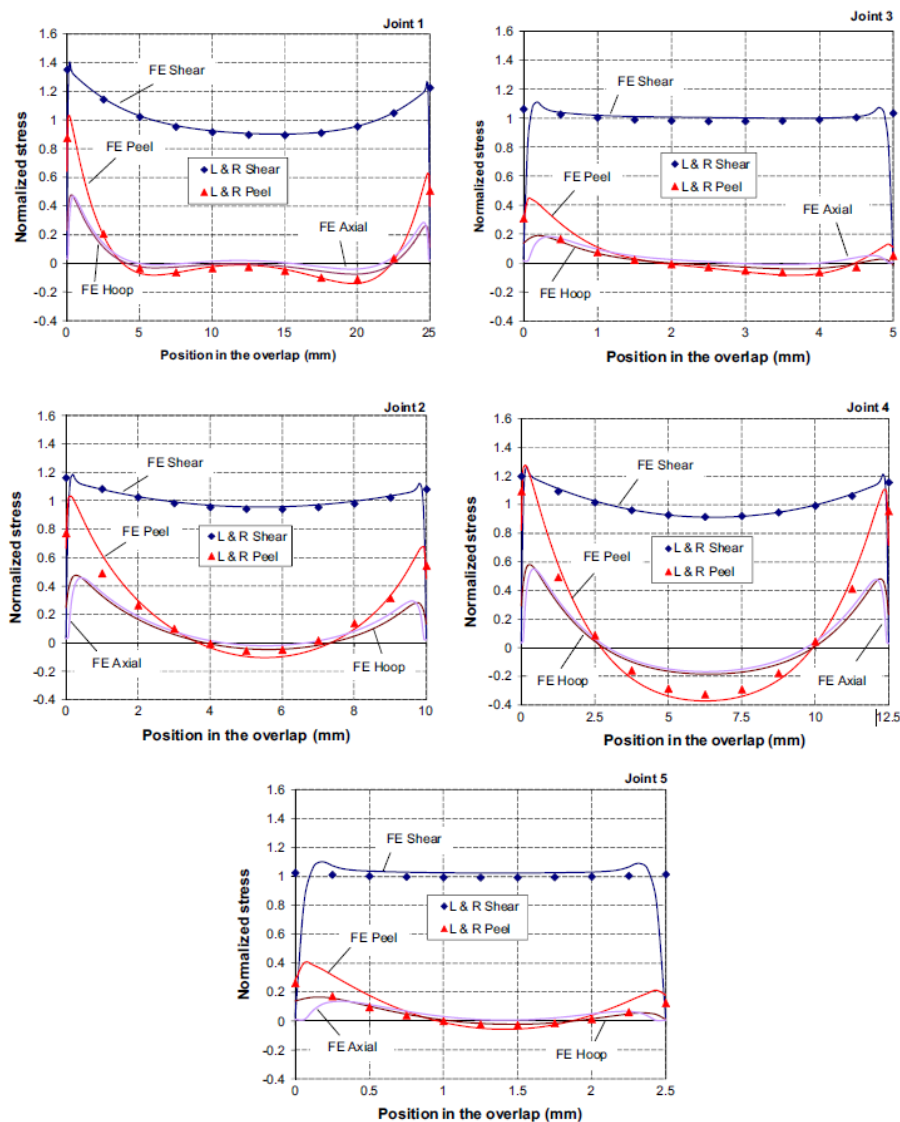


Figura 32 - Distribuições de tensão normalizadas a meia espessura do adesivo dadas por elementos finitos (EF) para as cinco configurações de juntas adesivas estudadas [36].

2.2.1.2 Estudo 2

O estudo numérico realizado por Qiu et al. [37] consistiu em desenvolver uma formulação teórica para descrever a distribuição das tensões de corte e estimar a capacidade de carga de juntas tubulares com aderentes de aço, sujeitas a carga axial. As previsões são validadas por resultados experimentais cobrindo várias geometrias de secção e comprimentos de ligação. Para tal, este estudo baseou a sua formulação numa relação entre as tensões e os deslocamentos bilinear que considera o comportamento elástico, a plasticidade e a rotura na região adesiva.

O artigo apresentado indica que uma análise elementar pelo MEF também é realizada para estimar a capacidade conjunta e descrever a distribuição de tensão de corte na camada adesiva, validando a confiabilidade dos resultados teóricos. Desta forma entende-se que formulação teórica é, portanto, mais utilizada no estudo dos efeitos dos parâmetros de projeto, incluindo o comprimento de adesão e o rácio de rigidez, novamente validado pelos resultados obtidos.

Tais resultados foram obtidos após um teste que necessitou da montagem de treliças planas, com uma série de amostras de juntas de sobreposição unidas, compostas por tubagem de compósito reforçado a fibra de vidro (CRFV) e componentes de aço. Os modelos testados foram categorizados em cinco grupos (G1 a G5) com base em diferentes seções transversais e características geométricas dos componentes de aço e CRFV. O adesivo utilizado foi o Araldite 420, que consiste num sistema epóxico estrutural de dois componentes. Este adesivo foi testado experimentalmente e foram obtidos valores de resistência à tração e módulo de Young de 28,6 MPa e 1,9 GPa, respetivamente.

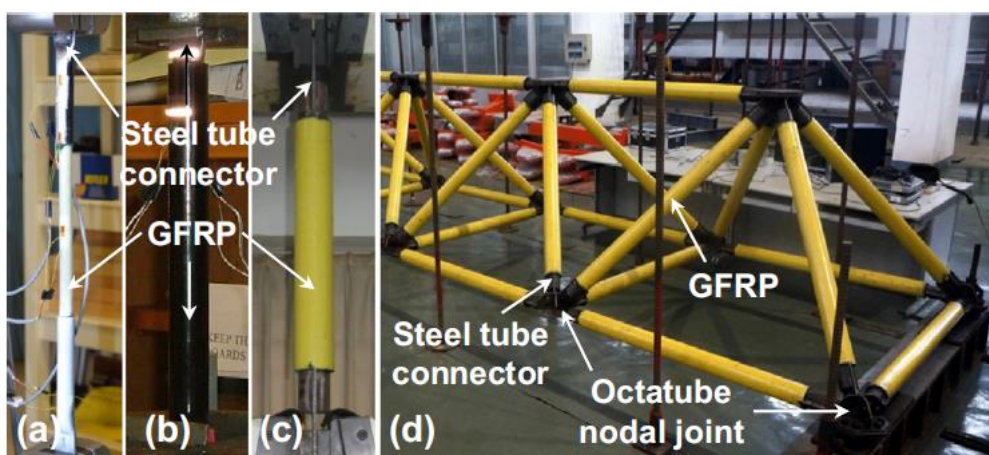


Figura 33 - Ligações para: (a) amostras G1 e G2; (b) amostras G3 e G4; (c) provete G5; e (d) um quadro espacial de grande escala montado [37].

O objetivo da adoção de hastes de CRFV no lugar de tubagem no G1 e G2 foi aumentar as áreas de secção transversal. Em G1 a G4, as extremidades livres dos tubos de aço foram achatadas para fixação aparafusada às juntas nodais na montagem estrutural. Os

provetes do grupo G5 foram soldados com uma placa de reforço de aço. Foi produzido o modelo representado na Figura 33 de forma a criar um cenário real para ser testado. Na Figura 34 é possível observar, por sua vez, a geometria utilizada para o modelo utilizado no teste de MEF.

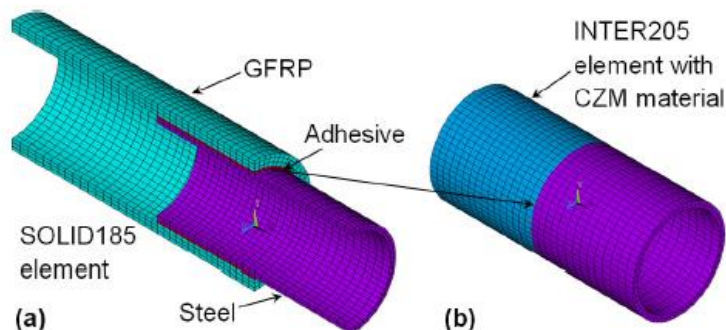


Figura 34 - Modelação EF: (a) Geometria geral; (b) Elementos de interface [37].

Dos catorze ensaios realizados obtiveram-se resultados que indicaram uma previsão precisa, apesar de uma ligeira previsão por excesso pela modelação teórica e MEF. Esta diferença pode ser atribuída a defeitos de fabrico nas zonas de colagem das tubagens examinadas. O valor obtido para a capacidade da junta ($P_{u,E} / P_{u,TH}$) foi de 0,935 e para os resultados experimentais e MEF ($P_{u,E} / P_{u,FE}$) foi de 0,981, com desvios padrão de 0,114 e 0,095, respetivamente.

Desta forma foi possível concluir que a capacidade máxima da junta no limite elástico (P_e) ocorre quando a rigidez dos aderentes é equilibrada (isto é, $E_s \cdot A_s / E_g \cdot A_g = 1$). Para o instante da rotura final ($P_{u,sf}$) a maior resistência da junta foi obtida para uma relação de rigidez ($E_s \cdot A_s / E_g \cdot A_g$) de 0,8. A variação da resistência da junta em função do rácio ($E_s \cdot A_s / E_g \cdot A_g$) é muito superior para (P_e) do que para ($P_{u,sf}$).

Tanto para o limite elástico como para o instante da rotura final, uma rigidez equilibrada entre aderentes (isto é, $E_s \cdot A_s / E_g \cdot A_g = 1$) gera uma distribuição simétrica de tensão de corte, onde o pico dessa tensão de corte τ_f se localiza nas extremidades do comprimento de ligação. Por outro lado, uma diferença na rigidez dos aderentes ($E_s \cdot A_s / E_g \cdot A_g \neq 1$) resulta num pico de tensão de corte localizado mais perto da extremidade do aderente mais rígido, indicando um maior deslizamento δ na extremidade oposta.

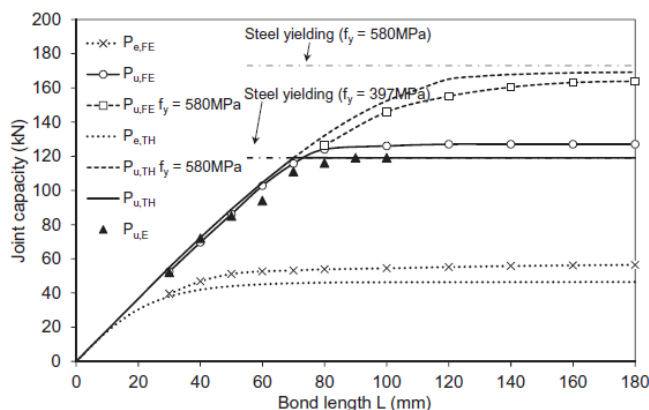


Figura 35 - Efeito do comprimento da ligação na capacidade conjunta [37].

Na Figura 35, é possível observar tanto os resultados teóricos como os dos ensaios por MEF indicaram que a capacidade da junta para o limite elástico P_e cessou de melhorar assim que o comprimento da ligação atingiu um determinado nível, o que demonstrou a existência de um efetivo comprimento de ligação dentro do estado elástico, sendo esse comprimento de cerca de 40 mm.

Utilizando o modelo teórico validado e a modelação pelo MEF, foram discutidos e clarificados os efeitos do L_0 e da rigidez dos aderentes na distribuição da tensão de corte e na capacidade de carga das juntas tubulares estudadas.

Foi possível retirar as seguintes conclusões deste estudo:

1. A formulação teórica fornece uma previsão satisfatória do comportamento da junta ao arrancamento para os ensaios experimentais com diferentes secções transversais e comprimentos de ligação, sendo que a razão média teste/previsão obtida foi de 0,935;
2. A modelação pelo MEF produziu juntas com capacidade ligeiramente inferior em comparação com a modelação teórica, o que pode ser explicado pela representação mais conservadora da área de ligação real na modelação pelo MEF e pela consideração da não linearidade do material no aderente. O teste de MEF produziu uma previsão precisa da junta experimental, com uma razão média de teste/previsão de 0,981;
3. Nos casos em que não se observa rotura do aderente, existem comprimentos de ligação efetivos para a capacidade da junta tanto no limite elástico como no estado final, a partir dos quais não se observa um aumento adicional da capacidade da junta. Levando em conta a capacidade dos aderentes, a relação entre o comprimento da ligação e a capacidade final da junta podem ser desenvolvidas via modelação por MEF para uma ligação específica;
4. A capacidade máxima da junta para o limite elástico (P_e) ocorre quando a rigidez dos aderentes é equilibrada (isto é, $E_s \cdot A_s / E_g \cdot A_g = 1$).

2.2.1.3 Estudo 3

O estudo numérico realizado por Nimje e Panigrahi [38] baseia-se na tenacidade à fratura (G_c) para a realização de análises de rotura em juntas tubulares compósitas de plástico reforçado com fibras (PRF), sob cargas variadas.

O estudo foi validado posteriormente comparando os resultados obtidos pelo MEF, para a junta tubular sob carga axial, com literatura publicada. Foram avaliadas as magnitudes da tensão de arrancamento (σ_{rr}) e da tensão corte (τ_{rz}) na camada adesiva da junta.

A geometria utilizada foi a apresentada na Figura 36. As condições fronteiras utilizadas foram as seguintes: a carga axial é aplicada na extremidade mais distante do tubo interno, o que equivale a uma carga uniforme de intensidade de 10 MPa. Uma pressão interna de 10 MPa é aplicada nas superfícies internas de ambos os tubos, de forma a simular a junção tubular sob o ambiente de carga axial. A carga de pressão é simulada ao fixar as bordas livres dos tubos interno e externo somente na direção longitudinal.

As condições fronteiras impostas na presente simulação pelo MEF para cargas axiais são expressas como: $z = -\frac{L}{2}; u = v = w = 0$.

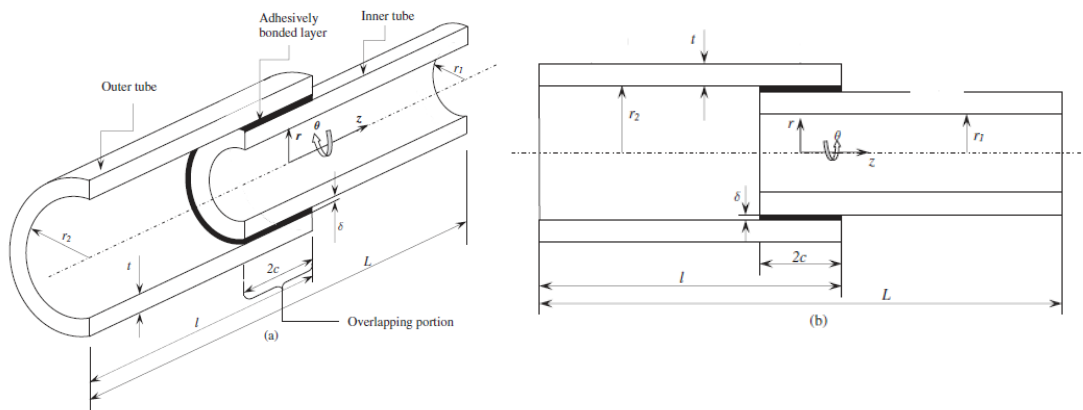


Figura 36 - Geometria e configuração da junta tubular colada: (a) Vista isométrica e (b) vista longitudinal [38].

Na Figura 37 é possível ver as variações dos índices de rotura ao longo das superfícies críticas da camada de ligação da junta tubular. O raio interno do tubo interior ($r_1 = 18,9$ mm), o raio interno do tubo exterior ($r_2 = 20,05$ mm), a espessura dos dois tubos ($t = 1$ mm), o comprimento de cada tubo ($l = 80$ mm), a espessura do adesivo ($\delta = 0,15$ mm), o comprimento de sobreposição ($2c = 22$ mm) e o comprimento total da estrutura da junta ($L = 138$ mm).

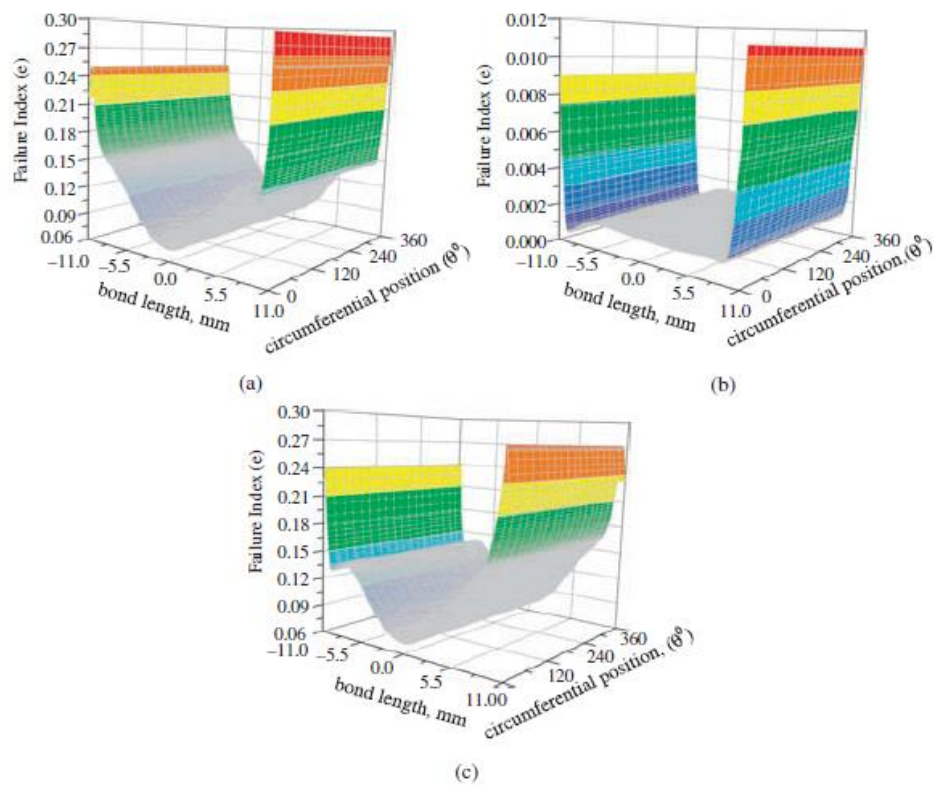


Figura 37 - Variações do índice de falha “e” na junção tubular sob carga axial ao longo da circunferência: (a) na interface do tubo interno e camada adesiva, (b) a superfície média da camada adesiva, e (c) na interface externa tubo e camada adesiva [38].

As bordas da camada de ligação são zonas mais vulneráveis no que diz respeito ao início de falha interfacial, pois os índices de rotura são mais elevados nesses locais. Com base na observação das magnitudes dos índices de rotura para todas as superfícies da camada de ligação, é claramente apontado que a superfície média do adesivo é ignorada para o início da rotura, em comparação com a rotura interfacial nas interfaces interna / externa do tubo adesivo. A localização prevista para o início da rotura no presente trabalho de pesquisa concorda com a evidência experimental de Tong [39] para a condição de carga axial.

Com este estudo foi possível concluir que as extremidades da camada de ligação são as zonas mais vulneráveis para a inicialização de roturas interfaciais. Observou-se também que as magnitudes do índice de rotura atingem um valor de pico na interface interior do tubo, assim como na camada adesiva perto da borda de ligação mais próxima da extremidade da junta. Portanto, conclui-se que esse local é o mais propenso ao aparecimento de danos.

Conclui-se também que a junta tubular sob carga de pressão é mais crítica em comparação com a situação em que sofre uma carga axial. Na situação sob pressão, o índice de rotura atinge a maior magnitude na borda livre esquerda da interface externa

do tubo-adesivo. Assim, a partir desta região, é esperado que ocorra a primeira rotura na forma de fendas, ocorrência evidenciada por Apalak [40].

Tal pesquisa originou as descobertas a seguir mencionadas. Estas sortiram informações importantes para o projeto da estrutura da junta tubular com adesivo graduado:

- A taxa de crescimento do dano interfacial é significativamente maior na junta tubular sob pressão em comparação com a carga de tração. Portanto, pode-se dizer que a junta tubular é vulnerável a roturas, sendo que tais roturas se propagarão a uma taxa mais rápida quando submetida a cargas de pressão;
- A tenacidade à fratura ao corte (G_{IIC}) é responsável pela propagação de danos na junta tubular sob carga axial durante o modo de abertura. O valor de G_{IIC} desempenha um papel vital para a propagação de danos quando a junta é submetida a carga de pressão;
- Sob a condição de carga axial, observa-se uma resistência significativa ao crescimento de dano interfacial na junta de sobreposição tubular com AFG (adesivo funcionalmente graduado) em comparação com a junta com adesivo de módulo único;
- Em geral, a junta tubular com a camada de AFG (aderente funcionalmente graduado) oferece resistência melhorada ao crescimento de danos interfaciais, o que aumentará a integridade estrutural e a vida útil da junta tubular.

2.2.2 Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção

2.2.2.1 Estudo 1

O estudo numérico e experimental conduzido por Hosseinzadeh et al. [28] tem o objetivo de caracterizar, de forma simplificada, o desempenho à torção de juntas tubulares metálicas ligadas por adesivos estruturais.

De forma a modelar a junta a analisar foi utilizado o módulo de análise paramétrica do *software* ABAQUS®. Utilizando o modelo de plasticidade de Ramberg e Osgood [41] foi possível caracterizar a iminência da rotura do adesivo para vários comprimentos de sobreposição. O modelo de plasticidade utilizado neste estudo foi afinado usando apenas um número limitado de parâmetros conhecidos, pela comparação com os resultados da simulação pelo MEF. Estes resultados foram posteriormente verificados com resultados experimentais. A análise de plasticidade revelou que o L_0 , ao contrário do que os resultados da análise pelo MEF mostrava, não afetará a resistência final da junta.

Neste estudo os autores optaram por reutilizar um modelo gerado num trabalho anterior, da sua autoria [42]. O modelo incluiu três componentes principais: o acoplamento, o tubo e o adesivo, conforme ilustrado esquematicamente na Figura 38(a). Já a Figura 38(b) revela os parâmetros geométricos mais pertinentes. O modelo

foi gerado a partir de 1240 elementos axissimétricos e 1575 nós, conforme representado no modelo bidimensional representado na Figura 39. Quanto ao elemento utilizado, este foi o CGAX8R do ABAQUS®, que consiste num elemento sólido axissimétrico de oito nós com esquema de integração reduzido.

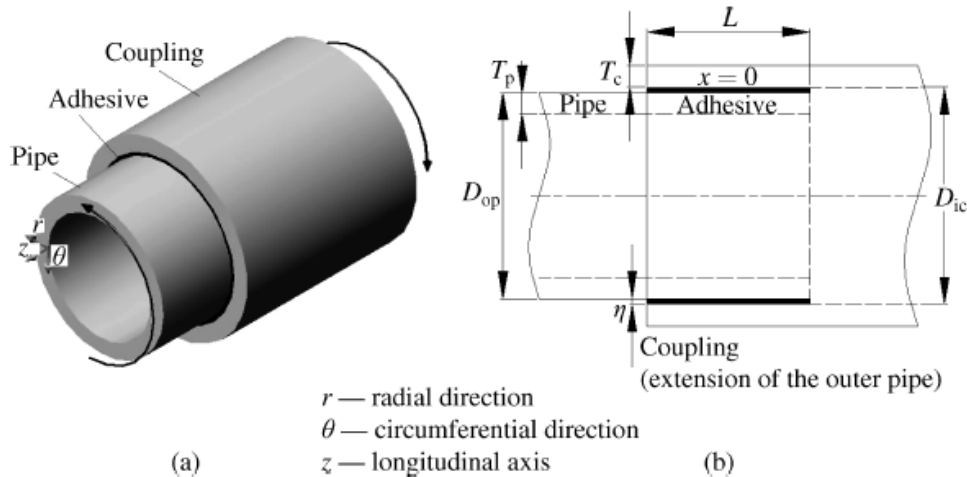


Figura 38 - Configuração esquemática de uma junta tubular colada. (a) Constituintes conjuntos, (b) Características geométricas [28].

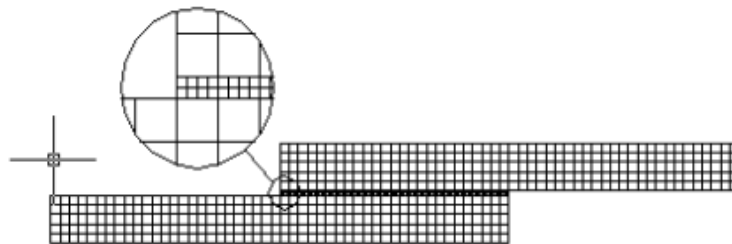


Figura 39 - Malha de elemento finito simétrica desenvolvida para o estudo paramétrico mostrando como os aderentes de malha grossa estão conectados ao adesivo de malha fina [28].

De forma a ensaiar as amostras foi utilizada uma máquina de ensaio universal biaxial (torção axial) (Instron 8821S), capaz de aplicar cargas estáticas e cíclicas com uma carga axial de ± 100 kN e um momento torsor de ± 1 kNm.

A Figura 40 revela os resultados de um teste de torção estático típico para os comprimentos de sobreposição de 30 e 40 mm. Para assegurar a consistência dos resultados, foram testadas duas amostras de cada comprimento. É possível observar que a resposta do adesivo à torção é totalmente plástica. Mesmo ampliando a torção versus rotação no estágio inicial de carregamento, pode-se observar que o comportamento não é linear. Pode concluir-se que, para modelar com precisão a resposta de tal sistema, o modelo computacional deve ser capaz de lidar com um comportamento totalmente plástico.

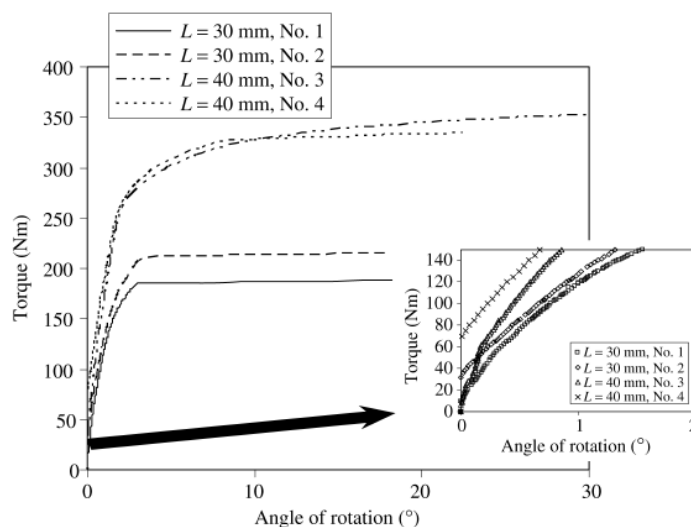


Figura 40 - Comportamento totalmente plástico de dois comprimentos diferentes de sobreposição, L , do teste de torção estática, mostrando o número de amostras para cada comprimento [28].

Foi conduzida uma investigação experimental e computacional combinada para estudar a resposta torsional de juntas de aço tubular coladas com adesivo, para diferentes comprimentos de sobreposição. Entre as várias conclusões retiradas encontram-se as respostas altamente não lineares que as juntas exibiram, resultando em diversas forças. Este assunto, embora não esteja de acordo com análises elásticas anteriores, foi confirmado por uma série de análises de MEF elasto-plásticas. Ficou demonstrado que o modelo de plasticidade desenvolvido poderia simular o comportamento das juntas de vários comprimentos com boa precisão. O modelo de plasticidade permitiu assim obter uma melhor compreensão da distribuição de tensões no interior da junta, bem como do modo de falha da mesma.

Os resultados mostraram que a capacidade de força da junta foi altamente dependente da sua energia de deformação absorvida. Ou seja, à medida que o comprimento aumentava, a junta absorvia mais energia, mesmo depois da junta ter passado para um modo totalmente plástico. A partir dos resultados experimentais e do MEF, pode-se concluir que, ao determinar a vida à fadiga para diferentes comprimentos de sobreposição, não se pode confiar apenas no valor máximo de tensão desenvolvido na junta, pois a tensão máxima foi semelhante para todos os comprimentos de sobreposição testados.

2.2.2.2 Estudo 2

A investigação conduzida por Esmael e Taheri [43] teve como principal objetivo o estudo da delaminação na camada aderente e a sua influência na distribuição de tensões no interior da camada adesiva. Para tal utilizaram-se três tipos de materiais para constituir as juntas adesivas: alumínio, compósito de vidro-epóxico e compósito de grafite-epóxico.

