



Estudo experimental e numérico de juntas T adesivas pela técnica bi-adesivo

PEDRO MIGUEL DIAS CARVALHO

novembro de 2021

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE JUNTAS T ADESIVAS PELA TÉCNICA BI-ADHESIVE

Pedro Miguel Dias Carvalho

1120655

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE JUNTAS T ADESIVAS PELA TÉCNICA BI-ADHESIVE

Pedro Miguel Dias Carvalho

1120655

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.

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia de Mecânica

JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Em primeiro lugar gostaria de agradecer aos meus pais pelo esforço que fizeram para que eu pudesse ter a oportunidade de conseguir uma formação superior.

Agradeço ao Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pelo seu auxílio constante e incansável durante a realização desta dissertação.

Quero deixar também um especial obrigado à minha noiva Rita Gonçalves pela paciência que teve ao longo destes anos, e por me ter acompanhado e ajudado sempre mesmo quando eu não sabia que precisava.

Por fim gostaria de agradecer aos meus colegas de cursos que me acompanharam ao longo deste caminho. Quero agradecer em especial à Alice Soares por toda a ajuda que me deu tanto neste trabalho como em tudo o resto.

PALAVRAS-CHAVE

Juntas adesivas; Juntas em T; Adesivo estrutural; Método de elementos finitos; Bi-adesivo; Modelos de dano coesivo; Tenacidade à fractura.

RESUMO

As juntas adesivas estão largamente difundidas na indústria nos dias de hoje substituindo em muitas situações as ligações mecânicas. Até há algumas décadas, um dos principais entraves à sua disseminação foi a falta de modelos que permitissem correctamente prever a resistência das juntas adesivas que resultava em estruturas fortemente sobredimensionadas, levando a um elevado custo de fabrico. Actualmente, técnicas de modelação como os modelos de dano coesivo (MDC) já demonstraram que é possível prever a resistência de juntas adesivas com precisão, como descrito no estudo de Carneiro [1].

As juntas adesivas são particularmente sensíveis a esforços de arrancamento, especialmente quando são usados adesivos mais frágeis como é o caso do Araldite® AV138. Para tentar melhorar a resistência de juntas em T, nesta dissertação é estudada a técnica de bi-adesivo. Esta técnica consiste na utilização de dois adesivos, colocando um adesivo mais dúctil nas extremidades da junta e um mais frágil na zona central. Para testar este método em juntas em T, nesta dissertação são usadas várias combinações dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Também são testados variados comprimentos do adesivo central, mantendo sempre a simetria da junta. Para avaliar estas combinações foi feito um estudo numérico usando a técnica de MDC, no *software* ABAQUS®, aplicando à junta um deslocamento de 6 mm e considerando um encastramento do aderente de base.

Com o presente trabalho, foi inicialmente possível validar a técnica de MDC com resultados experimentais. O trabalho numérico que se seguiu mostrou que a resistência das juntas em T depende de forma significativa da combinação de adesivos usados, e que é possível atingir incrementos de resistência e energia dissipada significativos relativamente às juntas de adesivo único.

KEYWORDS

Adhesive joints; T-joints; Structural adhesive; Finite element method; Bi-adhesive; Cohesive zone models; Fracture toughness.

ABSTRACT

Adhesive joints are widely used in the industry today, replacing mechanical joints in many situations. Until a few decades ago, one of the main obstacles to its dissemination was the lack of models that could correctly predict the strength of adhesive joints, which resulted in strongly oversized structures, and leading to a high manufacturing cost. Currently, modeling techniques such as cohesive zone models (CZM) have already demonstrated that it is possible to accurately predict the strength of adhesive joints, as described in the study by Carneiro [1].

Adhesive joints are particularly sensitive to peel stresses, especially when more brittle adhesives such as Araldite® AV138 are used. To try to improve the strength of T joints, in this dissertation the bi-adhesive technique is studied. This technique consists of using two adhesives, placing a more ductile adhesive at the overlap ends and a brittle one in the central area. To test this method in T joints, in this dissertation, various combinations of the adhesives Araldite® AV138, Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752 are used. Various lengths of the central adhesive are also tested, always keeping joint symmetry. To evaluate these combinations, a numerical study was carried out using the CZM technique, in the ABAQUS® software, applying a displacement of 6 mm to the joint and clamping the base adherend.

With the present work, it was initially possible to validate the CZM technique with experimental results. The numerical work that followed showed that the strength of T-joints significantly depends on the combination of adhesives used, and that it is possible to achieve significant increases in strength and dissipated energy relative to single-adhesive joints.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
CFRP	Polímero reforçado com fibra de carbono
CLS	Teoria das distâncias críticas
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
DEM	Departamento de Engenharia Mecânica
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Mecânica da Fractura Linear Elástica
MTS	Máquina de ensaio de tracção
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
TFFV	Técnica do fecho da fenda virtual

Lista de Unidades

°	Grau
°C	Graus Celsius
GPa	Gigapascal
J	Joule
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
m	metro
min	Minuto
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
Pa	Pascal

Lista de Símbolos

-	Símbolo matemático “menos” ou “negativo”
%	Porcentagem
/	Símbolo matemático “dividido por”
+	Símbolo matemático “mais” ou “positivo”
<	Símbolo matemático “menor que”
=	Símbolo matemático “igual a”
>	Símbolo matemático “maior que”
B	Largura do aderente
Curva P - δ	Curva carga-deslocamento
Curva σ - ε	Curva tensão-deformação
E	Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G	Taxa de libertação de energia de deformação
G_c	Taxa crítica de libertação de energia de deformação
G_I	Taxa de libertação de energia de deformação do modo I
G_{Ic}	Taxa crítica de libertação de energia de deformação do modo I
G_{Ic}	Tenacidade à tracção
G_{II}	Taxa de libertação de energia de deformação do modo II
G_{IIc}	Taxa crítica de libertação de energia de deformação do modo II
G_{IIc}	Tenacidade ao corte
h	altura
l	Comprimento da ligação
L_0	Comprimento de sobreposição
L_A	Altura do aderente
L_T	Distância entre apoios da placa de CFRP
M	Momento Flector
P	Carga
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima
P_x	Carga na direcção x
P_y	Carga na direcção y
R	Raio de curvatura do aderente
t	Espessura do adesivo
t_1	Espessura do aderente
t_a	Espessura do adesivo
t_n^0	Tensão máxima à tracção
t_p	Espessura do aderente
t_{p1}	Espessura do aderente de CFRP
t_{p2}	Espessura do aderente em alumínio

t_s^0	Tensão máxima ao corte
U	Energia absorvida
X	Distância
$\times$	Símbolo matemático “multiplicado por”
γ_f	Deformação de rotura ao corte
δ	Deslocamento
δ_n	Deslocamento em tracção
δ_n^0	Deslocamento máximo à tracção
δ_s	Deslocamento em corte
δ_s^0	Deslocamento máximo ao corte
ϵ_f	Deformação de rotura à tracção
ν	Coeficiente de Poisson
σ_f	Tensão de rotura
σ_x	Tensão normal na direcção x
σ_y	Tensão normal na direcção y
σ_y	Tensão de cedência à tracção
τ_f	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{médio}$	Tensão média de corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Junta adesiva com zonas constituintes [6].	8
Figura 2 - Configurações de juntas de sobreposição (adaptado de [4, 7]): a) junta de sobreposição simples (JSS), b) junta de sobreposição dupla (JSD), c) junta com chanfro exterior e d) junta de ressalto...	10
Figura 3 - Configurações de junta topo a topo (adaptado de [4, 7]: a) junta topo a topo, b) junta com chanfro interior (<i>scarf</i>), c) junta em degrau e d) junta macho-fêmea (<i>tongue and groove</i>).	11
Figura 4 - Configurações de juntas de tira ou com cobre-junta (adaptado de [4, 7]): a) junta de tira simples, b) junta de tira dupla, c) junta de tira com chanfros e d) junta tira macho-fêmea.	11
Figura 5 – Configurações de juntas em T [5].	12
Figura 6 - Configurações de juntas de canto [5].	12
Figura 7 - Configurações de juntas de reforço: a) arrancamento e b) clivagem [5].	13
Figura 8 - Configurações de juntas cilíndricas: a) Varões, b) Tubos [5].	13
Figura 9 - Diagrama de esforço de tracção com distribuição de tensões: a) não uniforme e b) uniforme (adaptado de [3, 9]).	14
Figura 10 - Diagrama de esforço de compressão com distribuição de tensões (adaptado de [6, 10]).	14
Figura 11 - Diagrama de esforço de corte com distribuição de tensões (adaptado [6]).	15
Figura 12 - Efeito do comprimento e largura de sobreposição na resistência ao corte [6].	15
Figura 13 - Diagrama de esforço de clivagem com distribuição de tensões (adaptado de [6]).	16
Figura 14 - Diagrama de esforço de arrancamento com distribuição de tensões (adaptado [6]).	16
Figura 15 - Rotura adesiva [5].	17
Figura 16 - Rotura coesiva [5].	17
Figura 17 - Rotura pelo aderente [5].	17
Figura 18 - Rotura mista [5].	17
Figura 19 - Esquema ilustrativos dos locais de aplicação de ligações adesivas de um Airbus A380 [12].	18
Figura 20 - Esquema ilustrativos da aplicação de adesivos na cauda de um Boeing 777 [3].	18
Figura 21 - Tipos de ligações adesivas num automóvel [3].	19
Figura 22 - Esquema de componentes de um sapato [12].	20
Figura 23 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de camada fina de adesivo: aproximação continua (b) (adaptado de [27]).	23
Figura 24 - Modelo coesivo triangular [38, 39].	24

Figura 25 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: a) iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição e b) crescimento dano do aderente de alumínio [27].	28
Figura 26 - Esquema de um ensaio de arrancamento a 180° [5].	30
Figura 27 - Representação esquemática do ensaio do rolete flutuante [5].	31
Figura 28 - Representação do ensaio de climbing [70].	31
Figura 29 - Esquema de representativo do ensaio de arrancamento em juntas T [5].	32
Figura 30 - a) Geometria da junta usada no estudo, b) Cargas aplicadas [71].	32
Figura 31 - Representação da geometria usada nos estudos experimentais [71].	33
Figura 32 - Representação da junta em L em estudo [72].	33
Figura 33 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e correspondente resultado numérico em função de t_{p2} para a) Araldite® AV138 e b) Sikaforce® 7752 [72].	34
Figura 34 - Representação da junta T usada no estudo e os seus parâmetros [73].	35
Figura 35 - Comparação de resultados numéricos e experimentais de $P_{máx}$ das juntas do estudo [73].	35
Figura 36 - Previsão de $P_{máx}$ do estudo [73].	35
Figura 37 - Representação da junta T usada no estudo [74].	36
Figura 38 - Representação das juntas T usadas no estudo: a) 25 %; b) 50% e c) 75% e embebimento [74].	36
Figura 39 - Configuração geométrica da junta T em estudo [75]	37
Figura 40 - Interações interfaciais numa junta adesiva curva: (a) interações normais e (b) interações paralelas [76]	39
Figura 41 - Representação esquemática da junta com bi-adesivo [77].	39
Figura 42 - Representação esquemática de juntas de sobreposição simples (a) sem filete de adesivo e (b) com filete de adesivo [81].	40
Figura 43 - Representação esquemática do chanfro interno [82].	41
Figura 44 - Representação esquemática do chanfro externo [83]	42
Figura 45 - Representação esquemática da junta tubular e respectivas condições fronteira [84]	42
Figura 46 - Representação esquemática da junta T usada na validação experimental [1].	45
Figura 47 - Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW 6092-T651 [59].	47
Figura 48 - Curva σ - ϵ de provetes <i>bulk</i> do adesivo Araldite® AV138 [87].	48
Figura 49 - Curva σ - ϵ de provetes <i>bulk</i> do adesivo Araldite® 2015 [87].	49
Figura 50 - Curva σ - ϵ de provetes <i>bulk</i> do adesivo Sikaforce® 7752	50

Figura 51 - Ensaio das juntas em T: (a) MTS utilizada e (b) encastramento do substrato base (adaptado de [1]).....	51
Figura 52 - Superfície de rotura das juntas adesivas com $t_{p2}=1$ mm [1].....	52
Figura 53 - Valores experimentais de $P_{máx}$ obtidos nas juntas adesivas com Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [1].....	53
Figura 54 - Representação do desenho da junta com $t_{p2}=1$ mm e das suas partições.....	54
Figura 55 - Propriedades usadas nas simulações em ABAQUS® para o adesivo Araldite® AV138.	54
Figura 56 - Selecção do tipo de secção para as juntas analisadas.....	55
Figura 57 - Incrementação usada nos modelos de estudo.....	55
Figura 58 - Condições fronteira para os modelos ABAQUS® usados.....	56
Figura 59 - Tipo de malha seleccionado nos modelos.....	57
Figura 60 - Malha usada nos modelos.....	57
Figura 61 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=1$ mm.....	64
Figura 62 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=4$ mm.....	64
Figura 63 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=1$ mm.	65
Figura 64 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=4$ mm.	66
Figura 65 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 25-75-25 e $t_{p2}=1$ mm.	67
Figura 66 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 25-75-25 e $t_{p2}=4$ mm.	67
Figura 67 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=1$ mm.	68
Figura 68 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=4$ mm.	69
Figura 69 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=1$ mm.	70
Figura 70 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=4$ mm.	70
Figura 71 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=1$ mm.	71
Figura 72 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=4$ mm.	72
Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 25-50-25 e $t_{p2}=1$ mm.	73
Figura 74 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 25-50-25 e $t_{p2}=4$ mm.	73
Figura 75 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=1$ mm.	74
Figura 76 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=4$ mm.	75
Figura 77 - Resultados de $P_{máx}$ obtidos para a configuração 12,5-75-12,5.....	76
Figura 78 - Resultados de $P_{máx}$ obtidos para a configuração 25-50-25.....	77
Figura 79 - Resultados de $P_{máx}$ obtidos para a configuração 33-34-33.....	79

Figura 80 - Resultados de U obtidos para a configuração 12,5-75,12,5.....	81
Figura 81 - Resultados de U obtidos para a configuração 25-50-25.....	82
Figura 82 - Resultados de U obtidos para a configuração 33-34-33.....	84

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Histórico de desenvolvimento dos adesivos estruturais [3, 4].	7
Tabela 2 - Tipos de juntas T usadas para ensaio e respectivas características (adaptado de [75]).	38
Tabela 3 - Parâmetros da junta usada na validação experimental [1].	46
Tabela 4 - Composição química da liga de alumínio utilizada [85].	46
Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio utilizada (Dados do fabricante,[85]).	46
Tabela 6 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [87, 88]. Valores ^a são estimados na referência [88] e valores ^b são do fabricante.	48
Tabela 7 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [87]. Valores ^a são do fabricante.	49
Tabela 8 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [89]. Valores ^a são do fabricante.	50
Tabela 9 - Aumento percentual dos valores de $P_{máx}$ [1]	53
Tabela 10 - Correspondência dos nomes dos adesivos a designações curtas utilizadas.	59
Tabela 11 - Modos de rotura numéricos.	60
Tabela 12 - Modos de rotura obtidos no estudo numérico na configuração 12,5-75-12,5.	61
Tabela 13 - Modos de rotura obtidos no estudo numérico na configuração 25-50-25.	62
Tabela 14 - Modos de rotura obtidos no estudo numérico na configuração 33-34-33.	62
Tabela 15 - Valores de $P_{máx}$ e aumentos de resistência obtidos para a configuração 12,5-75-12,5.	77
Tabela 16 - Valores de $P_{máx}$ e aumentos de resistência obtidos para a configuração 25-50-25.	78
Tabela 17 - Valores de $P_{máx}$ e aumentos de resistência obtidos em simulação ABAQUS® para a configuração 33-34-33.	79
Tabela 18 - Melhor selecção de adesivos para as várias configurações tendo em conta resultados de $P_{máx}$.	80
Tabela 19 - Valores de U e variações obtidos para a configuração 12,5-75-12,5.	82
Tabela 20 - Valores de U e variações obtidos em simulação ABAQUS® para a configuração 25-50-25.	83
Tabela 21 - Valores de U e variações obtidos em simulação ABAQUS® para a configuração 33-34-33.	84
Tabela 22 - Melhor selecção de adesivos para as várias configurações tendo em conta resultados de U .	85

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objectivos.....	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização de juntas adesivas.....	8
2.1.2	Configurações comuns de juntas	10
2.1.2.1	Juntas de sobreposição.....	10
2.1.2.2	Juntas topo a topo	10
2.1.2.3	Juntas com tira.....	11
2.1.2.4	Juntas em T	11
2.1.2.5	Juntas de canto	12
2.1.2.6	Juntas de reforço	12
2.1.2.7	Juntas cilíndricas	13
2.1.3	Esforços e modos de ruptura	14
2.1.4	Aplicações.....	18
2.1.4.1	Indústria Aeronáutica	18
2.1.4.2	Indústria Automóvel	19
2.1.4.3	Indústria do calçado.....	19
2.2	Previsão de resistência.....	20
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	21
2.2.2	Mecânica da fractura.....	22
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	23
2.2.3.1	Tipos de leis coesivas	24
2.2.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	25

2.2.4	Mecânica do dano	26
2.2.5	Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX)	27
2.2.6	Estado de arte	28
2.3	Juntas adesivas sujeitas a esforço de arrancamento	29
2.3.1	Ensaio de caracterização de adesivos ao arrancamento	30
2.3.2	Ensaio arrancamento a 180°	30
2.3.3	Ensaio de rolete flutuante	30
2.3.4	Ensaio de <i>climbing</i>	31
2.3.5	Ensaio <i>T-peel</i>	31
2.3.6	Juntas em L	32
2.3.7	Juntas em T	34
2.3.8	Outros tipos de juntas	37
2.3.8.1	Juntas “T-peel”	37
2.3.8.2	Juntas curvas	38
2.3.9	Técnicas de melhoria de resistência	39
2.3.9.1	Utilização de bi-adesivo	39
2.3.9.2	Utilização de filetes de adesivo	40
2.3.9.3	Utilização de chanfros interiores e exteriores	41
2.3.9.4	Alteração do comprimento de sobreposição e espessura dos aderentes	42
3	DESENVOLVIMENTO	45
3.1	Validação experimental	45
3.1.1	Geometria das juntas	45
3.1.2	Materiais utilizados	46
3.1.2.1	Aderentes	46
3.1.2.2	Adesivos	47
3.1.2.2.1	Araldite® AV138	47
3.1.2.2.2	Araldite® 2015	48
3.1.2.2.3	Sikaforce® 7752	49
3.1.3	Detalhes experimentais	51

3.1.3.1	Ensaaios das juntas	51
3.1.4	Resultados obtidos	52
3.1.4.1	Modos de rotura	52
3.1.4.2	Resistência das juntas	52
3.2	Análise numérica	53
3.2.1	Geometria das juntas	53
3.2.2	Pré-processamento dos modelos	54
3.2.2.1	Preparação dos modelos	54
3.2.2.1.1	Módulo “Part”	54
3.2.2.1.2	Módulo “Property”	54
3.2.2.1.3	Módulo “Interaction”	55
3.2.2.1.4	Módulo “Step”	55
3.2.2.1.5	Módulo “Load”	56
3.2.2.1.6	Módulo “Mesh”	56
3.2.2.2	Modelos de dano coesivo	57
3.2.3	Resultados obtidos	59
3.2.3.1	Modos de rotura	59
3.2.3.1.1	Configuração 12,5%-75%-12,5%	61
3.2.3.1.2	Configuração 25%-50%-25%	62
3.2.3.1.3	Configuração 33%-34%-33%	62
3.2.3.2	Distribuições de tensões	63
3.2.3.2.1	Tensões de arrancamento.....	63
3.2.3.2.2	Tensões de corte	69
3.2.3.3	Previsão da resistência.....	75
3.2.3.3.1	Configuração 12,5%-75%-12,5%	75
3.2.3.3.2	Configuração 25%-50%-25%	77
3.2.3.3.3	Configuração 33%-34%-33%	78
3.2.3.3.4	Comparação de combinações	80
3.2.3.4	Previsão da energia dissipada.....	80
3.2.3.4.1	Configuração 12,5%-75%-12,5%	81

3.2.3.4.2	Configuração 25%-50%-25%	82
3.2.3.4.3	Configuração 33%-34%-33%	83
3.2.3.4.4	Comparação de configurações	84
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	89
4.1	CONCLUSÕES.....	89
4.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	90
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	93

INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

1.2 Objectivos

1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas apresentam diversas vantagens em relação às ligações convencionais, tais como a facilidade de fabrico, a possibilidade de união de diferentes materiais, a distribuição mais uniforme de tensões e o baixo peso, pelo que a sua utilização na indústria tem vindo a aumentar. Dito isto, também existem desvantagens na sua utilização como a baixa resistência ao arrancamento, as dificuldades no controlo de qualidade e a necessidade de preparação cuidada das juntas. As propriedades do adesivo e substrato, a geometria da junta, entre outros factores influenciam a resistência de uma ligação adesiva. Indústrias como a naval, calçado, aeroespacial e automóvel têm obtido bons resultados com juntas adesivas, o que tem sido um grande contributo para a divulgação e por consequência a utilização das ligações adesivas.

A ductilidade e a resistência mecânica do adesivo são duas das principais características que influenciam a resistência das ligações adesivas. A ductilidade tem elevada influência para a absorção dos picos de tensões presentes nas extremidades das juntas, evitando assim a rotura prematura da junta, enquanto a resistência mecânica é um factor determinante na transmissão de elevados esforços entre aderentes. Os adesivos podem apresentar comportamentos desde o rígido e frágil (Araldite® AV138) até adesivos de elevada flexibilidade, ductilidade e resistência (Sikaforce® 7752), passando por adesivos moderadamente dúcteis e flexíveis, mas de menor resistência (Araldite® 2015).

As juntas de reforço, quando usadas, por exemplo em painéis de reforço, desempenham um papel importante no projecto de elementos de fuselagens, levando a aumentos da rigidez da estrutura. Em alguns casos desta aplicação, as juntas adesivas podem ficar sujeitas a esforços de arrancamento. O estudo de juntas adesivas sujeitas a esforço de arrancamento tem tido grandes avanços, no entanto continua a haver questões por responder quanto aos efeitos geométricos e dos materiais e qual a sua influência na resistência e vida da junta. Desta forma, ferramentas que auxiliem na previsão da resistência e da evolução do dano nas juntas são fundamentais para os projectistas.

1.2 Objectivos

A presente dissertação foi realizada no âmbito do ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico do Mestrado em Engenharia Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), no ano lectivo de 2020-2021.

O objectivo da dissertação consistiu na avaliação da viabilidade da utilização da técnica de bi-adesivo como técnica de melhoria da resistência das juntas adesivas em T. Para este efeito, foram estudadas a resistência, os modos de rotura, a energia dissipada e a distribuição de tensões. O trabalho realizado consistiu, após validação com dados experimentais dos modelos de dano coesivo (MDC), numa simulação numérica de juntas T em liga de alumínio AW 6082-T651 utilizando várias configurações e combinações de três adesivos diferentes (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752). Para realizar as simulações do estudo numérico foi utilizando o *software* de elementos finitos ABAQUS®. Para realizar o estudo foi usado um MDC de forma triangular já implementado no *software*. As configurações usadas consistiram na variação do comprimento do adesivo central mantendo a junta simétrica.

1.3 Organização da dissertação

Esta dissertação está organizada em quatro capítulos distintos.

No primeiro capítulo apresenta-se o enquadramento do tema, os objectivos propostos para a dissertação e a estrutura da mesma.

No segundo capítulo apresenta-se a revisão bibliográfica sobre os tópicos mais relevantes nas ligações adesivas. É feita uma análise sobre juntas adesivas, são demonstradas as suas vantagens e desvantagens e as suas aplicações industriais. Apresentam-se as configurações possíveis das juntas, os modos de rotura e os esforços a que as juntas podem estar sujeitas. Finalmente são descritos os ensaios utilizados na caracterização de juntas adesivas ao arrancamento e são apresentados estudos recentes sobre juntas L e T, e outros tipos de juntas onde os esforços de arrancamento são importantes.

No ponto 3.1 apresenta-se a validação experimental do MDC utilizado através da descrição detalhada do trabalho de Carneiro [1]. São descritos neste capítulo os materiais utilizados, as condições de teste e a geometria. Por fim, apresentam-se os resultados experimentais e a comparação dos mesmos com o estudo numérico.

Em 3.2 apresenta-se o estudo numérico realizado por MDC no *software* ABAQUS®. São apresentados os resultados de carga máxima ($P_{\text{máx}}$), a energia dissipada (U) e os modos de rotura para as várias configurações e combinações de adesivos utilizados. Por fim, é feita uma comparação entre os resultados obtidos para adesivos aplicados isoladamente e as combinações e configurações de bi-adesivo, no sentido de propor uma combinação ideal que maximize o desempenho destas juntas.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões da dissertação e também propostas para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Previsão de resistência
- 2.3 Juntas adesivas sujeitas a esforço de arrancamento

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

As juntas adesivas são largamente aplicadas em várias indústrias como a industria automóvel, a indústria naval e a indústria aeroespacial devido às significativas vantagens que oferecem [2].