Por vezes ocorrem defeitos nos materiais compósitos que são inadvertidamente introduzidos durante a fabricação, na forma de separação entre camadas, geralmente conhecidos como delaminações. A existência de delaminação numa estrutura compósita pode afetar significativamente o desempenho mecânico da estrutura e impedir a plena utilização da sua resistência.

Realizou-se um estudo paramétrico abrangente, usando uma simulação pelo MEF realizada em ABAQUS®. Desta forma foi possível investigar o desempenho de juntas tubulares unidas por colagem única e de encaixe. Estas eram feitas de aderentes em material compósito com uma delaminação. Entre os parâmetros considerados incluíram-se a localização e o comprimento de delaminação, as propriedades mecânicas do material compósito e orientação das fibras do aderente compósito.

Partindo de um estudo anterior realizado por Panigrahi e Pradhan [44] em que é afirmado que, nas juntas de sobreposição simples, o efeito mais crítico foi identificado como aquele que ocorre quando o centro de delaminação está alinhado com a borda do comprimento de adesão, Figura 41. Por esta razão, alinou-se a localização da delaminação com a borda esquerda do comprimento de ligação, adjacente à camada adesiva em ambas as configurações da junta. A largura circunferencial da delaminação foi mantida nos 45° durante o estudo.

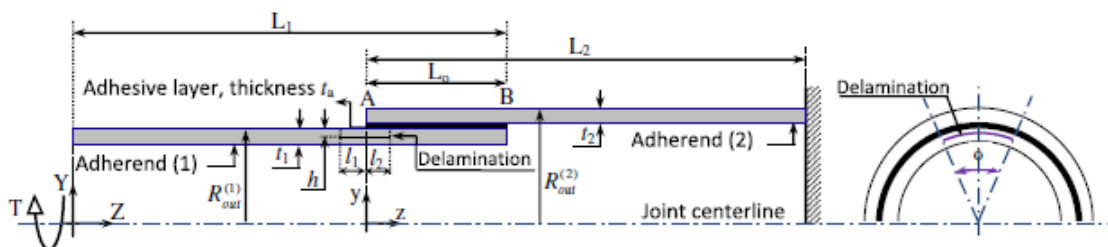


Figura 41 - Dimensões básicas de junta de sobreposição simples [44].

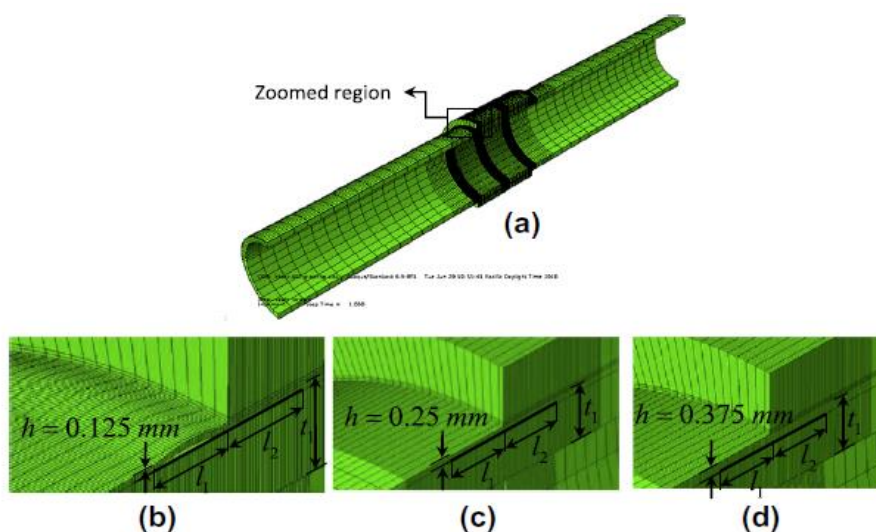


Figura 42 - Malha de elementos finitos. Localizações de laminação [43].

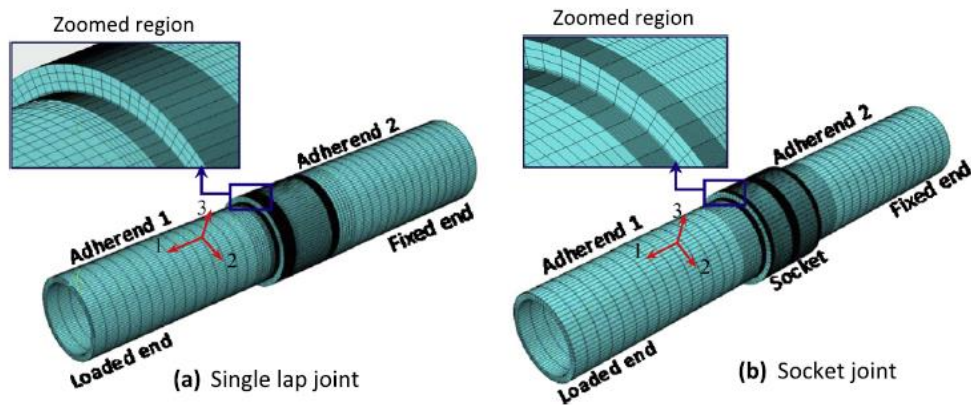


Figura 43 - Modelos de elementos finitos das duas juntas adesivas [43].

Na Figura 42 é possível observar três casos diferentes. No primeiro caso (b) a delaminação é colocada entre a primeira e a segunda camada, no caso (c) encontra-se entre a segunda e a terceira camada, e por fim, no caso (d) a delaminação encontra-se entre a terceira e a quarta camada. Através da espessura (Figura 43) da delaminação é possível criar três espessuras diferentes para a região delaminada superior, ou seja: $h=0,125$ mm, $h=0,250$ mm e $h=0,375$ mm, respectivamente.

A fim de verificar o procedimento de modelação, uma série de modelos preliminares foram criados e os resultados foram comparados com aqueles obtidos através da solução analítica desenvolvida por Zou e Taheri [45]. Na Figura 44(a) e na Figura 45(a) observa-se a comparação entre a distribuição das tensões de corte nas juntas de sobreposição simples (no plano médio da camada adesiva) obtida pela solução analítica e o modelo atual para juntas de aço-alumínio, alumínio-alumínio e de compósitos, respectivamente. Obtiveram-se excelentes correlações entre os resultados para as juntas sem delaminação.

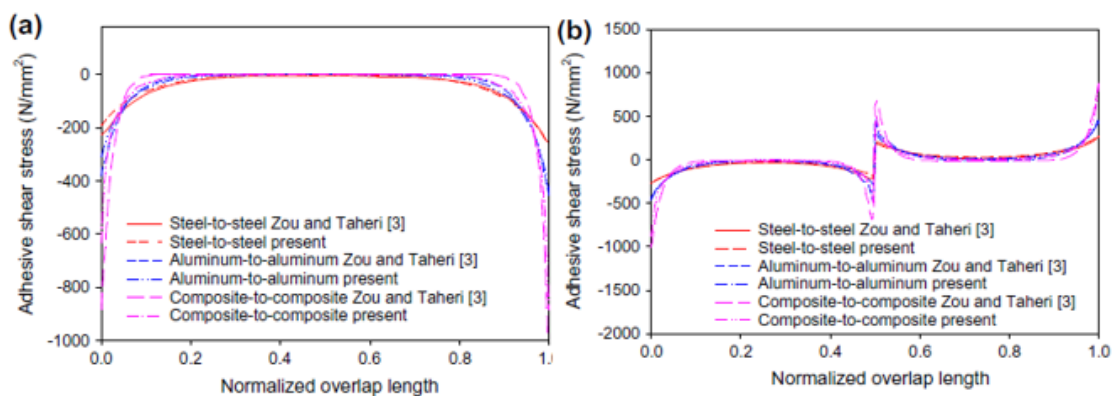


Figura 44 - Comparação das distribuições de tensão dentro da camada adesiva obtida a partir do MEF e solução analítica de Zou e Taheri para (a) juntas de uma unha intactas e (b) uniões de encaixe intactas formadas com vários aderentes [43].

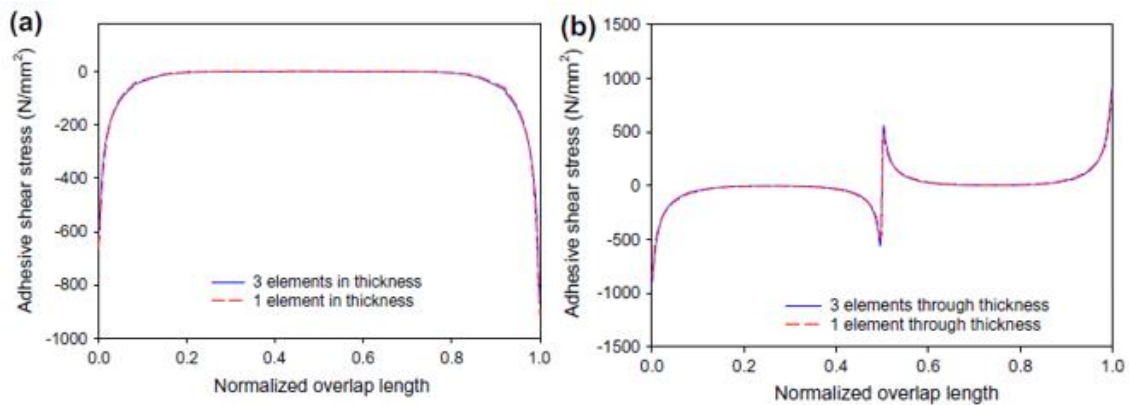


Figura 45 - Influência do uso de camadas extras de elementos na modelagem da distribuição de tensões dentro da camada adesiva da única volta intacta (a) e (b) juntas de encaixe [43].

De forma a melhor avaliar a integridade dos elementos do ABAQUS®, a análise foi repetida utilizando duas densidades de malha diferentes ao longo da espessura da parede tanto dos aderentes como do encaixe. Observa-se resultados que claramente revelam a excelente concordância entre as distribuições de tensão de corte simuladas pelos dois modelos, validando assim a integridade dos elementos.

Nas Figura 44 (b) e Figura 45 (b) são mostrados os resultados comparativos do mesmo procedimento de verificação, mas desta vez repetido para a configuração da junta de encaixe ligada adesivamente. Uma vez mais, foi alcançado um bom acordo entre os resultados da análise por MEF e as soluções analíticas.

Para a realização da experiência os autores partiram do pressuposto que existe delaminação pré-existente dentro dos aderentes em compósito. Desta forma, foi realizado um estudo paramétrico para explicar o efeito dessa delaminação pré-existente no estado de tensões desenvolvidas dentro da camada adesiva, focando principalmente nas tensões da camada adesiva de corte e arrancamento.

Algumas das conclusões alcançadas com o estudo em causa foram:

- Os valores máximos das tensões de corte e arrancamento foram observados na junta sem delaminação à medida que o comprimento da delaminação aumentava;
- Na configuração da junta tubular topo-a-topo com anel exterior de ligação, as concentrações de tensão não só se desenvolveram nas bordas do L_0 , mas também no local das descontinuidades entre os aderentes (onde os aderentes se enfrentaram), causando uma descontinuidade considerável no estado de tensões das juntas;
- Quando a localização da delaminação foi movida para uma zona mais profunda da espessura, a amplitude do pico secundário foi visivelmente diminuída, e as

tensões máximas da borda aproximaram-se dos valores na junta sem delaminação. Isto ocorreu em ambas as configurações de junta;

- As orientações das fibras não tiveram um efeito considerável sobre a tensão de arrancamento na configuração da junta de reforço, exceto pela junta com uma sequência de empilhamento de $[45]_{16}$. Além disso, a diminuição máxima no pico de tensão de corte foi notada para a disposição $[+ 45 / -45]$.

2.2.2.3 Estudo 3

Num outro estudo numérico elaborado por Oh [46] abordou-se a previsão da resistência das juntas tubulares compósitas, combinando análises térmicas e mecânicas.

De forma a calcular as tensões residuais térmicas geradas por um arrefecimento da temperatura de cura do adesivo foi usada uma análise pelo MEF. Também foi efetuada uma análise não linear incorporando o comportamento do adesivo não linear para estimar com precisão as tensões mecânicas no adesivo. Foram considerados 3 critérios para a rotura da junta, que são a rotura interfacial, a rotura coesiva do adesivo e a rotura do aderente. Os resultados das análises foram comparados com resultados experimentais disponíveis [47].

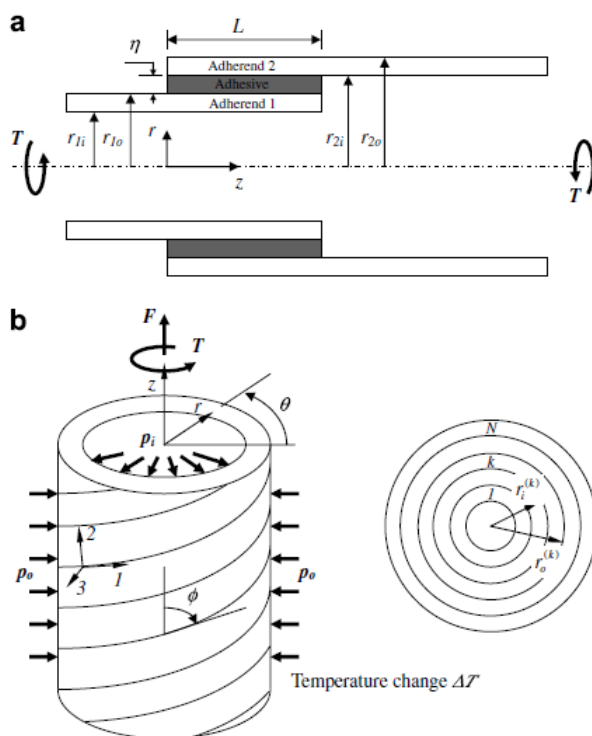


Figura 46 - Configuração geométrica: (a) junta de sobreposição simples e (b) tubo compósito laminado [47].

Foi obtida boa concordância entre a resistência prevista da junta e os dados experimentais disponíveis. Os resultados indicaram que as tensões térmicas residuais,

dependendo do ângulo de empilhamento, têm uma influência significativa no modo de rotura e na resistência das juntas adesivas quando é aplicada uma carga mecânica.

A configuração geométrica da junta adesiva tubular de sobreposição simples é a apresentada na Figura 46(a). Para cálculos numéricos, a camada adesiva é considerada fina e muito mais flexível do que os aderentes. Supõe-se que a tubagem esteja sujeita a uma carga termomecânica axissimétrica, como ilustrado na Figura 46(b).

De forma a prever as capacidades de transmissão de momentos torsores de juntas adesivas tubulares com aderentes em material compósito foram, realizadas análises térmicas e mecânicas combinadas. A validade destas análises foi verificada por comparação com resultados experimentais disponíveis de juntas adesivas tubulares de aço-compósito.

Observando a Figura 47 é possível analisar as capacidades previstas de transmissão de torque considerando os 3 modos de rotura (rotura do aderente, a rotura do adesivo e a rotura interfacial), bem como os resultados experimentais. O modo de rotura pelo aderente pode explicar os dados experimentais abaixo de um ângulo de fibra de $\phi=10^\circ$, enquanto o modo de rotura interfacial pode representar uma rotura acima de $\phi=30^\circ$. Observa-se que existe uma redução abrupta na resistência interfacial da junta para elevados ângulos de empilhamento devido ao efeito das tensões térmicas residuais.

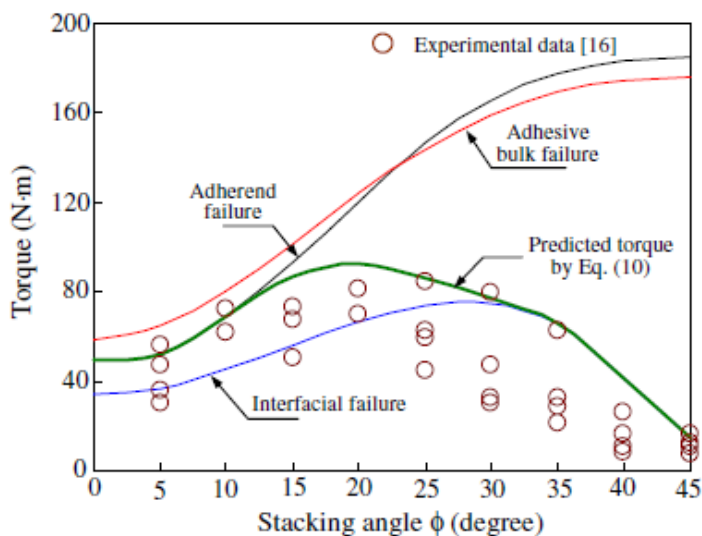


Figura 47 - Capacidades de torque previstas com base nos critérios de falha com os dados experimentais [46].

Foi possível concluir que a falha do adesivo ou do aderente ocorre em ângulos de empilhamento baixos, onde a influência de tensões térmicas residuais é insignificante. Já as juntas com elevados ângulos de empilhamento falham na interface entre o adesivo e o aderente devido às altas tensões térmicas residuais.

Ao contrário de uma junta com aderentes isotrópicos, as tensões térmicas residuais exercem uma influência significativa sobre a resistência da junta compósita, mesmo

sendo a espessura adesiva relativamente fina. As análises combinadas com critérios de falha conseguiram assim prever com precisão a capacidade de torção das juntas adesivas tubulares em que os aderentes são de material compósito.

2.2.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

2.2.3.1 Estudo 1

O estudo realizado por Canyon [48] tem como objetivo a estimação da resistência à fadiga de juntas adesivas tubulares usando, para tal, um algoritmo genético.

O presente artigo descreve o uso do processo de busca estocástica. Este, é a base do algoritmo genético modelo de estimativa da força de fadiga (GAFSEM), para a previsão da resistência à fadiga de componentes cilíndricos unidos por adesivos. O algoritmo foi desenvolvido para estimar a resistência à fadiga da união tubular adesiva usando vários materiais aderentes, tais como aço, bronze e alumínio. Todos os modelos desenvolvidos foram validados com dados experimentais [49, 50].

O algoritmo genético foi executado para determinar os valores de parâmetros de projeto (w_i) do GAFSEM. Tais parâmetros foram obtidos minimizando os resultados na soma do erro quadrado (SSE) entre os dados experimentais e os resultados estimados.

Na Figura 48 é possível observar a relação entre a rugosidade superficial e a resistência à fadiga. Tanto a introdução de termos cúbicos como a divisão da equação em duas partes reduziram significativamente o erro.

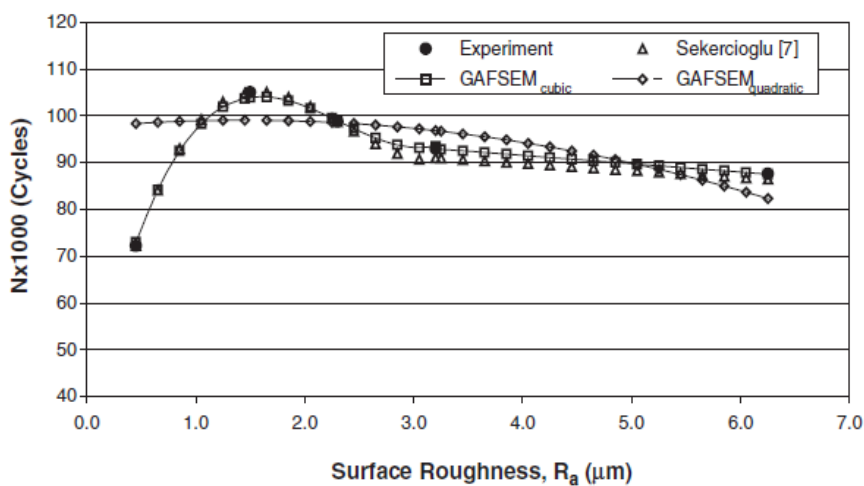


Figura 48 - Comparação do resultado experimental, [49] e resultados GAFSEM baseados no efeito da rugosidade da superfície [48].

Já as Figura 49, Figura 50 e Figura 51 mostram o efeito da folga da ligação, interferência e temperatura, respetivamente, na resistência à fadiga da junta. A partir destes resultados, observou-se que a folga e a temperatura de ligação conduziram a uma diminuição na resistência à fadiga.

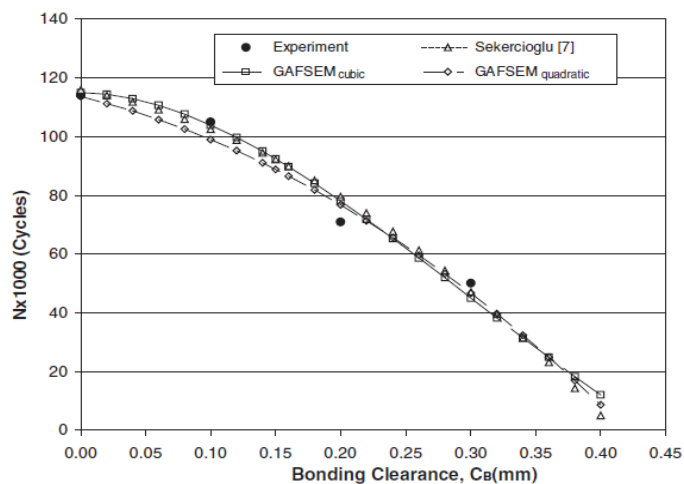


Figura 49 - Comparação do resultado experimental, [49] e os resultados do GAFSEM baseados no efeito da folga da união [48].

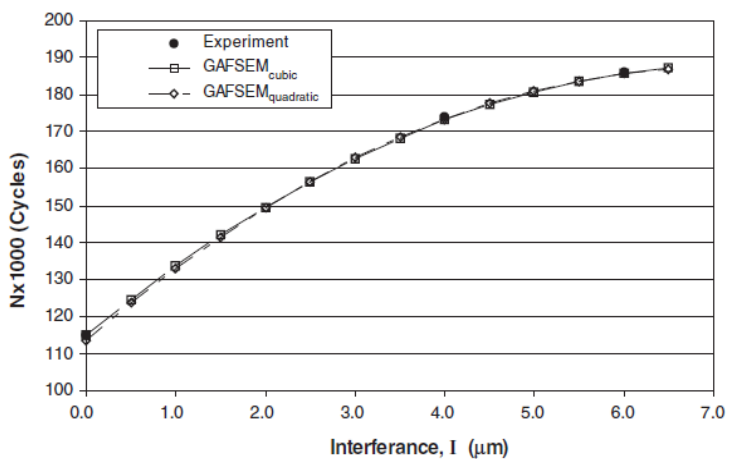


Figura 50 - Comparação dos resultados experimentais e dos resultados do GAFSEM com base no efeito da interferência [48].

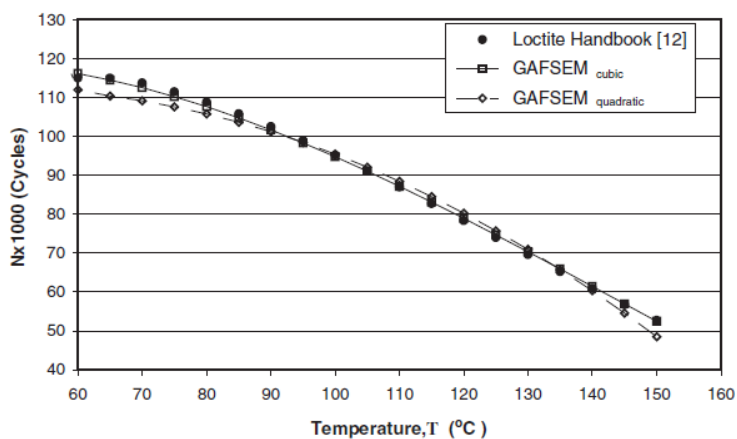


Figura 51 - Comparação dos resultados obtidos da [49] e GAFSEM com base no efeito da temperatura [48].

Para este trabalho as várias formas de abordagem de modelação realizadas e os resultados previstos foram comparados com os dados experimentais, obtidos de Sekercioglu [49] e Şekercioğlu et al. [50]. As seguintes conclusões podem ser extraídas dos resultados do presente estudo:

- O aumento da dimensionalidade devido a variáveis adicionais de projeto não impõe um custo computacional proporcional. O número de análises de função depende diretamente do tamanho da população. Nos modelos quadrático e cúbico testados neste trabalho, para um tamanho populacional de 80, foram necessários aproximadamente 250 números de gerações;
- O modelo GAFSEM pode ser usado como uma técnica de estimativa eficiente para prever a resistência à fadiga da união tubular adesiva usando materiais de aço, bronze e alumínio;
- Os resultados obtidos do GAFSEM indicam que não há inter-relação significativa entre os parâmetros de projeto, a rugosidade superficial, as folgas de aderência, a interferência, o material das peças de união e a temperatura;
- Os resultados do GAFSEM são comparáveis aos dados experimentais.

2.2.3.2 Estudo 2

O trabalho realizado por Sekercioglu [51] centrou-se num estudo sobre a confiabilidade na resistência das juntas tubulares coladas com adesivo. Existem vários fatores responsáveis pela resistência das juntas coladas, e uma vez que existem dúvidas quanto à confiabilidade deste tipo de tecnologia de ligação, foi realizado o seguinte estudo. Neste, foram produzidas um total de 44 amostras de juntas de sobreposição tubulares ligadas adesivamente para realização de testes de resistência, sendo que metade delas foram testadas estatisticamente, enquanto a outra metade foi testada dinamicamente sob condições definidas. A confiabilidade das juntas foi determinada com base em cargas aplicadas selecionadas aleatoriamente.

A experiência foi realizada com o auxílio da máquina de teste *Universal TecQuipment SM100*, com capacidade de 100kN que é capaz de realizar cargas estáticas e dinâmicas.

Para o estudo em questão foi utilizado o tipo de carregamento dado na norma ISO 9664 [50]. A aplicação da carga encontra-se representada da Figura 52. No caso da fadiga de amostras cilíndricas, como não existe uma norma disponível, foi utilizada como referência a ISO 9664.

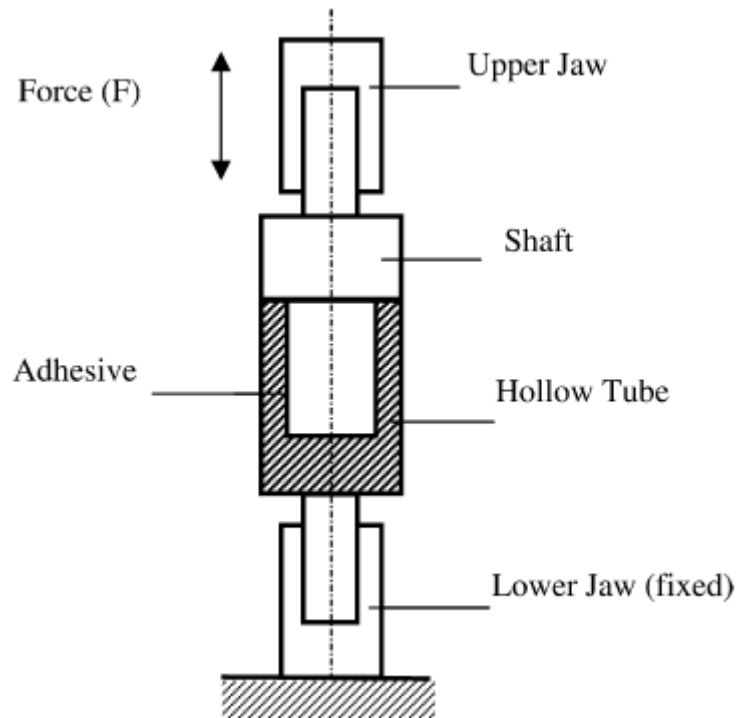


Figura 52 - Carregamento de amostras de juntas se sobreposição tubulares [51].

Nas seguintes Figura 53 e Figura 54 é possível observar a confiabilidade, tanto do carregamento estático, como do carregamento dinâmico.