Há indícios arqueológicos de que os neandertais utilizavam adesivos para fazer ligações dos cabos das suas ferramentas há 80.000 anos. No entanto apenas por volta do ano 1700 é que se iniciou a produção industrial de adesivos, aparecendo a primeira patente em Inglaterra para “*a kind of glue called fish glue*” em 1754. A Tabela 1 mostra cronologicamente a disponibilidade industrial de vários adesivos [3].

Tabela 1 - Histórico de desenvolvimento dos adesivos estruturais [3, 4].

Ano de disponibilidade comercial	Tipo de Adesivo	Ano de disponibilidade comercial	Tipo de adesivo
Pré-1910	Colas de osso animal	1950	Epóxidos
	“colas de peixe”		Ciano-acrilatos
	Adesivos vegetais		Anaeróbicos
1910	Fenol-formaldeído	1960	Poliimida
	Colas de caseína		<i>Polibenzimidazole</i>
			<i>Poliquinoxaline</i>
1920	Éster de celulose	1970	Acrílicos (2ª geração)
	Borracha ciclizada em adesivos		Poliuretanos estruturais
	<i>Neoprene</i>		
1930	Ureia-formaldeído	1980	Endurecedores para resinas
	Fitas adesivas sensíveis à pressão		termoendurecíveis
			Epóxidos à base de água
1940	Nitrilo-fenólico	1990	Époxidos modificados com poliuretano
	Vinil-fenólico		
	Acrílico		
	Poliuretano		
	<i>clorinated rubber</i>		

A necessidade tecnológica da segunda guerra mundial levou à utilização de ligações adesivas, por exemplo na construção do caça britânico *Mosquito* utilizando um adesivo de ureia-formaldeído para colar a sua estrutura de madeira. No entanto estes adesivos eram muito frágeis. Este problema foi ultrapassado por de Bruyne e os seus colegas nos anos 40, que modificaram a composição química dos adesivos através da adição de adesivos com boa tenacidade. Um exemplo disto é a combinação de polivinilo formal com resol fenólico. Este avanço foi muito importante para a tecnologia e permitiu ligação de materiais metálicos e madeira com bastante sucesso. Este adesivo foi aplicado nos anos 50 no projecto do avião a jacto *comet* obtendo uma boa rigidez e resistência combinados com um baixo peso da estrutura metálica [5].

Um adesivo pode ser definido como uma substância capaz de ligar duas superfícies de forma resistente e permanente. Os adesivos funcionam principalmente por forças de adesão. A adesão consiste na atracção de duas substâncias diferentes, por contraste as forças de coesão que existem dentro de uma substância. [3, 4].

2.1.1 Caracterização de juntas adesivas

Ao conjunto formado pelo adesivo, primário (caso aplicável), substrato, interfases e interfaces, chama-se junta adesiva, a Figura 1 mostra uma representação da ligação adesiva. Estes componentes podem ser descritos por [4, 5]:

- **Substrato**, é o material a ser ligado. É comum, após feita a ligação adesiva, e utilizar o termo aderente;
- **Interface**, é o plano de contacto entre o substrato e o adesivo;
- **Interfase**, é a uma pequena zona na qual está contida a Interface. As suas propriedades são diferentes tanto do adesivo como dos aderentes, e as suas características são fundamentais para qualidade da ligação;
- **Primário**, é um material que pode ser usado para protecção das superfícies (antes da aplicação de adesivo) ou para promover melhor adesão.

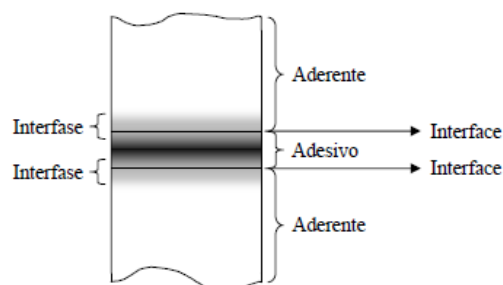


Figura 1 – Junta adesiva com zonas constituintes [6].

Podem ser apresentadas enumeras vantagens das ligações adesivas em relação aos processos tradicionais de ligação, como as ligações aparafusadas, soldadura, rebitagem ou brasagem. As vantagens de maior destaque são [4, 5]:

- Distribuição mais uniforme de tensões ao longos das áreas ligadas, o que favorece a transmissão de cargas e permite uma rigidez mais elevada, sendo assim possível uma redução de peso, um menor custo e uma melhor resistência à fadiga;
- Amortecimento de vibrações, permitindo, ainda que parcialmente, que as tensões sejam absorvidas;
- Permitir a ligação de materiais diferentes, tanto em composições químicas como propriedades físicas;
- Permitir, com elevada eficiência, ligar chapas de espessuras finas;
- Permitir estruturas com contornos regulares, ou seja, sem furos ou ressalto (provocados por parafusos ou rebites) ou marcas originadas pela soldadura;
- Garantir, entre as superfícies ligadas, um contacto contínuo;
- Permitir ligar componentes de qualquer forma ou espessura;
- As temperaturas necessárias para fabricar a junta não modificam as propriedades dos materiais ligados;
- Geralmente com custo inferior às ligações aparafusadas;
- Prevenir ou minimizar, entre metais dissimilares, corrosão galvânica.

Apesar de todas as vantagens que apresentam, as ligações adesivas também apresentam algumas desvantagens [4, 5]:

- Em condições extremas, como calor e humidade, tem resistência limitada;
- É necessária uma preparação cuidada das superfícies a ligar com, por exemplo, ataques químicos ou abrasão mecânica;
- O projecto da junta tem de minimizar forças de arrancamento, clivagem e impacto. As geometrias da junta devem evitar tensões localizadas e permitir uma distribuição uniforme das tensões. Caso tensões não estejam posicionadas perpendicularmente ao adesivo, podem ser criados esforços de clivagem ou arrancamento;
- Dificuldades no controlo da qualidade da ligação;
- Não existe um critério de dimensionamento universal que permita projectar qualquer estrutura;
- A ligação não é instantânea e por isso normalmente é necessário utilizar ferramentas de fixação para manter a posição dos componentes durante o processo de cura;
- A cura dos adesivos pode ser realizada a elevadas temperaturas, sendo necessário utilizar fornos ou prensas.

2.1.2 Configurações comuns de juntas

2.1.2.1 Juntas de sobreposição

A Figura 2 mostra uma representação das várias configurações de juntas de sobreposição.

As juntas de sobreposição são as mais comuns, nomeadamente as juntas de sobreposição simples (JSS) (Figura 2a)). Isto deve-se à facilidade de fabrico e à solicitação maioritariamente ao corte do adesivo. No entanto o desalinhamento dos substratos leva a que as forças transmitidas não sejam colineares originando flexão dos substratos, o que leva a que nas extremidades da junta existam tensões de arrancamento. A acrescentar a este efeito na zona final da junta há uma variação brusca de secção, causando também uma concentração de tensões [4, 5].

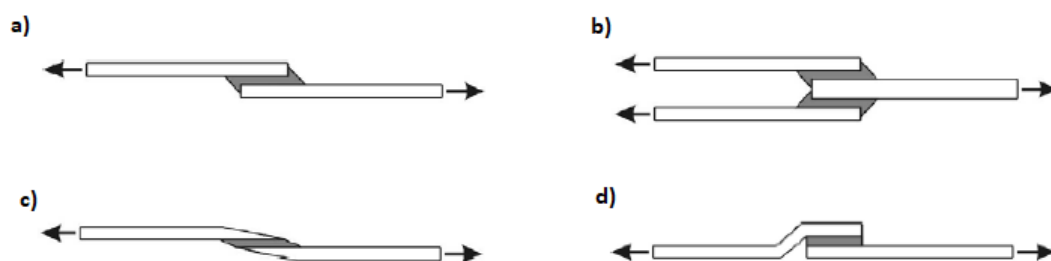


Figura 2 - Configurações de juntas de sobreposição (adaptado de [4, 7]): a) junta de sobreposição simples (JSS), b) junta de sobreposição dupla (JSD), c) junta com chanfro exterior e d) junta de ressalto

As juntas de sobreposição dupla (JSD) (Figura 2b)) são introduzidas como uma forma evitar a flexão dos substratos visto apresentarem uma configuração simétrica. No entanto, são de fabrico mais demorado quando comparado com a JSS. As juntas de chanfro exterior (Figura 2c)) são empregues para corrigir o desalinhamento de forças existente nas JSS. Em caso de substratos de elevada resistência ou frágeis a dificuldade de fabricação deste tipo de juntas é uma grande desvantagem. As juntas de chanfro exterior tem como objectivo eliminar os picos de tensões presentes nas extremidades da JSS conseguindo assim uma distribuição de tensões mais uniforme [4, 5].

2.1.2.2 Juntas topo a topo

A Figura 3 mostra uma representação das várias configurações de juntas topo a topo.

As juntas topo a topo são as mais simples de fabricar, no entanto não suportam esforços de flexão visto que induzem clivagem no adesivo.

As juntas de chanfro interior e de degrau são aplicadas como forma de diminuir a variação de tensões ao longo do adesivo e aumentar a resistência da junta. Este tipo de

juntas apresenta também uma diminuição da excentricidade de esforços. São, no entanto, conhecidas pelas dificuldades de fabricação dos seus degraus e rampas. No caso de serem aplicados em substratos em compósito, é comum que os degraus sejam realizados no empilhamento das camadas (antes da cura) de forma a evitar posterior maquinaria e dano nas fibras. As juntas macho-fêmea são mais eficientes a evitar os esforços de flexão visto serem auto-alinhantes [4, 5].

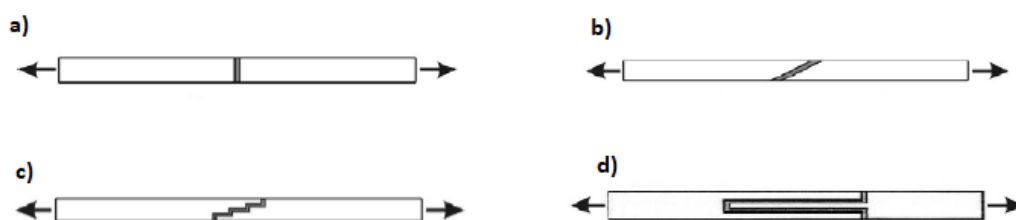


Figura 3 - Configurações de junta topo a topo (adaptado de [4, 7]): a) junta topo a topo, b) junta com chanfro interior (*scarf*), c) junta em degrau e d) junta macho-fêmea (*tongue and groove*).

2.1.2.3 Juntas com tira

A Figura 4 mostra uma representação de várias configurações de juntas com tira. As juntas de tira simples, tal como as JSS, estão sujeitas a esforços de arrancamento. As juntas de tira dupla permitem diminuir o momento flector, que torna este tipo de junta preferencial. As juntas de tira com chanfro e macho-fêmea apresentam o melhor desempenho, embora necessitem de maquinaria no fabrico dos substratos [4, 5].

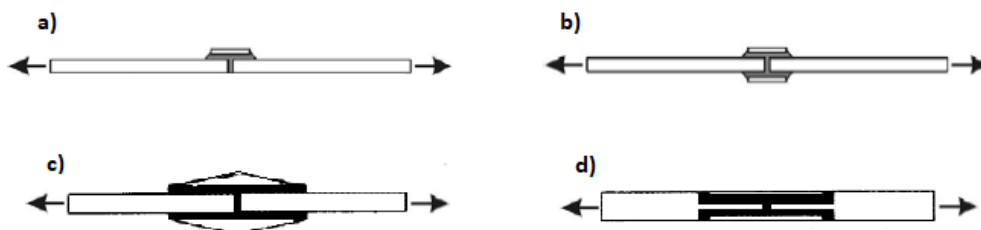


Figura 4 - Configurações de juntas de tira ou com sobre-junta (adaptado de [4, 7]): a) junta de tira simples, b) junta de tira dupla, c) junta de tira com chanfros e d) junta tira macho-fêmea.

2.1.2.4 Juntas em T

A Figura 5 mostra configurações de juntas em T que podem ser usadas no projecto de forma a reduzir o esforço de arrancamento e aumentar o esforço de corte [4, 5]. As Juntas em T são caracterizadas pela perpendicularidade dos seus componentes, mas consideram-se também em casos onde este ângulo de ligação é diferente de 90°. O carregamento neste tipo de juntas pode ser no plano da chapa (N) ou transverso (T).

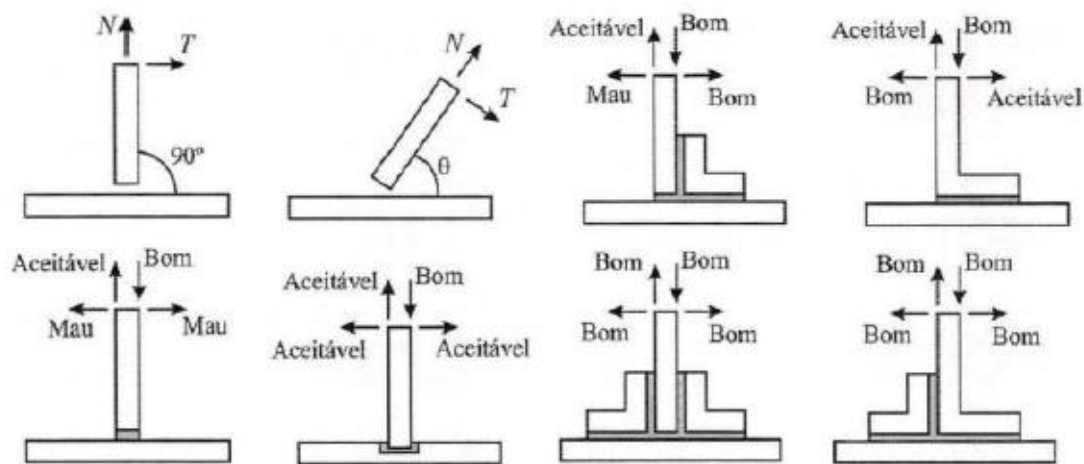


Figura 5 – Configurações de juntas em T [5].

2.1.2.5 Juntas de canto

A Figura 6 mostra configurações de juntas de canto para diminuir esforços de arrancamento. Como é visível, as soluções são muito semelhantes às empregadas nas juntas em T [4, 5]. As juntas de canto são semelhantes às juntas em T.

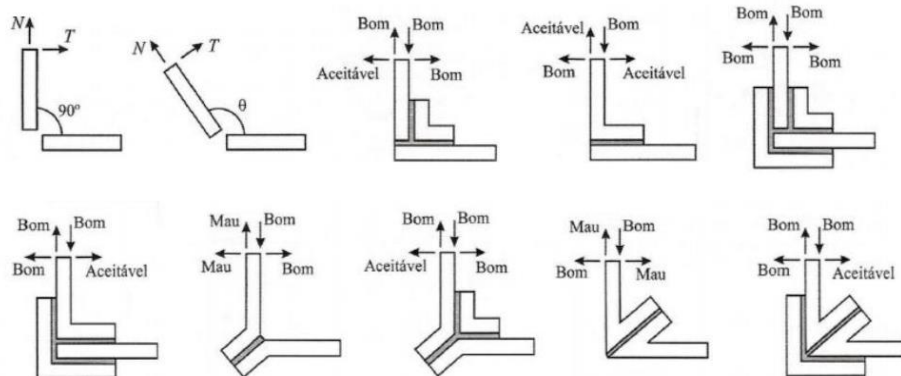


Figura 6 - Configurações de juntas de canto [5].

2.1.2.6 Juntas de reforço

Em juntas obtidas por colagem de substratos finos a componentes espessos, as solicitações podem gerar tensões de arrancamento elevadas. A Figura 7a) mostra algumas soluções que podem ser implementadas para reduzir estas tensões. É também comum fazer colagens de reforços sobre substratos finos para aumentar a sua rigidez. Nestes casos, solicitações de flexão poderão induzir esforços de clivagem no adesivo. Na Figura 7b) são apresentadas algumas opções para combater esforços de clivagem em juntas de reforço. Esta melhoria de resistência pode ser obtida através de um aumento da área de ligação, da flexibilidade do rebordo e da rigidez da base [4, 5].

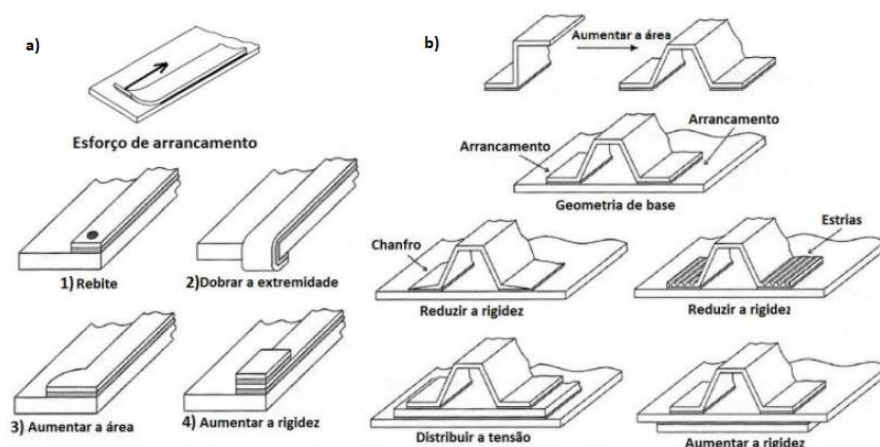


Figura 7 - Configurações de juntas de reforço: a) arrancamento e b) clivagem [5].

2.1.2.7 Juntas cilíndricas

A Figura 8 mostra algumas configurações de ligações cilíndricas em varões, a), e tubos, b). As juntas cilíndricas são usadas habitualmente para ligar varões e tubos. Estas são mais vantajosas quando comparadas com juntas topo a topo, visto que conseguem maior área de ligação e diminuição do efeito de arrancamento. Nestas juntas são usados chanfros, canais e ressaltos de forma a facilitar a montagem dos componentes. A inspecção da junta é difícil visto que esta não está acessível, mas podem utilizar-se, por exemplo, orifícios para injeção de adesivos e canais para saída de ar para garantir que o adesivo preencha completamente a cavidade. O fabrico da maioria das juntas deste tipo necessita de maquinagem, o que aumenta os custos de fabrico [4, 5, 8].

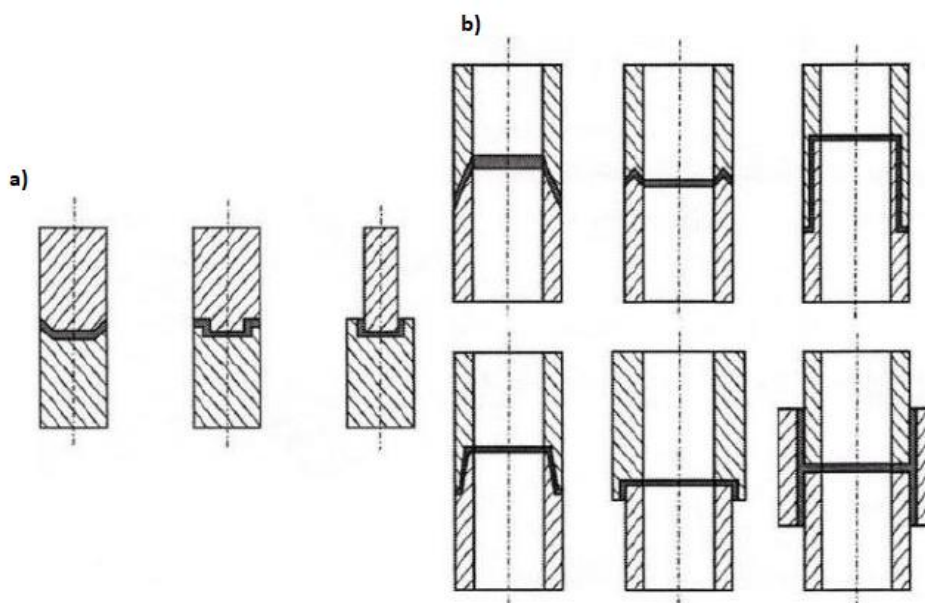


Figura 8 - Configurações de juntas cilíndricas: a) Varões, b) Tubos [5].

2.1.3 Esforços e modos de ruptura

Há essencialmente cinco tipos de esforços aos quais as ligações adesivas podem ser sujeitas:

Tracção: Esforços de tracção desenvolvem-se quando existe actuação de forças perpendiculares ao plano de colagem. A distribuição destas tensões normais é uniforme ao longo do comprimento de ligação (Figura 9b)). No entanto, nas juntas adesivas, a distribuição de tensões não é uniforme devido à existência de concentrações de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades de juntas (Figura 9a). Para evitar que estas concentrações de tensões apareçam é necessário que, no projecto da junta adesivas existam alguns cuidados como, por exemplo, criação de guiamento na junta para garantir um carregamento axial contínuo e utilização de aderentes rígidos o suficiente para que as tensões se distribuam o mais uniformemente possível [4, 5, 9].

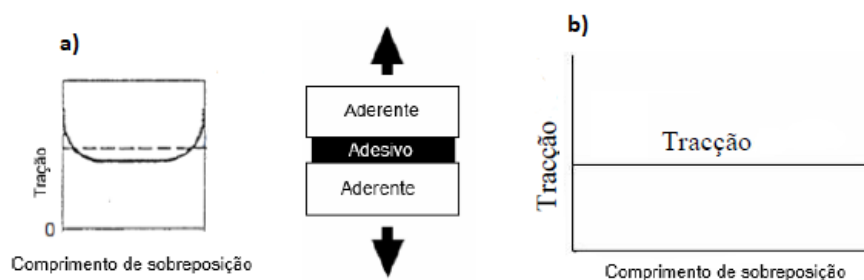


Figura 9 - Diagrama de esforço de tracção com distribuição de tensões: a) não uniforme e b) uniforme (adaptado de [3, 9]).

- **Compressão:** Os esforços de compressão surgem de forças que comprimem os aderentes um contra o outro. Juntas submetidas a compressão pura praticamente não precisam de adesivo. No entanto a sua aplicação pratica é limitada. A distribuição de tensões é uniforme ao longo da junta, como se pode observar na Figura 10 [4, 5, 9].t

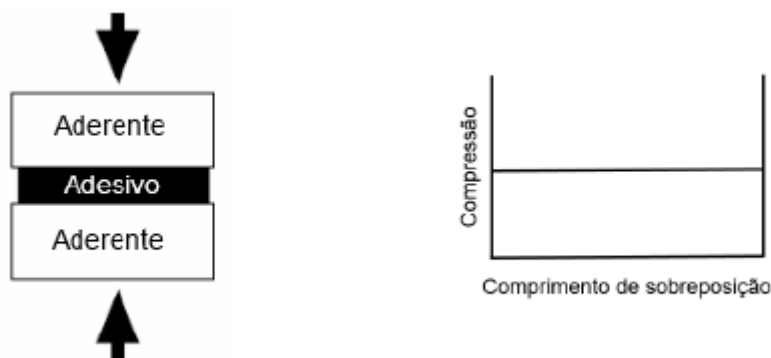


Figura 10 - Diagrama de esforço de compressão com distribuição de tensões (adaptado de [6, 10]).

- **Corte:** As tensões de corte surgem quando actuam forças na direcção do adesivo. As juntas adesivas são, de forma geral, mais resistentes quando submetidas a estes esforços porque é relativamente simples manter os substratos alinhados e toda a área de ligação contribui para a resistência da junta. As tensões de corte são mais elevadas nas extremidades do que no centro da junta (Figura 11) devido a fenómeno de deformação diferencial dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada um dos aderentes se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente de uma extremidade até à oposta da ligação. Quanto mais longa for a ligação maior será este efeito. Por este motivo, a largura da ligação é mais importante uma vez que este aumento aumenta a resistência da ligação como é visível na Figura 12. Isto sucede porque o aumento da largura da ligação aumenta a área nos extremos da junta. Aumentar o comprimento de ligação também aumenta a resistência da junta, embora devido ao referido efeito da deformação diferencial este aumento tenha uma taxa decrescente [4, 5, 9].

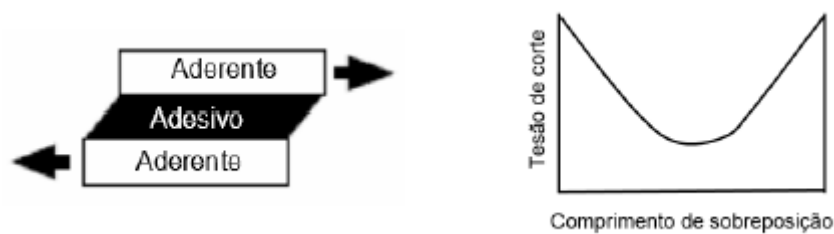


Figura 11 - Diagrama de esforço de corte com distribuição de tensões (adaptado [6]).

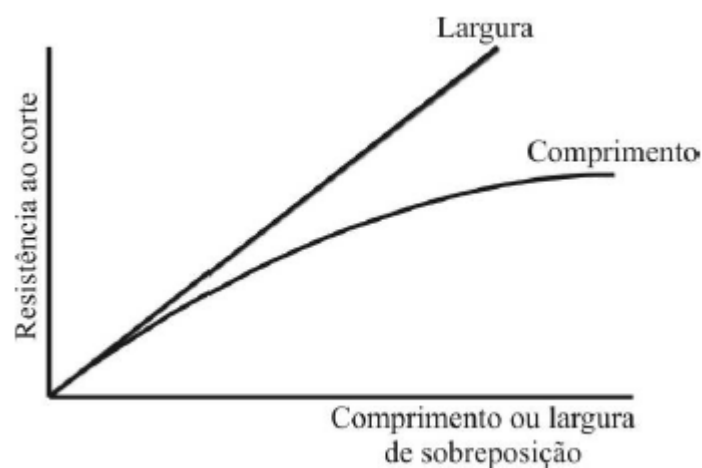


Figura 12 - Efeito do comprimento e largura de sobreposição na resistência ao corte [6].

- **Clivagem:** Os esforços de clivagem resultam de forças de tracção aplicadas apenas a uma extremidade da junta em substratos rígidos provocando concentração de tensões nessa extremidade. As juntas adesivas têm resistência

inferior nestas condições devido à menor área onde as tensões estão concentradas [4, 5]. Na Figura 13 é possível ver um diagrama de uma junta sujeita a clivagem.



Figura 13 - Diagrama de esforço de clivagem com distribuição de tensões (adaptado de [6]).

- **Arrancamento:** Os esforços de arrancamento são muito semelhantes aos de clivagem, mas surgem quando um ou ambos os aderentes são flexíveis. Neste caso os aderentes podem-se deformar plasticamente devido às forças aplicadas, levando à concentração de forças nessa extremidade como é possível de ver na Figura 14. Este tipo de esforços, junto com os de clivagem, devem sempre ser evitados no projecto de juntas adesivas devido à concentração de tensões em pequenas áreas de ligação que levam a resistências inferiores [4, 5].



Figura 14 - Diagrama de esforço de arrancamento com distribuição de tensões (adaptado [6]).

As rupturas de ligações adesivas podem ser [4]:

- **Adesivas:** As roturas adesivas acontecem na interface entre a superfície do substrato e o adesivo como visível na Figura 15. Após rotura, um dos substratos não apresenta resíduo de adesivo e o outro está coberto por adesivos. Este tipo de roturas resulta, normalmente, da preparação da superfície não adequada ou devido à presença de contaminantes na superfície dos aderentes no momento de colagem [3, 4]. Em alguma parte das roturas adesivas uma análise mais cuidada da superfície revela uma fina camada de resíduo de adesivo, sendo nestes casos por alguns autores preferido o termo rotura aparente na adesão [6].



Figura 15 - Rotura adesiva [5].

- **Coesivas:** As roturas coesivas acontecem na camada de adesivo, como é possível ver no esquema da Figura 16. Nestes casos o adesivo cede no seu núcleo, sendo a ligação entre o substrato e o adesivo mais forte do que a resistência interna do adesivo. Caracteristicamente é deixado resíduo adesivo em ambos os substratos. Este modo de rotura é um dos modos preferenciais para uma ligação adesiva [3, 4].



Figura 16 - Rotura coesiva [5].

- **Pelo aderente:** À semelhança das roturas coesivas este é também um dos modos de rotura preferencial de uma ligação adesiva. Estas roturas ocorrem quando a ligação entre substrato e adesivo é mais forte que o próprio aderente, existindo uma rotura total ou parcial do aderente deixando a camada de adesivo intacta, como se verifica no esquema da Figura 17. No caso de uma rotura deste tipo, quando a carga de rotura corresponde à resistência nominal do aderente, pode-se concluir que a junta foi bem fabricada [4].



Figura 17 - Rotura pelo aderente [5].

- **Mistas:** A rotura mista acontece quando há zonas dos aderentes com e sem adesivo, como se pode ver na Figura 18. Atribui-se este tipo de rotura à limpeza insuficiente da superfície ou a má homogeneização na mistura do adesivo [3, 4].



Figura 18 - Rotura mista [5].

2.1.4 Aplicações

As juntas adesivas são usadas nas mais variadas indústrias com a indústria aeronáutica, naval, construção, automóvel entre outras. Neste subcapítulo serão mencionadas as indústrias e produtos dessas indústrias onde são aplicadas juntas adesivas.

2.1.4.1 Indústria Aeronáutica

A indústria aeronáutica utiliza as ligações adesivas há décadas. Quando comparadas com as ligações mecânicas, as ligações adesivas trazem vantagens como a redução de peso, o amortecimento de vibrações, o isolamento, e a resistência à fadiga. Na indústria são utilizadas duas classes de ligações adesivas: as juntas estruturais, que transferem cargas entre membros e que usam adesivos epóxicos, fenólicos ou acrílicos, e as juntas de selagem, que protegem interfaces sujeitas à corrosão [11]. Na Figura 19 podem ver-se os locais onde se usam ligações adesivas num Airbus A380 e na Figura 20 na cauda de uma Boeing 777.

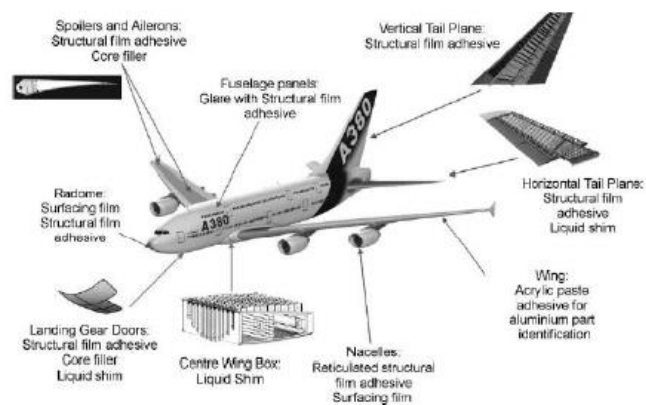


Figura 19 - Esquema ilustrativo dos locais de aplicação de ligações adesivas de um Airbus A380 [12].

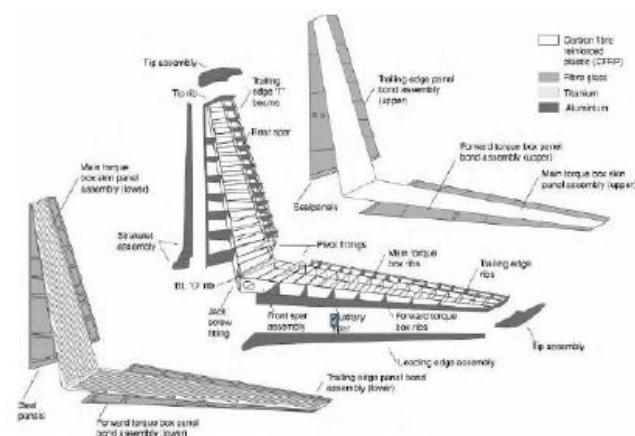


Figura 20 - Esquema ilustrativo da aplicação de adesivos na cauda de um Boeing 777 [3].

2.1.4.2 Indústria Automóvel

A utilização de ligações adesivas na indústria automóvel iniciou-se com a colagem de pára-brisas tendo posteriormente evoluído para pára-choques, componentes interiores, entre outros [11]. A Figura 21 mostra algumas aplicações de ligações adesivas na indústria automóvel.

As ligações adesivas são utilizadas com o objectivo de reduzir o peso dos veículos o que leva à redução de consumo e melhor desempenho. Esta utilização de adesivos nas estruturas levou a um aumento da resistência das estruturas que originou levou a uma optimização da rigidez à torção [11].

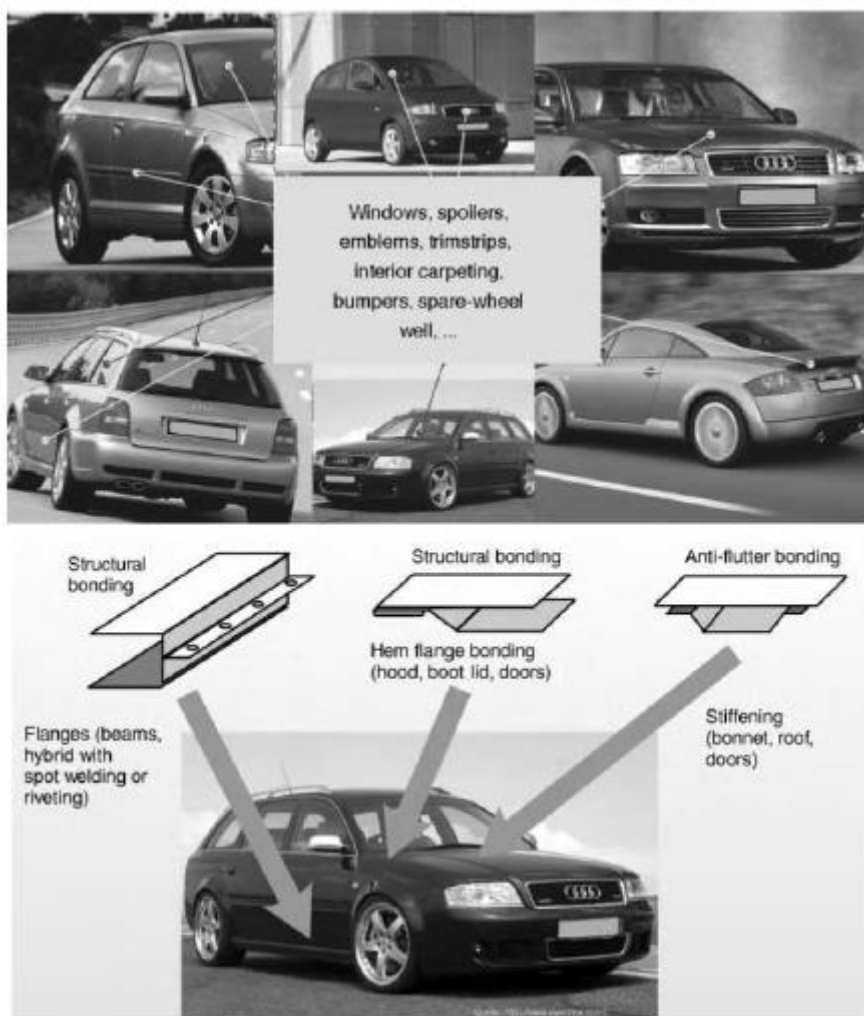


Figura 21 - Tipos de ligações adesivas num automóvel [3].

2.1.4.3 Indústria do calçado

Na indústria do calçado os adesivos são utilizados como alternativa à costura e à utilização de agramos, tachas ou pregos. Esta utilização apresenta várias vantagens, como

a obtenção de juntas mais flexíveis, homogêneas, com melhor aspecto e com uma distribuição de tensões mais uniforme. No entanto as juntas adesivas apresentam também desvantagens, como a necessidade de controlar rigorosamente o processo de ligação para evitar problemas de adesão.

Consoante o tipo de calçado, são aplicados diferentes tipos de ligações adesivas. Calçado para uso normal necessita de uma colagem de baixa exigência. Por outro lado, calçado de trabalho requer ligações de alta exigência, para cumprimento de normas de segurança, tendo de resistir a solventes, a forças elevadas por grandes períodos de tempo ou altas temperaturas. O calçado desportivo necessita também de uma colagem muito exigente, que deve combinar baixo peso com alta resistência ao impacto e flexão [3]. Na Figura 22 podem-se ver os locais de aplicação de adesivo num sapato.

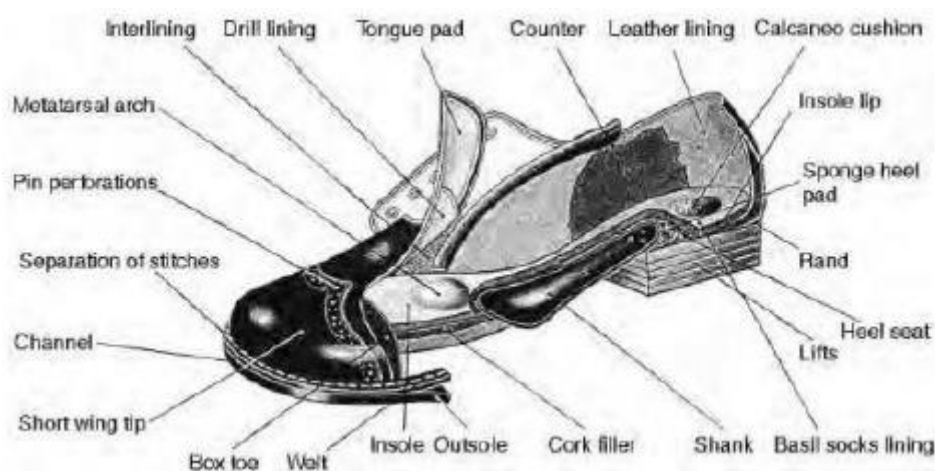


Figura 22 - Esquema de componentes de um sapato [12].

2.2 Previsão de resistência

O processo de evolução das juntas adesivas está relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão de elevada fiabilidade que possibilitam aumentar a eficiência da sua utilização, tornando possível ultrapassar o problema das juntas sobredimensionadas que resultavam em juntas mais pesadas e caras. Todas estas questões estão relacionadas com a falta de modelos precisos e de critérios de rotura adequados que há décadas se notavam. Podem ser aplicadas duas metodologias de análise de juntas, métodos analíticos e métodos numéricos.

Surgiram nos anos 30 do século XX estudos que permitiram avanços no estudo de juntas adesivas como o modelo analítico de Volkersen [13]. Este estudo parte do princípio de que o material tem um comportamento inteiramente elástico e que a deformação do adesivo ocorre apenas em corte. No entanto, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade de o adesivo sofrer deformação plástica, de serem utilizados substratos de compósito ou de materiais diferentes. A técnica mais comum de análise de juntas adesivas é o método dos elementos finitos (MEF) [14]. Esta técnica foi aplicada

inicialmente por Harris e Adams [15] que introduziram factores como a plasticidade dos aderentes e do adesivo, a rotação da junta e a influência de filetes de adesivo. Foi então usada a mecânica dos meios contínuos para previsão da resistência das juntas adesivas. Esta técnica requer a distribuição de tensões e um apropriado critério de rotura.

O MEF é também possível de combinar com técnicas de mecânica de fractura para previsão de resistência, quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV) que pelo factor de intensidade das tensões. No entanto estas técnicas de modelação têm impacto no esforço computacional devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda [16]. Um dos grandes avanços na modelação numérica consistiu na modelação por MDC. Esta técnica junta a modelação convencional por MEF para as regiões em que não se prevê dano com a mecânica de fractura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

Começou-se, mais recentemente, para modelar crescimento de fendas a usar o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), utilizando funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste na utilização de modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obter valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. Nesta técnica a previsão é realizada através de critérios como a deformação ou tensão máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise do estado limite. A estimativa de resistência das ligações adesivas é realizada através da comparação dos valores obtidos pelos modelos com valores admissíveis dos materiais da junta. Para prever a resistência de juntas de sobreposição através de métodos analíticos, pode ser usado o modelo de Volkersen [13]. Este modelo considera que o adesivo é apenas deformado ao corte, podendo assim ser considerada a tensão máxima de corte como um critério de rotura. O critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF foi usado por Adams *et al.* [17] para prever a resistência de juntas adesivas com bons resultados. A dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades do comprimento de sobreposição (L_0), é para estes mesmo autores um aspecto importante na análise de tensões e deformações por métodos numéricos. Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos consideram-se bastante intuitivos e, em alguns casos, conseguem gerar resultados satisfatórios [18]. Porém, estes podem ser muito complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras e defeitos presentes nos adesivos não são tidos em conta por estes critérios. Quando são usados adesivos dúcteis, segundo Harris e Adams [15], os critérios existentes

baseados em tensões não são adequados, porque após o adesivo ceder ele ainda suporta elevadas deformações antes da rotura.

2.2.2 Mecânica da fractura

É estabelecido pela mecânica dos meios contínuos que a estrutura e o seu material são contínuos. No caso de existirem defeitos no material, para estruturas com cantos reentrantes ou com outro tipo de singularidades de tensões esta hipótese não se adequa. Por outro lado, a mecânica da fractura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados quer por processos de fabrico quer por acidentes no seu funcionamento. Sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° , teoricamente, existe uma singularidade. Este efeito estende-se 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 fractura permite avaliar se estes defeitos são susceptíveis de causar falha catastrófica, ou se, durante a vida de serviço da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar de forma a manter a segurança da estrutura. As fracturas por propagação de fissuras podem ser desencadeadas por vários factores, como a aplicação de cargas lentas, por fadiga, de impacto, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [5]. Os princípios elementares da mecânica da fractura devem-se ao estudo de Griffith [19] de fractura em fibras de vidro, que lhe possibilitou concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fractura ocorre a partir do mais crítico deles.

Na indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projecto com tolerância de dano. Este baseava-se em conceitos da mecânica da fractura linear elástica. Para materiais dúcteis, há uma certa quantidade de material que plastifica antes de se iniciar a fenda, que se propaga de forma estável, antes da rotura final [20]. A teoria da mecânica da fractura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) foi criada para modelar roturas dúcteis por Hutchinson [21] e por Rice [22].

A taxa de libertação de energia à tracção e corte (G_I ou G_{II} , respectivamente), e o respectivo valor crítico ou resistência a fractura (G_c) são usados na maioria dos estudos em juntas adesivos [23], em detrimento dos factores de intensidade de tensão, devido à dificuldade na sua determinação quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fractura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tracção e corte e também pelo efeito dos substratos. Por este motivo, torna-se necessário utilizar o conceito de envelope de fractura. Ambas as componentes de tenacidade de tracção e corte são envolvidas pelo envelope de fractura quando ambas estão presentes numa solicitação.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

O dano na zona de processo da fractura na frente da fenda sob o efeito de cargas estáticas é descrito pelos estudos de Barenblatt [24] e de Dugdale [25] dando início ao conceito de MDC, um método mais refinado para caracterizar o dano em estruturas. O início de uma fenda e a sua propagação no interior na interface de materiais ou até a delaminação em compósitos passaram a ser possíveis de analisar com os MDC. A implementação dos MDC é, normalmente, feita em elementos coesivos podendo também ser usados elementos de mola [26].

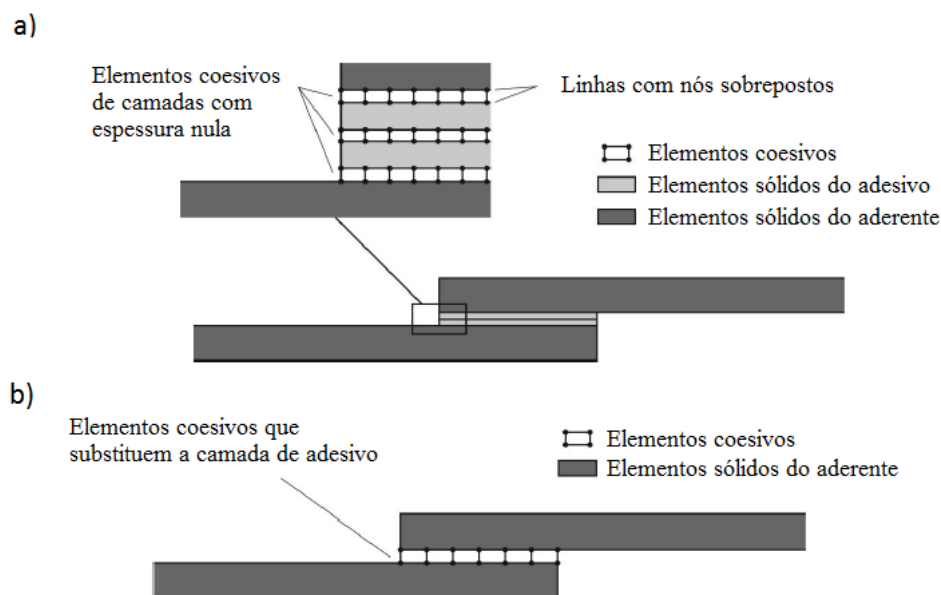


Figura 23 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [27]).

É possível de modelar o comportamento de materiais sujeitos à fractura através da incorporação destes modelos em programas de análise por MEF [28]. Os MDC têm como princípio fundamental a possibilidade de introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e avaliar assim o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tracção-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. É entre nós homólogos dos elementos coesivos que são aplicadas as leis coesivas (Figura 23). Estas podem ligar nós sobrepostos que representam diferentes camadas diferentes em compósitos ou diferentes materiais (aproximação local [29]), ou podem-se aplicar directamente entre dois materiais de forma a simular uma fina camada de material, por exemplo um adesivo (aproximação contínua [30]).

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, em que os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda são desvalorizados, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo

entre nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Os MDC são usados para simular a evolução elástica da tensão e consequente amaciamento até à rotura completa, permitindo assim que seja simulada a deterioração das propriedades dos materiais. É normal construir as leis de tracção-separação por relações lineares em cada etapa de carregamento, embora seja possível defini-las de forma distinta, de forma a possibilitar uma representação mais fiel dos comportamento dos materiais [31]. Em *software* com o ABAQUS® este modelo está implementado em duas (2D) e três (3D) dimensões, para uma análise estática. Comparativamente ao modelo 2D, o modelo 3D apresenta uma adicional componente de corte [32].

2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Foram ao longo dos anos estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [33], triangular [34], polinomial [35] e trapezoidal [30]. Podem ser consideradas diferentes forma de leis coesivas, com base no comportamento do material ou na interface em simulação, de forma a obter resultados mais precisos [36].

A lei triangular é a mais usada pelo reduzido numero de parâmetros a serem determinados, devido à sua simplicidade e ainda pela precisão dos seus resultados em condições reais [37]. Este modelo coesivo baseia-se em MEF de interface [38] de quatro nós e espessura nula, compatível com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. São apresentadas duas versões distintas de dano neste tipo de modelo: modo misto e modo puro (Figura 24).

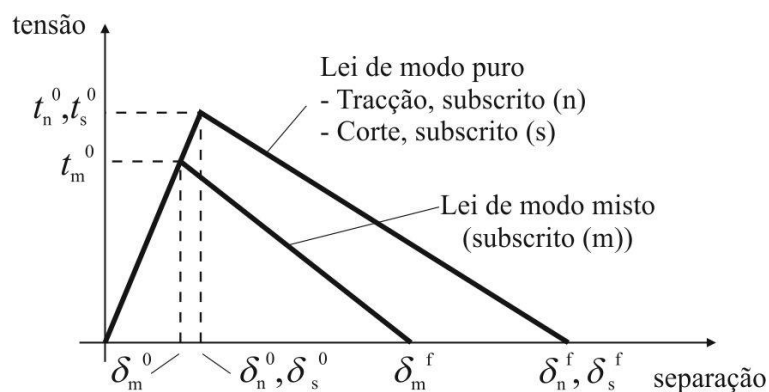


Figura 24 - Modelo coesivo triangular [38, 39].

O modo puro (lei de maiores dimensões) é caracterizado pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto (lei de menores dimensões) é caracterizado por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tracção e corte [40].

2.2.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

O comportamento do dano em juntas adesivas é possível de explicar com análises por MDC. No entanto, de forma a simular a rotura da ligação com maior precisão, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respectivamente validados [41]. Têm sido publicados vários estudos sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} , G_{IIc}). No entanto, segundo Jung Lee *et al.* [42], alguns parâmetros como t_n^0 , t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Daqui surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição de individual de parâmetros, o método directo e o método indirecto. Estes métodos apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Os MDC foram estimados em modo puro através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB), *End-Notched Flexure* (ENF) e JSS em alguns trabalhos para validar ensaios em modo misto, alcançando bons resultados [30, 43].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. Porém, este método é particularmente crítico devido a desvios entre os parâmetros do adesivo em ligação adesiva e material maciço [44]. Este problema é causado pelo efeito de restrição às deformações de uma fina camada de adesivo entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. As fendas em materiais maciços, de facto, tendem a crescer de forma perpendicular à direcção de tensão principal máxima [45]. No caso de ligações adesivas finas, o adesivo é normalmente mais fraco e flexível do que os aderentes, pelo que as fendas são forçadas a propagar-se no sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste num procedimento iterativo de ajuste entre dados experimentais e previsões numéricas, considerando, por exemplo, a curva carga-deslocamento (P - δ), que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que o ajuste de parâmetros está a ser realizado. Com base no comportamento do material a ser simulado, no método inverso é seleccionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter os MDC [46]. O método directo, por outro lado, define as leis coesivas de forma exacta, na medida em que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir de informação obtida de ensaios de caracterização à fractura [44], pela diferenciação das curvas G_I - δ_n ou G_{II} - δ_s (onde δ_n é deslocamento em tracção e δ_s é deslocamento em corte). Porém, em respeito aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são convencionalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preminente que desempenham nos resultados globais. Para avaliar G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fractura Linear Elástica (MFLE) são normalmente mais simples de aplicar, embora só possam ser usados em adesivos que não apresentem ductilidade muito elevada.

2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos usados na mecânica do dano estabelecem, para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez, um parâmetro de dano. Os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [47] em delaminação de compósitos ou de Khoramishad *et al.* [48] em camadas finas de adesivo são exemplos desta metodologia. É possível fazer a simulação do dano e da fractura de uma fenda, com trajectória pré-definida ou arbitrária dentro de um região finita, através do parâmetro de dano estabelecido [26].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. As primeiras, embora não directamente relacionadas com o mecanismo de dano, modelam o dano pela redefinição das propriedades construtivas dos materiais. As segundas estão relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [49]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [50] ou o número de ciclos para análises de fadiga [51, 52]. Em aplicações específicas, relativamente aos MDC, 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 trajectos pré-definidos [53].