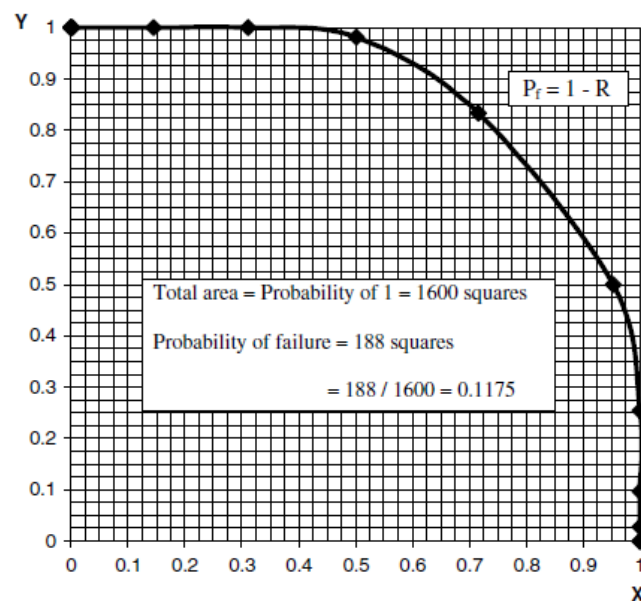


Figura 53 - Confiabilidade do carregamento estático [51].

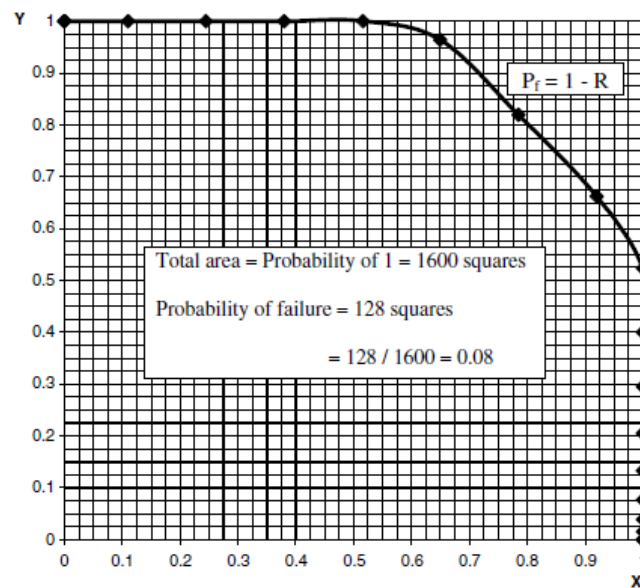


Figura 54 - Confiabilidade do carregamento dinâmico [51].

As áreas sob as curvas X – Y fornecem a confiabilidade das juntas adesivas tubulares para o caso do carregamento estático (Figura 53) e para o carregamento dinâmico (Figura 54). De acordo com a carga aplicada, a confiabilidade das juntas adesivas carregadas dinamicamente foi de 92%, enquanto a das juntas adesivas estaticamente carregadas foram de 89%. Da mesma forma, a confiabilidade das juntas pode ser determinada para outras condições de carga aplicadas sem a realização de qualquer ensaio.

A partir do trabalho experimental e analítico realizado no estudo em questão pode-se concluir que:

1. Os dados da rotura para os testes dinâmicos em juntas coladas com adesivo são muito limitados pois tais juntas não são produzidas em massa e os testes dinâmicos demoram muito tempo a ser executados. A análise de confiabilidade das juntas adesivas, conforme descrito aqui, pode ser realizada sempre que houver escassez de conhecimento sobre a confiabilidade das juntas adesivas;
2. O método usado durante o estudo pode ser aplicado em várias áreas industriais para determinar a confiabilidade de diferentes juntas coladas, tais como conexões eixo-cubo, conjuntos automotivos e ainda componentes estruturais de aeronaves.

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. 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 das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [52], 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 [53] é a técnica mais vulgarmente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [54], 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 da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [55]. 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 quando sujeitas a tensão, o Método de Elementos Finitos Estendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma

solução simples é usar o modelo de Volkersen [52], 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. [56] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [44]. 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 [54], 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 as estruturas e os seus materiais são contínuas, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de 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 [7]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [57] 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 [58]. 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 [59] e por Rice [60] 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 [61], 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 [62] e Dugdale [63], 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 [64].

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [65]. 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 55), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [66], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [67].

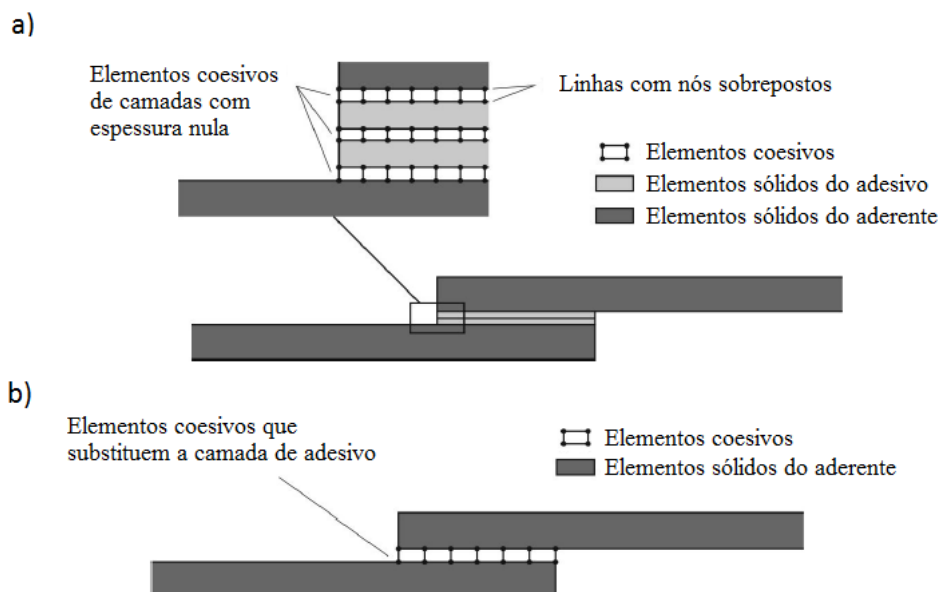


Figura 55 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [16]).

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 [68]. 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 [69].

2.3.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [70], triangular [71], exponencial [72], polinomial [73] e trapezoidal [67]. 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 [74].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [75]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [76] 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 56.

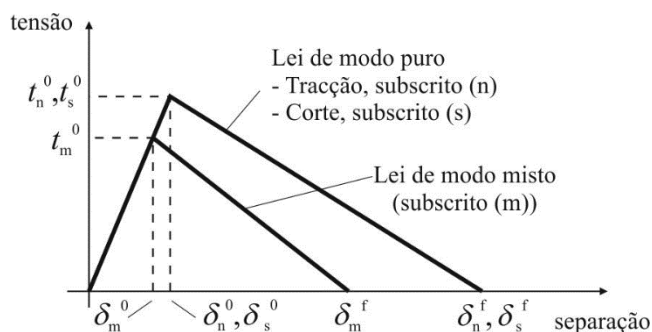


Figura 56 - Modelo coesivo triangular [28, 29].

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 [77].

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 [78] e modo II [79].

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 [80]. 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. [81], 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 (*Double-Cantilever Beam*), ENF (*End-Notched Flexure*) e JSS, alcançando bons resultados [67, 82].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devido a desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [83]. 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 [84]. 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 [85]. 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 [83], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_h$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_h 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 [86]. Rice [60] 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 [87]. 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 [79]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [88], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 57. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (1) em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar

a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

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

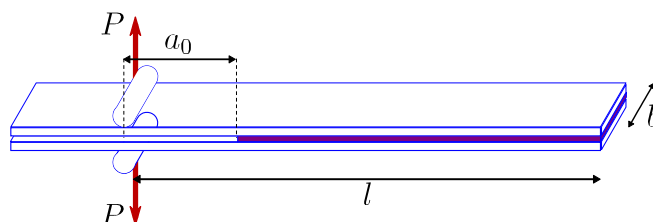


Figura 57 - Geometria do provete DCB [42].

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 58). 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 ($2L$) [89]. 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 [90].

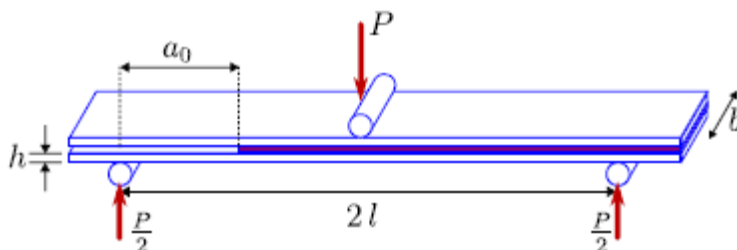


Figura 58 - Geometria do provete ENF [42].

2.3.3.3 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 [91] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramshad et al. [92] 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 [64].

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 microcavidades [93]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [94] ou do número de ciclos para análises de fadiga [95, 96]. 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 [97].

Hua et al. [98] 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. [99] 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 em algum 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.

2.3.3.4 Método de Elementos Finitos Estendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha

na proximidade da fenda [100]. Belytschko e Black [101], 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 [102]. 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 [103].

Campilho et al. [104] 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 59). 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.

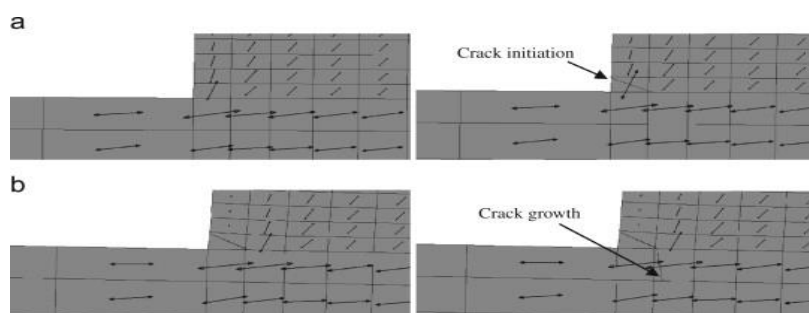


Figura 59 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [65].

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação experimental

Este capítulo tem como objetivo realizar e efetuar a validação do MDC através de resultados experimentais. Aqui serão abordados os materiais utilizados no trabalho experimental, e será ainda realizada uma análise dos resultados dos ensaios e a respetiva comparação com os valores numéricos. Tais dados experimentais, foram obtidos de um trabalho anterior [105]. Nesse trabalho a validação realizou-se com ensaios à tração, sendo este um carregamento diferente daquele estudado no capítulo 3.2.

3.1.1 Materiais utilizados

3.1.1.1 Substratos

Os substratos de todas as juntas adesivas estudadas foram concebidos em alumínio, nomeadamente a liga AW6082-T651. Esta liga de alumínio pertence à família de alumínio-magnésio-silício (série 6000 ou 6xxx), sendo esta uma das ligas mais populares (juntamente com as ligas 6005, 6061 e 6063) [106]. É obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. Foi a liga selecionada pelo facto de apresentar boas propriedades mecânicas, e por apresentar um amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada.

Esta liga de alumínio foi anteriormente caracterizada em trabalhos [107], onde foram obtidas as propriedades apresentadas na Tabela 3:

Tabela 3 - Propriedades da liga de alumínio AW6082-T651 [107].

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

Na Figura 60 é possível observar as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio, obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [107].

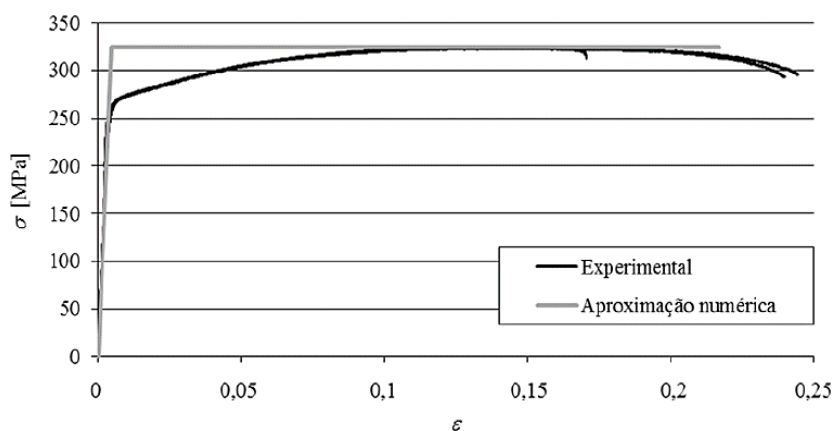


Figura 60 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [108].

3.1.1.2 Adesivos

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

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 com o endurecedor HV 998 consiste num sistema epóxico bi-componente que, quando combinado, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. Quando totalmente curado este, adesivo apresenta excelente desempenho a elevadas temperaturas. É um adesivo frágil de pasta que cura à temperatura ambiente. 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 da espátula [4]. Este adesivo é apropriado na ligação de materiais dissimilares, ou seja, de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração foram obtidas experimentalmente e estão apresentadas na Figura 61. As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 4.

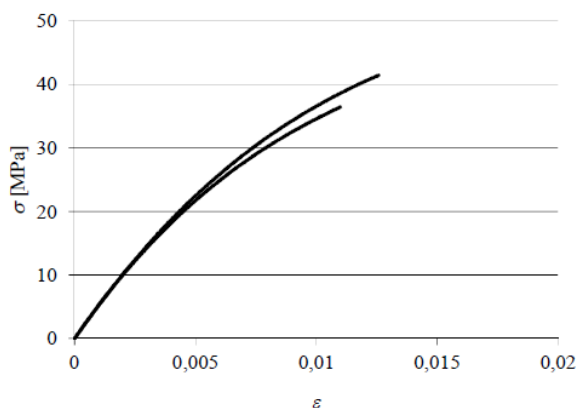
Figura 61 - Curvas σ - ε do adesivo Araldite® AV138 [108].

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [109].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	$4,89 \pm 0,81$
Coeficiente de Poisson, ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_f [MPa]	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de rotura à tração, σ_r [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_r [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] ^a	0,20
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm] ^a	0,38

^a Valores estimados na referência [109]

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 consiste num adesivo epóxico estrutural bi-componente, de cura à temperatura ambiente, com ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, concede uma resistência ao corte e à tração inferiores [110]. A razão de aplicação é de 50 g/50 g, sendo a mistura realizada por um bico e aplicada por meio de uma pistola de aplicação [4]. O facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração, que são geralmente situadas nas

extremidades das juntas. Isto deve-se à existência de assimetria na junta e efeito de deformação diferencial dos aderentes [110].

As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração podem ser observadas na Figura 62. As propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo Araldite® 2015 encontram-se na Tabela 5.

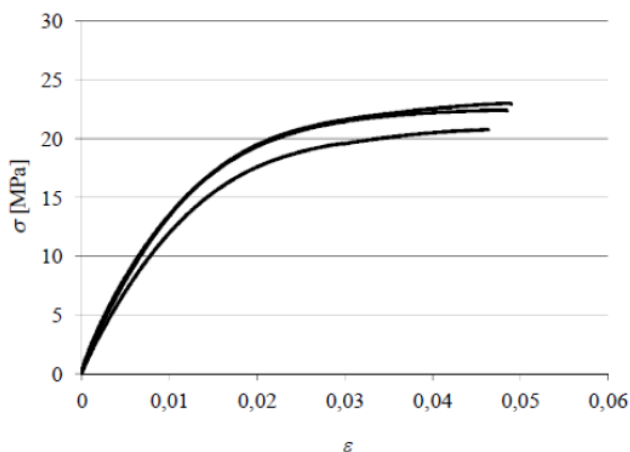


Figura 62 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 [108].

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [110].

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

^a valor do fabricante

Ao comparar os valores da Tabela 4 com os valores da Tabela 5, é possível verificar que a deformação de rotura ao corte do adesivo Araldite® 2015 é quase seis vezes superior ao valor apresentado para o adesivo Araldite® AV138. Contudo, 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 Sikaforce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, a resina e o endurecedor (FRW L60). A sua relação de mistura em peso é de cinco para um. É um adesivo dúctil que, comparativamente aos adesivos previamente referidos, Araldite® AV138 e Araldite® 2015, apresenta a menor resistência ao corte e à tração. Na Figura 63 estão representadas as curvas σ - ϵ do adesivo, enquanto que na Tabela 6 estão representadas as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo.

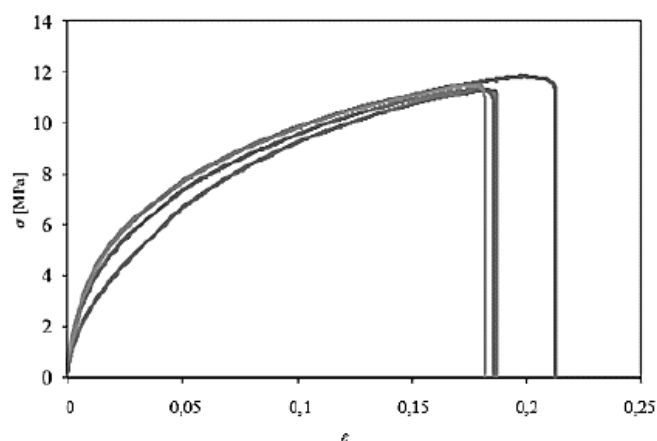


Figura 63 - Curvas σ - ϵ do adesivo SikaForce® 7752 [111].

Em relação às propriedades obtidas, é expectável uma resistência elevada em juntas adesivas com este adesivo, pois este combina uma resistência razoável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Desta forma, são esperadas tensões elevadas na camada de adesivo, assim 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 [112].

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [111].

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E [GPa]	$0,49 \pm 0,09$
Coeficiente de Poisson, ν^b	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_f [MPa]	$3,24 \pm 0,5$
Tensão de rotura à tração, σ_r [MPa]	$11,49 \pm 0,3$
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$19,18 \pm 1,4$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$5,16 \pm 1,1$
Tensão de rotura ao corte, τ_r [MPa]	$10,17 \pm 0,6$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$54,82 \pm 6,4$
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm] ^a	$2,36 \pm 0,2$
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm] ^a	$5,41 \pm 0,5$

^a Valor do fabricante

3.1.2 Geometria das juntas

O subcapítulo que se segue tem como finalidade a descrição da geometria das juntas estudadas. Na Figura 64 e na Tabela 7 estão representadas, respetivamente, a configuração e a designação das cotas utilizadas dos provetes.

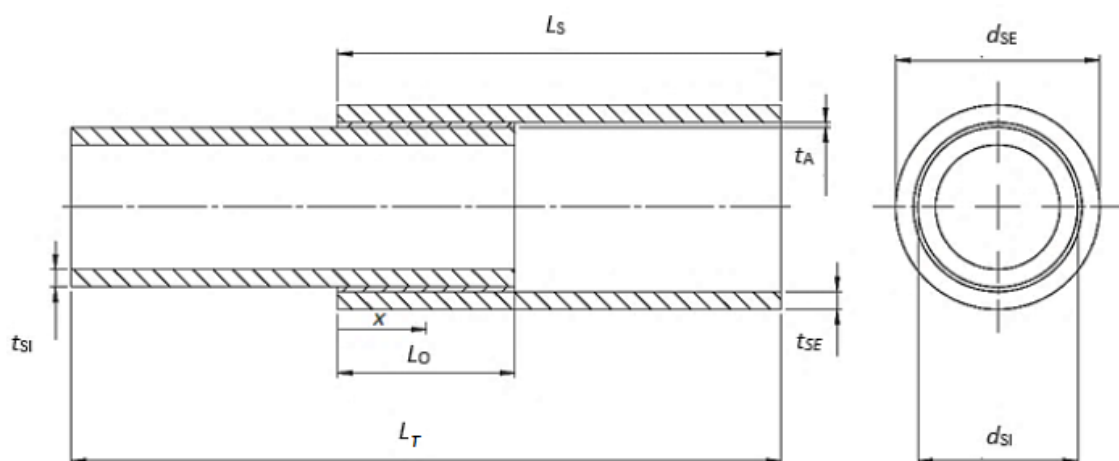


Figura 64 - Configuração da geometria do provete [105].

A espessura do adesivo (t_A) mantém-se constante para todas as amostras (0,20 mm). Os substratos apresentam um (L_S) de 50 mm até aos pontos de amarração. Foram concebidas seis amostras, com diferentes variações de espessuras de substrato, para cada um dos dois comprimentos de sobreposição, sendo que se repetiu o processo para cada um dos três adesivos estudados.

Tabela 7 - Cotas dos provetes e respetivos valores (em mm) [105].

Designação	Cota [mm]	
Comprimento dos substratos, L_S	50	
Comprimento de sobreposição, L_O	20	40
Comprimento total da junta, L_T	80	
Espessura do adesivo, t_A	0,2	
Espessura do substrato interior, t_{Si}	2	
Espessura do substrato exterior, t_{Se}	2	
Diâmetro externo do substrato interior, d_{Si}	20	
Diâmetro externo do substrato exterior, d_{SE}	22,4	

Os provetes utilizados possuem uma forma cilíndrica, já que os tubos de alumínio utilizados nas juntas possuem uma secção circular. A espessura do adesivo (t_A) é a mesma para todas as amostras (0,20 mm) tal como a espessura dos substratos interior (t_{Si}) e exterior (t_{Se}) (2 mm). O mesmo sucede relativamente ao diâmetro externo dos tubos: interior (d_{Si}) 20 mm e exterior (d_{SE}) 22,40 mm. O comprimento dos substratos (L_S) tem o valor de 50 mm. Foram concebidas dez amostras para cada um dos três adesivos em estudo, cinco delas com um comprimento de sobreposição (L_O) de 20 mm e as restantes cinco com 40 mm. O valor do comprimento total (L_T) da amostra em estudo não depende de L_O .

3.1.3 Resultados obtidos

No subcapítulo seguinte são apresentadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para os diferentes adesivos e valores de L_O . Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ estão apresentados em tabelas, sendo que cada uma corresponde a um adesivo diferente. Foram realizados cinco ensaios para cada caso e obtiveram-se roturas coesivas para todos as amostras testadas. Em cada tabela estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios para cada

valor de L_0 , a força máxima média ($P_{m\acute{a}x} Méd$), que corresponde à média das forças máximas recolhidas e o desvio padrão, que fornece a dispersão, em termos numéricos e percentuais, dos valores obtidos dos ensaios. A análise destes dados experimentais é de grande importância pois os mesmos servirão para validar as soluções obtidas pelo estudo numérico.

3.1.3.1 Araldite® AV138

Na Figura 65 é possível observar as curvas $P-\delta$ referentes ao adesivo Araldite® AV138. Na Tabela 8 pode-se visualizar os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente, em juntas adesivas tubulares, para o adesivo Araldite® AV138 e para os diferentes valores de L_0 , bem como o desvio padrão associado. De referir que alguns provetes foram considerados inválidos, como tal, as respetivas curvas não são apresentadas.

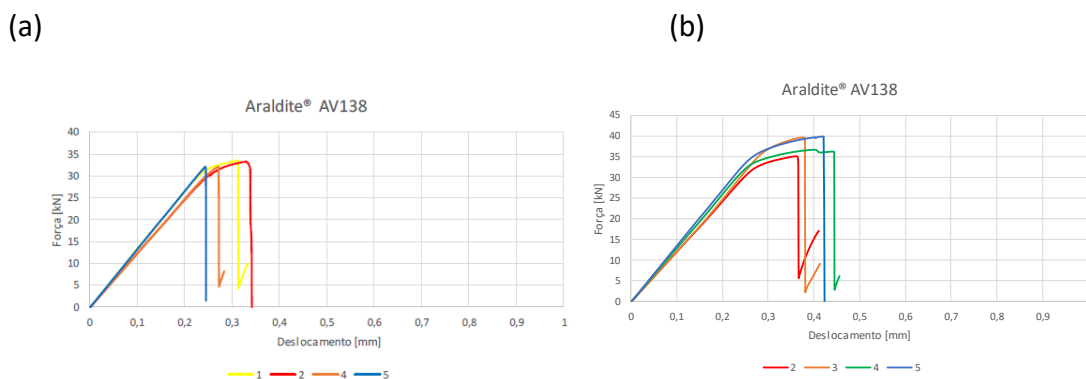


Figura 65 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [105].

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 65 (a)) verifica-se a ocorrência de plastificação dos substratos nas amostras 1 e 2 (curva vermelha e amarela, respetivamente), possivelmente devido a um excesso de adesivo na junta que infiltrou-se dentro do tubo interior, gerando uma área de contacto superior à desejada. As restantes amostras apresentam um comportamento linear até ocorrer rotura.

Para as juntas adesivas com $L_0=40$ mm (Figura 65 (b)) ocorre a plastificação dos substratos em todas. No geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento para ambos os casos de estudo. Regista-se apenas a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e questões de amarração dos provetes. Os provetes cujos valores não são apresentados na Tabela 8 foram considerados inválidos.

Os provetes considerados inválidos foram removidos da análise pois apresentavam discrepâncias demasiado elevadas entre $P_{m\acute{a}x}$ e $P_{m\acute{a}x} Méd$. Desta forma, verifica-se uma redução do desvio padrão percentual relativamente ao respetivo valor médio. Com esta ação é possível obter uma boa repetibilidade das curvas $P-\delta$. A dispersão dos valores obtidos é muito reduzida, sendo que o maior desvio padrão percentual registado para o

Araldite® AV138 ocorreu nos provetes com $L_0=40$ mm (5,15%). Questões relacionadas com o fabrico dos provetes, constituição dos materiais ou mesmo com a máquina de ensaios, podem ter contribuído para esta diferença.

Tabela 8 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138 [105].

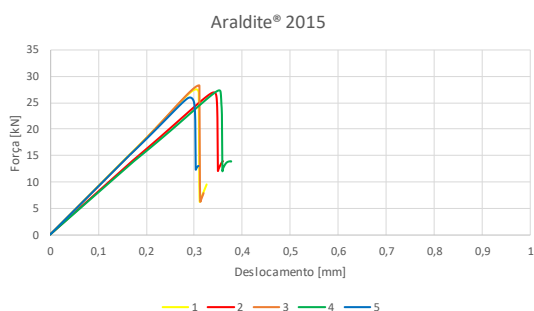
L_0 [mm]	1	2	3	4	5	$P_{m\acute{a}x}$ Méd (N)	Desvio Padrão	Desvio Padrão Relativo
20	33468	33342	-	32162,6	32216,9	32797,5	609,7	1,86%
40	-	35209,8	39546,9	36770,2	39902,1	37857,2	1951,1	5,15%

3.1.3.2 Araldite® 2015

Na Figura 66 são observadas as curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Analisando a Tabela 9 é possível observar os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para o mesmo adesivo, em função de L_0 .

Aqui verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=20$ mm (Figura 66 (a)). Para o caso dos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 66 (b)) verifica-se plastificação dos substratos. De forma geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento. As pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios, especialmente para $L_0=20$ mm.

(a)



(b)

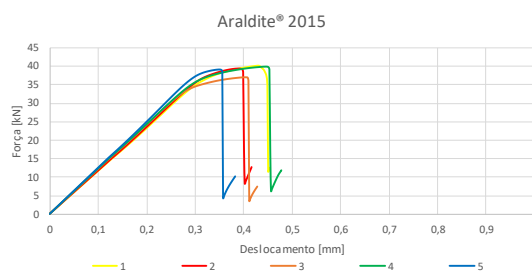


Figura 66 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [105].

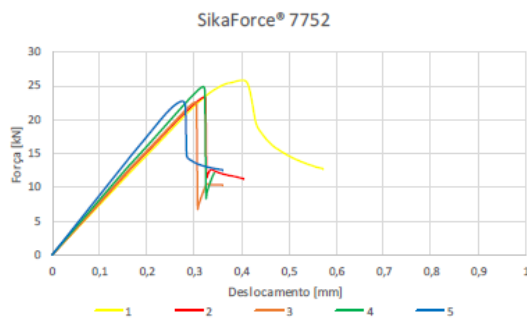
Tabela 9 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015 [105].

L_0 [mm]	1	2	3	4	5	$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio Padrão [N]	Desvio Padrão Relativo
20	27576	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	2,84%

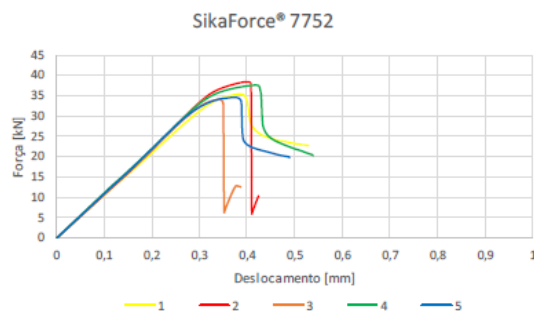
Conclui-se que o adesivo Araldite® 2015 é o que apresenta mais coerência em relação à dispersão dos valores obtidos. Para ambos os comprimentos ($L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm), o desvio padrão percentual registado foi de 2,84%. Além de este não ser um desvio significativo, foram considerados todos os provetes ensaiados, fatores que reforçam a validade dos dados recolhidos.