Foi proposto por Hua *et al.* [54] um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas a degradação ambiental, utilizando um adesivo dúctil. Este efeito, na modelação numérica, era alcançado através da introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. A calibração de parâmetro foi feita através de ensaios à fractura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, 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.* [55] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para prever o início e a propagação do dano, e também para a carga de rotura. Após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, a técnica consiste em analisar 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 respectiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. Quando comparados os resultados obtidos por esta técnica e ensaios experimentais, revelou-se resultados bastante positivos.

2.2.5 Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX)

O MEFX é um desenvolvimento recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para a previsão da fractura em estruturas, apoiado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, no lugar dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tracção e corte correspondentes a $P_{máx}$, respectivamente) usados no MDC, pela mesma ordem. Quando comparado com os MDC, no MEFX deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que é uma vantagem significativa. Assim, é possível que a fenda se propague livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem ser necessário refazer a malha na proximidade da fenda [56]. No final dos anos 90 foram apresentados, por Belytschko e Black [57], as principais características deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado MEF introduzindo funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, permitindo o crescimento e separação entre faces da fenda [58]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da fenda. São criadas, em simultâneo, as funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

É inicialmente considerado pelo MEFX um comportamento linear elástico dos materiais, que se representa por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. A simulação do dano e rotura pelo MEFX é feita através de critérios de iniciação de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fracturados. Os critérios de iniciação de dano podem, por exemplo, depender das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis de tracção-separação que simulam a degradação dos materiais até à fractura podem ser lineares ou exponenciais [10].

O MEFX foi utilizado por Campilho *et al.* [59] para previsão da resistência de JSS e JSD, coladas com um adesivo dúctil. Neste estudo foram comparados resultados por MEFX com os MDC (Figura 25). Foi concluído pelo estudo que o MEFX não é o método mais adequado para a propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, visto que a direcção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, que se traduz numa propagação na direcção dos substratos em vez de ao longo da camada de adesivo, o que não representa o comportamento real das juntas. Por sua vez, os MDC demonstram previsões muito precisas do comportamento real da junta.

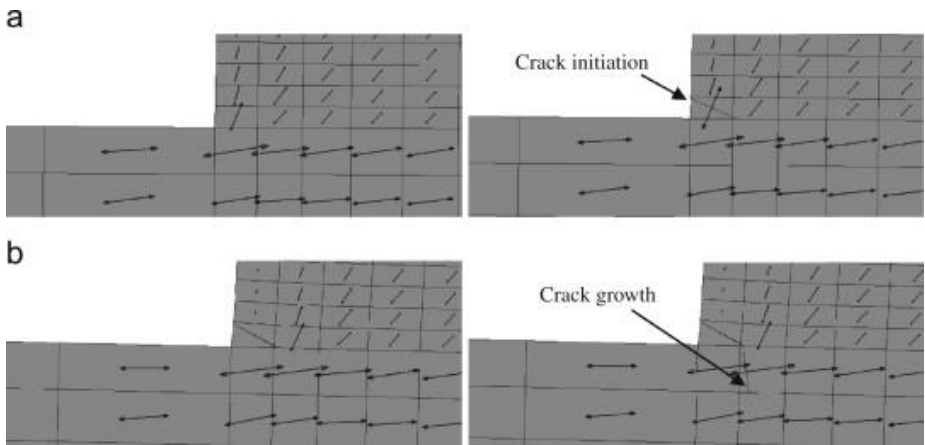


Figura 25 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: a) iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição e b) crescimento dano do aderente de alumínio [27].

2.2.6 Estado de arte

Autores	Descrição
Akpinar [2]	Estudo realizado com aderentes em Alumínio 2024-T3 e os adesivos DP 460 e SBT 9244. Após realizados ensaios experimentais nos 3 conjuntos de juntas fabricados (um conjunto para cada um dos adesivos e um conjunto de juntas mistas) verificou-se que quando se utilizam adesivos de menor rigidez nas extremidades das juntas se diminuem concentrações de tensões e podem levar a maior resistência da junta.
De Sousa <i>et al.</i> [60]	Os autores compararam análises analíticas de JSS e verificaram que o modelo plástico de Hart-Smith [61] é capaz de determinar correctamente a resistência da junta com o aumento do comprimento de sobreposição quando são usados adesivos rígidos ou moderadamente dúcteis, mostrando melhores resultados nos primeiros. Para adesivos dúcteis <i>global yielding failure criterion</i> [62] foi o único capaz de prever a resistência das juntas quando comparados a ensaios experimentais.

Ayatollahi e Akhavan-Safar [63]	Os autores propuseram um novo critério baseado em esforços longitudinais e na teoria das distâncias críticas (CLS). Os autores concluíram que este método consegue prever resistências em JSS para várias espessuras de adesivo, no entanto quando a relação entre comprimento de ligação e a espessura de adesivo se torna baixa o resultado não é fiável.
Reis <i>et al.</i> [64]	Os autores avaliaram a influencia das propriedades mecânicas na resistência de JSS e concluíram que aderentes mais rígidos resultam em maiores resistências de junta.
Campilho <i>et al.</i> [65]	Os autores estudaram JSS com geometria de curvatura inversa e usando MEF para concluir que com esta geometria existe um aumento de resistência da junta.
O'Mahoney <i>et al.</i> [66]	Os autores usaram uma MDC em JSS em compósito junto com uma análise Taguchi para concluir que a resistência do adesivo, a resistência a fractura da interface e a ductilidade do adesivo são os mais importantes factores na resistência deste tipo de junta.
Sugiman <i>et al.</i> [67]	Foi feita pelos autores uma comparação entre a utilização de elementos coesivos no meio do adesivo e a sua utilização na interface da junta. De acordo com os seus resultados, usar elementos coesivos no meio do adesivo obtém resultados ligeiramente mais fiéis.
Heshmati <i>et al.</i> [68]	Os autores usaram um analise local para prever a resistência de JSD e obtiveram resultados próximos dos experimentais. Foi também concluído no estudo que usar para a análise numérica a simetria da JSD resultava num resultado superior ao experimental.

2.3 Juntas adesivas sujeitas a esforço de arrancamento

As juntas adesivas são constantemente submetidas a tensões normais. Dependendo do tipo de solicitação e da geometria da junta estas tensões normais podem ter maior ou menor importância na rotura.

2.3.1 Ensaios de caracterização de adesivos ao arrancamento

As juntas adesivas são notoriamente sensíveis aos esforços de arrancamento por esse motivo é muito importante medir a sua resistência ao arrancamento. Os ensaios de arrancamento consistem em arrancar um aderente flexível de um aderente rígido, normalmente, a um ângulo de 90° ou 180° [4].

O objectivo no desenvolvimento de adesivos tem sido o aumento da resistência ao arrancamento, muitas vezes a custa da resistência a condições ambientais. A resistência ao arrancamento é definida como a força média por unidade de largura, medida ao longo da linha de aderência, necessária para separar progressivamente dois aderentes unidos por um adesivo [69].

2.3.2 Ensaio arrancamento a 180°

O ensaio de arrancamento a 180°, normalizado na norma ASTM D903-49, é usado de forma comum para a caracterização de adesivos. A execução deste ensaio consiste em dobrar o substrato mais flexível para formar um ângulo de 180°. O ensaio é apropriado para juntas adesivas em que existe um substrato rígido e o outro é flexível [5, 11]. Na Figura 26 é possível ver uma representação do ensaio de arrancamento a 180°.

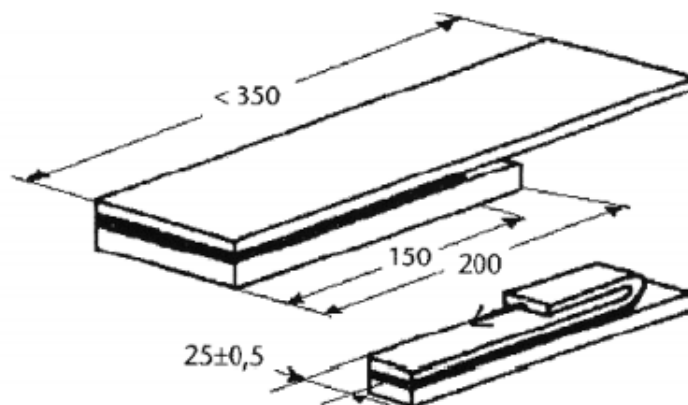


Figura 26 - Esquema de um ensaio de arrancamento a 180° [5].

2.3.3 Ensaio de rolete flutuante

O ensaio de rolete flutuante, normalizado pela norma ASTM D 3167, é usado para determinar a resistência ao arrancamento de uma junta adesiva em que um substrato é rígido e o outro flexível. O mecanismo com rolete permite manter durante o ensaio um ângulo, que é ajustável, constante de arrancamento durante o ensaio. O objectivo deste ensaio é obter a carga média ao longo do tempo em que a força de arrancamento é estável [5, 11]. Na Figura 27 encontra-se uma representação de um ensaio de rolete flutuante.

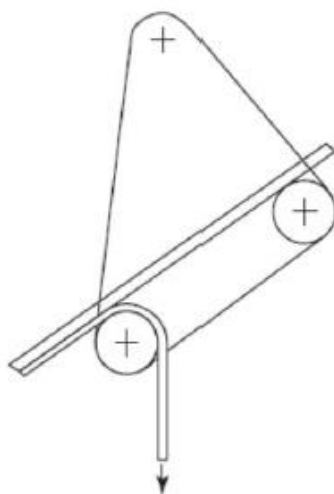


Figura 27 - Representação esquemática do ensaio do rolete flutuante [5].

2.3.4 Ensaio de *climbing*

O ensaio de *climbing*, normalizado pela norma ASTM D 1781, pode ser usado na caracterização de juntas de ligações adesivas em um substrato flexível e um rígido. O Ensaio, também conhecido como *climbing drum test*, é mais frequentemente utilizado para em estruturas *sandwich* para determinar a resistência a separação entre as peles e o núcleo. É normalmente aplicado com o objectivo de determinar a qualidade da ligação adesiva. Obter um reduzido valor de força de arrancamento pode indicar uma cura incompleta do adesivo [5, 11]. Na Figura 28 pode-se observar uma representação do ensaio de *climbing*.

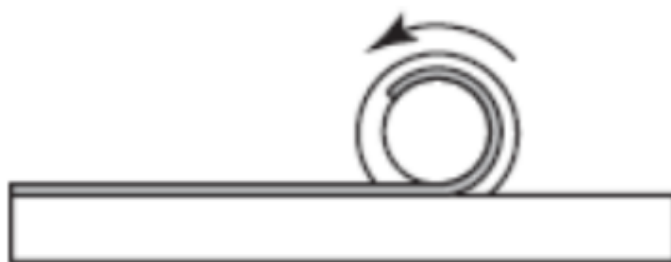


Figura 28 - Representação do ensaio de climbing [70].

2.3.5 Ensaio *T-peel*

O teste *T-peel*, normalizado pela norma ASTM D 1876, é o método mais utilizado para determinar uma resistência relativa ao arrancamento de juntas adesivas fabricadas com aderentes metálicos flexíveis, no entanto caso a deformação dos substratos seja significativa não deve ser usado. A razão desta utilização prende-se na facilidade e baixos custos do fabrico das juntas [5, 69].

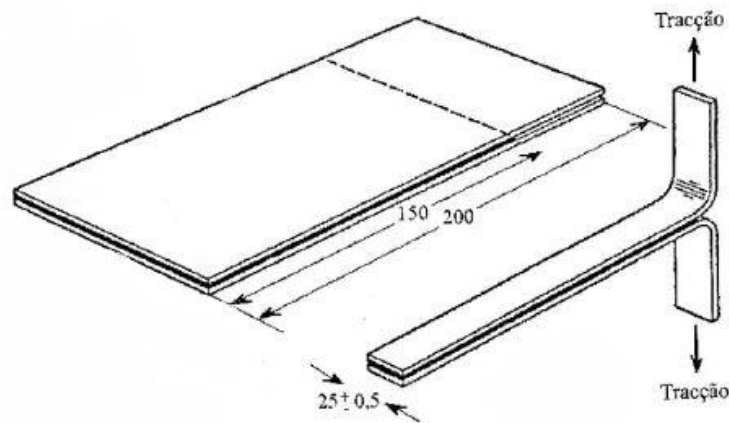


Figura 29 - Esquema de representativo do ensaio de arrancamento em juntas T [5].

Segundo a norma, deverão ser ensaiados no mínimo dez provetes nas mesmas condições. Em grande parte das vezes este ensaio é usado para testar combinações de adesivos e preparação de superfícies. Os resultados do ensaio dependem da espessura do adesivo, normalmente é usado 0,25 mm. A geometria do adesivo excedente é algo a ter em consideração, sendo que deve ficar cerca de 50% do raio da secção do substrato. Pode ser usada uma ferramenta para garantir este parâmetro. Para adesivos flexíveis a concentração de tensões ocorre na extremidade do excesso de adesivo, no entanto para adesivos mais dúcteis e flexíveis esta concentração é possível de se deslocar para o interior da camada de adesivo [5]

2.3.6 Juntas em L

Neste capítulo são descritos trabalhos científicos realizados em juntas adesivas em L. Li *et al.* [71] realizaram um estudo de uma junta adesiva em L com aderentes em aço. A junta utilizada no estudo está representada na Figura 30.

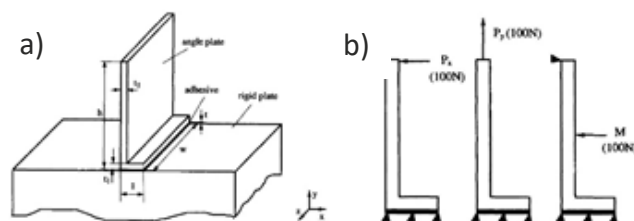


Figura 30 - a) Geometria da junta usada no estudo, b) Cargas aplicadas [71].

No estudo foram considerados valores de 2 e 4 mm para a espessura dos aderentes (t_1) e para o comprimento da ligação (l) de 6, 8, 10, 12, 14 e 16 mm. A espessura do adesivo (t) foi mantida em 0,2 mm. O aderente tem 20 mm de largura e a sua altura (h) é de 40 mm. Os 3 modos de carregamento aplicados no estudo estão representados na Figura 30 b).

O programa ABAQUS® foi utilizado para analisar tensões (σ_y), tensão de corte (τ_{xy}) e tensão normal na direcção x (σ_x) ao longo do adesivo. Ocorre uma redução da tensão máxima no adesivo quando a espessura dos aderentes aumenta, no entanto, o valor das tensões no final do comprimento de ligação aumentam, excepto na solicitação por carga P_y . Na análise experimental foram realizados ensaios aplicando a carga P_x . Para estimar as tensões no adesivo foram aplicados sete extensómetros.

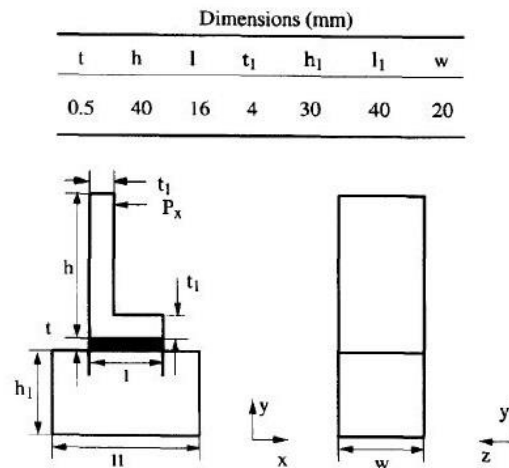


Figura 31 - Representação da geometria usada nos estudos experimentais [71].

Foi concluído numericamente que quando aplicadas cargas P_x e momento flector (M) que a concentração máxima de tensões é encontrada na extremidade mais afastada da curvatura do L, podemos concluir com estes dados que a rotura se inicia nesta zona. O caso da carga P_y as máximas concentrações de tensões ocorrem na extremidade mais próxima da curvatura do aderente em L, conclui-se assim que a rotura do adesivo se iniciaria nesta zona.

Foi realizado por Domingues *et al.* [72] um estudo experimental e por MDC em juntas adesivas em L entre compósito de carbono epóxico e de alumínio quando sujeitas a esforços de arrancamento, utilizando deferentes configurações de junta e diferentes adesivos. Na Figura 32 é possível de ver uma representação da junta utilizada no estudo.

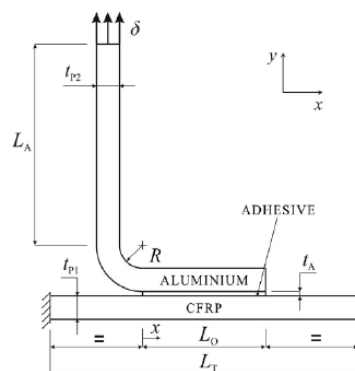


Figura 32 - Representação da junta em L em estudo [72].

No estudo foi variada a espessura do aderente em alumínio (t_{p2}) usando os valores de 1, 2, 3 e 4 mm, sendo mantidos constantes os restantes parâmetros geométricos como L_0 de 25 mm, a distância entre apoios da placa de CFRP (L_t) de 80 mm, a espessura do aderente de CFRP (t_{p1}) de 3 mm e a espessura do adesivo (t_a) de 0,2 mm.

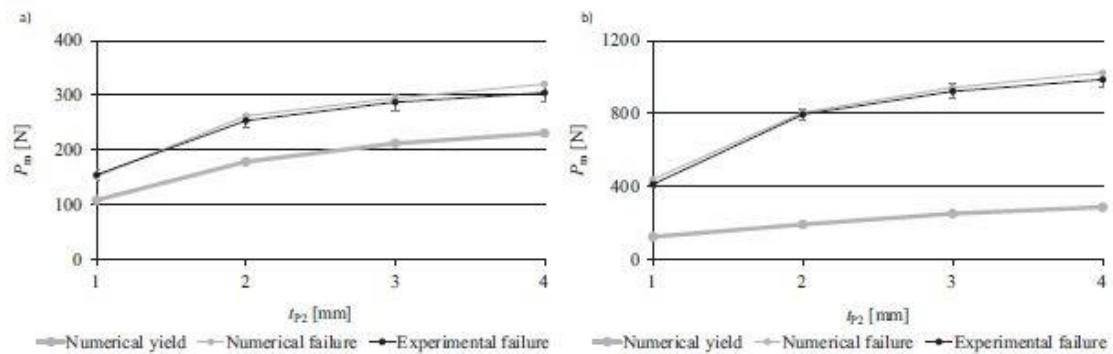


Figura 33 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e correspondente resultado numérico em função de t_{p2} para a) Araldite® AV138 e b) Sikaforce® 7752 [72].

Na Figura 33 podem-se ver os resultados experimentais e numéricos em função de t_{p2} . Neste estudo verificou-se que as tensões máximas de arrancamento ocorrem, em todas as configurações de junta, na extremidade mais próxima da curvatura do aderente em L, sendo que os valores para o adesivo Araldite® AV138 devido à sua rigidez superior.

Para ambos o adesivo foi possível determinar que quanto maior for L_0 , maior é o pico de tensões. No entanto a influência de t_{p2} , visto que, com o seu aumento, o tipo de solicitação aproxima-se mais de clivagem, e as distribuições de tensões de arrancamento tornam-se mais graduais ao longo do adesivo. Verificou-se que a porção danificada da junta do adesivo Araldite® AV138 é inferior à que acontece quando usado o adesivo Sikaforce® 7752. É também possível de verificar que o adesivo Sikaforce® 7752 (mais dúctil) obtém valores de $P_{máx}$ superiores ao do Araldite® AV138. Verifica-se também que o ganho de resistência é superior com o aumento de t_{p2} do que com o aumento de L_0 . É também de referir que o estudo valida a técnica de MDC para prever resistência de juntas em L, visto ter-se revelado precisa a modelar o processo de rotura.

2.3.7 Juntas em T

Neste capítulo irão ser descritos alguns trabalhos com juntas T. Carneiro e Campilho [73] realizaram um estudo numérico por MDC e experimental do comportamento de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio e adesivos de diferentes ductilidades. É possível ver na Figura 34 uma representação da junta utilizada no estudo.

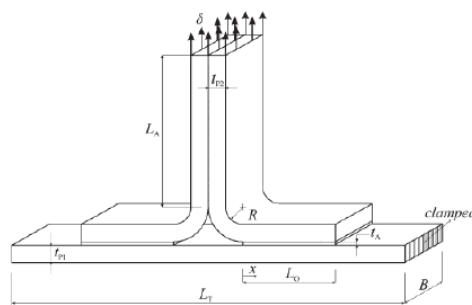


Figura 34 - Representação da junta T usada no estudo e os seus parâmetros [73].

No estudo foi variada a espessura do aderente (t_{p2}) em valores de 1, 2, 3 e 4 mm, por consequência disso o raio de curvatura do aderente (R) foi também variado com valores de 5; 5,5; 7,5; 7,5 mm. Os restantes parâmetros mantiveram-se constantes. Para o estudo experimental, cujos resultados podemos ver comparados com o estudo numéricos na Figura 35, foram ensaiados 40 provetes, variando t_{p2} e utilizando 2 tipos de adesivos (Araldite® AV138 e Araldite® 2015).

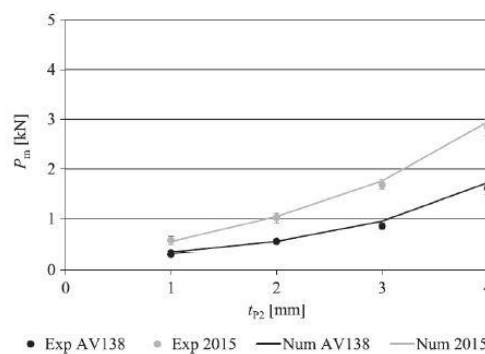


Figura 35 - Comparação de resultados numéricos e experimentais de $P_{máx}$ das juntas do estudo [73].

Para o estudo numérico, utilizando o método MDC triangular, consistiu na determinação da resistência das juntas em T. Para este estudo além dos adesivos usado na parte experimental foi também usado o adesivo Sikaforce® 7752. Na Figura 36 pode ver-se os resultados do estudo numéricos em questão.

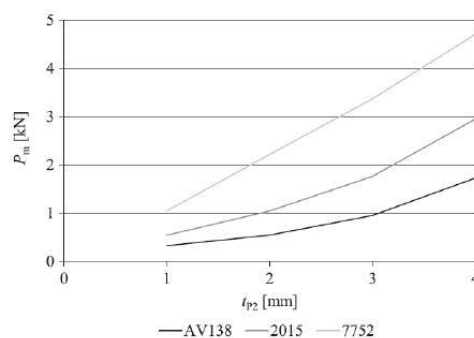


Figura 36 - Previsão de $P_{máx}$ do estudo [73].

Com o estudo foi possível concluir que o adesivo mais dúctil obtém valores de $P_{\text{máx}}$ mais elevados. Com t_{p2} de 3 e 4 mm é obtida uma melhoria significativa a resistência da junta. Os ensaios experimentais permitiram validar os modelos numéricos para os dois adesivos em questão.

No estudo realizado por Burns *et al.* [74] foi analisada uma junta T fabricada com compósitos de resina epóxico impregnada com fibras de carbono. O projecto desta junta foi inspirado na ligação entre os ramos e os troncos das árvores. O laminado foi contruído com a orientação (+/- 45; 0/90, +/- 45; 0/90) e curado em autoclave a 180°C com 690 kPa de pressão. Na Figura 37 é possível ver uma representação da junta T usada neste estudo.

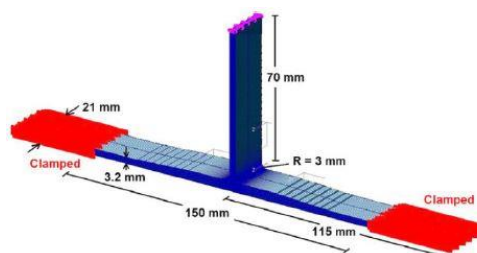


Figura 37 - Representação da junta T usada no estudo [74].

Três diferentes condições de embebimento do componente em T no componente da base da junta (25, 50 e 75% da espessura da base). De forma a obter resultados comparativos foram realizados ensaios com juntas com o mesmo número de camadas de adesivo, é possível ver estas juntas na Figura 38.

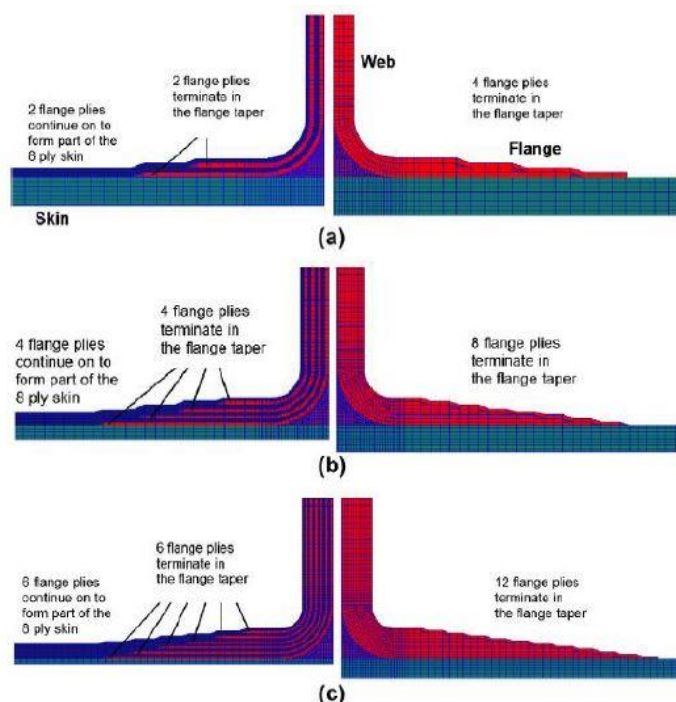


Figura 38 - Representação das juntas T usadas no estudo: a) 25 %; b) 50% e c) 75% de embebimento [74].

De cada tipo de junta foram ensaiados 8 provetes, usando uma máquina de ensaio com uma célula de carga de 50 kN. Os carregamentos foram feitos das seguintes formas:

- O carregamento de flexão, através da aplicação de uma força transversal ao componente em T. Feita a uma velocidade constante 3 mm/min na extremidade livre do componente em T;
- O carregamento de tracção, a uma velocidade constante de 1 mm/min na extremidade livre do componente em T.

Este estudo permitiu retirar algumas conclusões. Este tipo de construção de juntas T tem algumas vantagens como:

- Aumento de ductilidade;
- Aumento da energia dissipada até à carga máxima;
- Melhor tolerância ao dano, que se traduz numa menor probabilidade da falha catastrófica da junta.

Apesar destas vantagens este tipo de construção apresenta como desvantagem a iniciação de dano a carga inferior devido a tensões interlaminares mais elevadas no raio de curvatura devido a geometria embebida.

2.3.8 Outros tipos de juntas

Neste capítulo são referidos estudos de outros tipos de juntas, nomeadamente juntas *T-peel* (sujeitas predominantemente a esforço de arrancamento) e juntas curvas.

2.3.8.1 Juntas “T-peel”

Hu et al. [75] realizaram um estudo experimental e numérico cujo principal objectivo consistiu numa aprofundada análise da capacidade de carga das juntas *T-peel* sob uma carga de tracção nas extremidades do T. Estes autores consideraram o efeito do comprimento de ligação das juntas adesivas em T fabricadas em alumínio e aço, segundo as imposições do fabricante (Figura 39).

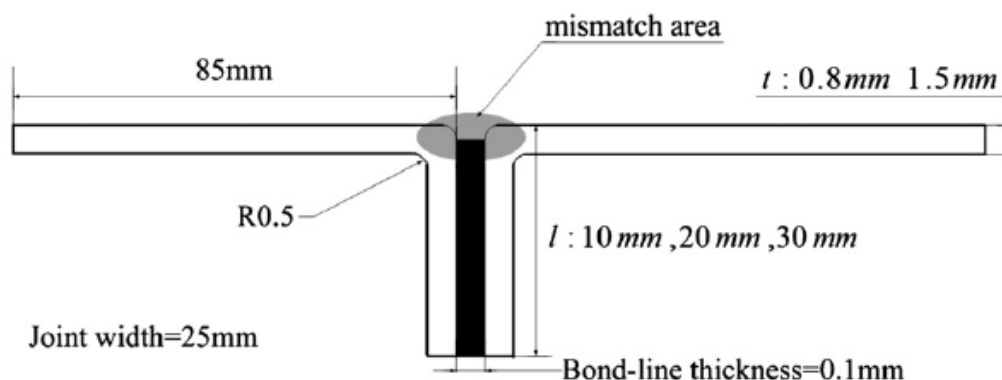


Figura 39 - Configuração geométrica da junta T em estudo [75]

Na Tabela 2 encontram-se apresentados as características dos seis tipos de juntas T que os autores utilizaram para ensaios.

Tabela 2 - Tipos de juntas T usadas para ensaio e respectivas características (adaptado de [75])

Tipo de junta T		Aderentes	Geometria	Rácio
<i>Balanced T-joint</i>	I	Alumínio-Alumínio	$t: 0,8 - 0,8$ $l: 10, 20, 30$	1
	II	Alumínio-Alumínio	$t: 1,5 - 1,5$ $l: 10, 20, 30$	1
	III	Aço-Aço	$t: 1,5 - 1,5$ $l: 10, 20, 30$	1
<i>Imbalanced T-joint</i>	IV	Alumínio-Aço	$t: 1,5 - 1,5$ $l: 10, 20, 30$	0,34
	V	Alumínio-Alumínio	$t: 0,8 - 1,5$ $l: 10, 20, 30$	0,15
	VI	Alumínio-Aço	$t: 0,8 - 1,5$ $l: 10, 20, 30$	0,05

O estudo numérico, efectuado com o apoio da ferramenta ABAQUS®, consistiu numa análise da propagação do dano através de uma análise baseada em MDC, na qual se pode observar que apenas a extremidade superior do adesivo transmite carga no início do ensaio, o que indica que após a ocorrência do dano, este irá se propagar da extremidade superior para a extremidade inferior do adesivo.

Os resultados experimentais mostraram que o comprimento de ligação não teve qualquer efeito sobre a carga máxima da junta T. Contudo, a capacidade de absorção de energia das juntas T aumentou significativamente devido ao aumento do comprimento de ligação. Nas juntas equilibradas (*balanced T-joint*), o principal motivo que provocou o aumento do valor da carga final do tipo I para o tipo III traduz-se no modo de rotura do adesivo. Deste modo, o pré-tratamento da superfície torna-se bastante importante para obter melhores resultados nas juntas T equilibradas. Por outro lado, nas juntas desequilibradas (*imbalanced T-joint*), o rácio de rigidez entre os dois aderentes (R) é o principal factor que afecta a resistência de uma junta *T-peel*, uma vez que à medida que o valor de R aumenta, a carga máxima também pode ser aumentada.

2.3.8.2 Juntas curvas

Ascione e Mancusi [76] realizaram um estudo sobre o comportamento de juntas adesivas curvas. Os autores desenvolveram um modelo numérico que considera o raio de curvatura, a deformabilidade ao corte e os efeitos entre o comportamento axial e corte/flexão (Figura 40).

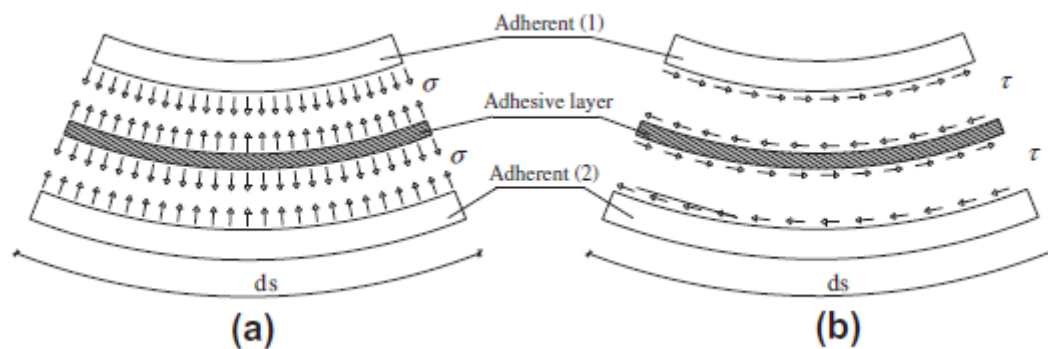


Figura 40 - Interações interfaciais numa junta adesiva curva: (a) interações normais e (b) interações paralelas [76]

Através deste modelo, os autores verificaram que um raio de curvatura finito é geralmente benéfico à medida que o ângulo de curvatura diminui, quando a absorção de energia é atrasada.

2.3.9 Técnicas de melhoria de resistência

Um dos problemas nas ligações adesivas são as concentrações de tensões nas extremidades das ligações. Estas podem originar fendas ou promover a rotura precoce das juntas, pelo que se torna necessária a aplicação de técnicas de melhoria de resistência das juntas durante o fabrico das mesmas [2].

2.3.9.1 Utilização de bi-adesivo

Uma técnica usada para a melhoria de resistência é o bi-adesivo (Figura 41), que consiste no uso de um adesivo mais dúctil combinado com um adesivo mais rígido na mesma junta. O adesivo mais dúctil é utilizado nas extremidades da ligação e o adesivo mais rígido na zona central [77].

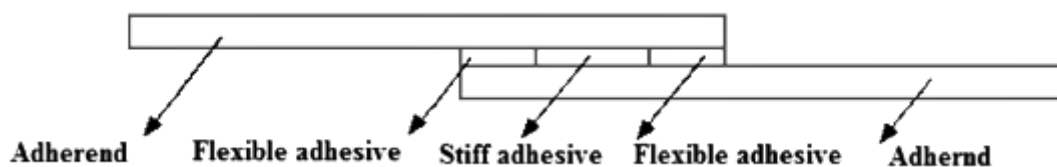


Figura 41 - Representação esquemática da junta com bi-adesivo [77]

Ramezani et al. [77] apresentaram uma análise experimental abrangente de juntas de sobreposição simples com bi-adesivo através da aplicação do método de correlação de imagem digital. Para esta análise foram considerados diferentes parâmetros, como as espessuras do adesivo e dos aderentes e o comprimento de sobreposição para um adesivo rígido e outro flexível. A iteração destes parâmetros também foi analisada

experimentalmente pelo método de correlação de imagem digital. Os autores realizaram uma análise numérica para avaliação do efeito do comprimento de sobreposição na distribuição de tensões ao longo da superfície de sobreposição. Estes autores verificaram que a falha se inicia na interface entre os adesivos rígidos e flexíveis. Os resultados da correlação de imagem digital mostraram que o efeito do comprimento de sobreposição na tensão de remoção do adesivo aumenta à medida que espessura do adesivo diminui. Por outro lado, este diminui com o aumento da rigidez. Verificou-se que as juntas de sobreposição simples com bi-adesivo com substratos mais espessos apresentam uma melhor resistência.

2.3.9.2 Utilização de filetes de adesivo

A utilização de filetes de adesivo (Figura 42) permite a redistribuição das tensões nas extremidades de sobreposição das juntas, pelo que promove o aumento da resistência da ligação adesiva. Estes são aplicados sob a espessura dos substratos de modo a minimizar as tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da junta [78-80].

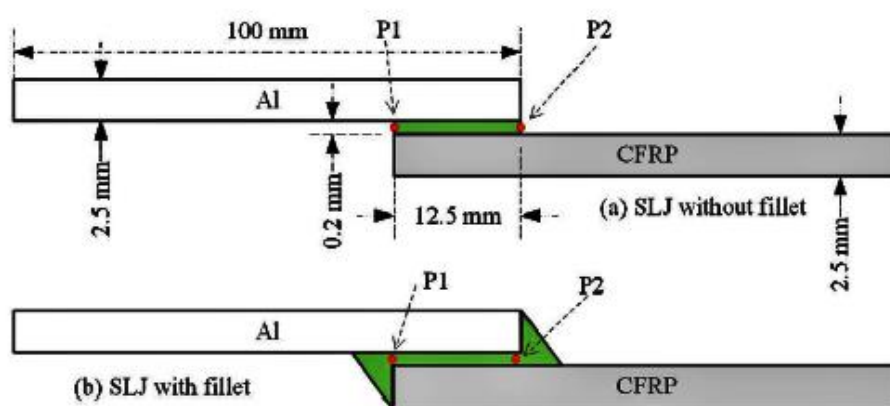


Figura 42 - Representação esquemática de juntas de sobreposição simples (a) sem filete de adesivo e (b) com filete de adesivo [81]

Zheng *et al.* [81] estudaram a importância dos filetes de adesivos em juntas de sobreposição simples. Estes autores efectuaram ensaios em provetes, com e sem filete, constituídos por aderentes compostos por CFRP e uma liga de alumínio. De modo a promover um envelhecimento à junta, os provetes foram mergulhados em água destilada, à priori dos ensaios de tracção axial. A leitura da distribuição da tensão na interface da camada adesiva foi obtida através de correlação digital de imagem. Os autores verificaram que ocorreu uma alteração no pico de tensão devido ao filete de adesivo, pelo que a tensão de arrancamento e a tensão de corte do adesivo foram reduzidas, o que promoveu uma melhoria no desempenho da junta, ainda que esta tenha sido envelhecida previamente. O facto de envelhecer as juntas com água destilada provoca uma perda de resistência em ambos os tipos de junta ensaiados. A tensão de

arrancamento e a tensão de corte da camada adesiva tornam-se assimétricas nos lados dos aderentes devido ao material heterogêneo em que as juntas foram fabricadas.

2.3.9.3 Utilização de chanfros interiores e exteriores

Os picos de tensão de arrancamento nas extremidades das juntas podem ser minimizados através da utilização de chanfros interiores ou exteriores nos aderentes [2]. A utilização de chanfros interiores (Figura 43) promove a atenuação de tensões na camada de adesivo. Por outro lado, a utilização de chanfros exteriores (Figura 44) promove uma uniformização da distribuição de tensões entre os aderentes. Estas alterações resultam num aumento da resistência da junta.

You *et al.* [82] analisaram o efeito da altura do chanfro e respectivo ângulo, aplicados nas superfícies interiores dos aderentes. Estes chanfros são aplicados nas extremidades de descarga dos adesivos. Os autores pretenderam ainda estudar o efeito da variação do módulo elástico de diferentes adesivos na distribuição das tensões nas juntas adesivas, pelo que utilizaram o MEF elástico-plástico para análise. Através da validação experimental dos resultados, os autores concluíram que a existência de chanfro na parte intermédia da sobreposição aparenta ter diminuído quase todos os picos de tensão. Por outro lado, os chanfros próximos das extremidades apresentaram uma menor relevância nas tensões. As tensões normais e de arrancamento diminuem à medida que o ângulo do chanfro aumenta. Os autores verificaram que as tensões de corte, tensões equivalentes de von Mises e a tensão principal diminuíram inicialmente, no entanto, posteriormente aumentaram gradualmente. Neste estudo foi ainda possível concluir que ao considerar um adesivo com um módulo de elasticidade elevado, o pico de tensões diminui pois transfere-se dos filetes para o centro da sobreposição, o que promove o aumento da resistência da junta.

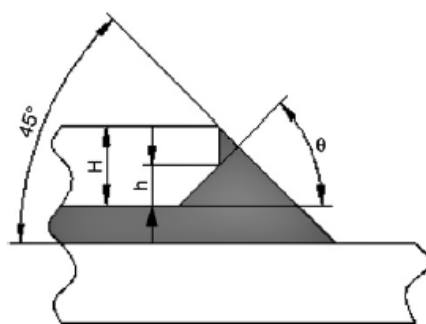


Figura 43 - Representação esquemática do chanfro interno [82]

Ferreira *et al.* [83] avaliaram numericamente a carga máxima de juntas tubulares através da utilização de um chanfro exterior na região de sobreposição dos tubos. Para este estudo, os autores recorreram ao MEF para análise das tensões de arrancamento e de corte na camada adesiva, pelo que foram usados modelos de dano coesivo para a previsão da carga máxima. Estes autores verificaram que a aplicação de curtos

comprimentos de sobreposição beneficia os adesivos rígidos, mas mais frágeis, devido a uma distribuição de tensões mais uniforme. Por outro lado, a aplicação de longos comprimentos de sobreposição apresentou um melhor resultado no valor de carga máxima com adesivos menos rígidos, mas mais dúcteis, uma vez que estes lidam de forma mais eficiente com os picos de tensão. A utilização de chanfros exteriores promoveu uma gradual diminuição das tensões de pico, bem como um melhor resultado no valor de carga máxima, apesar de esta melhoria ter sido limitada pela plastificação dos tubos.

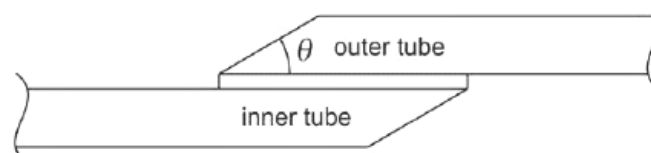


Figura 44 - Representação esquemática do chanfro externo [83]

2.3.9.4 Alteração do comprimento de sobreposição e espessura dos aderentes

O valor da espessura dos aderentes e de L_0 (Figura 45) são bastante relevantes na resistência da junta, uma vez que quanto maior a área de adesão maior será a resistência da junta [2]. Lavalette *et al.* [84] avaliaram a influência de diferentes tipos de juntas JAT, através da realização de ensaios experimentais com provetes de juntas tubulares de sobreposição simples. Estes ensaios permitiram a validação dos modelos numéricos anteriormente desenvolvidos com o uso de um modelo de dano coesivo. Estes autores verificaram que o aumento de L_0 e do diâmetro interior promovem um significativo aumento da resistência da junta, embora apenas até um determinado valor limite de L_0 . Todas as variações nas espessuras dos aderentes e nos comprimentos dos chanfros dos aderentes influenciam directamente a distribuição uniforme das tensões de corte ao longo de toda a sobreposição, bem como a carga de rotura para comprimentos de sobreposição mais elevados.

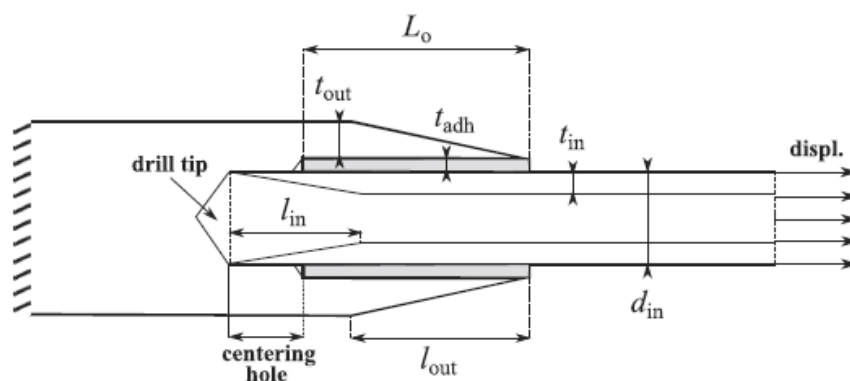


Figura 45 - Representação esquemática da junta tubular e respectivas condições fronteira [84]

DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação experimental

3.2 Análise numérica

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é descrito o trabalho experimental e numérico da presente dissertação. A primeira parte aborda a validação de modelos numéricos através da comparação dos mesmos com ensaios experimentais. Nesta primeira fase são também descritos o método de ensaio das juntas, os materiais usados e a geometria das juntas. Na segunda parte é abordado o trabalho numérico. São apresentadas as condições do estudo numéricos, o modelo de dano usado, análise de tensões da junta e a comparação de resultados entre as várias configurações de junta e combinações de adesivos estudados

3.1 Validação experimental

Neste capítulo é feita a abordagem à validação experimental realizada durante esta dissertação. No ponto 3.1.1 é descrita a geometria da juntas utilizadas. No ponto 3.1.2 são descritos os materiais utilizados de forma detalhada, onde se referem as suas principais características mecânicas. No ponto 3.1.3 é detalhado o processo de ensaio das juntas, incluindo o equipamento utilizado. No ponto 3.1.4 é são apresentados os resultados e é feita a comparação entre as juntas ensaiadas e os modelos numéricos.

3.1.1 Geometria das juntas

As juntas usadas na validação numérica são em T com variação do valor de t_{p2} entre 1 e 4 mm. O valor de L_0 mantêm-se constante em 25 mm. Na Figura 46 é possível observar uma representação das 4 juntas utilizadas e na Tabela 3 encontram-se os principais parâmetros geométricos da junta.

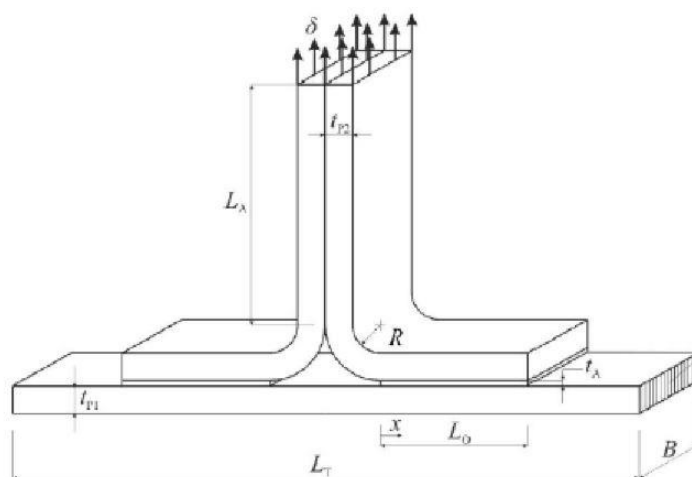


Figura 46 - Representação esquemática da junta T usada na validação experimental [1].

Tabela 3 - Parâmetros da junta usada na validação experimental [1].

Parâmetro	Valor (mm)
t_{p1}	3
t_{p2}	1; 2; 3; 4
t_a	0,2
L_A	60
L_T	100
L_0	25
R	5; 5,5; 7,5; 7,5
B	25

3.1.2 Materiais utilizados

Para a validação experimental foram considerados 2 adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e para os aderentes foi considerada a liga de alumínio AW 6082-T651.

3.1.2.1 Aderentes

Para os aderentes foi considerada a liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida como uma liga estrutural da série 6000, sendo os seus principais elementos de liga o magnésio e o silício. Esta liga é muito utilizada na obtenção de peças a partir de perfil extrudido mas também a partir de maquinagem. Esta utilização deve-se principalmente à sua elevada resistência à tracção. A Tabela 4 e Tabela 5 mostra as propriedades químicas e mecânicas do material em questão.

Tabela 4 - Composição química da liga de alumínio utilizada [85].

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
% Min.	0,70	0,60	0,40	0	0	0	0	0	-
% Max.	1,30	1,20	1,00	0,50	0,25	0,20	0,10	0,05	Restante

Tabela 5 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio utilizada (Dados do fabricante,[85]).

Espessura (mm)	Tensão de rotura Min. (MPa)	Tensão de cedência 0,2 % Min. (MPa)	Alongamento Min. (%)	Dureza Brinell	Módulo de Young (GPa)
3	300	255	9	91	70

As indústrias automóvel e aeronáutica usam frequentemente ligas de alumínio para o fabrico de juntas adesivas. A sua relação peso/resistência e a elevada energia de superfície fazem deste tipo de material ideal para estas estruturas[4].

Campilho *et al.* [59] caracterizaram esta liga de alumínio à tracção segundo a norma ASTM-E8M-04 [86], onde registaram as propriedades que se seguem:

- Módulo de Young (E)= $70,07 \pm 0,83$ GPa;
- Tensão de Ruptura (σ_f)= $324,00 \pm 0,16$ MPa;
- Tensão de cedência à tracção (σ_y)= $261,67 \pm 7,65$ MPa;
- Deformação de ruptura à tracção (ϵ_f)= $21,70 \pm 4,24\%$.

A Figura 47 mostra a curva tensão-deformação (σ - ϵ) da liga em questão e a aproximação numérica obtida no estudo referido.

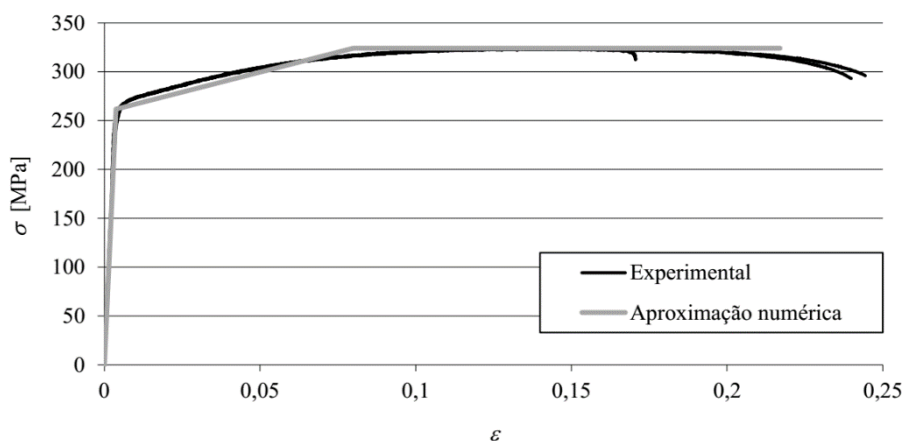


Figura 47 - Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW 6092-T651 [59].

3.1.2.2 Adesivos

Para a validação experimental foram utilizados dois adesivos estruturais: Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite® 2015 (Adesivo epóxico dúctil) e Sikaforce® 7752 (adesivo poliuretano de elevada ductilidade e moderada resistência mecânica). Todos os três adesivos são bi-componente (resina + endurecedor) com baixa viscosidade. Esta característica facilita a deposição nas superfícies, e facilmente permite variar a espessura de adesivo e corrigir a falta de planeza nos substratos [85].

3.1.2.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo epóxico frágil de elevada resistência (como visível na Figura 48). Este adesivo termoendurecível, de base epóxida, é de bi-componente, e é constituído pela resina AV138 e um endurecedor HV998. Este adesivo cura à temperatura ambiente e apresenta-se sob a forma de uma pasta tixotrópica. Pode ser utilizado na ligação de vários materiais, tais como metais compósitos ou polímeros

[87]. Na Tabela 6 encontram-se os valores das propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138.