3.1.3.3 SikaForce® 7752

(a)



(b)

Figura 67 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [105].

Da mesma forma que o adesivo anterior, são apresentadas as curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752 na Figura 67. Na Tabela 10 encontram-se presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos de forma experimental para o SikaForce® 7752 em função de L_0 .

Tabela 10 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 [105].

L_0 [mm]	1	2	3	4	5	$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio Padrão [N]	Desvio Padrão Rel. [%]
20	25776,6	23329,9	22552,7	24848,6	22774,0	23856,4	1250,6	5,24
40	35247,2	38345,6	33909,8	37634,2	34512,8	35929,9	1749,0	4,87

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 67 (a)) verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura, com exceção da amostra nº1 (curva amarela). Esta última apresenta plasticidade dos substratos e um deslocamento até à rotura evidentemente superior quando comparada com os restantes provetes. Este comportamento pode ter sido o resultado da deposição de uma espessura de adesivo superior à prevista ou devido à acumulação de excesso de adesivo no interior da junta adesiva. Nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 67 (b)) observou-se plastificação dos substratos. O provete nº3 (curva laranja) apresenta uma deformação até à rotura inferior em relação aos outros provetes. Tal comportamento poderá ter-se gerado devido a uma espessura de adesivo na junta inferior à pretendida.

Apesar das diferenças registadas, de forma geral assiste-se a uma boa repetibilidade das curvas no que respeita à rigidez. Como foi apontado previamente para demais adesivos estudados, é notória a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes.

O adesivo SikaForce® 7752 é, dos três adesivos ensaiados, o que apresenta as dispersões mais elevadas: 5,24% para $L_0=20$ mm e 4,87% para $L_0=40$ mm. No entanto, não são desvios significativos em relação aos valores individuais dos ensaios relativamente ao respetivo valor médio. Tais diferenças registadas entre os valores podem-se justificar pelos mesmos motivos mencionados no caso do Araldite® AV138.

3.1.4 Comparação de resultados

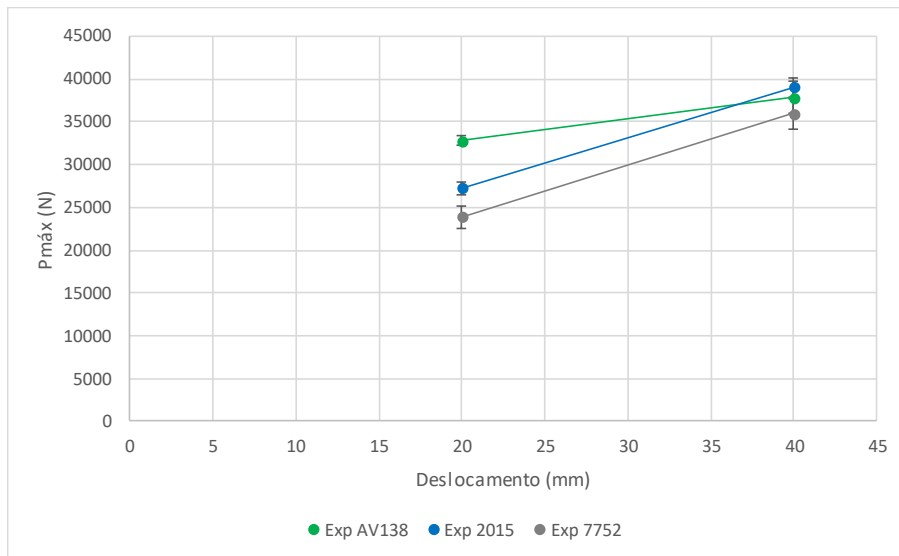


Figura 68 - Variação de $P_{máx}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [105].

Na Figura 68 encontra-se representada a comparação geral dos valores de $P_{máx}$ para as juntas de diferentes adesivos assim como o desvio padrão de cada valor de L_0 , que revela a dispersão individual dos valores de $P_{máx}$ para cada provete relativamente à respetiva média. Tabela 11 estão presentes os valores de $P_{máx} Méd$ em função de L_0 e o aumento percentual dos mesmos, para cada adesivo estudado.

Relativamente ao adesivo Araldite® AV138, para o valor de L_0 de 20 mm, este apresenta-se como sendo, dos três adesivos, aquele que suporta o carregamento mais elevado (32797,5 N). Para o caso $L_0=40$ mm, $P_{máx}$ aumenta em cerca de 15,4% até 37857,2 N. A fragilidade do Araldite® AV138 é evidenciada por este aumento relativamente reduzido.

Tabela 11 - $P_{máx} Méd$ [N] e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares [105].

Adesivo	$P_{máx} Méd$ [N] $L_0=20mm$	$P_{máx} Méd$ [N] $L_0=40 mm$	$\Delta P_{máx}$ [%]
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,4
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,4
SikaForce® 7752	23856,4	35929,9	50,6

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{máx}=27238,4$ N para um $L_0=20$ mm. No entanto, este adesivo apresenta um aumento percentual, em termos de $P_{máx}$, muito superior ao Araldite® AV138, pois trata-se de um adesivo mais dúctil e, por isso, serão induzidas

cargas mais elevadas. Consequentemente, dá-se a plastificação dos substratos. O aumento percentual é de 43,4% e, por esta razão, para um $L_0=40$ mm, a carga máxima que a junta adesiva suporta é de 39066,8 N, ou seja, apresenta uma resistência superior à do Araldite® AV138.

O adesivo SikaForce® 7752 apresenta o maior aumento de resistência percentual (50,6%) entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Tal acontecimento ocorre pois este é o adesivo mais dúctil dos três em estudo. Desta forma, para um L_0 de 20 mm, $P_{m\acute{a}x}$ é de 23856,4 N, e para $L_0=40$ mm é de 35929,9N. Contudo, apesar do grande aumento de resistência na junta adesiva, a carga máxima suportada pelos provetes com o adesivo SikaForce® 7752 manteve-se sempre abaixo dos adesivos anteriormente descritos.

O adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares para ambos os L_0 estudados, seguidos do Sikaforce® 7752, que apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos dois referidos anteriormente. De outra forma, o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, por se apresentarem como os adesivos mais dúcteis, são os que revelam um maior aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 .

3.1.5 Modelo de dano coesivo

Na análise de juntas adesivas o uso de MDC requer uma lei constitutiva de forma a descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Os MDC fundamentam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que fazem a ligação de nós homólogos dos elementos coesivos. Desta forma simula-se o comportamento elástico do material até à resistência máxima e a subsequente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [113].

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem considerar-se diferentes formas de leis coesivas de modo a obter uma maior precisão de resultados [74]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o modelo triangular [71], o linear-parabólico [70], o exponencial [72], o polinomial [73] e o trapezoidal [67]. A lei triangular é a mais usada devido a fatores como: a simplicidade, o reduzido número de parâmetros a determinar e por proporcionar resultados precisos para a maioria das condições reais [75]. O modelo exemplificativo de uma lei coesiva triangular 2D implementado no *software* ABAQUS® está representado na Figura 69, com a representação dos pontos O, A, B, C e D. No ponto O, o material ainda não se encontra carregado e não existe 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_{max}). Depois do ponto A, o material começa a sofrer dano e observa-se uma diminuição da rigidez coesiva (amaciamento do material). Num ponto genérico B (com a 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_{max} para o valor atual T_δ . No ponto C, quando a tração admissível cai para zero (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. O ponto D, por estar a seguir a C, encontra-se agora fora da zona coesiva e pertence às superfícies da rotura localizadas atrás da ponta da mesma [114].

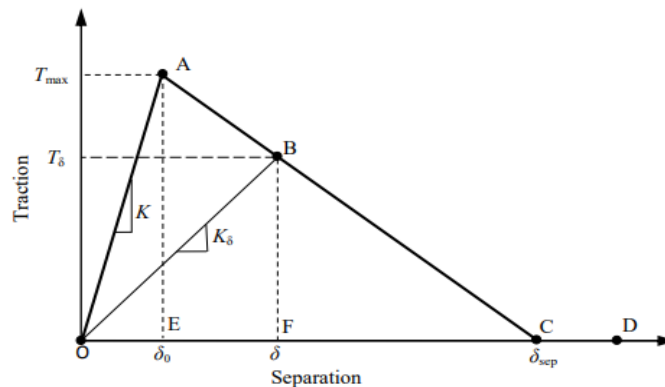


Figura 69 - Lei coesiva triangular [114].

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 $G_c = T_{max} \times \delta_{sep}/2$. 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_{max} e δ_{sep} , 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 $\delta_0 = T_{max}/K$.

Formulação do modelo

O modelo de dano triangular pode ser de dois tipos: 2D ou 3D. Como referido anteriormente o modelo implementado no *software* ABAQUS® foi o triangular 2D e neste distinguem-se o modo puro e o modo misto. Este modelo encontra-se representado na Figura 70, onde a lei de maiores dimensões representa a lei em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto. O modo puro divide-se em dois modos: no primeiro a fenda abre por esforços de tração, e no segundo em que a fenda desliza por esforços de corte [115].

No modo misto ambos os modos atuam simultaneamente, e são utilizados critérios de tensões e critérios energéticos de forma a combinar tração e corte [77].

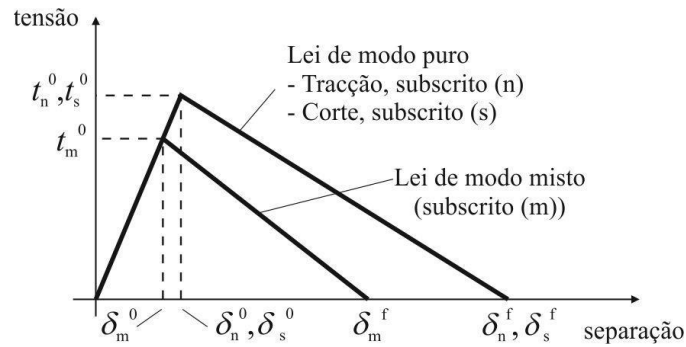


Figura 70 - MDC 2D com lei triangular [116].

Inicialmente a lei de dano triangular assume um comportamento linear elástico, que é seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva (K) que relaciona as tensões e deformações em tração e corte nos elementos coesivos (subscritos n e s , respetivamente). A matriz contém ainda os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição está dependente da formulação utilizada [117]:

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

Na formulação contínua de camadas finas de adesivo obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a seguinte equação (3), onde G é o módulo de elasticidade transversal. Este modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [77].

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

Para o modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios. Um desses critérios é o critério quadrático de tensões, expresso pela expressão (3):

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

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. O critério distingue-se pela sua precisão, testada em trabalhos anteriores [118]. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_{m^0} na Figura 70), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_{mf} , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} .

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

3.1.6 Leis coesivas para simulação do adesivo

De forma a caracterizar as leis coesivas em tração e corte, é necessário conhecer t_{n^0} , t_{s^0} , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos que, por aproximação, assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [8, 119, 120]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [121, 122]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

3.1.6.1 Araldite® AV138

Na determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso num trabalho anterior [123]. Contudo, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento adotado foi ligeiramente diferente do procedimento 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, usando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L_0=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas utilizando um método inverso de ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} , valores estes que reproduzem os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente. No trabalho [107] foi concluído que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. Na Tabela 12 encontram-se apresentados os parâmetros utilizados na simulação da camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto [107].

Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [107].

E	G	t_{n^0}	t_{s^0}	G_{IC}	G_{IIC}
4890	1560	39,45	30,2	0,20	0,38
MPa				N/mm	

3.1.6.2 Araldite® 2015

As leis coesivas da camada de adesivo no caso do adesivo Araldite® 2015 foram, da mesma forma, determinadas num trabalho anterior [123], por um método inverso para a determinação de t_{n^0} e t_{s^0} . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que consiste basicamente na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria adequados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_{n^0} ou t_{s^0} , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente, DCB para tração ou ENF para corte, com as dimensões iguais às 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 13 estão exibidos os parâmetros utilizados na simulação da camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva de modo misto [124]. Os valores de E e G , módulo de elasticidade em tensão e corte da camada de adesivo, respetivamente, foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente [123].

Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [123].

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	

3.1.6.3 SikaForce® 7752

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo SikaForce® 7752 seguiu um processo semelhante ao utilizado para o Araldite® 2015. Para a determinação

da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso, 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} [125]. Neste trabalho utilizou-se valores médios de t_{s^0} e G_{IIC} obtidos através do trabalho Azevedo [125], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, o que traduz para uma repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, adotou-se um processo diferente. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [111], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios, e o valor de t_{n^0} foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [111]. No caso particular de solicitação à tração, caso definido em trabalhos anteriores, o valor de t_{n^0} não tem influência digna de registo para variações de t_{n^0} até 25 % do valor obtido por método inverso (variação para ambos os sentidos) [111]. Desta forma, 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 [111]. A Tabela 14 apresenta os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada do adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 14 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [111].

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	

3.1.7 Condições da análise numérica

A análise numérica baseou-se no MEF e, por isso, foi selecionado o *software* ABAQUS®, versão 6.13 (*Dassault Systèmes*). Este possui grande aplicação em diversos trabalhos na área da adesão e permite a utilização do módulo integrado de MDC para prever a resistência das juntas adesivas tubulares. Possui também uma extensa biblioteca de elementos [18].

A análise pelo MEF tem por base a utilização de elementos 3D deformáveis de oito nós (C3D8R do ABAQUS®) com integração reduzida. Para a camada do adesivo utilizam-se elementos coesivos 3D (COH3D8 do ABAQUS®), fornecendo resultados precisos para este tipo de geometrias (Figura 71). O MDC usado é o modelo de dano triangular que existe no ABAQUS®, que se encontra descrito na secção 3.1.5. Neste caso, os substratos foram modelados com elementos sólidos tridimensionais de estado plano de deformação e o adesivo com elementos coesivos.

Apresentam-se de seguida os procedimentos de pré-processamento da modelação pelo MEF, citando com algum detalhe os módulos de *software* em que a informação foi introduzida: *Parts, Property, Assembly, Step, Load, Mesh e Job*.

Section Name (Type)	Material Name	Region
✓ Alumínio (Solid, Homogeneous)	Alumínio	(Picked)
✓ Adesivo (Cohesive)	Adesivo	Set-111

Figura 71 - Atribuição dos respetivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®

Nota: Este modelo caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

1º Passo – Part

Inicialmente desenvolveu-se o desenho da junta adesiva, como representado na Figura 72. Posteriormente foi executado o comando de *solid extrude* de forma a obter o modelo representado na Figura 73. Na modelação dos substratos e do adesivo desenhou-se um só corpo, que foi dividido em partições, seguido da atribuição dos respetivos materiais. As partições criadas isolam diferentes zonas da junta, como os aderentes e a camada de adesivo.

A modelação dos aderentes foi realizada com elementos 3D. Na análise de rotura por MDC considerou-se o comportamento não linear geométrico das juntas. Na Figura 73 é possível observar o modelo criado.

Como está em causa a análise de elementos 3D, o eixo de revolução é de extrema importância (assinalado com um “X” amarelo na Figura 72), pois, além de posicionar o modelo no centro do sistema de eixos, vai ditar o diâmetro da junta adesiva tubular.

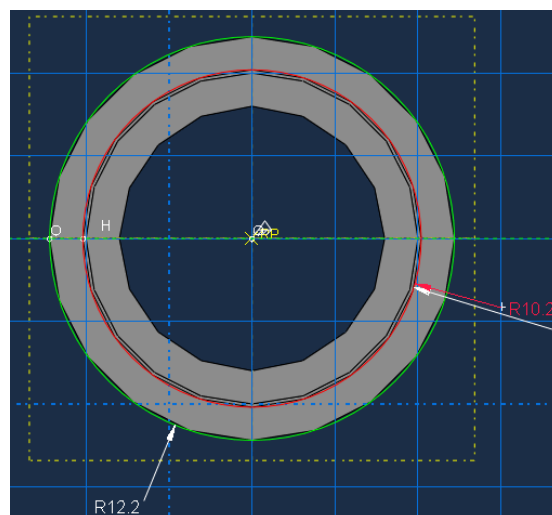


Figura 72 - Desenho 2D de uma junta adesiva tubular no ABAQUS®.

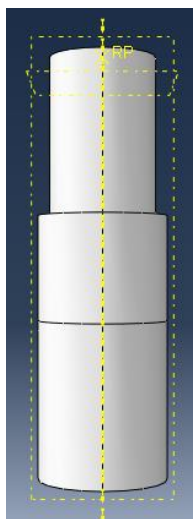


Figura 73 - Junta adesiva tubular em 3D modelada no ABAQUS® (partição observável na tubagem de maior diâmetro).

2º Passo – Property

Consiste na associação das diferentes propriedades para cada partição da estrutura desenhada no módulo anterior. Também neste módulo são criados os materiais e são atribuídas secções às respetivas partições

A camada de adesivo é modelada com propriedades coesivas.

3º Passo – Assembly

Este módulo tem como função unir as diferentes partes de um conjunto. Contudo, no presente caso, como os modelos são compostos por um só componente (dividido em partições relativas aos diferentes constituintes da junta), não foi necessário efetuar nenhuma operação.

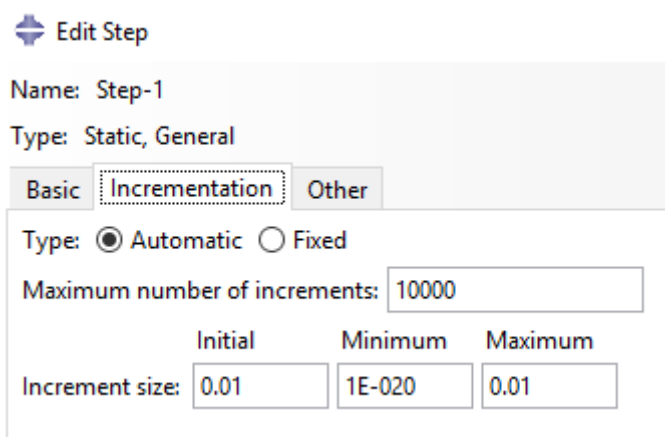
4º Passo – Step

Neste passo são introduzidos os parâmetros de computação da simulação, como o número máximo de incrementos que o modelo pode conter e os limites de tamanho destes. Na construção do modelo numérico a incrementação é um aspeto importante a ter em conta. Neste módulo é necessário definir um tamanho mínimo de incremento suficientemente reduzido, para que o *software* não tenha problemas de convergência na zona de propagação do dano. Por outro lado, o limite superior de incrementos que a análise pode conter deve ser elevado o suficiente para que a análise não termine devido a exceder o número de incrementos permitido.

Na Figura 74 são referidos os valores utilizados na incrementação para a grande maioria das análises. Considerou-se um tamanho inicial de incremento de 1% do deslocamento aplicado nos modelos. Considerou-se igualmente, um tamanho máximo de incremento

de 1% do deslocamento aplicado nos modelos. O número máximo de incrementos a realizar considerado foi de 10000.

Optou-se por um valor extremamente reduzido para o tamanho mínimo do incremento, de forma a contabilizar a redução de tamanho do incremento que o *software* necessita de aplicar durante a fase da propagação de dano com sentido a evitar os problemas de convergência associados.



✚ Edit Step

Name: Step-1

Type: Static, General

Basic Incrementation Other

Type: Automatic Fixed

Maximum number of increments: 10000

Increment size:	Initial	Minimum	Maximum
	0.01	1E-020	0.01

Figura 74 - Definição de incrementos para análise no *software* ABAQUS®.

5º Passo – Load

Neste módulo aplicam-se as condições fronteira à junta adesiva de forma a simular o carregamento à torção. As condições fronteira utilizadas nas simulações realizadas observam-se nas Figura 75, Figura 76 e Figura 77.

Numa das extremidades do substrato é simulado um encastramento (Figura 75). Contudo, foi também necessário impedir o movimento rotacional provocado pela força torsional. Para tal, retirou-se à extremidade encastrada a capacidade rotacional (Figura 76). Na outra extremidade foi necessário aplicar um deslocamento. Para tal, criou-se um *reference point* (RP) no ponto central do tubo e realizou-se a sua ligação a vários pontos ao longo do diâmetro externo (Figura 78). Desta forma foi possível aplicar a deslocação torsional no ponto criado e assim realizar os ensaios.

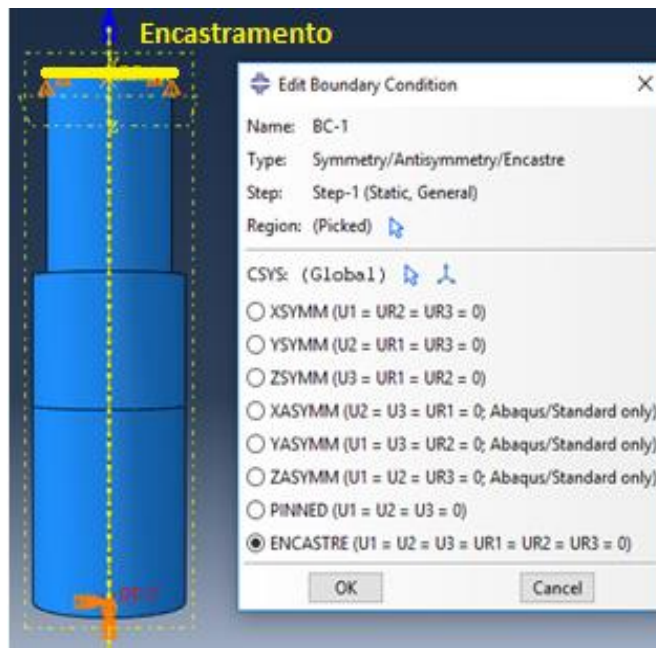


Figura 75 - Representação das condições fronteira na simulação (encastramento).

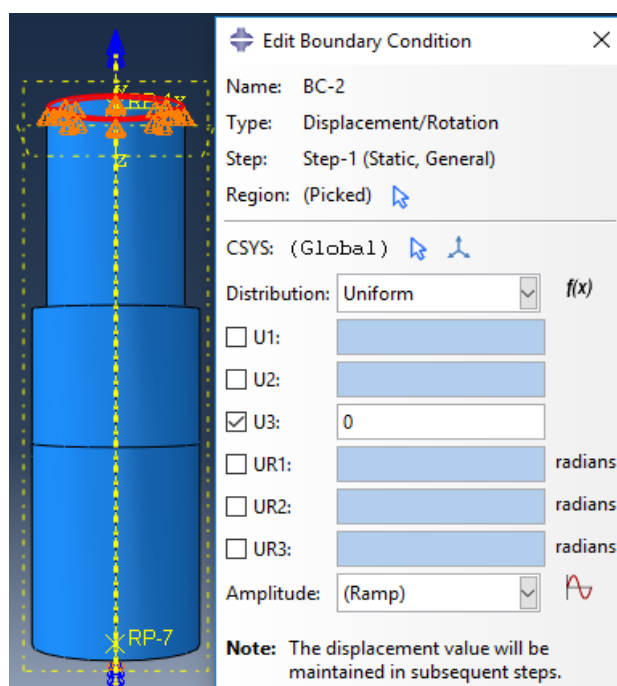


Figura 76 - Representação das condições fronteira na simulação (rotação nula na extremidade do tubo com menor diâmetro).

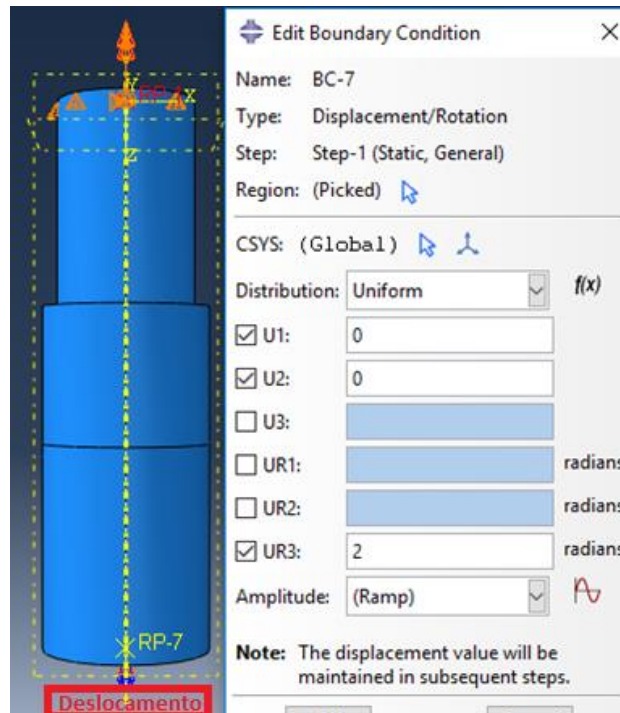


Figura 77 - Representação das condições fronteira na simulação (ângulo de rotação).

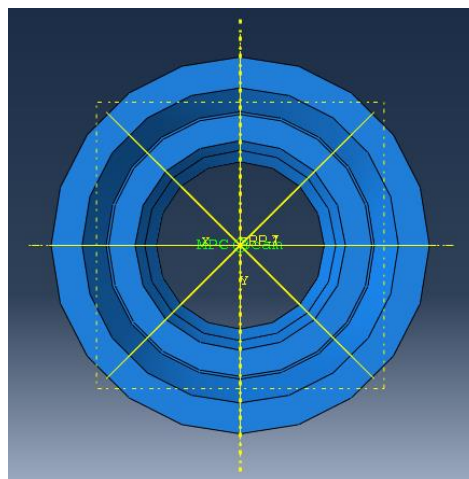


Figura 78 - Representação do RP e respetiva ligação a vários pontos.

6º Passo – Mesh

Neste passo de construção do modelo é efetuada a discretização da malha, após definidos os tamanhos de malha em cada aresta do modelo. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. Na junta tubular adesiva existem variações das dimensões da malha, esta é mais refinada na zona da camada adesiva (zona de contacto das duas tubagens) e nas suas proximidades, como observado na Figura 79, quando comparada com as extremidades de ambos os tubos.

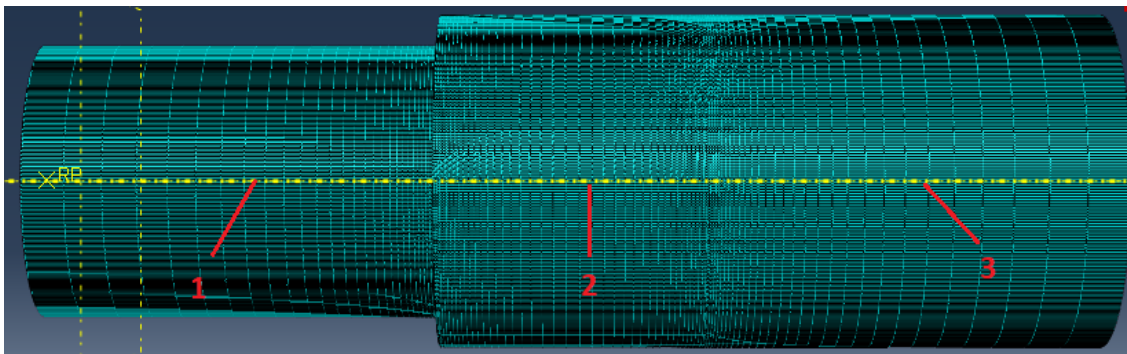


Figura 79 – Ilustração da malha refinada.

Devido à necessidade de obter valores de tensão com elevada precisão foram atribuídos valores ao número de elementos e ao *bias ratio*, em função de L_0 . O *bias ratio* é definido como o rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo. Nos comprimentos marcados com o ponto 1 e 3 na Figura 79 foram utilizados *single bias* com 0,2 mm de valor mínimo e 3 mm de valor máximo para o tamanho do elemento. No comprimento referente ao ponto 2 foi utilizado um *double bias* com 0,2 mm de valor mínimo e 1 mm de valor máximo.