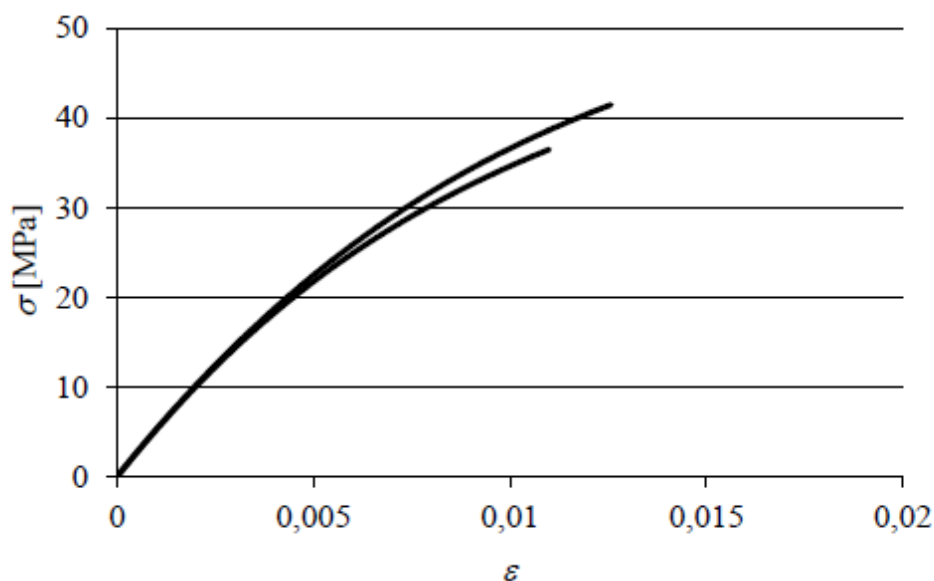


Figura 48 - Curva σ - ϵ de provetes *bulk* do adesivo Araldite® AV138 [87].

Tabela 6 - Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [87, 88]. Valores ^a são estimados na referência [88] e valores ^b são do fabricante.

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

3.1.2.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 é um adesivo epóxico com ductilidade moderada e baixa contracção (visível na Figura 49). Quando comparado com o adesivo Araldite® AV138 apresenta resistências ao corte e tracção inferiores. No entanto a sua ductilidade moderada possibilita a redistribuição de tensões nas zonas críticas, tipicamente na extremidade das juntas devido à existência de assimetria da junta e ao efeito de

deformação diferencial dos aderentes [87]. O adesivo é bi-componente é fornecido numa pistola manual que utiliza um bico misturador para fácil aplicação, e apresenta-se sob a forma de pasta tixotrópica e cura à temperatura ambiente. Ligações efectuadas com este adesivo são afectadas pela preparação das superfícies. Estas deverão ser limpas com um bom desengordurante de forma a remover todos os vestígios de contaminações e sujidades. Na Tabela 7 apresentam-se as propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015.

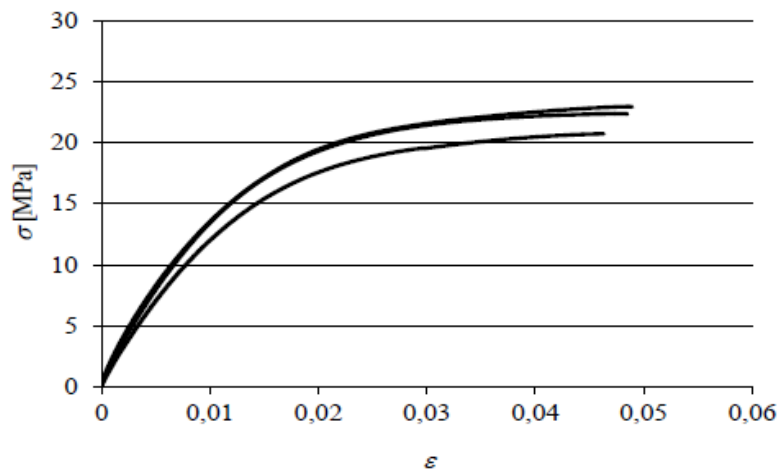


Figura 49 - Curva σ - ϵ de provetes *bulk* do adesivo Araldite® 2015 [87].

Tabela 7 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [87]. Valores ^a são do fabricante.

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

3.1.2.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo dúctil. Em comparação com Araldite® AV138 e 2015 e este adesivo apresenta resistências ao corte e tracção muito inferiores, embora apresente ductilidade muito superior. A Figura 50 mostra a curva σ - ϵ do adesivo Sikaforce® 7752.

O adesivo Sikaforce® 7752 tem base de poliuretano e apresenta-se como bi-componente. O adesivo é constituído por uma resina poliol com cargas e um endurecedor de base isocianato que possuem baixa emissão de gases e perdas voláteis. Este adesivo apresenta boa resistência a altas temperaturas. É expectável, analisando as propriedades mecânicas do adesivo na Tabela 8 que a resistência das juntas deste adesivo seja elevada, visto que ele combinado uma resistência aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos.

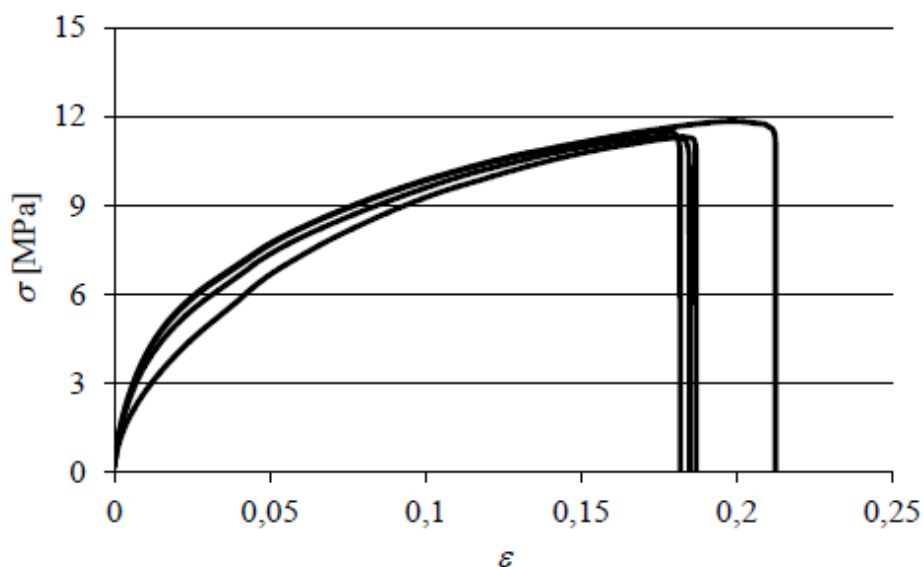


Figura 50 - Curva σ - ϵ de provetes bulk do adesivo Sikaforce® 7752

Tabela 8 - Propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 [89]. Valores ^a são do fabricante.

Propriedade	Valor
E – Módulo de Young [GPa]	$0,49 \pm 0,09$
ν – Coeficiente de Poisson	$0,30^a$
σ_y – Tensão de cedência à tracção [MPa]	$3,24 \pm 0,48$
σ_f – Tensão de rotura à tracção [MPa]	$11,48 \pm 0,25$
ϵ_f – Deformação de rotura à tracção [%]	$19,18 \pm 1,40$
G – Módulo de elasticidade transversal [GPa]	$0,19 \pm 0,01$
τ_y – Tensão de cedência ao corte [MPa]	$5,16 \pm 1,14$
τ_f – Tensão de rotura ao corte [MPa]	$10,17 \pm 0,64$
γ_f – Deformação de rotura ao corte [%]	$54,82 \pm 6,38$
G_{Ic} – Tenacidade à tracção [N/mm]	$2,36 \pm 0,17$
G_{IIc} – Tenacidade ao corte [N/mm]	$5,41 \pm 0,47$

3.1.3 Detalhes experimentais

Para efeitos de validação experimental da técnica numérica usada nesta dissertação, serão apresentados os principais resultados do trabalho realizado por Carneiro [1]. Este autor realizou um estudo em juntas T com diferentes espessuras (t_{p2}) e dois tipos de adesivos, sendo que para o fabrico das juntas foi utilizada uma liga de alumínio.

É importante salientar que para efeitos de validação experimental, serão apenas analisados os resultados experimentais e numéricos do adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Deste modo, são apresentados os modos de rotura, curvas $P-\delta$, resistência e, ainda, uma análise e comparação dos resultados obtidos com os resultados numéricos por MDC, com o apoio da ferramenta ABAQUS®.

3.1.3.1 Ensaios das juntas

Neste trabalho, foi utilizada uma máquina de ensaio de tracção (MTS) da Shimadzu®, disponibilizada pelo DEM (Figura 51). Esta MTS é registada com o número de série 346-55240-11, modelo AGX™-100 e capacidade máxima na célula de carga de 100 kN.



Figura 51 - Ensaio das juntas em T: (a) MTS utilizada e (b) encastramento do substrato base (adaptado de [1])

As juntas em T executadas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015 foram solicitadas à tracção na MTS e encastradas no substrato base, como representado na Figura 51, e foi aplicada uma velocidade de ensaio igual a 0,5 mm/min. O encastramento das juntas foi garantido com o auxílio de um suporte em alumínio, que fixou os substratos base através de barras móveis e aparafusadas. Esta solução permitiu um comprimento livre de 100 mm entre pontos de encastramento. A solicitação das juntas

foi realizada a velocidade constante até ocorrer a separação total entre os substratos em L e o substrato base.

3.1.4 Resultados obtidos

Para uma análise detalhada dos resultados obtidos para cada t_{p2} , foram registradas as respectivas curvas $P-\delta$, verificados os modos de rotura e retirada a resistência das juntas em função de t_{p2} .

3.1.4.1 Modos de rotura

Na Figura 52 encontram-se apresentados os cinco provetes de juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm. O autor Carneiro [1] verificou que os modos de rotura para estas juntas adesivas foram semelhantes para todos os valores de t_{p2} , e que a presença de adesivo em ambos substratos representa um rotura coesiva.

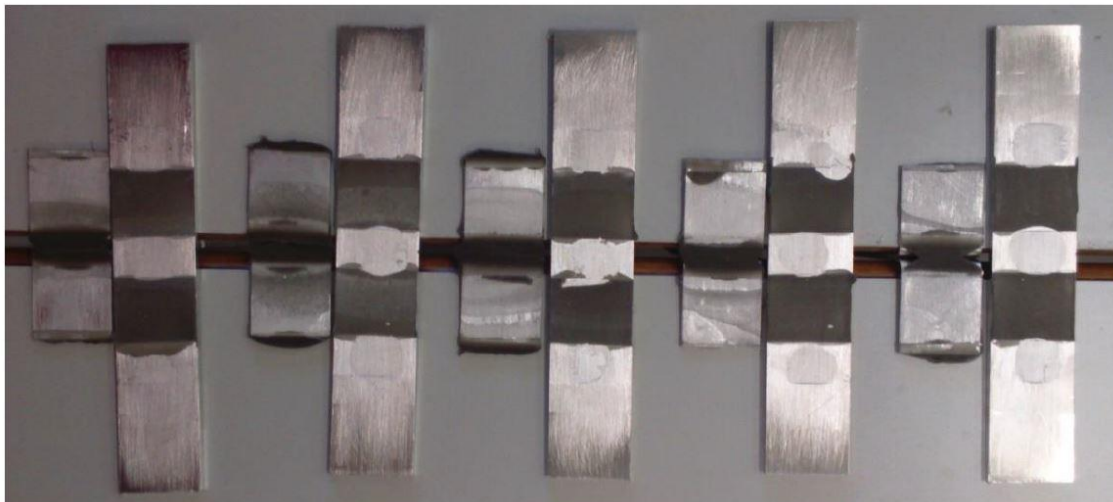


Figura 52 - Superfície de rotura das juntas adesivas com $t_{p2}=1$ mm [1]

3.1.4.2 Resistência das juntas

Para o cálculo das médias e desvio padrão de cada configuração de junta, Carneiro [1] considerou no mínimo três provetes. Os valores experimentais de $P_{máx}$ das juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, em função de t_{p2} , estão apresentados na Figura 53. Note-se que o adesivo Araldite® 2015 não foi considerado para efeitos de validação experimental deste trabalho.

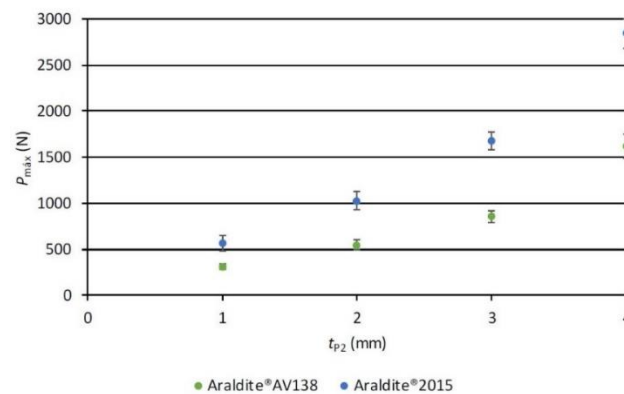


Figura 53 - Valores experimentais de $P_{máx}$ obtidos nas juntas adesivas com Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [1]

Através da análise da Figura 53, Carneiro [1] verificou que os valores de $P_{máx}$ aumentam com t_{p2} e que ocorreu um maior aumento da resistência entre as juntas com $t_{p2}=3$ mm e $t_{p2}=4$ mm. Na Tabela 9 é apresentado o aumento percentual do valor de $P_{máx}$ relativamente ao valor de $P_{máx}$ para $t_{p2}=1$ mm.

Tabela 9 - Aumento percentual dos valores de $P_{máx}$ [1]

Valor de t_{p2} (mm)	Aumento percentual (%)
2	75,00
3	173,80
4	419,30

3.2 Análise numérica

Neste capítulo serão apresentados os resultados do trabalho numérico desenvolvido nesta dissertação. No ponto 3.2.1 faz-se uma descrição das juntas utilizadas e a descrição dos parâmetros variáveis no estudo numérico. No ponto 3.2.2 é descrita a construção dos modelos em ABAQUS® e os modelos de dano utilizados para análise de resistência das juntas. No ponto 3.2.3 apresentam-se os resultados de resistência, as análises de tensões, os modos de rotura e é feita a comparação entre as várias configurações e combinações.

3.2.1 Geometria das juntas

De forma a comparar o método de bi-adesivo com um adesivo único as juntas simuladas foram desenhadas de forma a comparar vários comprimentos do adesivo central. Foram usadas 3 configurações diferentes. Foram usadas 3 configurações 12,5%-75%-12,5%, 25%-50%-25% e 33%-34%-33% (percentagem do comprimento de ligação, de 22 mm). A geometria utilizada para os ensaios numéricos é idêntica à usada na validação experimental e está representada na Figura 46.

3.2.2 Pré-processamento dos modelos

Neste ponto é feita uma descrição da construção dos modelos no *software* ABAQUS®.

3.2.2.1 Preparação dos modelos

A preparação de modelos de análise em ABAQUS® é feita através dos vários módulos do *software* tendo cada módulo destinado a si uma parte da construção do modelo. Para a análise foi usado o ABAQUS®/CAE 2016 HF2. Este consiste num programa de simulação baseado em MEF, que permite a selecção do modelo de dano a ser utilizado na análise. No caso desta dissertação foi usado o modulo integrado de MDC que no ponto 3.2.2.2 são descritos em detalhe.

3.2.2.1.1 Módulo “Part”

O módulo “Part” foi usado para fazer o desenho dos limites e partições das juntas. Partições são divisórias criadas dentro da junta, são usadas para permitir a atribuição de diferentes propriedades às diferentes partes da camada de adesivo. Qualquer alteração geométrica dos aderentes foi realizada neste módulo. Na Figura 54 encontra-se uma representação da junta com e sem as várias partições usadas nos modelos.

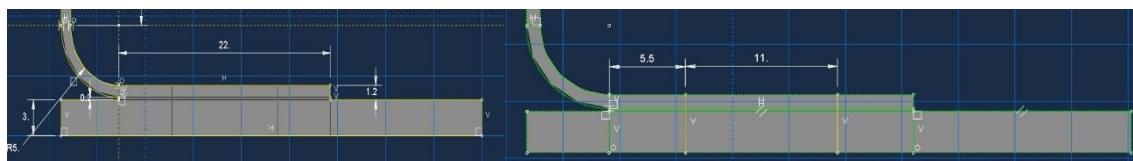


Figura 54 - Representação do desenho da junta com $t_{p2}=1$ mm e das suas partições.

3.2.2.1.2 Módulo “Property”

O módulo “Property” serve para criar materiais e secções e atribuir estas últimas às partições criadas no módulo “Part”. Na Figura 55 é possível ver as propriedades do adesivo Araldite® AV138.

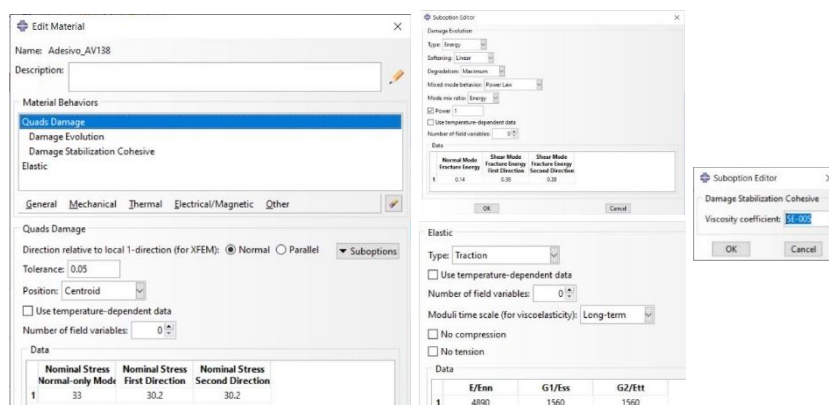


Figura 55 - Propriedades usadas nas simulações em ABAQUS® para o adesivo Araldite® AV138.

Neste modulo é também definido o tipo de secção a aplicar para cada secção, no caso dos adesivos foi seleccionada uma secção do tipo Coesiva e para os aderentes Sólido Homogéneo, a selecção pode ser vista na Figura 56.

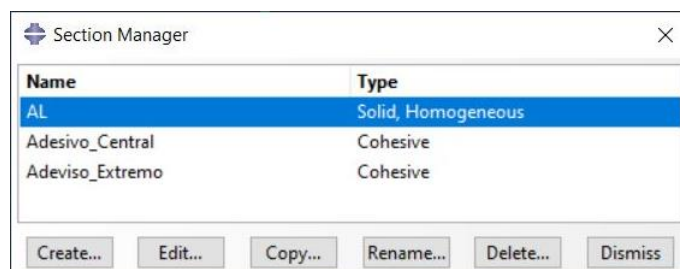


Figura 56 - Selecção do tipo de secção para as juntas analisadas.

3.2.2.1.3 Módulo “Interaction”

O módulo “interaction” é utilizado para definir interações entre componentes. Como a junta utilizada no estudo foi considerada um componente único este modulo não será utilizado.

3.2.2.1.4 Módulo “Step”

O módulo “Step” define as condições de análise. É usado para seleccionar o tipo de análise (térmica, dinâmica, estática, entre outros), a incrementação e o método de análise. Durante a construção dos modelos, um dos factores a ter em conta é o número máximo de incrementos dos modelos e os seus limites. É necessária a definição de um valor máximo de incremento para que software não ultrapasse, é também necessário definir um valor mínimo de incremento visto que o software, quando encontra problemas de convergência na zona de propagação de dano, diminui o incremento [90]. Na Figura 57 é possível ver a definição de incrementação usada nos modelos de estudo.

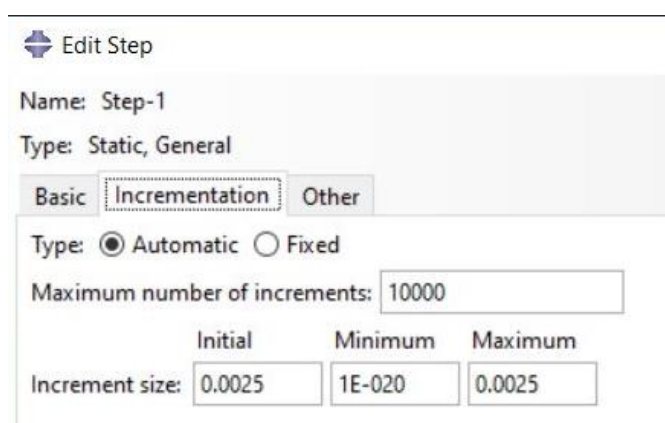


Figura 57 - Incrementação usada nos modelos de estudo.

3.2.2.1.5 Módulo “Load”

No módulo “Load” é definido o carregamento que a junta está submetida. No caso da junta em análise as condições fronteira consistem em criar um deslocamento, um encastramento na extremidade livre da junta e uma condição de simetria visto que a junta está a ser estudada apenas representando o seu lado direito. Na Figura 58 podem ver-se as condições fronteira consideradas no modelo da dissertação.

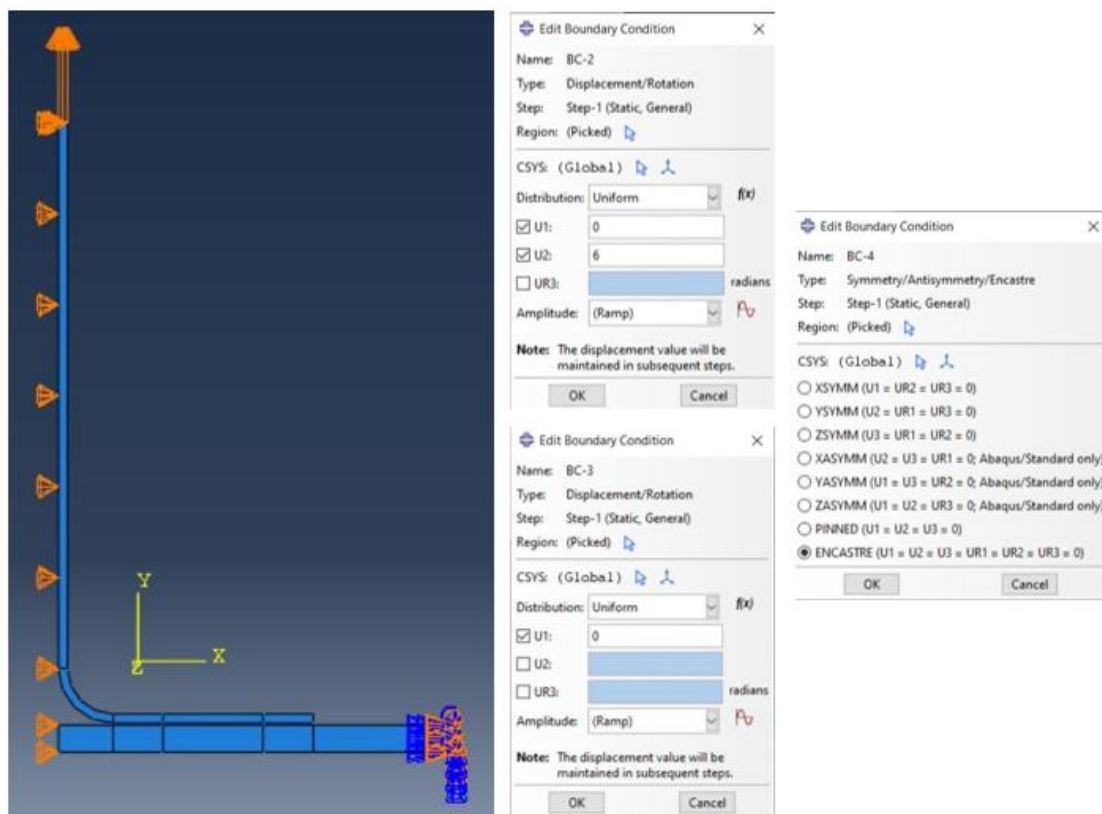


Figura 58 - Condições fronteira para os modelos ABAQUS® usados

3.2.2.1.6 Módulo “Mesh”

No módulo “Mesh” é definida a malha do modelo. A malha divide o modelo num número finito de elementos. Ao preparar a malha de uma junta adesiva vários factores devem ser tidos em consideração, como o tipo de elemento e a densidade da malha. Dependendo da aplicação, cada tipo de elementos tem vantagens e desvantagens, sendo assim a selecção do tipo de elemento é uma das escolhas com maior influência nos resultados finais [5, 90].

Para os aderentes foi seleccionada a tipologia “Structured”, e para os adesivos “Sweep”. O tipo de malha “Structured” é mais indicado para utilização em sólidos enquanto o tipo “Sweep” é mais indicado para elementos de irão sofrer maior deformação. Na Figura 59 pode-se ver esta diferença.