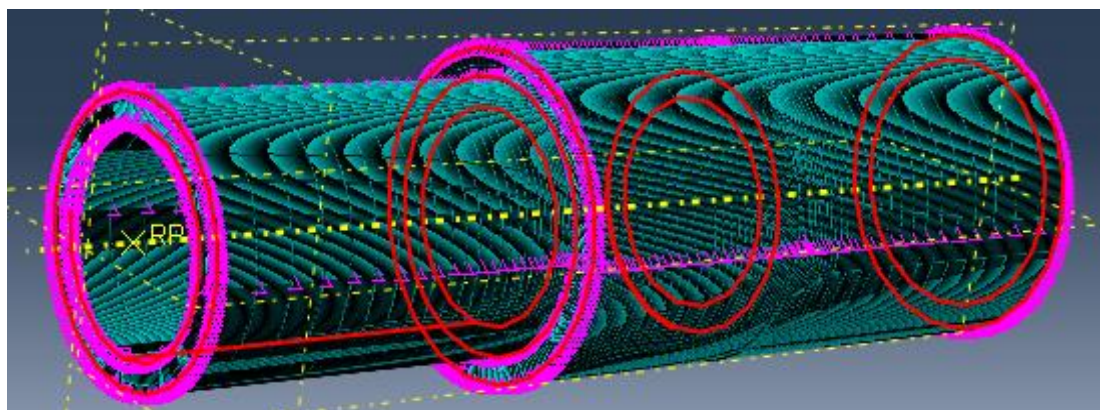


Figura 80 - Refinamento da malha nas arestas da tubagem.

Para as arestas das tubagens, incluindo as da sobreposição, foram considerados 60 elementos (Figura 80). Nas divisórias nas várias partições criadas foi considerado um *single bias* com mínimo de 0,2 mm e um máximo de 1,5 mm (Figura 81).

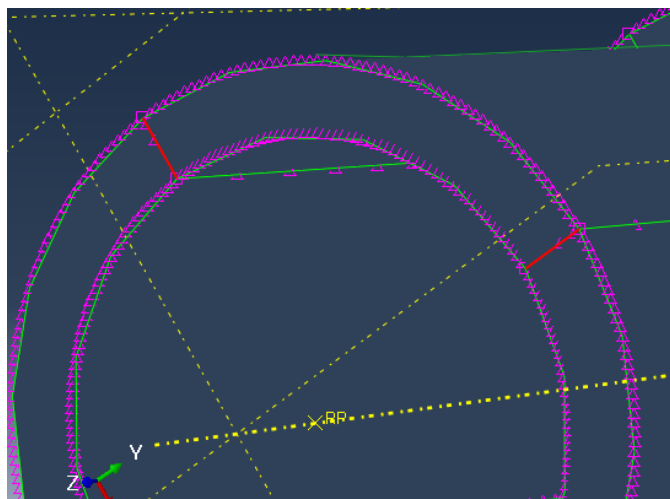


Figura 81 - Refinamento da malha nas zonas de partição da tubagem.

Os diferentes valores atribuídos têm como finalidade a redução do esforço computacional, garantindo simultaneamente a precisão dos resultados. Visto tratar-se de um modelo 3D, o esforço computacional foi bastante elevado.

Posteriormente, através da função *Assign Element Type*, foi introduzida viscosidade aos elementos coesivos de forma a evitar problemas de convergência, resultando num processo mais suave.

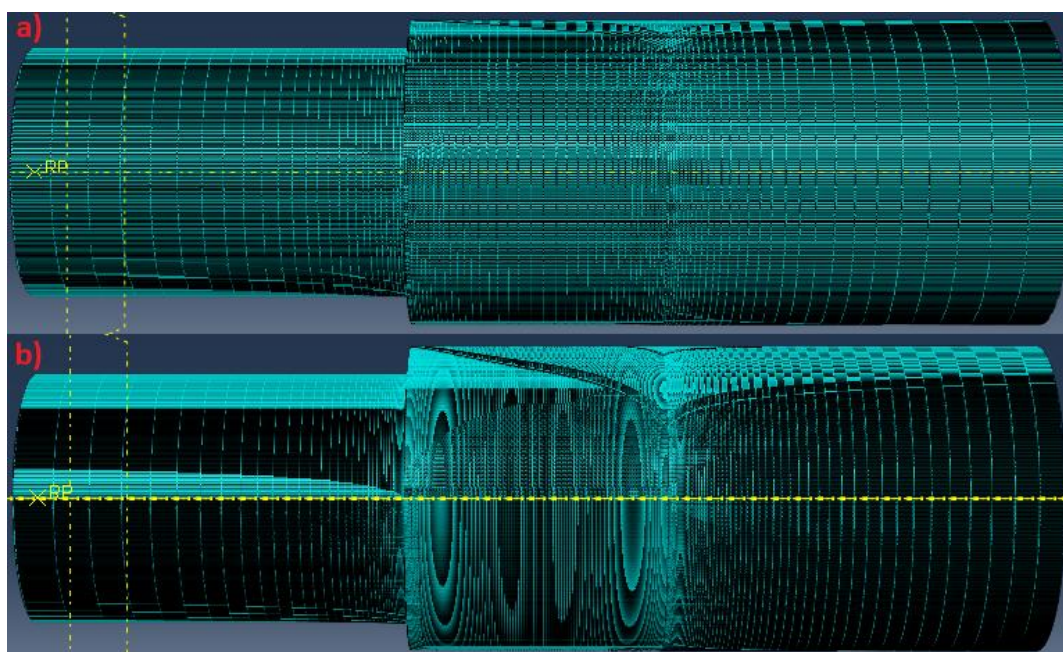


Figura 82 - Malha refinada para: (a) análise de resistência e (b) análise de tensões.

Foram também aplicados os *Mesh Controls* em função do tipo de elemento. No caso dos elementos sólidos foi utilizada uma malha estruturada e, no caso dos elementos adesivos, foi utilizada uma malha do tipo *sweep*.

Verifica-se que a malha utilizada no teste de análise de tensões é bastante mais refinada do que a malha usada para a análise de resistência, de forma a conseguir capturar os elevados gradientes de tensões ao longo do adesivo. A malha na Figura 82(b) é cerca de quatro vezes mais refinada do que a da Figura 82(a).

Na análise de resistência, foi utilizada uma malha menos refinada do que a utilizada para a análise de tensões para reduzir o esforço computacional associado, garantindo simultaneamente que a precisão dos resultados em zonas com grandes variações de tensões não era comprometida.

7º Passo – Job

Neste módulo realizam-se os testes dos modelos criados. Para o modelo de análise de resistência, os testes decorrem até ao fim do deslocamento imposto, de maneira a atingir a rotura total da estrutura. Quanto ao modelo de análise de tensões apenas é necessário um incremento de análise, uma vez que se pretende extrair as tensões no domínio elástico do carregamento.

3.1.8 Análise de tensões na junta

Neste capítulo é realizada a comparação da distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e das tensões de corte (τ_{xy}) localizadas a meio da espessura do adesivo para as juntas adesivas tubulares. Considera-se os diferentes valores de L_0 de forma a compreender a forma como as mesmas variam em função deste parâmetro. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , que representa a média de valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de L_0 . As seguintes figuras mostram as distribuições das tensões σ_y e τ_{xy} em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$), em que x está definido na Figura 64.

3.1.8.1 Tensões de arrancamento

As distribuições das tensões σ_y para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 83.

De uma forma geral verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , exceto em zonas localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [126, 127]. Na região interior 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 governada pela deformação dos substratos e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma. As tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura prematura [118, 119]. As tensões σ_y na região central da sobreposição são aproximadamente nulas, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de L_0 .

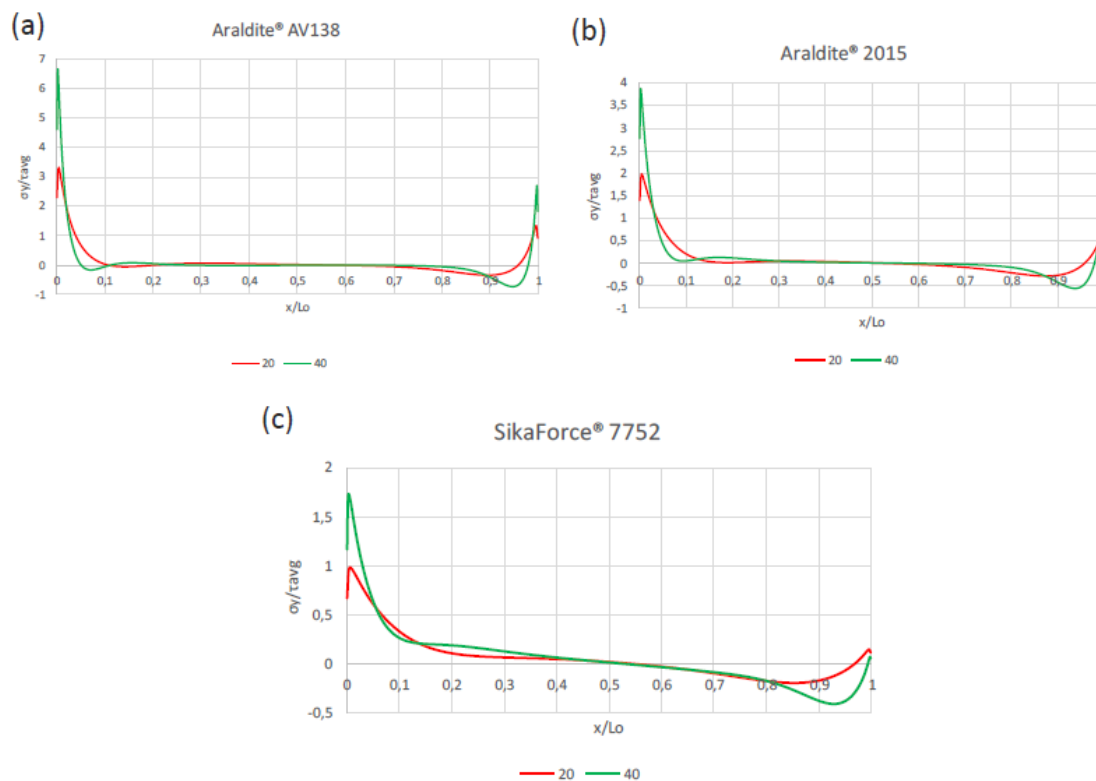


Figura 83 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [105].

Para valores de L_0 mais elevados, observam-se picos compressivos na proximidade das singularidades, que aumentam de magnitude com L_0 . Ao mesmo tempo, as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se menos significativas. Esta tendência tende a parar a propagação de dano, após dano localizado nas zonas de singularidades [128], justificando algumas vezes que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é obtido após a iniciação da fenda [129]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 deve reduzir a resistência média da junta relativamente à área de ligação, especialmente para juntas com adesivos frágeis [130].

A partir dos gráficos apresentados na Figura 83 é possível verificar que o adesivo Araldite® AV138, comparativamente aos outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, que correspondem às extremidades de L_0 na junta da camada de adesivo. 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.

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 83 (c), formaram-se picos de concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva claramente inferiores aos dos outros adesivos (Tabela 15).

Tabela 15 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [105].

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,30	6,65
Araldite® 2015	1,99	3,88
SikaForce® 7752	0,98	1,73

3.1.8.2 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 84.

Tal como para a distribuição de tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} demonstra valores mais reduzidos na região central de L_0 e atinge o máximo nas extremidades da sobreposição [131, 132]. 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 [56, 133, 134]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos, causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se empreguem adesivos frágeis a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades de sobreposição [134]. 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 [119, 135].

O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} observado foi para o Araldite® AV138 (Tabela 16). 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 este adesivo 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 16).

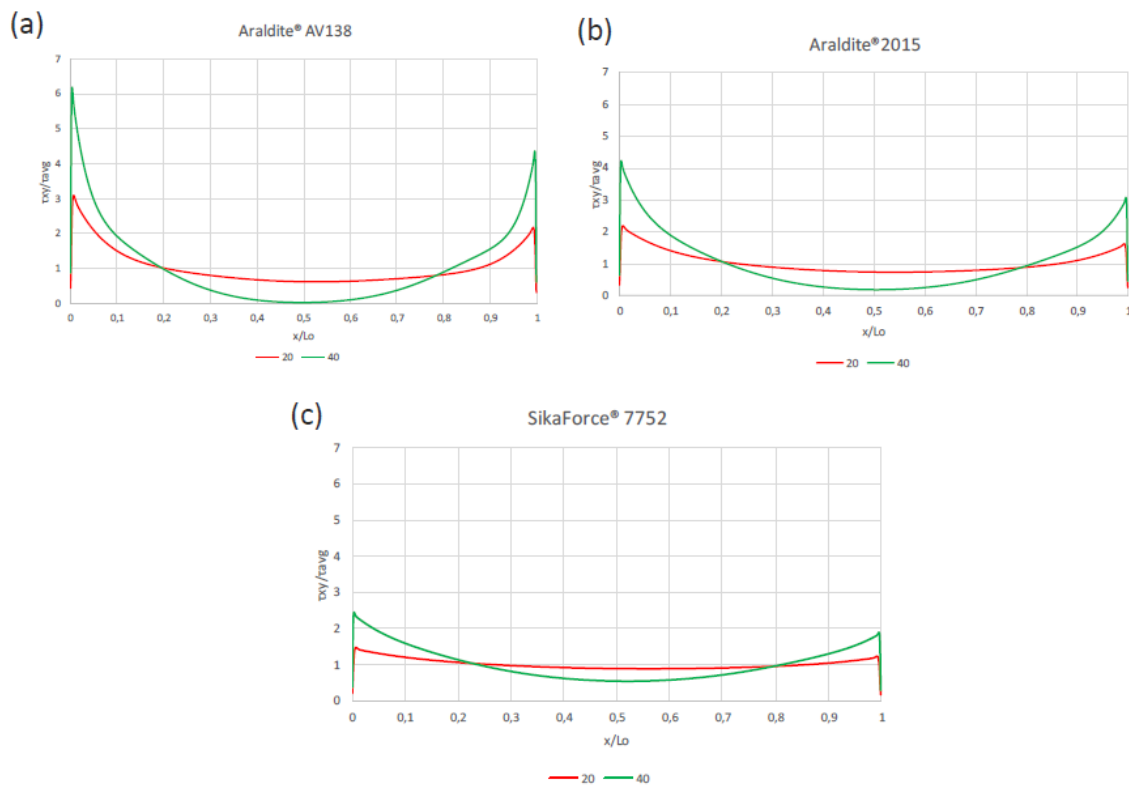


Figura 84 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [105].

Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [105].

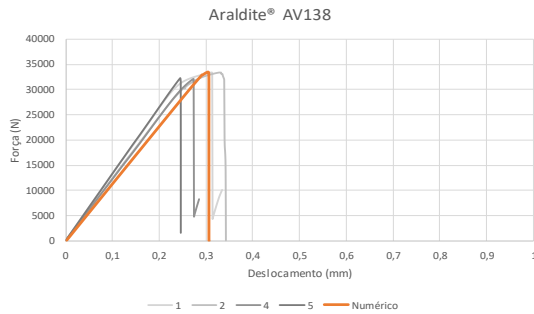
Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,08	6,19
Araldite® 2015	2,19	4,24
SikaForce® 7752	1,46	2,43

3.1.9 Previsão da resistência por MDC

No seguinte capítulo é executada uma comparação dos resultados dos ensaios experimentais com as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelos MDC, efetuando assim a respetiva validação do modelo. Desta forma, será possível a posterior realização do estudo paramétrico, uma vez que tanto o MDC como as propriedades obtidas dos materiais se encontram devidamente validadas. Nas figuras que se seguem apresentam-se as curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC (Figura 85, Figura 86 e

Figura 87, para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

(a)



(b)

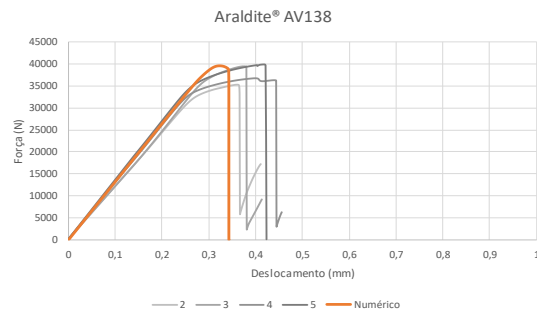
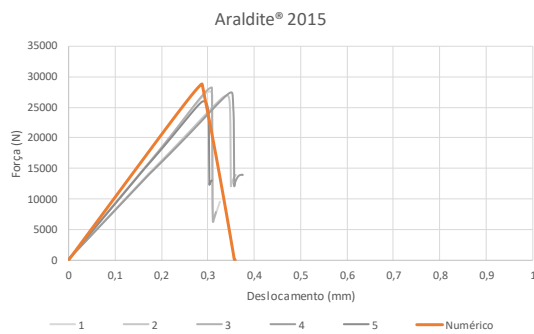


Figura 85 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [105].

(a)



(b)

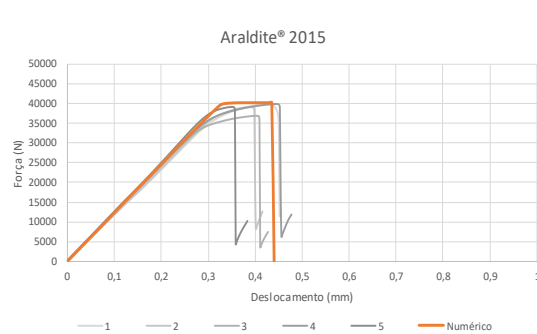
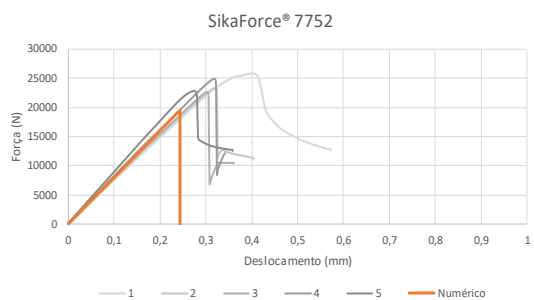


Figura 86 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [105].

(a)



(b)

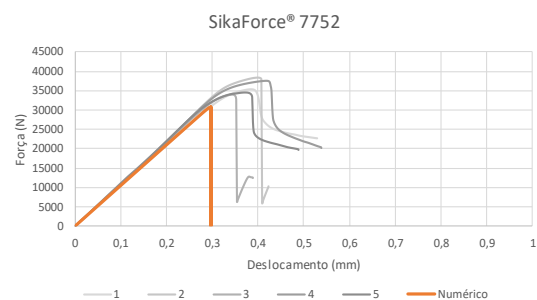


Figura 87 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [105].

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se empregaram os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 85 e Figura 86, respetivamente), em relação à $P_{m\acute{a}x}$,

rigidez e deslocamento de rotura [136]. No caso do SikaForce® 7752 (Figura 87), visto tratar-se de um adesivo bastante dúctil, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais [4]. Por esta razão, os resultados experimentais ($P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento da carga máxima) são ligeiramente superiores aos numéricos. No entanto, existe uma boa correlação das curvas obtidas experimentalmente para este adesivo.

3.1.10 Discussão dos resultados obtidos

Observou-se que o adesivo Araldite® AV138 consegue uma resistência superior relativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752 (Tabela 17). Esta diferença é bem evidente para $L_0=20$ mm, cujo $P_{m\acute{a}x}\approx 33$ kN. Com o aumento de L_0 (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, devido à capacidade limitada de plastificação deste último mencionado [23]. Assim, o resistente mas frágil Araldite® AV138 permite um valor mais elevado de $P_{m\acute{a}x}$ do que os restantes adesivos para $L_0=20$ mm, mas a ductilidade característica do Araldite® 2015, como foi mencionado na secção 3.1.4, permitiu um aumento percentual de 43,4% para $L_0=40$ mm e, como tal, observou-se um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$, superando o $P_{m\acute{a}x}$ do Araldite® AV138. O Sikaforce® 7752 combina uma alta resistência e ductilidade, e a rotura ocorre em condições que se assemelham à plastificação generalizada até grandes valores de L_0 [135]. As juntas com este adesivo apresentaram-se como sendo as menos resistentes, uma vez que tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ 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 de $P_{m\acute{a}x}$ (50,6%) permitiu uma grande, aproximando-o dos restantes adesivos para $L_0=40$ mm.

Posto isto, verifica-se que o Araldite® 2015 e o SikaForce®, que são os adesivos mais dúcteis, apresentam aumentos percentuais elevados entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Este aumento 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.

Tabela 17 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0 [105].

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	32797	37857
Araldite® 2015	27238	39067
SikaForce® 7752	23856	35930

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 84) [5].

No que concerne às tensões σ_y (Figura 83), na extremidade interior da ligação registam-se picos de compressão [137]. Isto deve-se sobretudo ao carregamento simétrico nas juntas, que evita a deflexão transversal do substrato interior [115, 138]. Com isto ocorre uma redução das tensões de pico σ_y para todos os valores de L_0 [139]. Na região central os valores das tensões σ_y são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da sobreposição com o incremento de L_0 .

No que respeita ao perfil de tensões τ_{xy} (Figura 84), verificam-se picos de tensões τ_{xy} de maior magnitude na extremidade exterior, 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 $x/L_0=0$ [23].

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 83, Figura 84, Tabela 15 e Tabela 16). Este comportamento é mais evidente para valores de L_0 mais elevados. A Figura 83 e a Figura 84 revelam que os perfis das tensões σ_y e τ_{xy} tornam-se mais constantes com a redução de L_0 , o que torna as sobreposições menores mais dependentes da resistência do adesivo. Por outro lado, um adesivo frágil sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona 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 [140].

Com isto, é possível aferir que o adesivo Araldite® AV138 é o que confere à junta adesiva tubular a maior resistência mecânica para L_0 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_f e também devido à capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [134]. 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® demonstrou ser o adesivo menos resistente dos três. A partir do perfil de tensões τ_{xy} da Figura 84 (c) é fácil constatar uma boa uniformidade na distribuição de tensões, mais óbvia para valores de L_0 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 reduz a probabilidade da mesma sofrer uma rutura prematura (desde que a carga aplicada esteja dentro dos limites de resistência do material).

3.1.11 Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais

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. A Figura 88 representa os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e as previsões numéricas, considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

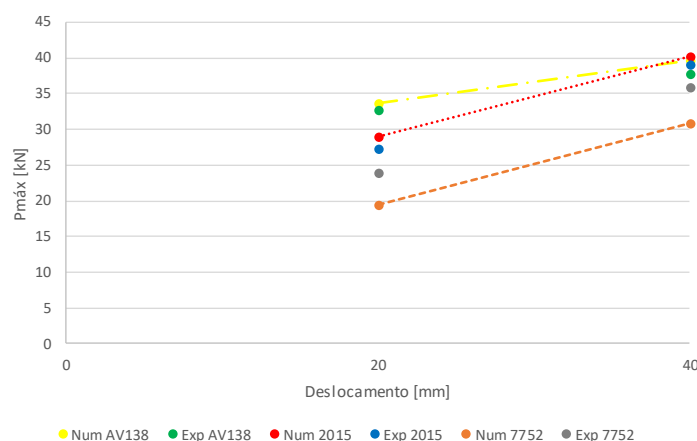


Figura 88 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [105].

Na Tabela 18 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para os três adesivos, em função de L_0 . Na mesma tabela estão

presentes as diferenças relativas para cada um, de forma a permitir uma maior facilidade na comparação dos mesmos.

Tabela 18 – Valores de $P_{máx}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa [105].

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
L_0 [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

As previsões da Figura 88 demonstraram, de um modo geral, que os valores obtidos por MDC e experimentalmente relativamente a $P_{máx}$ são muito próximos para as juntas adesivas tubulares com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Por outro lado, observa-se 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 $L_0=20$ mm a diferença relativa foi de 2,4% e, para $L_0=40$ 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 $P_{máx}$ experimentais e numéricos de 6,1% para $L_0=20$ mm (com os valores obtidos pelo MDC superiores aos experimentais). Esta discrepância é aceitável pois é, de facto, muito reduzida, uma vez que $P_{máx}$ experimental ≈ 27 kN e $P_{máx}$ numérico ≈ 29 kN. Esta percentagem torna-se ainda mais reduzida para $L_0=40$ mm (2,9%). Desta forma, 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 que utilizam o adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{máx}$ obtidos pelo método numérico são bastante inferiores aos experimentais. 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 [110]. 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_n^0 e t_s^0) e de tenacidade à fratura (G_{IC} e G_{IC}) tenham sido estimados corretamente [141]. Posto isto, a diferença entre os valores experimentais e MDC para o SikaForce® 7752 é bastante evidente: 18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3 para $L_0=40$ 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.

3.2 Trabalho numérico

Neste segmento da dissertação procede-se ao estudo paramétrico das juntas adesivas tubulares previamente descritas no subcapítulo 3.1.1. A análise numérica realizada teve por base o *software* ABAQUS®, que se baseia no MEF. A sua escolha deve-se ao facto de possibilitar a utilização do MDC, de forma prever a resistência das juntas adesivas tubulares.

O estudo consiste na modificação dos parâmetros geométricos das juntas adesivas tubulares e verificar, a partir das curvas $P-\delta$ e dos gradientes de tensões σ_y e τ_{xy} , as alterações na resistência destas. As alterações geométricas efetuadas para a realização dos estudos numéricos aqui referenciados foram: variação de L_0 , de t_{Si} e de t_{Se} .

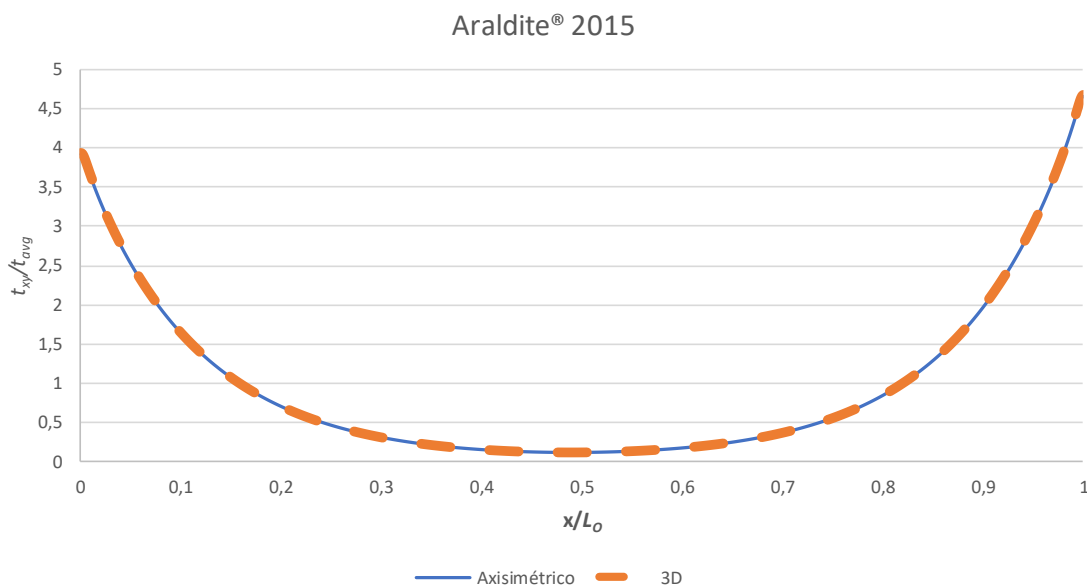


Figura 89 - Comparação de curvas de t_{xy}/t_{avg} entre os modelos axisimétrico e tridimensional.

De forma a ser possível realizar os ensaios de tensões no *software* ABAQUS® foi necessário produzir novos modelos, pois os modelos 3D continham uma quantidade demasiado elevada de elementos para ser possível realizar a sua análise no *Hardware* disponível. Enquanto que os modelos utilizados para retirar as curvas $P-\delta$ eram em 3D,

os utilizados para a análise de tensões eram axissimétricos. Desta forma facilitou-se a realização da análise no *software*. Os modelos 3D eram impossíveis de realizar na totalidade no *Hardware* disponível devido ao elevadíssimo número de elementos.

De forma a verificar a legitimidade das curvas retiradas dos modelos axissimétricos será realizada uma comparação com uma curva de um dos modelos 3D com menor número de elementos (Figura 89).

3.2.1 Geometrias analisadas

De forma a realizar a análise numérica foram considerados certos parâmetros geométricos, como o L_0 , assim como t_{si} e t_{se} . Tal análise vai consistir num estudo da resistência das juntas e do seu comportamento em função das tensões instaladas para os principais parâmetros geométricos anteriormente referidos.

Inicialmente, é realizado o estudo numérico considerando a variação de L_0 , num intervalo de 20 mm a 40 mm. Para os dois comprimentos selecionados procedeu-se à análise das juntas adesivas tubulares variando a espessura dos tubos de alumínio, sendo que esta espessura variou entre 1 mm e 5 mm. Este ponto foi dividido em dois, o primeiro considerando apenas a alteração de t_{si} , numa segunda fase, considerando apenas a variação de t_{se} ;

3.2.2 Análise de tensões na junta

Neste capítulo é realizada a comparação da distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e das tensões de corte (τ_{xy}) localizadas no meio da espessura do adesivo para as juntas adesivas tubulares. Considera-se os diferentes valores de L_0 , de t_{si} e de t_{se} de maneira a compreender a forma como estas variam em função deste parâmetro. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , que representa a média de valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de L_0 . As seguintes figuras mostram as distribuições das tensões σ_y e τ_{xy} em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$).

3.2.2.1 Tensões de corte

Este subcapítulo estuda as tensões τ_{xy} , e a respetiva influência da variação dos parâmetros L_0 , t_{se} e t_{si} da junta, assim como o adesivo utilizado.

As distribuições das tensões τ_{xy} para os três adesivos utilizados nas juntas adesivas tubulares são apresentadas seguidamente (Figura 90).

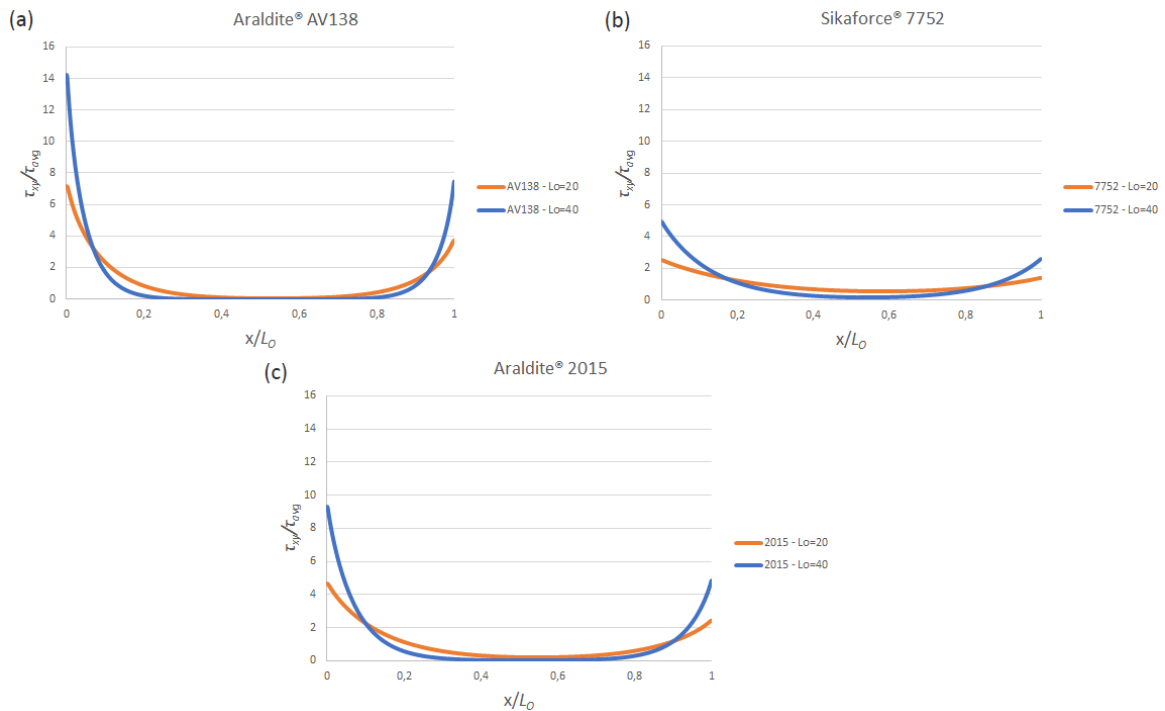


Figura 90 - Comparação entre L_0 para as distribuições das tensões τ_{xy} para os três adesivos utilizados nas juntas adesivas tubulares ((a) Araldite® AV138, (b) SikaForce 7752 e (c) Araldite® 2015) na condição $t_{S1}=t_{Se}=2$ mm.

O objetivo desta secção é analisar as tensões de corte da junta. Na Figura 90 é possível observar a variação da tensão de corte (τ_{xy}/τ_{avg}), normalizada pela tensão de corte média (τ_{avg}), registada ao longo da zona de sobreposição da ligação adesiva para os L_0 estudados. Para todos os casos apresentados a distribuição de tensões τ_{xy} apresenta valores mais reduzidos, praticamente nulos, na região central de L_0 , atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição. Na região central referente à sobreposição dos aderentes estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} , devido ao ângulo de rotação relativa entre os aderentes [131, 132].

O valor mais elevado de τ_{xy}/τ_{avg} observado foi para o Araldite® AV138. Uma vez que é o adesivo mais frágil de todos, geram-se picos de concentração de tensões τ_{xy} muito elevados nas extremidades das juntas que utilizem este adesivo. Como tal, o valor de rigidez presente nas extremidades pode condicionar a resistência da junta e conduzir a uma rotura prematura desta.

As tensões τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos, causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas compostas por adesivos frágeis, a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões τ_{xy} não serem favoravelmente redistribuídas pela camada adesiva, o que por sua vez não permite plastificação nas extremidades da sobreposição. Por outro lado, os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões pela camada adesiva.

Verifica-se uma clara distinção entre os picos de tensões, na qual a tensão de corte na extremidade esquerda do L_0 é muito superior à da extremidade direita do L_0 . Isto ocorre pelo facto de as áreas dos aderentes serem diferentes. Uma vez que se trata de um caso de tubagem sobreposta, o aderente exterior possuirá maior área, quando comparado com o aderente interior, de forma a que a sobreposição se possa realizar. Isto resulta em tensões superiores na extremidade esquerda da zona de sobreposição referente ao aderente com menor área de secção reta (Figura 91).

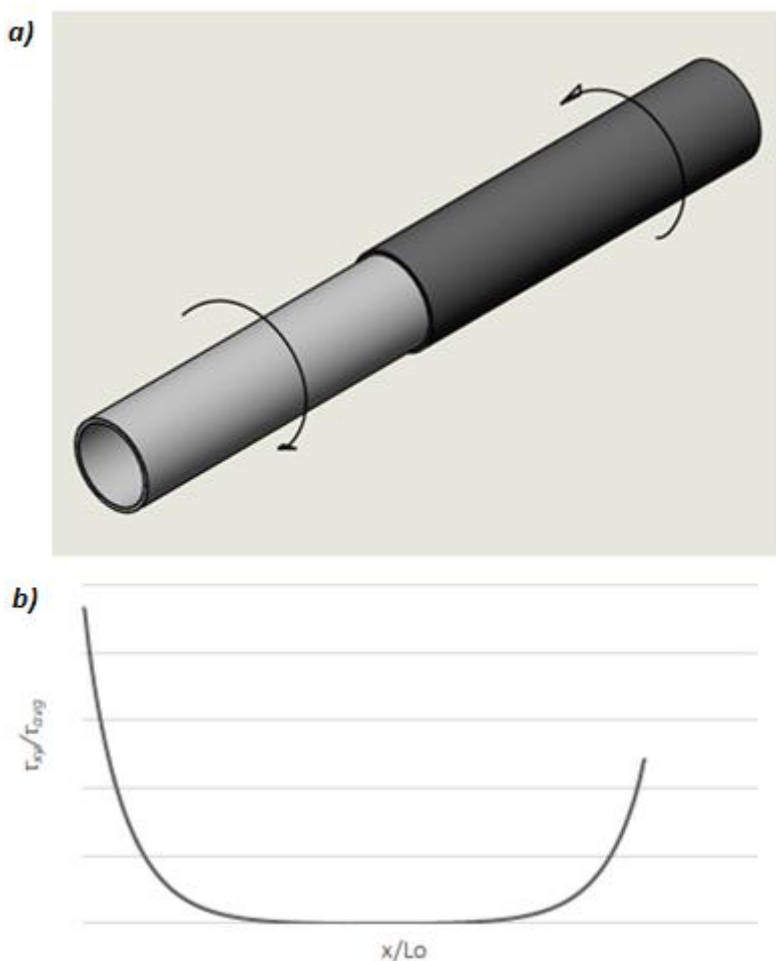


Figura 91 – Ilustração a) diferença de diâmetro entre ambos os aderentes e b) respetivo gráfico ilustrativos dos efeitos resultantes nas tensões de corte nas extremidades.

Verifica-se que para um valor de L_0 mais elevado (Figura 90) (exemplo, linha azul $L_0=40$ mm), regista-se uma maior tensão de corte. De reparar que este fenómeno é observado em todos os gráficos, significando que a influência de L_0 é idêntica para os 3 adesivos.

O pico de maior tensão (valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg}) corresponde ao adesivo mais frágil, que neste caso se trata do Araldite® AV138, seguido do Araldite® 2015. Por último, o adesivo que apresenta os picos de tensão mais curtos é o SikaForce® 7752.

Compara-se agora a distribuição das tensões de corte no substrato interior e no substrato exterior consoante a variação de espessura interior ou exterior dos substratos.

Para tal são apresentados somente os gráficos do adesivo Araldite® 2015, uma vez que os adesivos apresentam distribuições semelhantes. Desta forma estudar-se-á somente o adesivo de ductilidade intermédia.

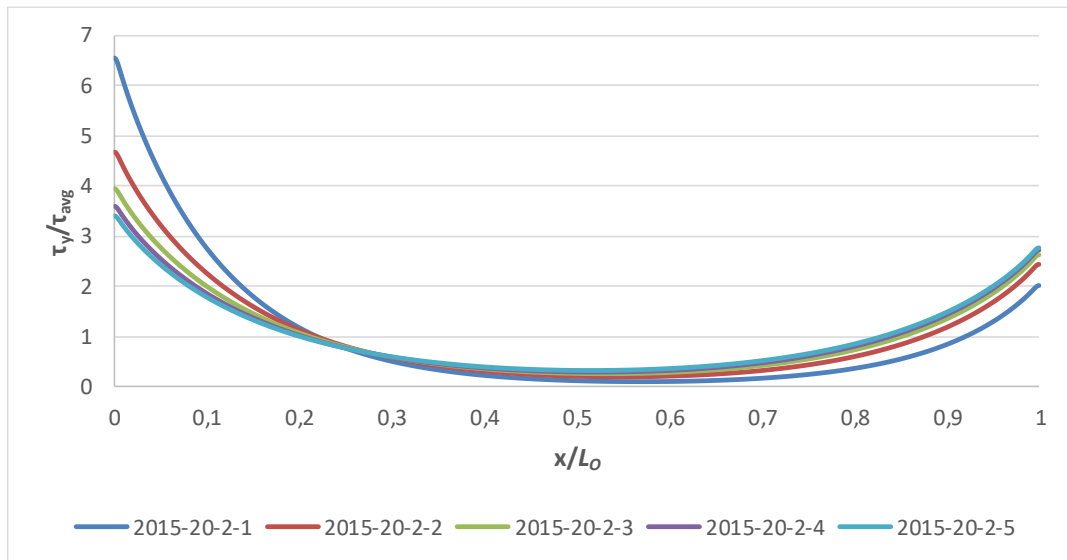


Figura 92 – Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=20$ mm e para variação de t_{si} .

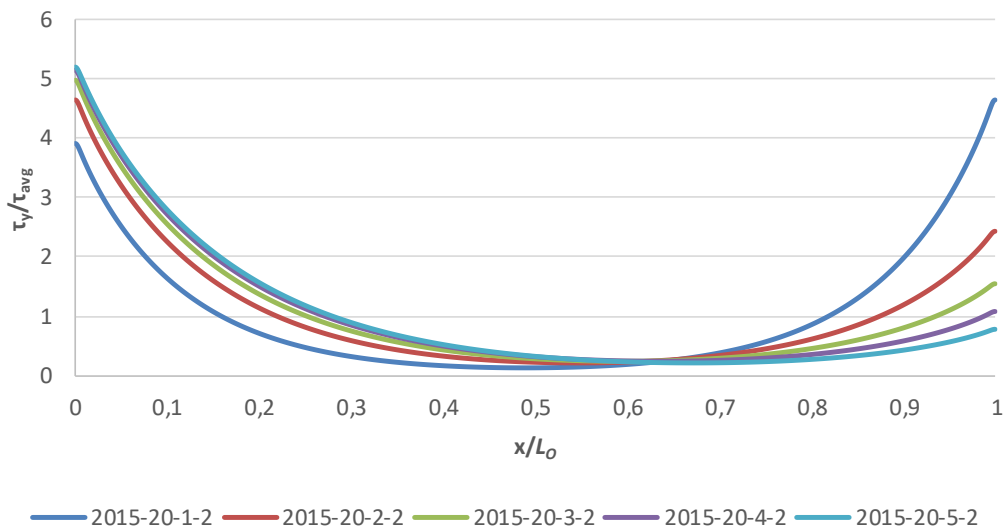


Figura 93 - Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=20$ mm e para variação de t_{se} .

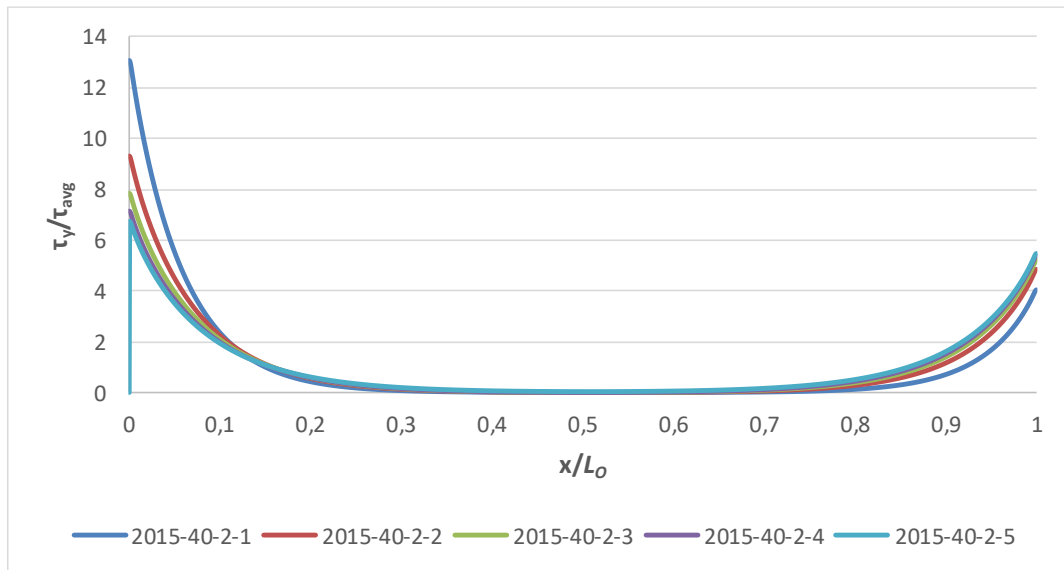


Figura 94 - Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=40$ mm e para variação de t_{Si} .

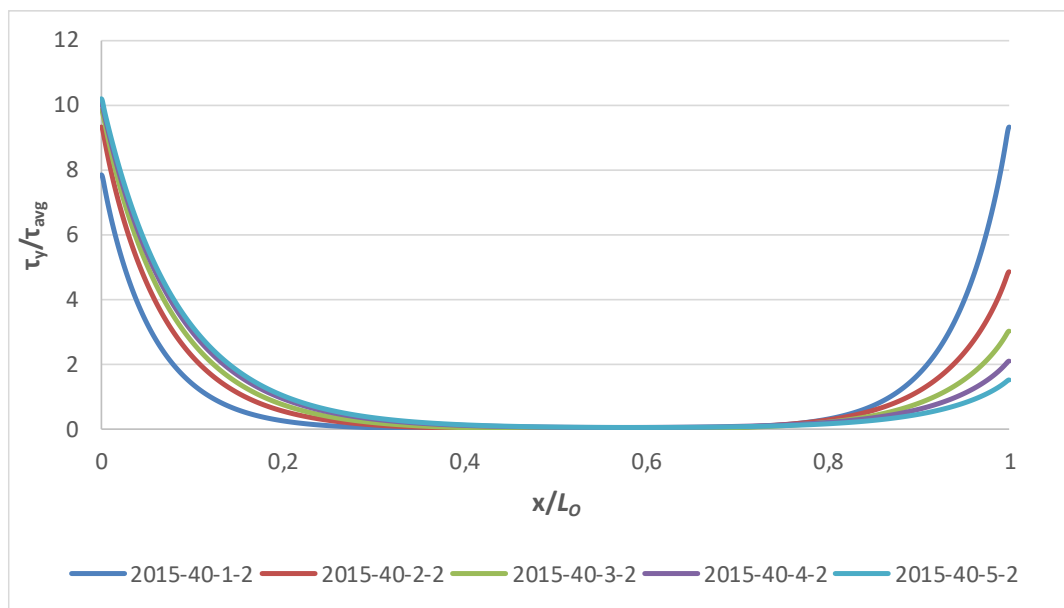


Figura 95 - Distribuição de tensões de corte na junta colada com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=40$ mm e para variação de t_{Se} .

Ao analisar os gráficos (Figura 92, Figura 93, Figura 94 e Figura 95) é verificável que o pico de maior tensão ocorre para valores mais baixos de t_{Si} . Ou seja, a tensão de corte diminui com o aumento da espessura do aderente interior. Para o substrato exterior é possível verificar o oposto. O maior pico de tensão ocorre para o valor de t_{Se} mais elevado.

3.2.2.2 Tensões de arrancamento

Como o caso em estudo se trata de um carregamento de torção pura não existem componentes normais de tensão. Desta forma as tensões de arrancamento não serão abordadas neste trabalho.

3.2.3 Estudo da variável de dano

No subcapítulo que se segue, irá ser apresentado um estudo incidente na variável de dano, estudando os efeitos resultantes da influência de parâmetros como, L_0 , t_{si} e t_{se} nos casos de estudo.

Para tal, o parâmetro utilizado no estudo foi o *Stiffness Degradation* (SDEG), tendo este sido medido na camada de elementos coesivos representativos do adesivo, e ao longo da sobreposição dos aderentes. Esta variável foi retirada no instante de $P_{máx}$ e fornece uma estimativa da degradação da rigidez da lei coesiva em modo misto do MDC (Figura 56) e varia entre 0 (ausência de dano) e 1 (rotura completa).

3.2.3.1 Araldite® AV138

Para o adesivo Araldite® AV138 verifica-se uma variação abrupta nas extremidades da sobreposição. Sendo que se trata de um adesivo mais frágil, a rotura do adesivo nas extremidades ocorre com grande facilidade e, por consequência, a rotura da junta. A sua inability de distribuir tensões causa que estas fiquem sempre localizadas nas extremidades.

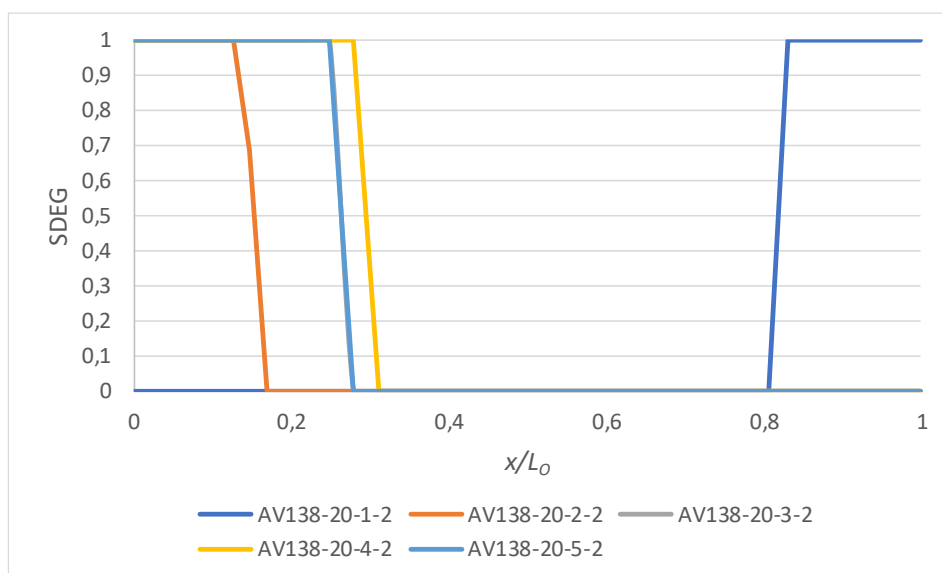


Figura 96 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{se} .

A ocorrência de dano tende a registrar-se mais perto da extremidade esquerda para valores de espessura do aderente (t_p) inferiores. À medida que se aumenta os valores de t_p , os registos de rotura vão progredindo ao longo do comprimento da junta adesiva.

Para o valor de maior t_{sj} ou t_{se} (5 mm), a zona de rotura ocorre na extremidade mais à direita.

Verifica-se que independentemente do valor de L_0 , existe uma zona central na camada de adesivo onde não se regista qualquer dano.

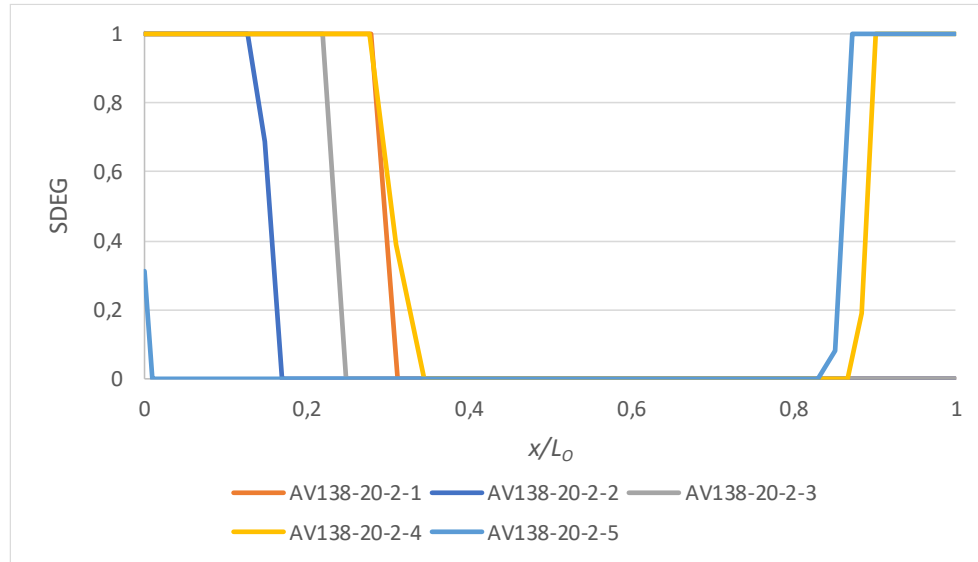


Figura 97 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{sj} .

Para $L_0=40$, analisando o gráfico para t_{se} (Figura 98), verifica-se que o local de rotura ocorre em zonas mais centrais do adesivo comparativamente ao caso $L_0=20$.

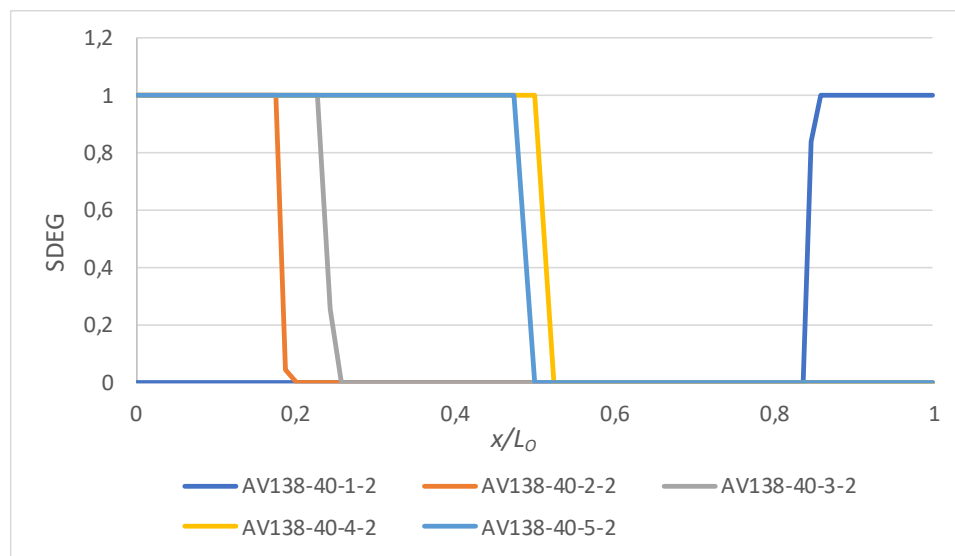


Figura 98 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{se} .

Para os provetes com variação de t_{Si} (Figura 99) é de notar a evolução do dano. Para espessuras superiores ocorre dano em ambas as extremidades do adesivo, chegando mesmo a existir rotura nos dois lados no caso em que t_{Si} é igual a 4 mm.

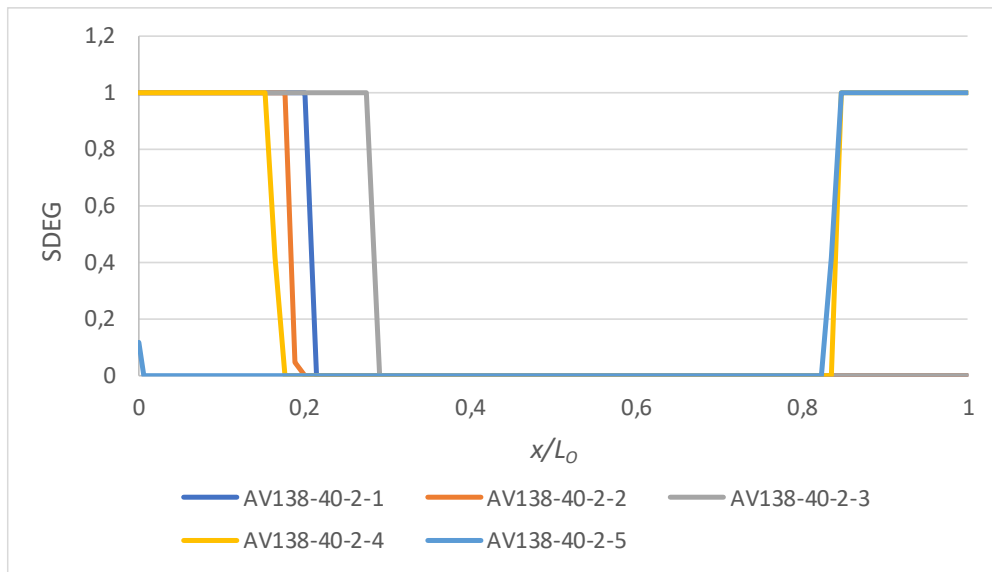


Figura 99 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® AV138. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{Si} .

3.2.3.2 Araldite® 2015

Nas figuras que se seguem (Figura 100 e Figura 101) observa-se o dano para os casos com $L_0=20$. No primeiro caso apenas se variou a espessura exterior (Figura 100), enquanto que no segundo caso (Figura 101) somente se variou a espessura interior.

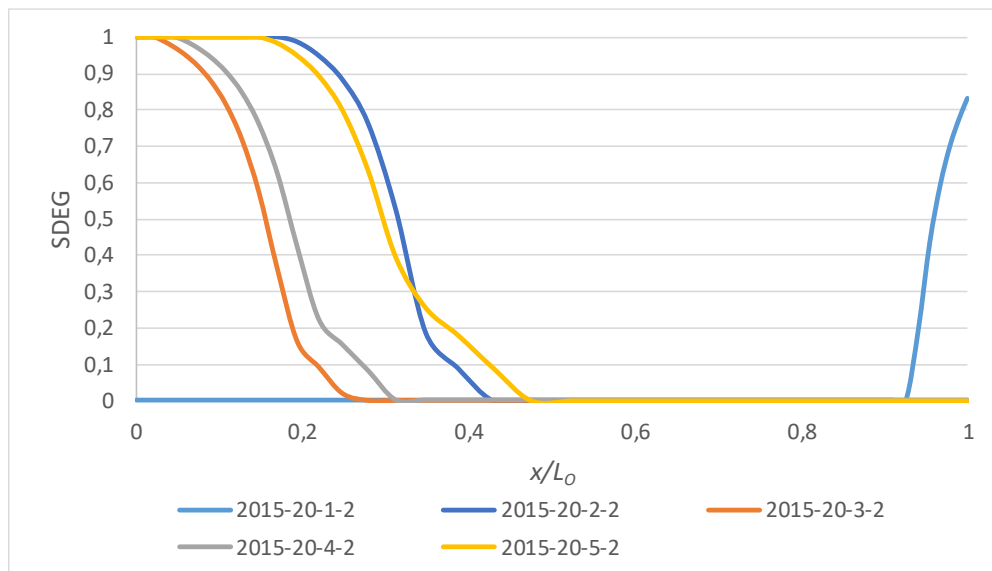


Figura 100 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Se} .