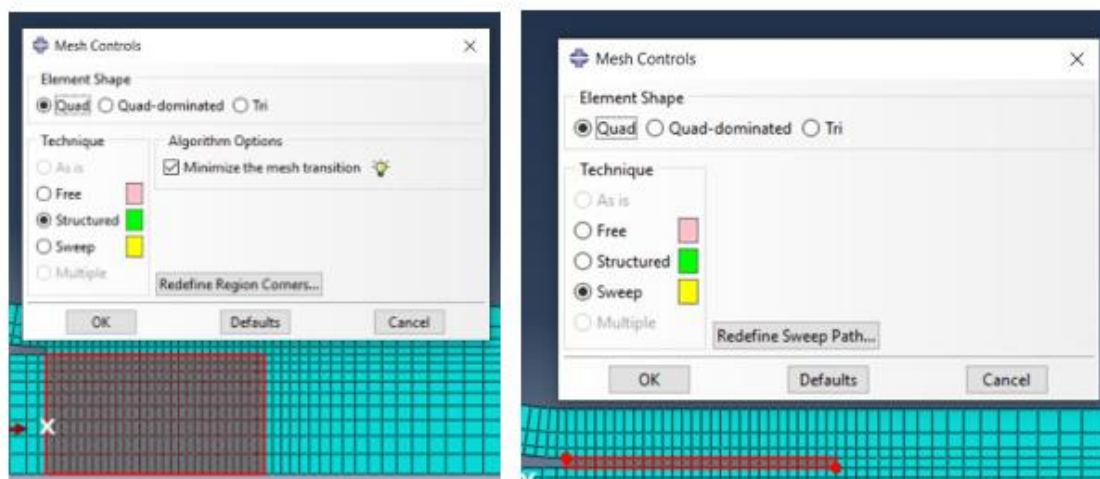


Figura 59 - Tipo de malha seleccionado nos modelos.

Os elementos usados na malha são quadriláteros e o seu tamanho varia entre 0,2 mm e 2 mm dependendo da zona do modelo. Zonas críticas como extremidades do adesivo e interface entre adesivos contêm elementos de dimensões mais reduzidas, as restantes, por exemplo zonas dos aderentes afastadas da área de ligação, contêm elementos maiores dimensões. Esta variação do tamanho dos elementos da malha é obtida através do uso de “bias”, podendo ser aplicadas numa só direcção ou em duas. É possível ver na Figura 60 a variação do tamanho dos elementos de malha.

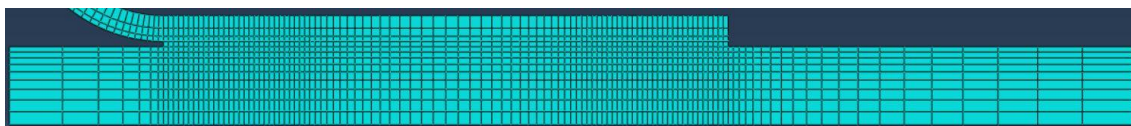


Figura 60 - Malha usada nos modelos.

3.2.2.2 Modelos de dano coesivo

Como descrito em 2.2.3, os MDC permitem a análise do início de uma fenda e a sua propagação no interior ou na interface dos materiais ou, também, em delaminação de compósitos. Estes modelos baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que estão ligados através de nós homólogos de elementos coesivos e simulam o comportamento elástico de um determinado material até à resistência máxima e, posteriormente a degradação das propriedades dos materiais até à rotura [27]. Existem vários MDC, nomeadamente, o modelo linear [33], exponencial [91], polinomial [35], trapezoidal [30] e triangular [34], que são aplicados em diferentes casos conforme o comportamento dos materiais em causa ou das suas interfaces a serem simuladas, de forma a obter resultados mais precisos [36].

A lei triangular é a mais utilizada devido ao reduzido número de parâmetros a serem determinados e aos resultados precisos para grande parte das condições reais [37]. Este modelo é baseado em MEF de interface de quatro nós, compatíveis com os elementos

sólidos bidimensionais de quatro nós do ABAQUS® [38]. Neste tipo de modelo de dano (Figura 24) são apresentados dois modos: puro e misto. No modo puro, a propagação do dano ocorre num conjunto particular de nós homólogos quando os valores das tensões no respectivo modo forem anulados na lei coesiva. Em contrapartida, o modo misto usa critérios energéticos e de tensões de forma a conjugar os modos puros de tracção (modo puro I) e de corte (modo puro II) [40].

A relação entre tensões e deformações antes da presença de dano é definida pela matriz $\mathbf{K}_{COH}$, representada na equação (1), que relaciona as tensões e deformações em tracção e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz inclui os parâmetros que definem a rigidez da ligação adesiva [87].

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

Quando é usada uma formulação local para a simulação de rotura ao longo de uma linha de espessura nula, os parâmetros da matriz apresentam valores muito elevados, de modo a não criar deformações na estrutura, induzidas pela presença de elementos coesivos [87]. Por outro lado, particularmente para ligações adesivas, perante uma modelação contínua de camadas finas, tem-se uma aproximação fiável aos parâmetros de rigidez, pelo que se admitem as seguintes igualdades:

$$k_{nn} = E ; k_{ss} = G \text{ e } k_{ns} = 0 ,$$

onde E e G correspondem ao módulo de elasticidade longitudinal e módulo de elasticidade transversal, respectivamente. Deste modo, ao considerar estes parâmetros, o modelo traduz a deformação da camada de adesivo de uma forma correcta [40].

Em modo misto, o início do dano pode ser definido através de diferentes critérios, embora o critério quadrático de tensões seja o mais usado, uma vez que este critério é reconhecido pela sua exactidão [87, 92]. Esta lei é traduzida pela equação (2):

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

onde “ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de *Macauly*, que indicam que uma tensão de compressão não provoca dano. A rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento quando a resistência coesiva em modo misto (t_m^0) é atingida (Figura 24) através da equação (2). A separação completa de um par de nós homólogos (Figura 24) é prevista por um critério linear energético em função de G_{IC} e G_{IIC} , que é traduzido pela equação (3):

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (3)$$

Este método permite o estudo da variável do dano ao longo da junta adesiva. O parâmetro *stiffness degradation* (SDEG) é um dos parâmetros considerados para este estudo, que revela a degradação de um elemento coesivo compreendido no intervalo $[0;1]$, onde zero e um representam a ausência de dano no elemento e a rotura total, respectivamente. Os valores de SDEG definem a plastificação do adesivo de forma percentual, deste modo quando estes valores pertencem ao intervalo $[0;1]$, o adesivo encontra em processo de amaciamento.

3.2.3 Resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados os resultados obtidos nas simulações numéricas realizadas. Para facilitar a apresentação de resultados os adesivos utilizados são referidos em gráficos e tabelas por uma designação curta do seu nome, como apresentado na Tabela 10. Os resultados são apresentados em função da configuração usada.

Tabela 10 - Correspondência dos nomes dos adesivos a designações curtas utilizadas.

Nome completo do adesivo	Designação curta a ser utilizada
Araldite® AV138	138
Araldite® 2015	2015
Sikaforce® 7752	7752

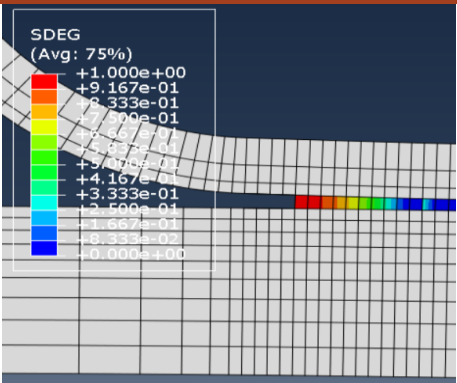
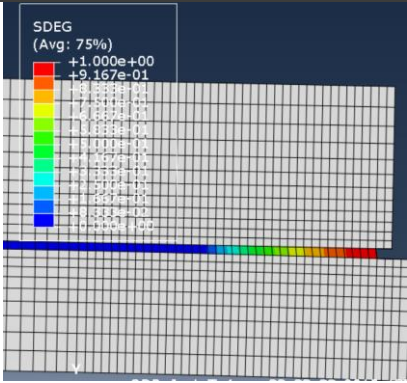
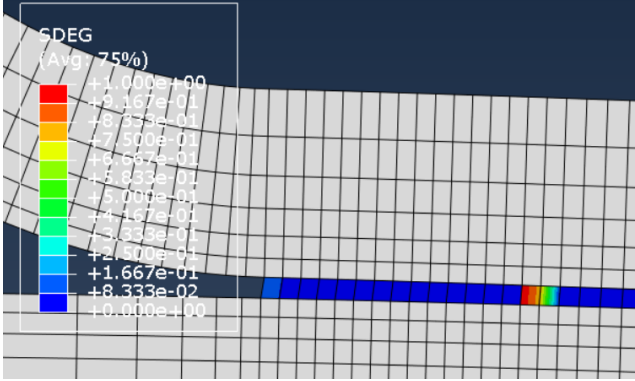
3.2.3.1 Modos de rotura

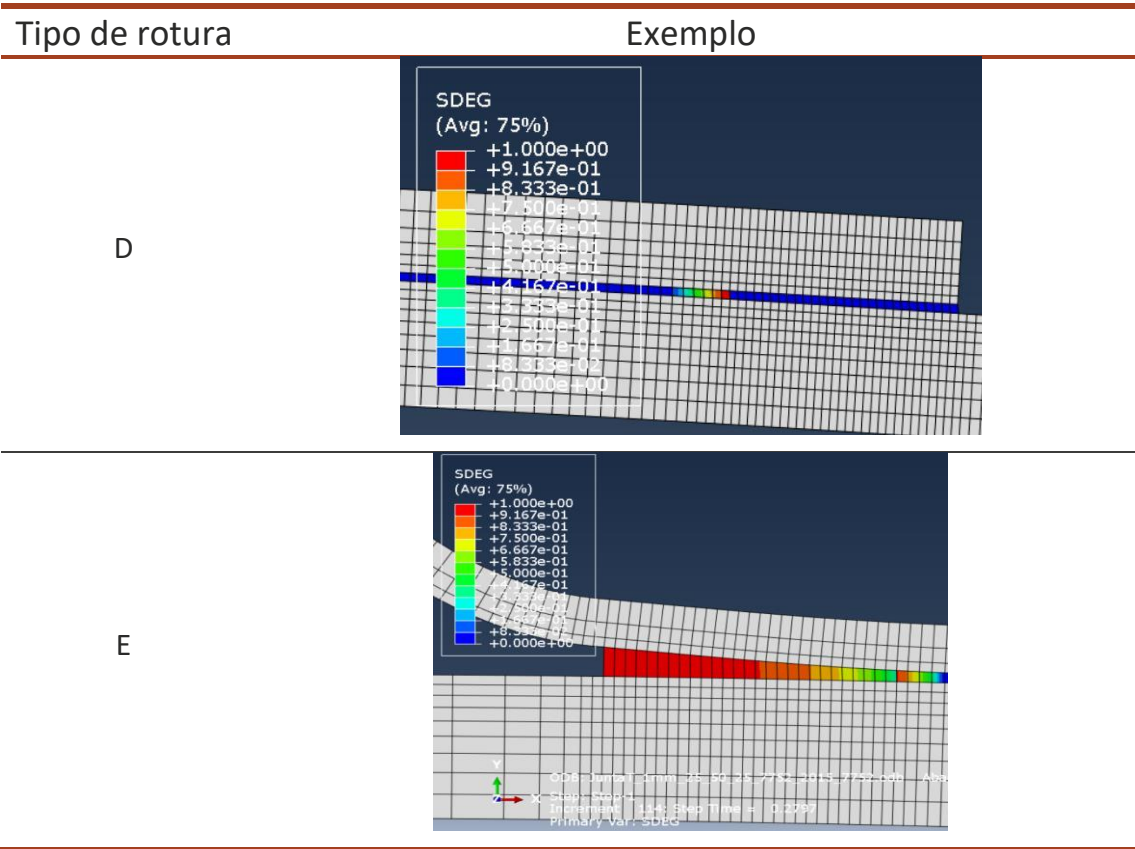
Experimentalmente, os modos de rotura são analisados após a rotura total da junta adesiva. Numericamente, é possível acompanhar a evolução do dano ao longo de todo o carregamento, permitindo visualizar o caminho da rotura desde o início do carregamento até à rotura total da junta e desta forma ter uma percepção mais detalhada do processo de dano. Para análise dos modos de rotura, na análise numérica, foi utilizada a variável SDEG para identificar o caminho de rotura. Os modos de rotura podem ser:

- A. Rotura na extremidade interior da sobreposição;
- B. Rotura na extremidade exterior da sobreposição;
- C. Rotura na zona de transição entre adesivos interior;
- D. Rotura na zona de transição entre adesivos exterior;
- E. Rotura simultânea na extremidade e zona de transição entre adesivos interior.

Os modos de rotura “A” e “B” são aqueles onde a rotura da junta se inicia nos extremos da camada do adesivo. Uma rotura do tipo “C” e “D” ocorre quando esta se inicia no interior da camada de adesivo, mais especificamente na zona de transição entre os dois adesivos utilizados. O modo de rotura “E” é obtido quando a rotura se inicia simultaneamente na extremidade interior do adesivo e na zona de transição entre adesivos interior. Na Tabela 11 é possível se observar os modos de rotura observáveis numericamente. É visível junto de cada exemplo uma escala de dano (variável SDEG), quando este valor é igual a 1 ocorre a rotura do elemento coesivo.

Tabela 11 - Modos de rotura numéricos.

Tipo de rotura	Exemplo
A	
B	
C	



3.2.3.1.1 Configuração 12,5%-75%-12,5%

Na Tabela 12 são apresentados os modos de rotura das juntas da configuração 12,5%-75%-12,5%. Como é possível observar na maioria das juntas a rotura inicia-se pela zona de transição entre os adesivos. Nos valores de $t_{p2}=3$ e 4 mm a rotura inicia-se na zona de transição entre adesivos do lado exterior da junta, enquanto para valores de $t_{p2}=1$ e 2 mm a rotura inicia-se, para a maioria das juntas, na zona de transição entre adesivos do lado interior da junta. Quando é usada a combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 para valores de $t_{p2}=1$ e 2 mm há roturas a iniciarem do lado interior da junta, o que não acontece nas restantes combinações.

Tabela 12 - Modos de rotura obtidos no estudo numérico na configuração 12,5-75-12,5.

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	A	E	D	D
7752-138-7752	C	C	D	D
7752-2015-7752	C	C	D	D

3.2.3.1.2 Configuração 25%-50%-25%

Na Tabela 13 são apresentados os modos de rotura das juntas da configuração 25%-50%-25%. Nesta configuração, à semelhança da anterior, a maior parte das roturas inicia-se na zona de transição entre adesivos. Nas juntas com $t_{p2}=1$ e 2 mm, excepto para a combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, caso em que a rotura se inicia do lado interior da junta, por outro lado para $t_{p2}=3$ e 4 mm a rotura inicia-se do lado exterior da junta. A combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 em valores de $t_{p2}=1$ e 2 mm obtêm do tipo “E”, ou seja, na zona interior da ligação, por outro lado para $t_{p2}=3$ e 4 mm a rotura inicia-se do lado exterior da junta.

Tabela 13 - Modos de rotura obtidos no estudo numérico na configuração 25-50-25.

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	C	A	D	B
7752-138-7752	C	D	D	D
7752-2015-7752	E	E	C	D

3.2.3.1.3 Configuração 33%-34%-33%

Na Tabela 14 são apresentados os modos de rotura das juntas da configuração 33%-34%-33%. É possível observar que, nesta configuração, ao contrário do que acontece nas restantes configurações, nas juntas com $t_{p2}=1$ mm a rotura inicia-se na camada de adesivo no lado interior. Na combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 para $t_{p2}=1, 2$ e 4 a rotura inicia-se do lado interior da camada de adesivo, por outro lado para as restantes combinações isto não acontece a excepção das juntas com $t_{p2}=1$ mm.

Tabela 14 - Modos de rotura obtidos no estudo numérico na configuração 33-34-33.

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	A	A	D	B
7752-138-7752	A	D	D	D
7752-2015-7752	A	C	C	D

Em todos os casos estudados a rotura inicia-se na camada de adesivo. Na sua maioria na zona de transição entre adesivos no lado exterior da ligação. As configurações influenciam o início da rotura comparando, por exemplo, as juntas com $t_{p2}=1$ mm quando a configuração 33%-34%-33% é usada as roturas iniciam-se na camada de adesivo do lado interior. No entanto nas restantes configurações a rotura acontece na

zona de transição entre adesivos do lado interior. Nas combinações de adesivos que incluem o adesivo Sikaforce® 7752 a rotura inicia-se maioritariamente no lado exterior da camada de adesivo, seja ou não na zona de transição entre adesivos. Com o aumento de t_{p2} o início da rotura move-se da zona interior da ligação adesiva para a exterior devido ao aumento da rigidez do aderente superior. Nas juntas de $t_{p2}=4$ mm todas as roturas se iniciam na zona exterior da ligação, seja ou não na zona de transição entre adesivos, por outro lado em $t_{p2}=1$ mm as roturas ocorrem na zona interior da ligação, seja ou não na zona de transição entre adesivos.

3.2.3.2 Distribuições de tensões

Neste capítulo são apresentados os resultados do estudo de tensões realizado com o *software* ABAQUS®. Como forma de comparação são apresentados resultados de tensões para as juntas $t_{p2}=1$ e 4 mm. As análises de tensões apresentadas foram retiradas no regime elástico do carregamento no momento do primeiro incremento.

3.2.3.2.1 Tensões de arrancamento

A análise de tensões de arrancamento consiste no estudo de $\sigma_y/\tau_{médio}$ em função de X/L_0 ($0 < L_0 < 1$). Da Figura 61 à Figura 68 são apresentadas as distribuições de σ_y obtidas na linha central da camada de adesivo em função de L_0 para todas as configurações de junta e combinações de adesivos.

3.2.3.2.1.1 Adesivo simples

Na Figura 61 e Figura 62 apresentam-se os resultados para análise de tensões de arrancamento das juntas com adesivos simples para $t_{p2}=1$ e 4 mm, respectivamente. Nas juntas de $t_{p2}=1$ mm verifica-se que o ponto de tensão máximo de encontra em $X/L_0=0$. Por outro lado, para $t_{p2}=4$ mm este máximo posiciona-se em $X/L_0=1$. Isto acontece devido ao aumento de rigidez do aderente. Para $t_{p2}=4$ mm há um segundo pico de tensões (neste caso negativo) do lado oposto da junta, o que não se observa para $t_{p2}=1$ mm. Isto deve-se ao aumento de rigidez do aderente para $t_{p2}=4$ mm. Existe para $t_{p2}=1$ mm, um pico de tensão menos elevado registado para $X/L_0=0,9$. Para $t_{p2}=4$ mm este pico encontra-se $X/L_0=0,1$. O adesivo Araldite® AV138 é o adesivo menos dúctil empregado no estudo e por esse motivo, é na sua utilização que se encontram os picos de tensão mais elevados, 1,77 e 2,02 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente. Em contraste, o adesivo Sikaforce® 7752 é o adesivo com maior ductilidade e é nas juntas com este adesivo que se resistam os menores picos de tensão 0,62 e 0,74 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, cerca de 65% inferiores. No caso do adesivo Araldite® 2015 os resultados são intermédios 1,14 e 1,33 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, sendo cerca de 35% inferior ao adesivo Araldite® AV138.

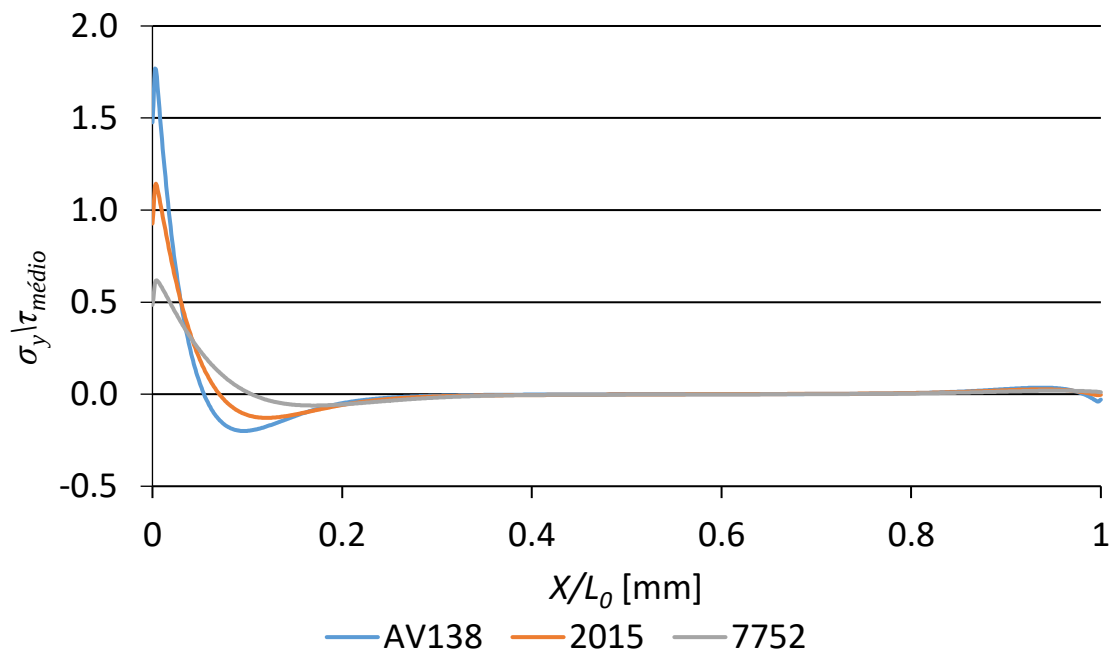


Figura 61 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=1$ mm.

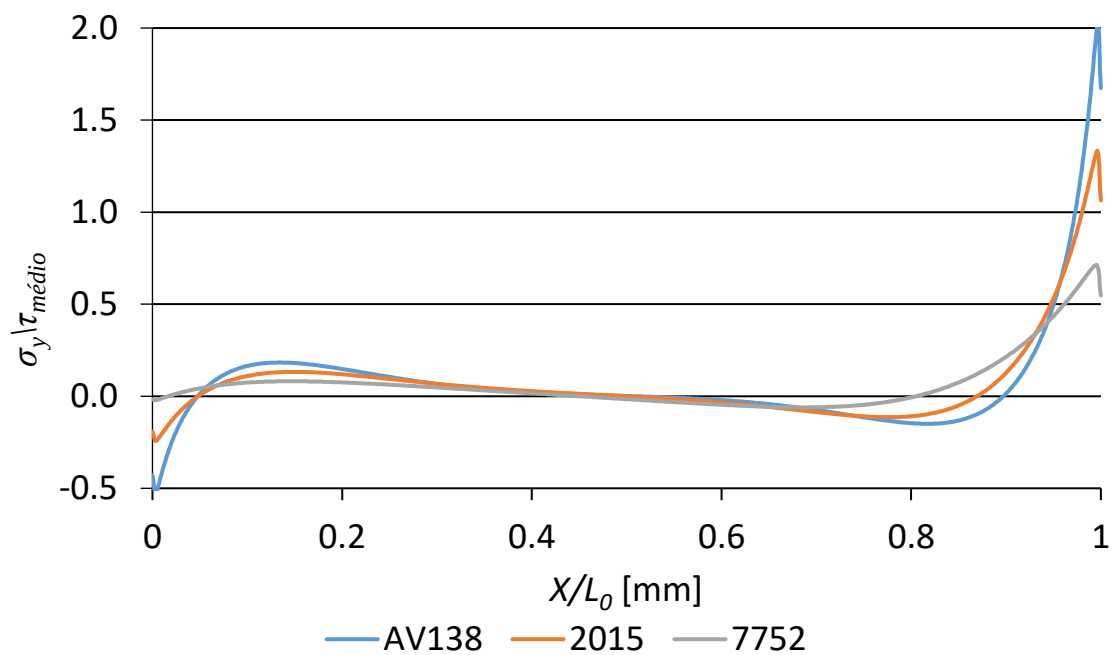


Figura 62 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.3.2.1.2 Configuração 12,5%-75%-12,5%

Na Figura 63 e Figura 64 apresentam-se os resultados para análise de tensões de arrancamento das juntas com a técnica de bi-adesivo na configuração 12,5%-75%-12,5% para $t_{p2}=1$ e 4 mm.

Os picos máximos de tensão nesta configuração, 1,14 e 1,35 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, são inferiores aos encontrados nas juntas com adesivos simples, em cerca de 25%. À semelhança das juntas de adesivos simples, também nesta configuração para $t_{p2}=1$ mm o máximo de tensão encontra-se em $X/L_0=0$. Em $t_{p2}=4$ mm o ponto máximo de tensão encontra-se em $X/L_0=1$. É possível observar, em ambos os valores de t_{p2} , a existência de picos de tensão na fronteira entre adesivos. Os valores destes picos são superiores para $t_{p2}=4$ mm do que em $t_{p2}=1$ mm devido ao aumento de rigidez do aderente.

A combinação dos adesivos Araldite® AV 138 e Araldite® 2015 conduz aos maiores picos de tensão. As combinações onde é aplicado o adesivo Sikaforce® 7752 obtêm valores de picos máximos muito próximo, 0,63 e 0,74 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, cerca de 45% inferiores ao máximo da configuração em questão. Nos picos registados nas zonas de transição entre adesivos é importante salientar que em $t_{p2}=1$ mm. O valor máximo corresponde à combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. No entanto para $t_{p2}=4$ mm a combinação do adesivo Araldite® AV138 com o adesivo Sikaforce® 7752 tem um valor mais elevado de tensão (0,68). Este pico (0,68) é muito próximo do máximo registado pela combinação dos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 (0,74) para $t_{p2}=4$.