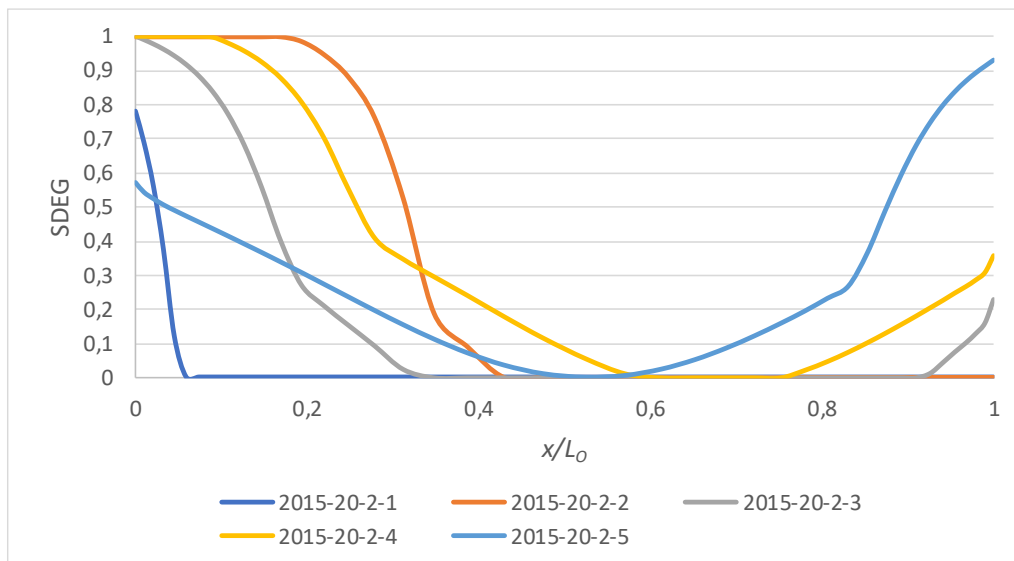


Figura 101 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Si} .

Analisando os gráficos (Figura 100 e Figura 101) é possível assinalar que o dano na extremidade direita da sobreposição é inexistente para a grande maioria dos casos. O dano para os adesivos com variação de t_{Se} (Figura 100) ocorre no início da camada adesiva, sendo a única exceção o ensaio com a variação de t_{Se} com o valor mais reduzido (1 milímetro). Nesta situação a rotura total não ocorre.

Já no caso de variação de t_{Si} (Figura 101) ocorre dano em ambas as extremidades, sendo que este é mais significativo na extremidade esquerda da sobreposição, indicando assim a zona onde o dano é mais expectável.

Na grande maioria dos estudos realizados o dano é mais elevado na extremidade esquerda, com a exceção do ensaio da Figura 101, em que se mantém constante t_{Se} , no caso que $t_{Si}=5$ mm. Este último não atinge a rotura total, tendo-se registado um valor bastante próximo.

Observando as curvas dos gráficos, para esta situação, pode-se afirmar que estas consistem em curvas progressivas, indicando que o adesivo sofre uma distribuição gradual da deformação ao longo da camada adesiva. Isto deve-se à ductilidade significativa do adesivo em causa.

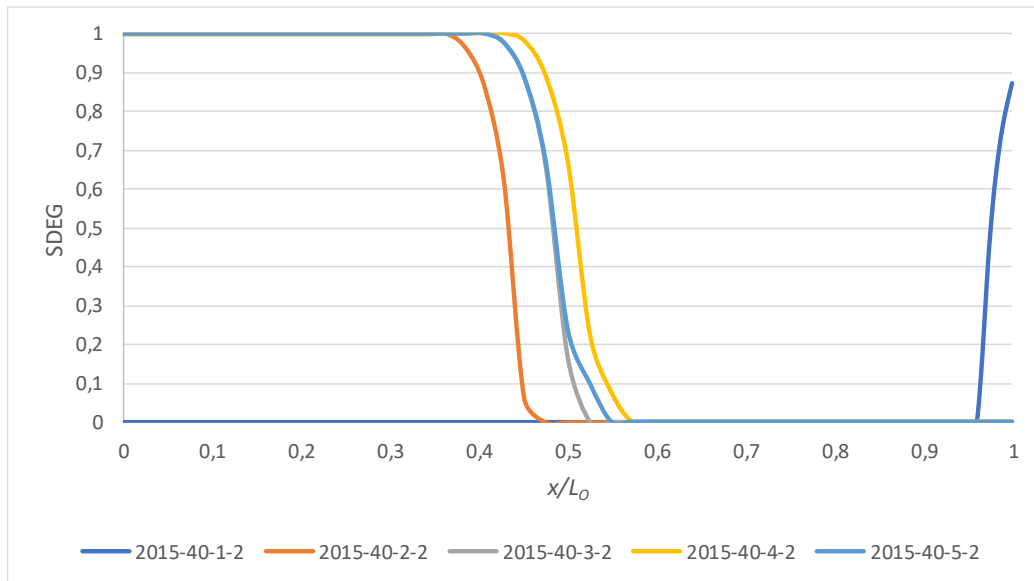


Figura 102 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{se} .

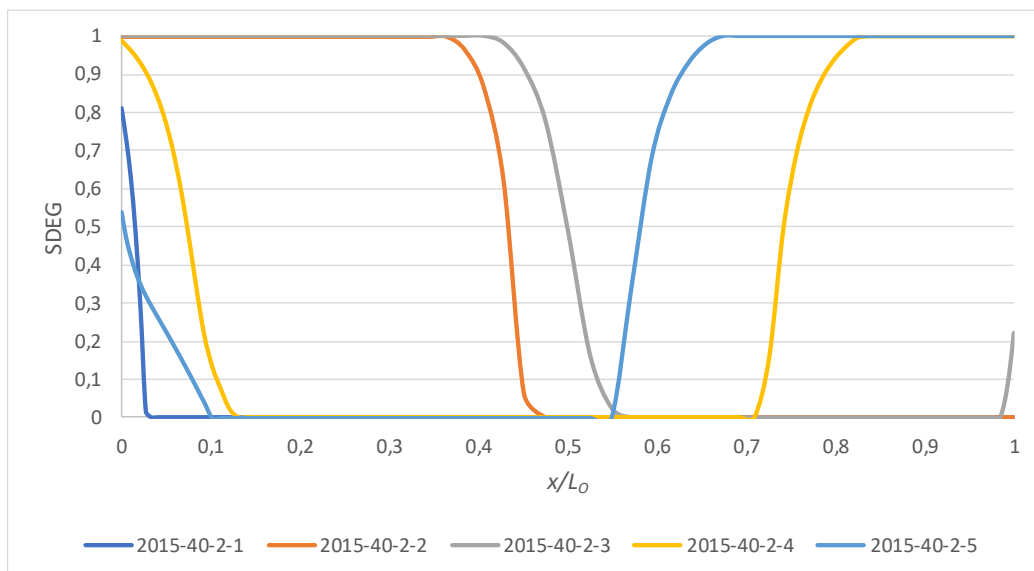


Figura 103 - Variável de dano para a junta com Adesivo Araldite® 2015. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{si} .

Para um $L_0=40$, analisando o gráfico da variação de t_{se} (Figura 102), é possível observar as semelhanças com o gráfico da variação de t_{se} para um $L_0=20$. O dano simplesmente ocorre numa zona mais central da sobreposição. No caso de t_{si} (Figura 103) as diferenças são notórias. As curvas de dano estão dispersas pelo gráfico, sendo a única constante a existência de uma zona central na camada de adesivo onde não se regista qualquer dano. É também observável a existência de curvas de dano em formato de “U”, indicando que graças ao efeito de torção ocorreu rotura total tanto na extremidade esquerda como na direita. Contudo, para um valor de $t_{si}=1$ mm o adesivo não apresenta rotura.

3.2.3.3 Sikaforce® 7752

A Figura 104 e Figura 105 representam a variação da variável SDEG registada ao longo dos L_0 indicados, para cada alteração de espessura. É possível observar que, independentemente de a alteração ser de t_{Si} ou t_{Se} , quanto mais aumenta o valor de espessura do aderente (t_p) menor será o dano registado na junta adesiva.

Para espessuras superiores a 2 mm a rotura ocorre praticamente na extremidade esquerda do adesivo, sendo que a curva de dano possui uma variação abrupta a partir do ponto de rotura.

Independentemente do valor de t_p , globalmente a distribuição do dano pelo adesivo é igual, sendo que esta se estende por uma área mais alargada para valores de L_0 superiores.

Numa zona central, observa-se que não existe qualquer dano, enquanto na extremidade mais à esquerda estão concentradas as curvas de dano. A única exceção visível é a curva para $t_{Se}=1$ mm que está situada na extremidade direita do gráfico.

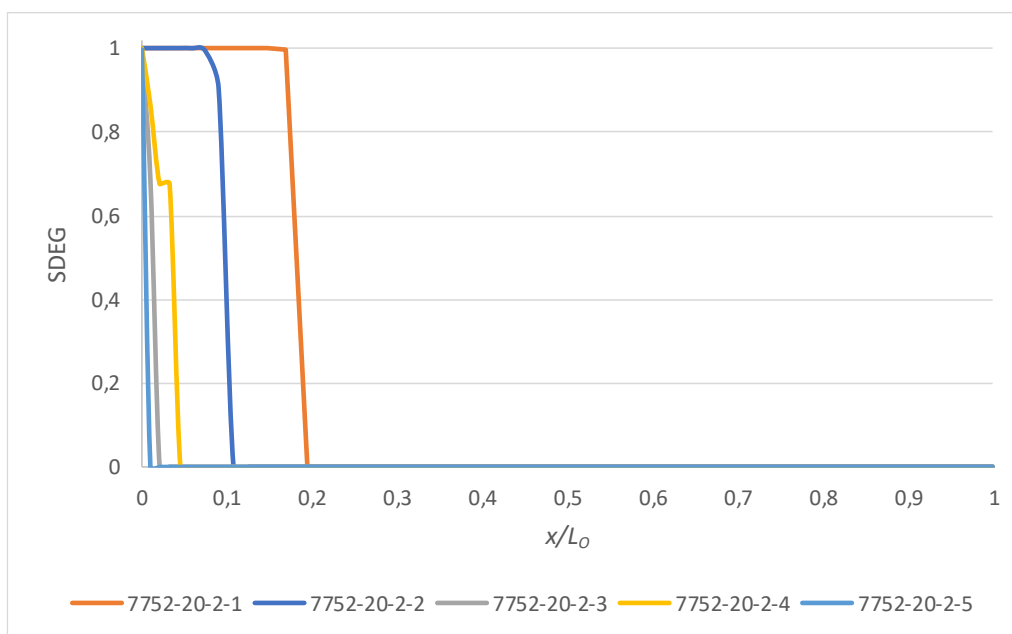


Figura 104 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{Si} .

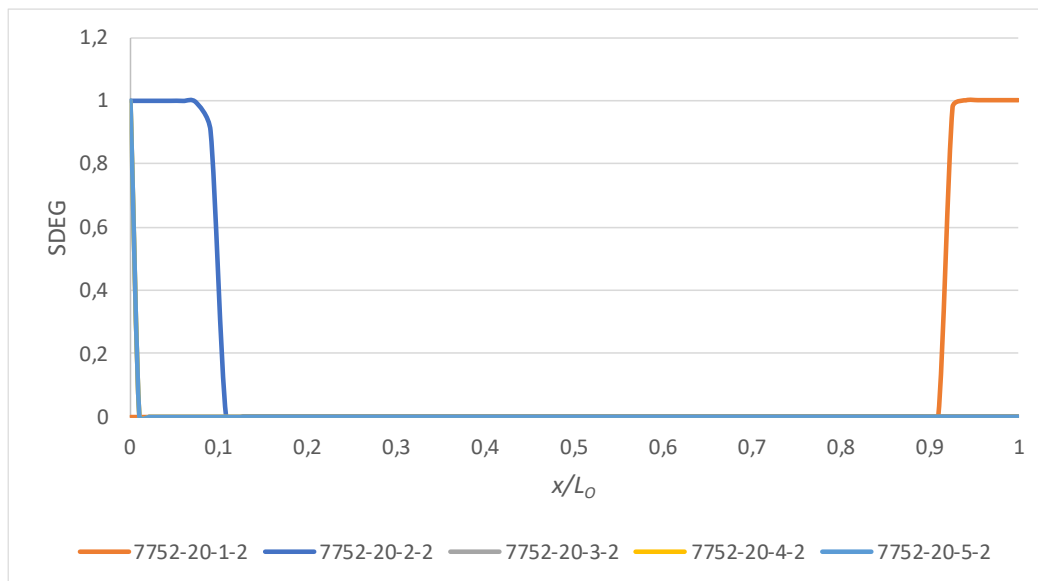


Figura 105 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=20$ e com variação de t_{se}

Analisando os gráficos (Figura 106 e Figura 107) observa-se que um aumento de 20 mm no L_0 cria na junta uma zona de dano mais abrangente, no que diz respeito a valores de t_p inferiores (1 mm e 2 mm).

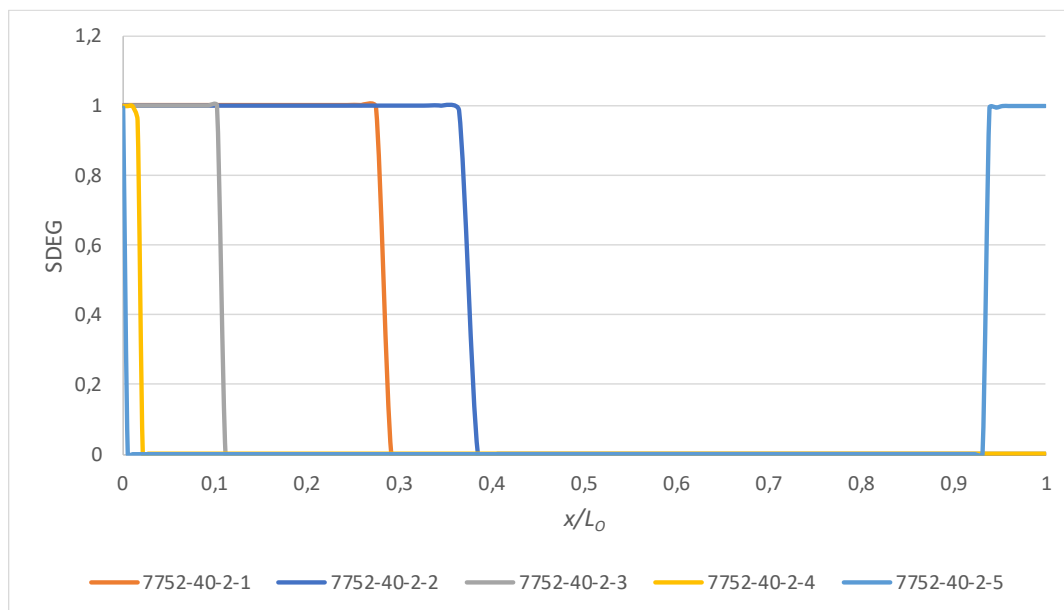


Figura 106 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{si}

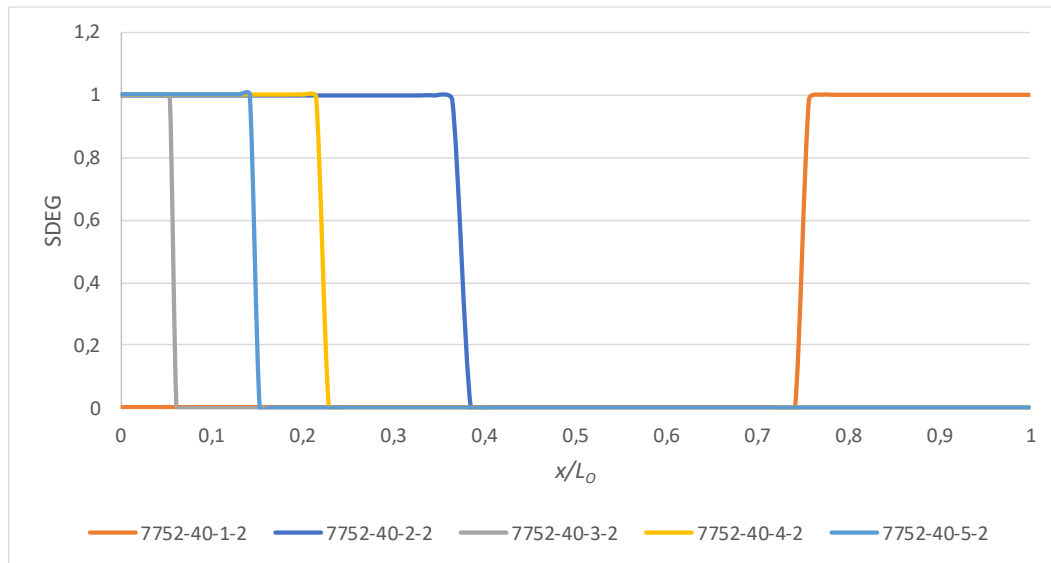


Figura 107 - Variável de dano para a junta com Adesivo SikaForce® 7752. Na situação em que $L_0=40$ e com variação de t_{se}

Conclusivamente pode-se afirmar que os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, o mais frágil e o mais dúctil respectivamente, concentram o dano nas extremidades. O Araldite® 2015 enquanto adesivo com ductilidade intermédia no estudo realizado, possibilita que uma região plástica considerável contribua para a resistência das juntas.

3.2.4 Previsão da resistência

No subcapítulo que se segue, é apresentada a previsão da resistência, que estuda as influências dos parâmetros anteriormente falados. O parâmetro a ser controlado é o $P_{máx}$, que indica o valor da força máxima registada nos ensaios numéricos realizados.

As figuras que se seguem foram obtidas através da análise numérica por MDC no ABAQUS® em função de L_0 , t_{se} e t_{SI} para os três adesivos. Cada figura inclui três curvas, que representam a resistência dos três adesivos estudados com base nos diferentes L_0 e t_p analisadas. A influência de L_0 vai incidir entre dois valores (20 e 40 mm), em que cada um usufrui de uma análise comportamental para a variação gradual da espessura, tanto do substrato interior como do exterior.

Por norma, no estudo efetuado somente foi alterada uma das espessuras de cada vez, sendo 2 mm o valor da espessura do aderente que se mantém constante em cada situação.

A primeira situação (Figura 108) o gráfico a) ($t_{se}=1$ mm) apresenta valores mais elevados comparativamente aos apresentados no gráfico b). O efeito de L_0 é notável em todos os casos, contudo para $t_{se}=1$ mm o Araldite® AV138 mostra valores bastante idênticos para cada L_0 estudado, indicando uma pequena evolução com o aumento de L_0 , para este caso. Para $L_0=40$ mm os adesivos AV138 e 2015 apresentam um valor praticamente idêntico.

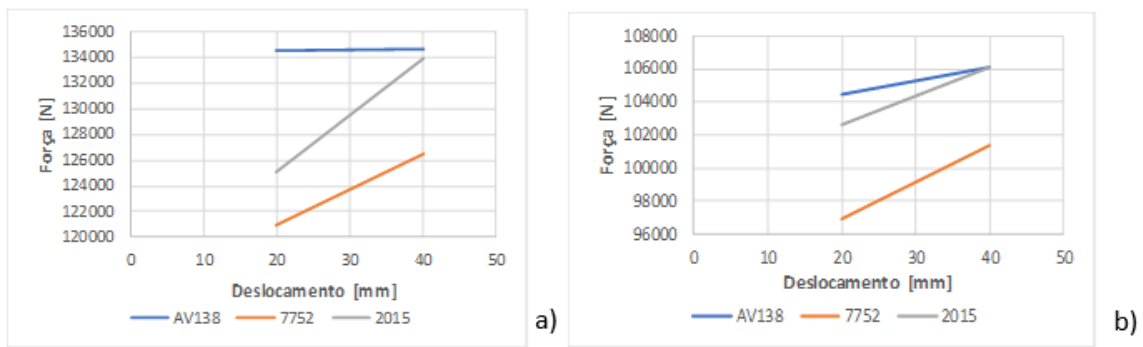


Figura 108 – Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=1$ mm (gráfico a) e para $t_{Sj}=1$ mm (gráfico b)).

Para $t_{Se}=t_{Sj}=2$ mm (Figura 109) o SikaForce® 7752 exibe mais uma vez os valores mais reduzidos. No entanto, o adesivo Araldite® 2015 apresenta agora os valores mais elevados, contrariamente aos gráficos anteriores.

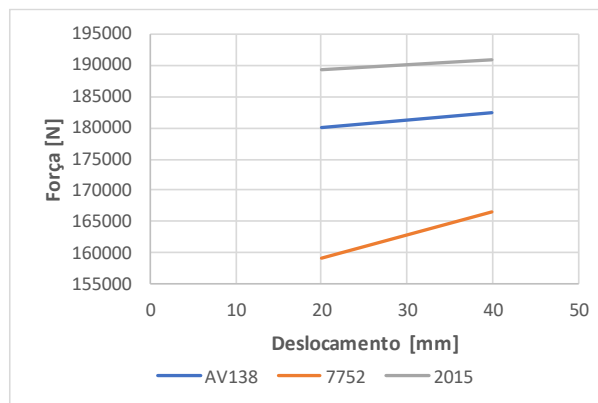


Figura 109 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=2$ mm e para $t_{Sj}=2$ mm.

No caso em que $t_{Sj}=3$ mm (Figura 110), para $L_O=40$ mm o adesivo SikaForce® 7752 apresenta, juntamente com o Araldite® 2015, o valor mais elevado. Relativamente às restantes espessuras (Figura 111 e Figura 112) a distribuição das curvas é bastante semelhante. Para $t_{Sj}=4$ mm os valores obtidos são superiores aos de $t_{Se}=4$ mm.

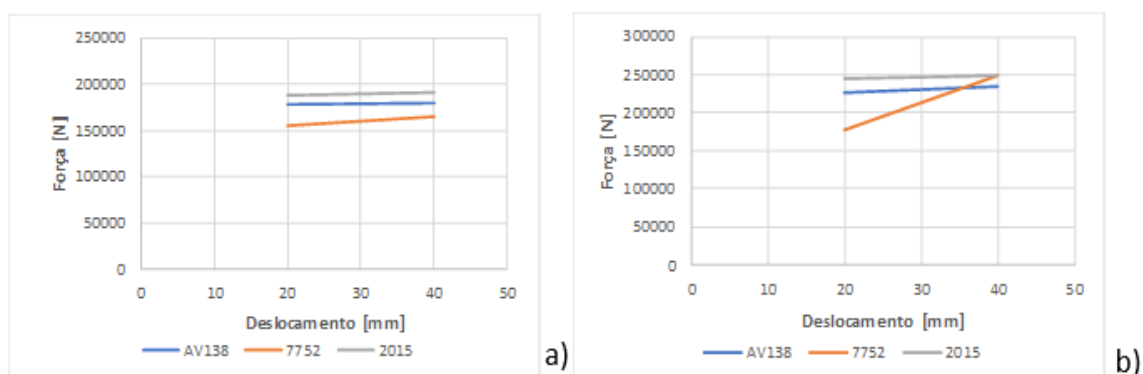


Figura 110 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=3$ mm (gráfico a) e para $t_{Sj}=3$ mm (gráfico b)).

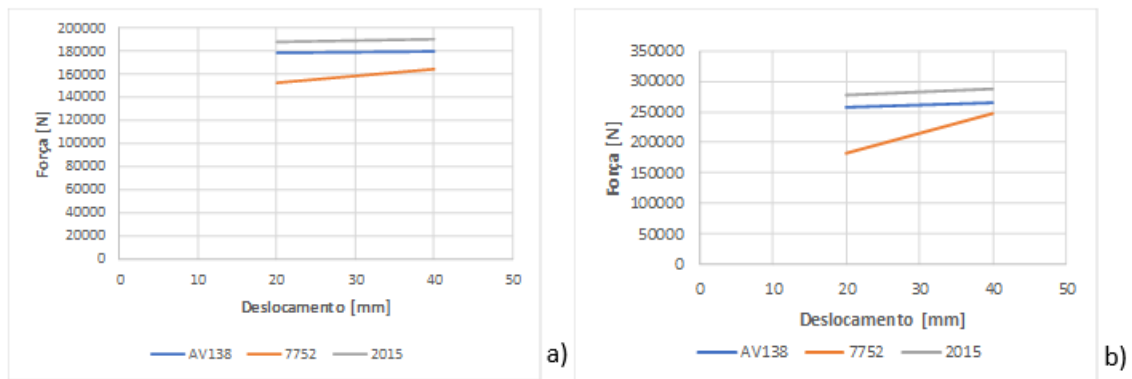


Figura 111 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso $t_{Se}=4$ mm (gráfico a) e para $t_{Si}=4$ mm (gráfico b).

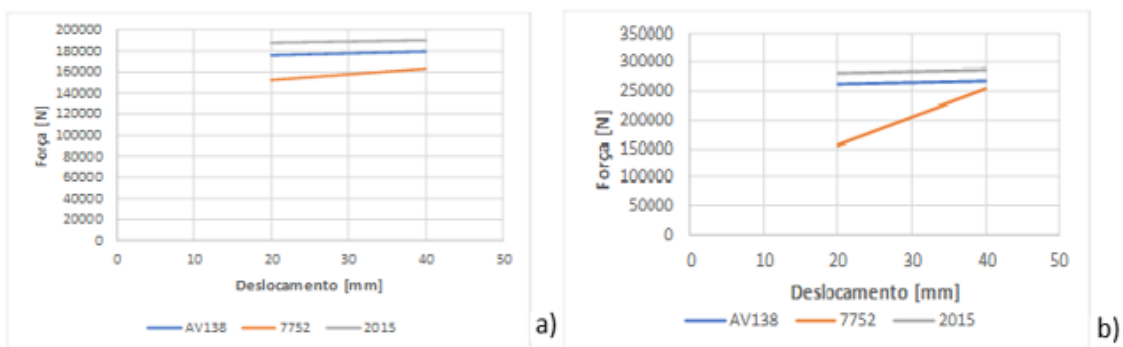


Figura 112 - Curvas representativas da resistência dos 3 adesivos estudados para o caso e para $t_{Se}=5$ mm (gráfico a) e para $t_{Si}=5$ mm (gráfico b).

Analisando os gráficos unicamente para a influência de L_0 , à medida que este aumenta também o valor de $P_{máx}$ aumenta. Isto é muito mais visível nos adesivos dúcteis, 7752 e 2015, relativamente ao adesivo mais frágil AV138, onde o ganho de resistência efetivamente existe, mas é muito baixo comparativamente aos demais.

3.2.5 Previsão da energia dissipada

O capítulo que se segue analisa a previsão da energia dissipada (Figura 113, Figura 114, Figura 115, Figura 116, Figura 117 e Figura 118), estudando a influência dos adesivos utilizados com os parâmetros L_0 , t_{Si} e t_{Se} da junta. A energia dissipada é obtida através da área diretamente abaixo da curva $P-\delta$.

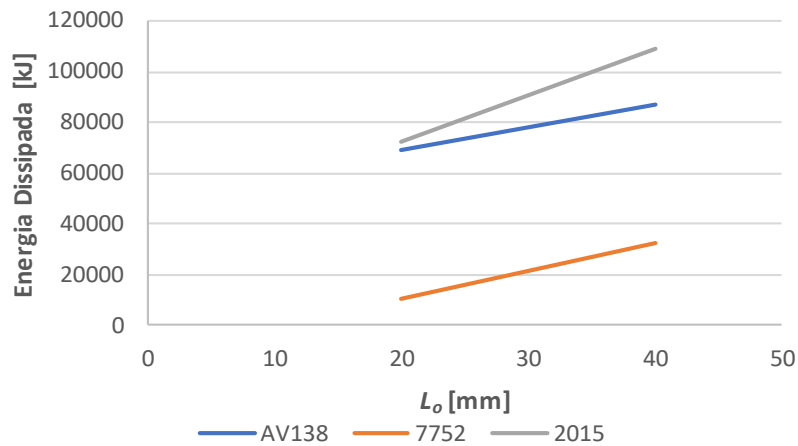


Figura 113 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{sj}=t_{se}$ de 2 mm.

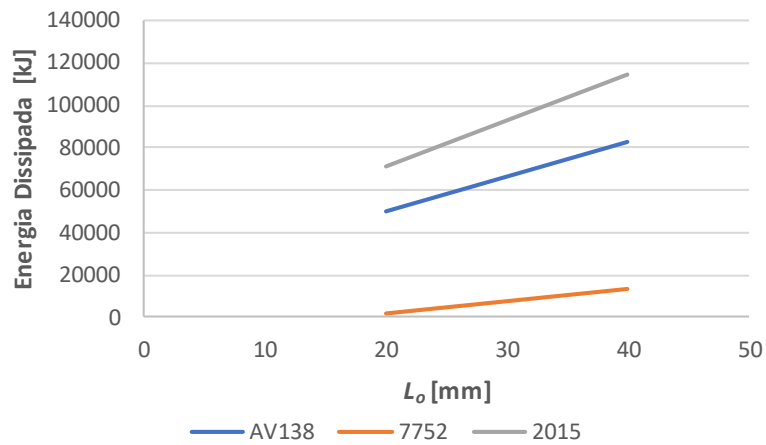


Figura 114 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{se} de 2 mm e t_{sj} de 3 mm.

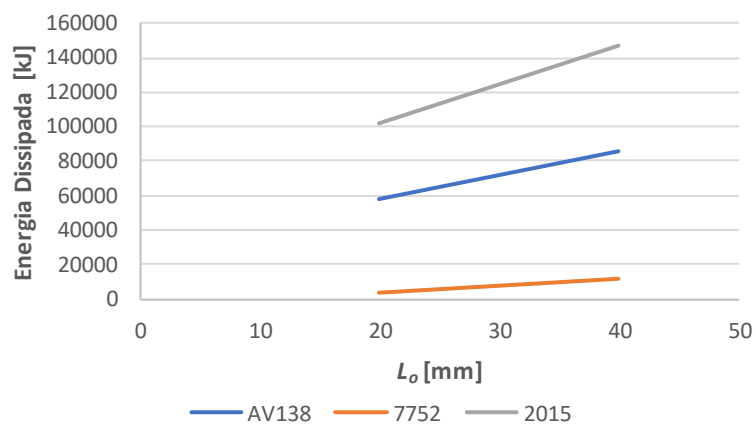


Figura 115 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{se} de 2 mm e t_{sj} de 4 mm.

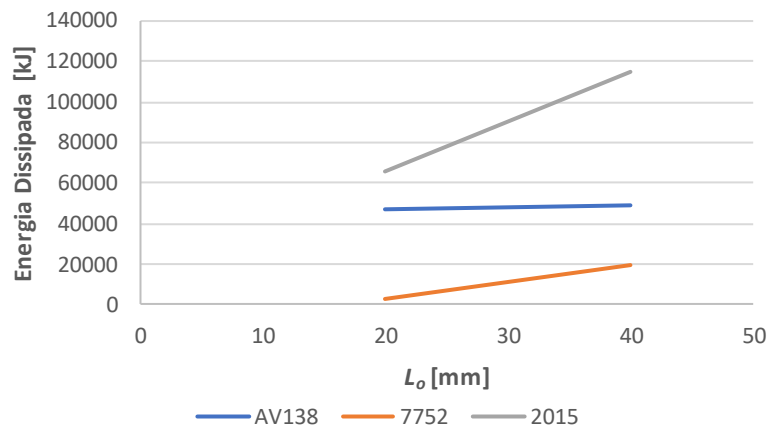


Figura 116 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{se} de 2 mm e t_{si} de 5 mm.

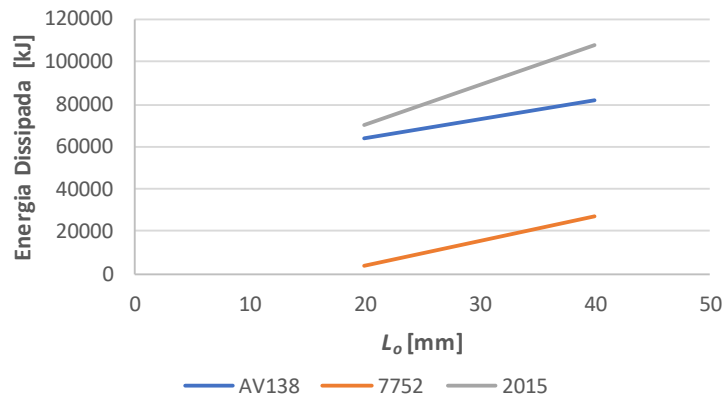


Figura 117 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{se} de 3 mm e t_{si} de 2 mm.

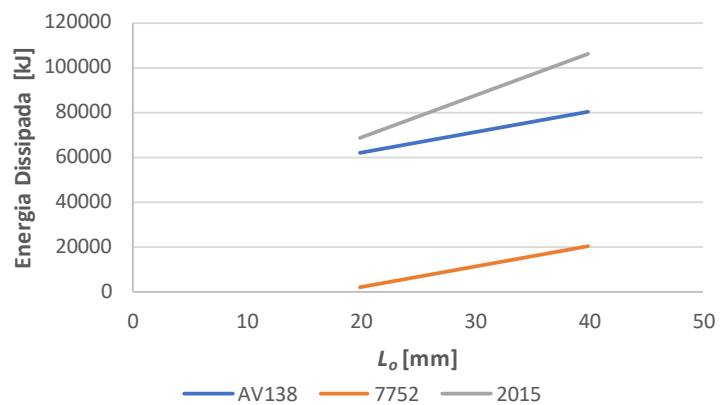


Figura 118 - Energia dissipada em função de L_o para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{se} de 4 mm e t_{si} de 2 mm.

Analisando os vários casos apresentados observa-se que a influência do parâmetro L_0 é também bastante clara. Verifica-se ainda que, independentemente das diferenças em termos de espessuras, é possível afirmar que existe um aumento de energia dissipada com o aumento de L_0 estudado.

Relativamente ao Adesivo Araldite® AV138 é de notar a baixa energia libertada nos casos em que a diferença entre as espessuras é máxima (por exemplo $t_{Se}=2$ mm e $t_{Si}=5$ mm) (Figura 116). Mais concretamente nas variações de t_{Si} . Este comportamento é justificado pela rotura do Araldite® AV138 antes dos demais, devido à sua elevada rigidez, e ao facto de possuir uma reduzida capacidade de deformação plástica.

O adesivo que apresenta os valores mais elevados de dissipação energética na altura do colapso é o Araldite® 2015. A sua maior capacidade de deformação plástica, permite que este adesivo suporte maior energia associada ao seu processo de alongamento. Apesar de garantir sempre valores superiores aos demais adesivos, a diferença vai reduzindo à medida que a espessura exterior vai aumentando, especialmente para o adesivo Araldite® AV138.

Os valores de energia dissipada mais elevados encontram-se nas juntas com variação de t_{Si} (Figura 115 e Figura 116). Contudo isto não se observa para o adesivo SikaForce® 7752 que mantém constante os resultados ao longo do estudo numérico.

Alguns ensaios foram considerados como inválidos, não sendo apresentados neste capítulo.

3.2.6 Previsão da deformação à torção

No capítulo que se segue são exibidos os resultados alusivos à propriedade *plastic strain equivalent* (PEEQ), do *software* ABAQUS®. Estes consistem na previsão da deformação à torção que a junta adesiva suportará após os respetivos ensaios. De notar que a liga de alumínio (AL) em estudo possui uma capacidade limite de deformação de 21%.

Cada tabela contém a evolução de L_0 assim como cada um dos adesivos observados. A Tabela 19 e a Tabela 20 abordam a previsão da deformação para valores de t_{Se} e t_{Si} iguais a um milímetro, respetivamente. A Tabela 21 apresenta os resultados para $t_{Se}=t_{Si}=2$ mm.

As demais tabelas (Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24) englobam cada uma, um conjunto de 2 tabelas, alusivas à variação de t_{Se} e t_{Si} para 3 mm, 4 mm e 5 mm, respetivamente.

Tabela 19 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{se} de 1 mm.

$t_{se}=1$	20	40
AV138	Ultrapassou limite do AL	o Ultrapassou o limite do AL
7752	3,48%	5,05%
2015	Ultrapassou limite do AL	o Ultrapassou o limite do AL

Tabela 20 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de t_{sj} de 1 mm.

$t_{sj}=1$	20	40
AV138	6,36%	5,05%
7752	4,20%	5,83%
2015	Ultrapassou limite do AL	o 9,14%

Tabela 21 – Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{sj}=t_{se}$ de 2 mm.

$t_{sj}=t_{se}=2$	20	40
AV138	3,85%	6,64%
7752	0,46%	2,78%
2015	8,23%	20,00%

Tabela 22 – Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{Sj}=t_{Se}$ de 3 mm.

$t_{Sj}=3$	20	40	$t_{Se}=3$	20	40
AV138	3,76%	4,86%	AV138	1,27%	6,08%
7752	0%	1,58%	7752	0,54%	2,34%
2015	6,80%	7,57%	2015	7,97%	9,17%

Tabela 23 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{Sj}=t_{Se}$ de 4 mm.

$t_{Sj}=4$	20	40	$t_{Se}=4$	20	40
AV138	2,88%	3,73%	AV138	5,44%	8,21%
7752	0%	1,16%	7752	0,21%	2,16%
2015	6,80%	6,53%	2015	7,82%	8,90%

Tabela 24 - Previsão da deformação à torção para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para um valor de $t_{Sj}=t_{Se}$ de 5 mm.

$t_{Sj}=5$	20	40	$t_{Se}=5$	20	40
AV138	3,76%	3,83%	AV138	2,95%	20,00%
7752	0%	1,91%	7752	0,22%	2,15%
2015	5,29%	6,35%	2015	7,72%	7,95%

Analisando as tabelas indicadas, é possível verificar que somente nos casos em que t_{Sj} e t_{Se} são iguais a 1 mm o dano produzido nos aderentes ultrapassa o limite elástico do alumínio. Como era expectável, a deformação aumenta com o aumento de L_0 . O Araldite® 2015 apresenta os resultados mais elevados de previsão de deformação para todos os casos, excluindo o de $t_{Se}=5$ mm, que é ultrapassado pelo Araldite® AV138. Para variações de t_{Sj} , o Araldite® 2015 apresenta resultados em média 50% superiores aos do Araldite® AV138. Relativamente a t_{Se} , o Araldite® AV138 aumenta a deformação com o aumento de t_{Se} . Analisando os resultados das juntas adesivas com Sikaforce® 7752 é observável a reduzida deformação resultante das juntas por este adesivo. Para $L_0=20$ e t_{Sj} igual ou superior a 3 mm, a deformação na junta registou-se como nula.

3.2.7 Análise dos resultados obtidos

Na análise de tensões τ_{xy} , foram obtidos picos de tensões τ_{xy} de maior magnitude na extremidade esquerda, ao passo que na extremidade oposta os picos de tensões τ_{xy} são menos predominantes (Figura 91). Desta forma a variação de t_{Si} apresenta-se como aquela onde são obtidos os valores de picos de tensões τ_{xy} mais elevados. Nas juntas adesivas compostas por adesivos frágeis como o Araldite® AV138, a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não possibilitarem plastificação nas extremidades da sobreposição. De outra forma, os demais adesivos por serem mais dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nas extremidades. Existe uma clara redução de tensões τ_{xy} para adesivo AV138 com o aumento de t_{Si} . Com o aumento de t_{Si} o adesivo mais frágil e resistente não consegue acomodar os picos de tensão.

Os valores mais reduzidos foram obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752. Este possui elevada ductilidade, contudo apresenta a mais baixa resistência dos adesivos estudados. Analisando o seu perfil de tensões observa-se menor uniformidade na distribuição de tensões τ_{xy} . Os picos de tensão obtidos são muito reduzidos, comparativamente aos demais, característica que reduz a probabilidade de a junta adesiva sofrer uma rotura prematura. Para L_O reduzidos (20 mm) os ensaios conduzidos com este adesivo não apresentaram na maioria das vezes qualquer percentagem de deformação na junta. Na previsão de energia dissipada observa-se que o adesivo Sikaforce® 7752 produz a menor energia (dos adesivos estudados).

Uma análise aos dados exibidos no trabalho numérico revela que o aumento de $P_{máx}$ com L_O varia consoante o adesivo. O adesivo Araldite® AV138, de forma geral, e o Araldite® 2015, para espessuras (t_{Si} e t_{Se}) iguais ou superiores a 3 mm, não apresentam um aumento tão acentuado de $P_{máx}$. Para $L_O=20$ mm e espessuras inferiores a 3 mm, o Araldite® AV138 apresenta valores bastante superiores aos obtidos pelo Araldite® 2015. Contudo, à medida que L_O aumenta é observável um aumento significativo de $P_{máx}$ para o Araldite® 2015. A partir dos 3 mm, tanto para t_{Si} como t_{Se} , o adesivo Araldite® AV138 começa a sofrer reduzidas variações de $P_{máx}$ com o aumento de L_O . Este comportamento é a consequência da fragilidade elevada do Araldite® AV138, que limita bastante a sua deformação plástica. Como consequência desta particularidade, ao serem atingidas as tensões limites nas extremidades de sobreposição, ocorre a rotura da junta devido à carência de capacidade de plastificação do adesivo. Para t_{Si} ou t_{Se} iguais ou superiores a 3 mm, e $L_O=20$ mm, os valores obtidos para o Araldite® 2015 são, em média 7% superiores aos do Araldite® AV138.

Observando o Araldite® 2015, são notáveis os aumentos significativos de $P_{máx}$ para valores de t_{Si} superiores. Este adesivo, embora ostente propriedades mecânicas inferiores ao adesivo Araldite® AV138, é definido como sendo um adesivo dúctil devido à elevada tenacidade. O adesivo Araldite® 2015 atinge, para $L_O=40$ e t_{Si} superiores a 2 mm, valores de $P_{máx}$ 8,6% mais elevados comparativamente aos obtidos pelo Araldite®

AV138. Isto deve-se ao facto de um adesivo dúctil usufruir da capacidade de distribuição de carga de forma mais uniforme, usando as regiões em que as tensões são tipicamente mais baixas. De outra forma, no caso de o adesivo ser mais frágil, a carga concentra-se nas extremidades da sobreposição sem possibilidade de plastificação do adesivo [53].

Relativamente ao adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{máx}$ são bastante inferiores aos restantes em todos os casos, com a exceção de $t_{SI}=3$ mm, em que se atinge o valor mais elevado juntamente com o adesivo Araldite® 2015 (Figura 110 b)). O SikaForce® 7752 sofre grande evolução no valor de $P_{máx}$ com o aumento de L_0 . Desta forma, para este adesivo, quanto maior for o valor de L_0 , mais acentuada é a capacidade da junta em suportar esforços de torção.

Para concluir, para valores de L_0 baixos e t_p de 1 mm, o Araldite® AV138 é uma opção viável. Para L_0 e t_p superiores deve ser escolhido o Araldite® 2015. Ou seja, a escolha deve incidir mais num adesivo com resistência mais baixa e maior ductilidade.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Após a validação do método numérico aplicado para a previsão do comportamento de juntas tubulares submetidas a esforços torsionais, procedeu-se à realização das análises paramétricas pretendidas, com o auxílio do *software* ABAQUS®. Os resultados obtidos desta forma apresentaram-se na forma de curvas $P-\delta$, que traduzem a evolução da carga suportada das juntas, curvas de dano, onde se verifica a degradação da camada de adesivo ao longo do L_O adotado e ainda curvas representativas da distribuição das tensões de corte (τ_{xy}) para as modificações geométricas realizadas na junta adesiva tubular.

Relativamente à distribuição de tensões, uma vez que o caso de estudo consiste num carregamento de torção pura, não existem componentes normais de tensão. Desta forma, as tensões de arrancamento não serão abordadas neste trabalho. Estudando as tensões de corte observou-se como a extremidade esquerda da zona de sobreposição do adesivo foi a zona com maior registo de tensões, independentemente dos valores utilizados nos parâmetros de controlo. Tal efeito é resultante da própria geometria do provete. Como os provetes selecionados consistem em forma tubular, o aderente exterior terá sempre maior área comparado ao aderente interior, de outra forma não seria possível a realização da sobreposição. Em termos de influência dos parâmetros de controlo conclui-se que, para valores de L_O mais elevados, as tensões τ_{xy} apresentam valores de pico mais elevados. Além disso, para o valor mais baixo de L_O , a distribuição de tensões τ_{xy} é mais uniforme, devido à redução de deformação diferencial.

Quanto à variação de espessura, quanto menor for o valor de t_{Si} , maiores serão os picos de tensão τ_{xy} . Tal efeito ocorre, pois, à medida que a espessura do tubo interior diminui, maior será a taxa de deformação transversal que este sofre. Com a diminuição de t_{Si} , também a secção transversal sofre diminuição, provocando uma maior deformação diferencial dessa secção da junta tubular. Na variação de t_{Se} as maiores tensões registadas ocorrem nos casos com maior diferença de espessura entre os tubos, ou seja, para o valor mais alto de t_{Se} . Isto resulta do diferencial de rigidez entre ambos os tubos nas extremidades de sobreposição. O tubo com menor espessura vai apresentar uma elevada deformação transversal, enquanto o tubo exterior vai apresentar uma elevada rigidez. Tais efeitos, resultantes do aumento da diferença de espessuras entre tubos, irão aumentar a deformação à qual o adesivo vai ser submetido. Verifica-se que, dos adesivos selecionados, o adesivo Araldite® AV138 é o mais frágil. Desta forma é, também, aquele que apresenta mais elevados valores de pico de τ_{xy}/τ_{avg} .

Relativamente ao dano sofrido pela camada adesiva, este ocorre de forma praticamente constante pela extremidade esquerda da camada adesiva. O adesivo Araldite® AV138 justifica o facto de ser o mais rígido dos adesivos estudados. Este atinge a rotura imediatamente ser alcançado o seu limite elástico. Este apresenta curvas de dano praticamente verticais nas extremidades e uma zona central sem ocorrência de dano. Este caso não é observável nos adesivos 2015 e 7752, que possuem melhor capacidade de distribuição de tensões e, como tal, têm o dano mais repartido.

Os resultados observados na previsão da resistência são semelhantes aos da previsão da energia dissipada no sentido em que o adesivo 7752 é constantemente aquele que apresenta os valores mais reduzidos. No caso da resistência, o AV138 apresenta os valores mais elevados, ligeiramente acima do adesivo 2015. Contudo, não são observadas grandes variações de $P_{máx}$ pois, devido à sua grande fragilidade, este adesivo sofre rotura precoce. Tendo em conta a variação de espessura dos substratos, os valores de energia dissipada mais elevados encontram-se nas juntas com variação t_{sj} . A dissipação aumenta com o valor de t_{sj} até um valor de $t_{sj}=4$ mm. Isto ocorre especialmente para as juntas ligadas pelo adesivo 2015 que, sendo um dos mais dúcteis, torna espectável tal resultado. Este apresenta valores de energia dissipada bastante semelhantes ao AV138 para $L_O=20$ mm, mas bastante superiores quando $L_O=40$ mm.

O adesivo SikaForce® 7752 mantém constante os resultados ao longo do estudo numérico. No estudo de tensões ficou comprovado que este produzia os picos de tensão mais curtos, e pelo estudo das curvas de energia dissipada concluiu-se que este produz a menor energia na altura da rotura. Contudo, é também o adesivo que apresenta os valores de resistência mais baixos dos três estudados.

Propõem-se as seguintes propostas de alguns trabalhos futuros a serem elaborados no âmbito de melhor desenvolver o estudo das juntas adesivas:

- Validação dos resultados numéricos das variações geométricas através de ensaios experimentais;
- Estudo numérico de diferentes configurações de juntas adesivas, por exemplo tubagem quadrada ou retangular;
- Estudo numérico de um espectro mais alargado de parâmetros geométricos, nomeadamente interação simultânea de diferentes parâmetros;
- Estudo de outro género de solicitações que também se podem encontrar no mundo real, como por exemplo solicitações dinâmicas ou de impacto.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
2. Pizzi, A. and K.L. Mittal, *Handbook of adhesive technology*. 2017, Boca Raton (EUA): CRC Press.
3. Sharpe, L.H., *Some fundamental issues in adhesion: A conceptual view*. The Journal of Adhesion, 1998. **67**(1-4): p. 277-289.
4. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
5. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
6. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlin, Germany: Springer Science & Business Media.
7. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto, Portugal: Publindústria.
8. Pocius, A.V. and D.A. Dillard, *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. 2002, Amsterdam, Netherlands: Elsevier.
9. Louro, A., et al., *Adesivos estruturais na construção de aviões*. Relatório da unidade curricular Projeto FEUP do Mestrado em Engenharia Mecânica, 2011.
10. Armero, R.A. *Adhesives and the construction industry*. 1995 [acedido em Julho 2018]; Available from: <http://www.tectonica-online.com/topics/adhesives/adhesives-construction-industry-ramon-araujo/42/>.
11. Bishopp, J., *Aerospace: a pioneer in structural adhesive bonding*, in *Handbook of adhesives and sealants*. 2005, Elsevier: Amsterdam, Netherlands. p. 215-347.
12. *The Aluminium Automotive Manual*. 2013, European Aluminium: Brussels, Germany.
13. da Silva Hipolito, I., R.d.S. Hipolito, and G. de Almeida Lopes, *Polímeros na construção civil*. Proceedings of the Simpósio de Excelência em Gestão e Tecnologia, Resende, Brazil, 2013: p. 23-25.
14. Mays, G.C. and A.R. Hutchinson, *Adhesives in civil engineering*. 2005: Cambridge University Press.
15. Murad, D.S., *Global adhesives and sealants state of the union*. The ChemQuest Group, april, 2007.
16. Monteiro, D.F., *Análise do comportamento a fractura de juntas de aço efectuadas com adesivos estruturais*. 1995, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

17. *Adesivos na Construção Cívil*. 2018 [cited 2018 [acedido em Julho 2018]; Available from: <http://www.fcc.com.br/mercados/construcao-civil>.
18. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. 2016, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
19. International, A., *Engineered materials handbook: adhesives and sealants*. Vol. 3. 1990, Boca Raton (EUA): CRC-Press.
20. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova Iorque: McGraw-Hill.
21. Sousa, F.S.M.d., *Caracterização de adesivos de altas temperaturas para aplicações aeroespaciais*. 2010, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
22. ASTM, D., *5573-99. Standard practice for classifying failure modes in fiber-reinforced-plastic (FRP) joints*. Annual book of ASTM standards, 2002. **15**: p. 2002.
23. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
24. Adhesives, G.a.S. *Bond Failure Modes*. 2015 [cited 2018 [acedido em 11/07/2018]; Available from: <http://www.adhesiveandglue.com/fracture-ofadhesive.html>.
25. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2008, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
26. Neto, J.A.B.P., *Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito*. 2011, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
27. Handbook, D.o.D., *Composite materials handbook, volume 3: polymer matrix composites—materials usage, design and analysis*. 2002, Department of Defense Handbook Horsham, PA.
28. 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.
29. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints*. The Journal of Adhesion, 1977. **9**(1): p. 1-18.
30. Lubkin, J. and E. Reissner, *Stress distributions and design data for adhesive lap joints between circular tubes*. 1955, New York, U.S.A: American Society of Mechanical Engineers.
31. 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.
32. Nayeb-Hashemi, H., J. Rossettos, and A. Melo, *Multiaxial fatigue life evaluation of tubular adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1997. **17**(1): p. 55-63.
33. Pugno, N. and A. Carpinteri, *Tubular adhesive joints under axial load*. Journal of applied mechanics, 2003. **70**(6): p. 832-839.

34. 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.
35. Nemes, O. and F. Lachaud, *Modeling of cylindrical adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1383-1393.
36. Dragoni, E. and L. Goglio, *Adhesive stresses in axially-loaded tubular bonded joints—Part I: Critical review and finite element assessment of published models*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **47**: p. 35-45.
37. Qiu, C., et al., *Joint capacity of bonded sleeve connections for tubular fibre reinforced polymer members*. Composite Structures, 2017. **163**: p. 267-279.
38. Nimje, S. and S. Panigrahi, *Strain energy release rate based damage analysis of functionally graded adhesively bonded tubular lap joint of laminated FRP composites*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(5): p. 389-411.
39. Tong, L., *Failure of adhesive-bonded composite single lap joints with embedded cracks*. AIAA journal, 1998. **36**(3): p. 448-456.
40. Apalak, M.K., *Stress analysis of an adhesively bonded functionally graded tubular single lap joint subjected to an internal pressure*. Science and Engineering of Composite Materials, 2006. **13**(3): p. 183-212.
41. Ramberg, W. and W.R. Osgood, *Description of stress-strain curves by three parameters*. National Advisory Committee for Aeronautics; Washington, DC, U.S.A, 1943.
42. Hosseinzadeh, R., N. Cheraghi, and F. Taheri, *An engineering approach for design and analysis of metallic pipe joints under torsion by the finite element method*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2006. **41**(6): p. 443-452.
43. Esmaeel, R.A. and F. Taheri, *Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion*. Composite Structures, 2011. **93**(7): p. 1765-1774.
44. 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.
45. Zou, G.P. and F. Taheri, *Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading*. International Journal of Solids and Structures, 2006. **43**(20): p. 5953-5968.
46. Oh, J.H., *Strength prediction of tubular composite adhesive joints under torsion*. Composites science and technology, 2007. **67**(7-8): p. 1340-1347.
47. Choi, J.K. and D.G. Lee, *Torque transmission capabilities of bonded polygonal lap joints for carbon fiber epoxy composites*. The Journal of Adhesion, 1995. **48**(1-4): p. 235-250.
48. 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.
49. Sekercioglu, T., *The investigations of adhesively bonded joints behaviour under dynamic loading*. 2001, Ph. D. Thesis, Pamukkale University, Denizli, Turkey, 2001 (in Turkish).

50. Şekerciöğlü, T., et al., *The effects of surface roughness on the strength of adhesively bonded cylindrical components*. Journal of materials processing technology, 2003. **142**(1): p. 82-86.
51. Sekercioglu, T., *Strength based reliability of adhesively bonded tubular lap joints*. Materials & design, 2007. **28**(6): p. 1914-1918.
52. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
53. 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.
54. 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.
55. 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.
56. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
57. 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.
58. 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.
59. 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.
60. 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.
61. 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.
62. 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.
63. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. 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.

68. 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.
69. 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.
70. 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.
71. 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.
72. 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.
73. 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.
74. 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.
75. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
76. 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.
77. 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.
78. 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.
79. 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.
80. 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.
81. 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.
82. 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.
83. Pandya, K.C. and J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.

84. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. *Experimental Mechanics*, 1992. **32**(4): p. 296-303.
85. 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.
86. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014. **53**: p. 15-22.
87. 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.
88. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
89. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
90. 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.
91. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. *Composite Structures*, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
92. 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.
93. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
94. 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.
95. 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.
96. 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.
97. 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.
98. 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.
99. 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.
100. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.

101. 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.
102. 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.
103. Abaqus[®], *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
104. 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.
105. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
106. Avallone, E.A., T. Baumeister, and A. Sadegh, *Marks' standard handbook for mechanical engineers*. Vol. 6. 1987: McGraw-Hill New York etc.
107. 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.
108. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
109. 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.
110. 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.
111. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
112. 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.
113. Ribeiro, T., et al., *Damage analysis of composite–aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Composite Structures, 2016. **136**: p. 25-33.
114. Chen, X., *Numerical study of stable tearing crack growth events using the cohesive zone model approach*. 2013, University of South Carolina - Columbia.
115. 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.
116. da Silva, L.F. and R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer: Berlin, Germany. p. 1-93.
117. 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.

118. 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.
119. 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.
120. Pocius, A., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002, Amsterdam, Netherlands: Hansen Gardner Publications, Inc., Maplewood Cincinnati.
121. 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.
122. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
123. 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.
124. 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.
125. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
126. 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.
127. 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.
128. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2012.
129. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009, Universidade do Porto (Portugal).
130. 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.
131. Luo, Q. and L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(7): p. 2349-2370.
132. Vable, M. and J.R. Maddi, *Boundary element analysis of adhesively bonded joints*. International journal of Adhesion and Adhesives, 2006. **26**(3): p. 133-144.
133. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**(1/2): p. 41-47.
134. Grant, L., R. 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.

135. 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.
136. 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.
137. 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.
138. 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.
139. 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.
140. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal shear joints*. 1999.
141. Yang, Q. and B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. International Journal of Fracture, 2005. **133**(2): p. 107-137.