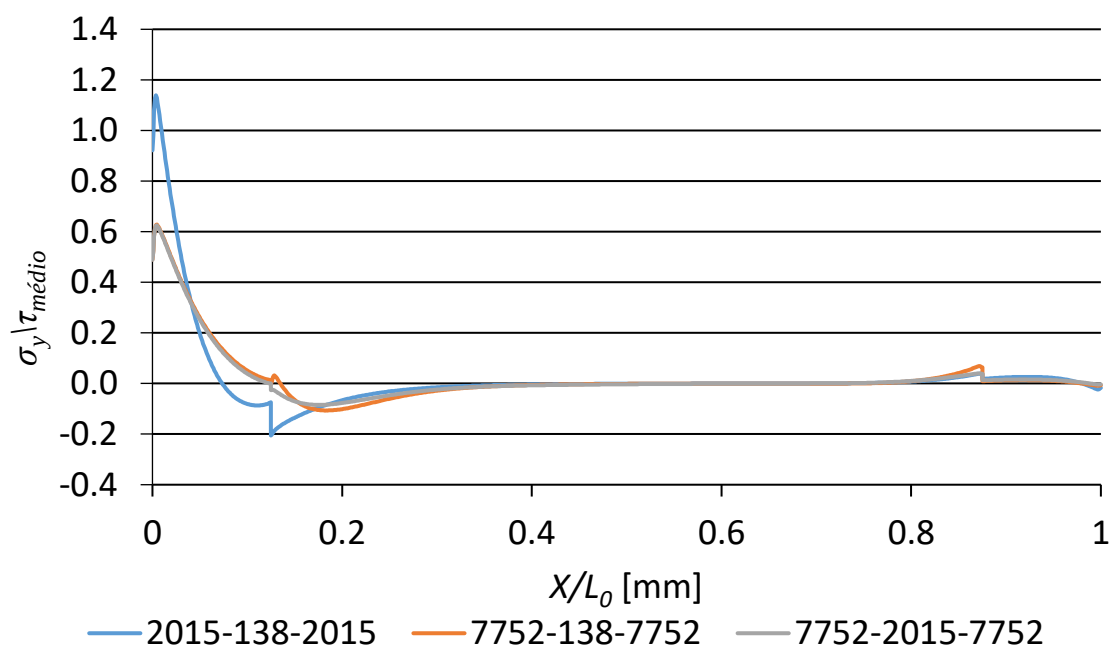


Figura 63 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=1$ mm.

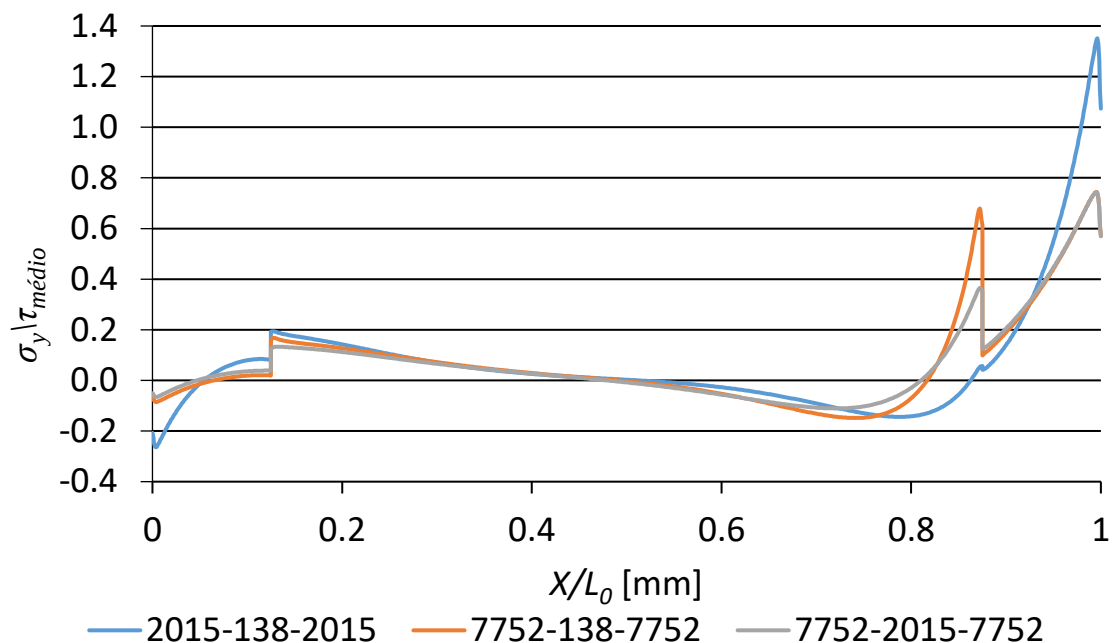


Figura 64 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.3.2.1.3 Configuração 25%-50%-25%

Na Figura 65 e Figura 66 apresentam-se os resultados para análise de tensões de arrancamento das juntas com a técnica de bi-adesivo na configuração 25%-50%-25% para $t_{p2}=1$ e 4 mm. É possível evidenciar que, à semelhança da configuração anterior e das juntas com adesivo simples, os picos máximos de tensão para $t_{p2}=1$ mm encontram-se em $X/L_0=0$ e para $t_{p2}=4$ mm em $X/L_0=1$. É também com a utilização da combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 que são obtidos os valores máximos de tensão, 1,15 e 1,35 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, sendo que os valores obtidos são idênticos.

As combinações de adesivos que incluem o adesivo Sikaforce® 7752, tal como ocorria na configuração anterior, obtêm valores máximo de tensão muito semelhantes, 0,63 e 0,76 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, o que corresponde a uma redução de cerca de 45% em relação ao valor obtido pela combinação do adesivo Araldite® AV138 com o adesivo Araldite® 2015.

Os valores dos picos intermédios de tensão para $t_{p2}=4$ mm desta configuração são muito inferiores aos obtidos com a configuração 12,5%-75%-12,5%. A zona de fronteira entre adesivos no caso da configuração 12,5%-75%-12,5% encontra-se muito próxima da zona onde, nas juntas de adesivos simples, $X/L_0=0,9$, se encontra um segundo pico de tensão causando uma sobreposição de efeitos que no caso da configuração 25%-50%-25% já não existe.

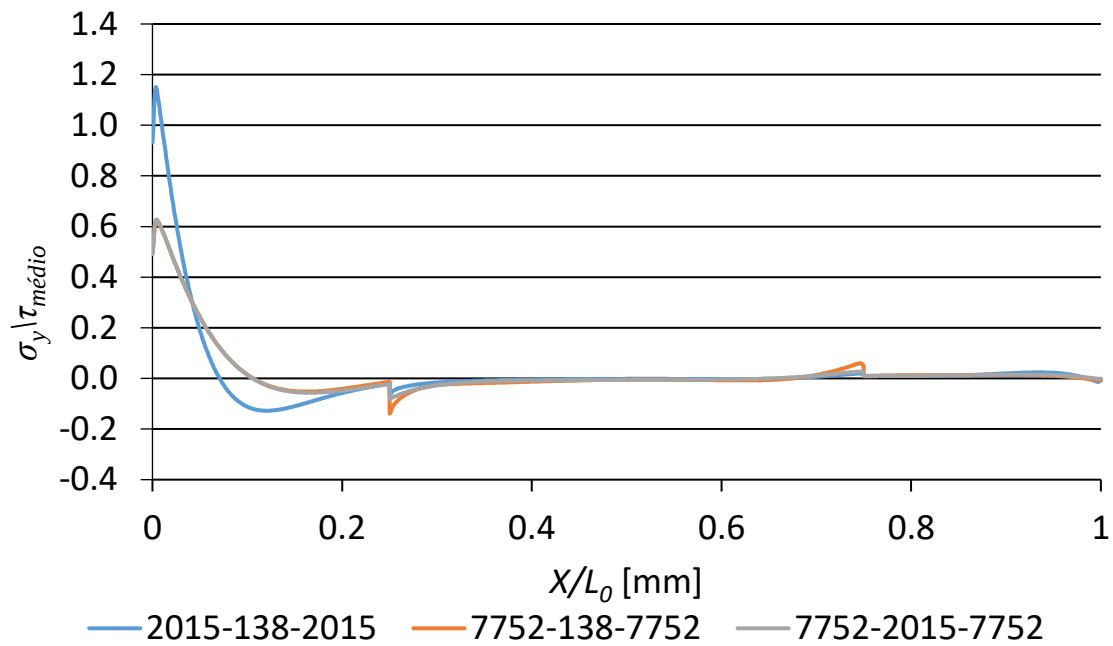


Figura 65 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 25-75-25 e $t_{p2}=1$ mm.

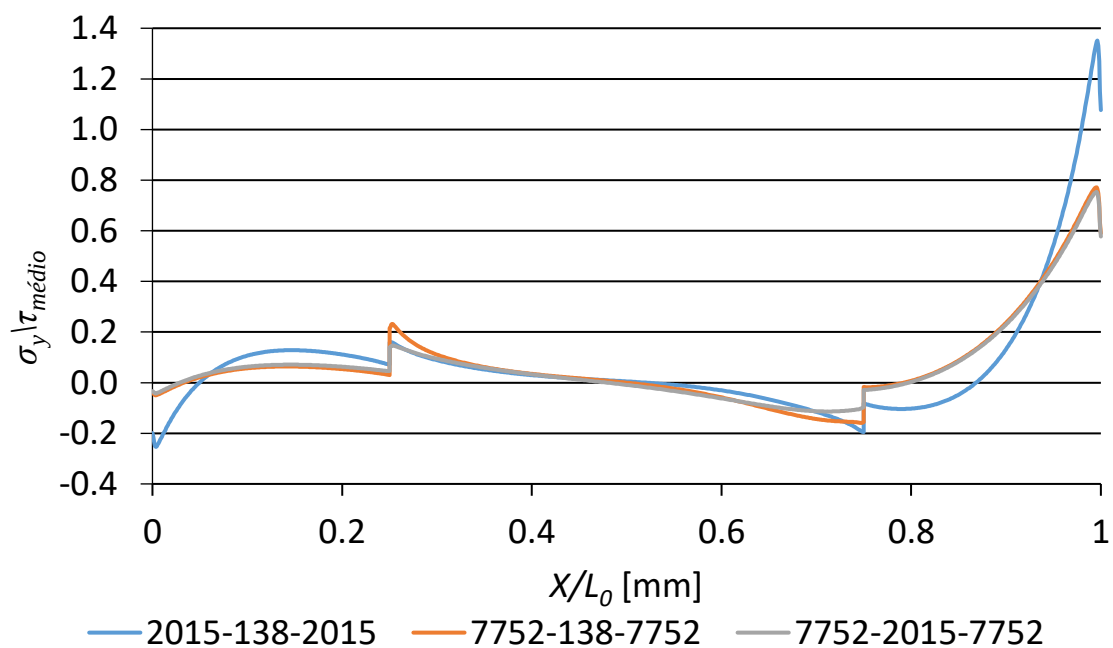


Figura 66 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 25-75-25 e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.3.2.1.4 Configuração 33%-34%-33%

Na Figura 67 e Figura 68 apresentam-se os resultados para análise de tensões de arrancamento das juntas com a técnica de bi-adesivo na configuração 33%-34%-33% para $t_{p2}=1$ e 4 mm.

Nesta configuração os valores máximos de tensões, 1,15 e 1,35 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, apresentados são muito semelhantes aos vistos nas juntas das restantes configurações usadas. O comportamento das várias combinações de adesivos é também semelhante ao apresentado anteriormente. Os valores máximos de tensão registam-se para a combinação dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. As duas combinações restantes apresentam valores muito próximos, 0,63 e 0,75 para $t_{p2}=1$ e 4, respectivamente, uma redução de cerca 45% de redução face ao máximo. Também na utilização desta configuração não se verifica a existência de picos muito elevados de tensão na zona de fronteira entre adesivos, à semelhança do que se observou na configuração 25%-50%-25%.

Pode constatar-se imediatamente que as concentrações de tensão σ_y passam do lado interior para o lado exterior da sobreposição quando o valor de t_{p2} aumenta. A espessura de transição é $t_{p2}=3$ mm. Conclui-se também que o adesivo utilizado influencia o tamanho do pico de tensão obtido. O adesivo mais frágil (Araldite® AV138) obtém picos bem mais elevados do que as alternativas mais dúcteis. Na utilização da técnica bi-adesivo verifica-se que a combinação Araldite® AV138 e Araldite® 2015 é a que tem picos de tensão mais elevados, no entanto inferiores aos registados quando o adesivo Araldite® AV138 é utilizado isoladamente. As juntas com $t_{p2}=4$ mm apresentam picos de tensão nas zonas de transição entre adesivos superiores às encontradas nas juntas com $t_{p2}=1$ mm. Verifica-se também que os picos de tensão diminuem quando a percentagem do comprimento do adesivo mais dúctil aumenta.

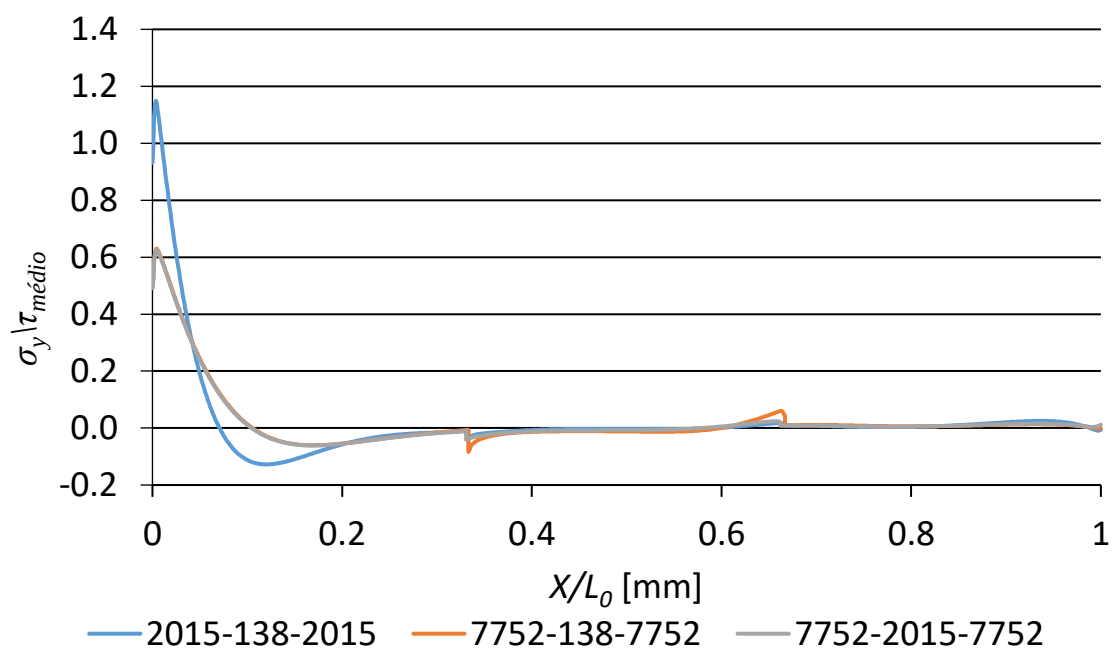


Figura 67 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=1$ mm.

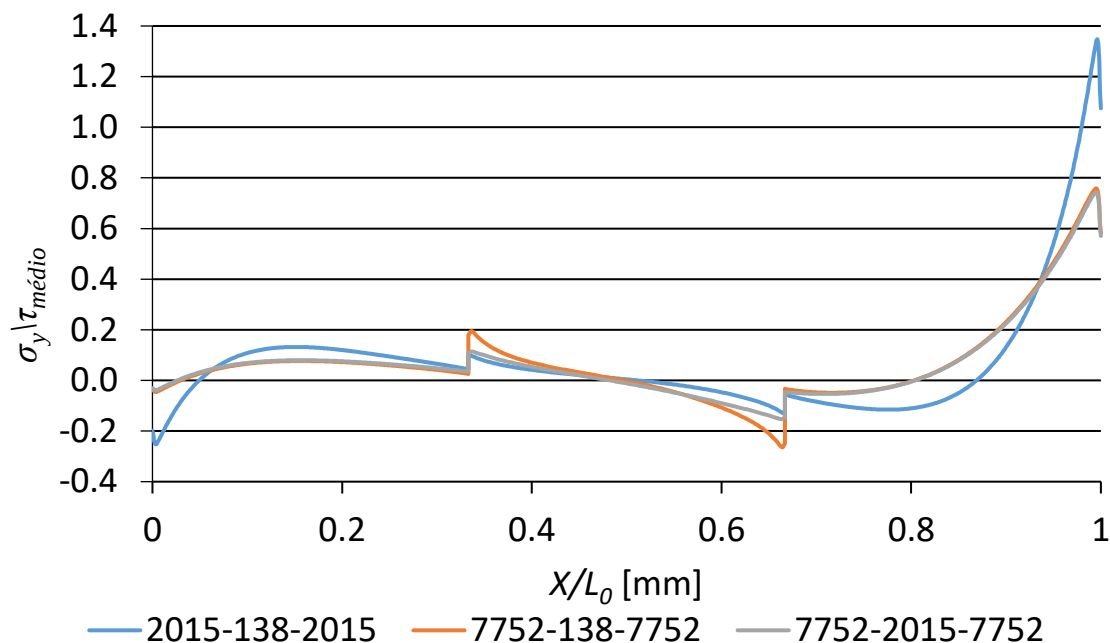


Figura 68 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.3.2.2 Tensões de corte

A análise de tensões de corte consiste no estudo de $\tau_{xy}/\tau_{médio}$ em função de X/L_0 ($0 < L_0 < 1$). Da Figura 69 à Figura 76 são apresentadas as distribuições de τ_{xy} obtidas na linha central da espessura da camada de adesivo em função de L_0 para todas as configurações de junta e combinações de adesivos.

3.2.3.2.2.1 Adesivo simples

Na Figura 69 e Figura 70 apresentam-se os resultados para análise de tensões corte das juntas com adesivos simples para $t_{p2}=1$ e 4 mm. Os valores máximos de picos de tensão acontecem para o adesivo Araldite® AV138 (0,72 e 1,34). Para $t_{p2}=4$ mm regista-se um valor cerca de 86% superior ao registado para $t_{p2}=1$ mm devido ao aumento de rigidez do aderente. Ao contrário do que acontece nas tensões de arrancamento, o valor máximo para os adesivos Araldite® 2015, 0,42 e 0,73 restantes, e Sikaforce® 7752, 0,16 e -0,43 restantes, são diferentes. O adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 têm um valor máximo de cerca de 45% e 80%, respectivamente, inferior ao registado para o adesivo Araldite® AV138. Para ambos t_{p2} verifica-se que o pico de tensões se encontra em $X/L_0=0$, excepto para na utilização do adesivo Sikaforce 7752 com $t_{p2}=4$ mm, neste caso o máximo regista-se em $X/L_0=1$, ou $X/L_0=0$ (apenas para o adesivo Sikaforce® 7752). Este pico de tensão, no adesivo Araldite® AV138 (1,04) é cerca de 23% inferior ao pico máximo (apesar de negativo). Para o adesivo Araldite® 2015, o pico negativo é praticamente igual ao positivo. Para o adesivo Sikaforce® 7752, o pico positivo (0,21) é cerca de 50% inferior ao máximo.

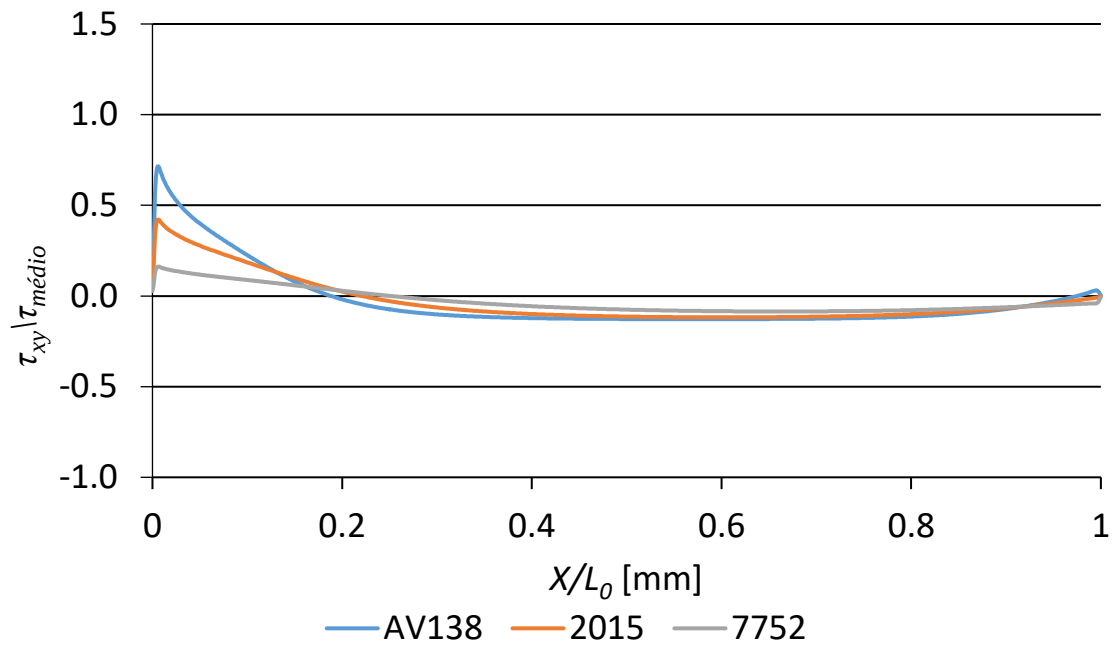


Figura 69 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=1$ mm.

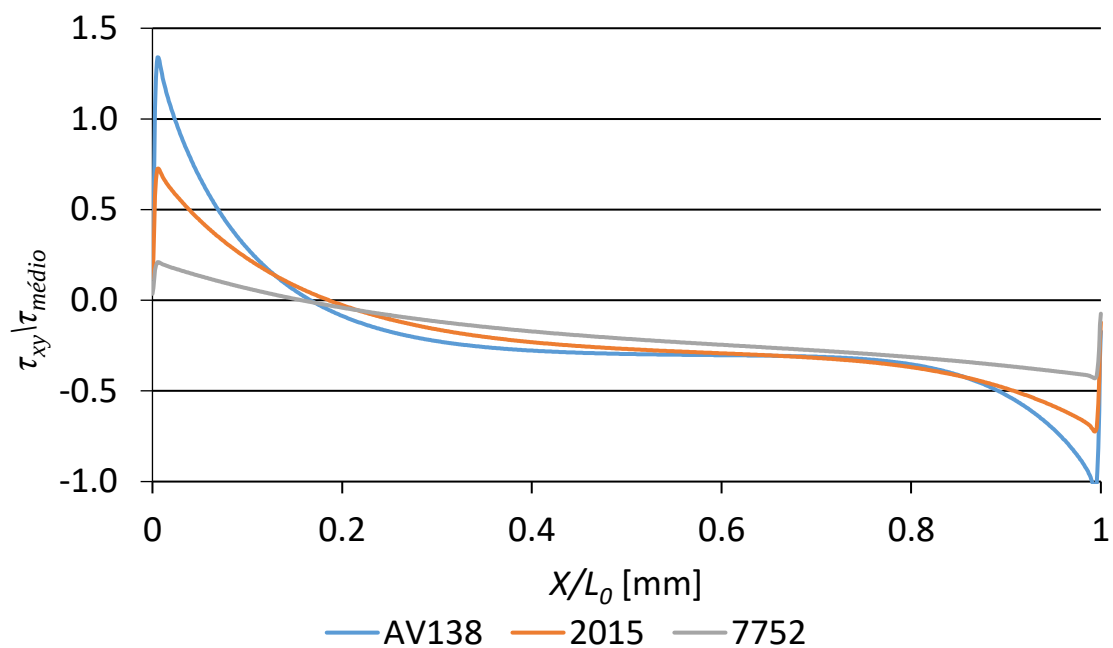


Figura 70 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração de adesivos simples e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.3.2.2.2 Configuração 12,5%-75%-12,5%

Na Figura 71 e Figura 72 apresentam-se os resultados para análise de tensões de corte das juntas com a técnica de bi-adesivo na configuração 12,5%-75%-12,5% para $t_{p2}=1$ e 4 mm.

Para esta configuração, os valores máximos de tensões, 0,45 e -1,05 são obtidos pela combinação do adesivo Sikaforce® 7752 com o adesivo Araldite® AV138. Estes pontos máximos, ao contrário do verificado nas juntas de adesivo simples, não se encontram nos extremos da ligação. Para $t_{p2}=1$ mm, o máximo de tensão regista-se para $X/L_0=0,13$, ou seja, perto da zona de transição entre adesivos. Para $t_{p2}=4$ mm, é para $X/L_0=0,87$ que se regista o máximo de tensão, perto também da zona de transição entre adesivos.

Para $t_{p2}=1$ mm, ambas as restantes combinações de adesivos registam o seu máximo valor de tensão para $X/L_0=0$, sendo que o valor da combinação dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 (0,42) é apenas 7% inferior ao máximo registado nesta configuração. A combinação do adesivo Sikaforce® 7752 com Araldite® 2015 (0,24) é cerca de 45% inferior ao máximo da configuração para $t_{p2}=1$ mm. Os valores de tensão em $X/L_0=0$ das combinações dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 e dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® AV138 são muito próximos.

Para $t_{p2}=4$ mm a combinação do adesivo Araldite® 2015 com o adesivo AV138 (0,72) tem o seu valor máximo de tensão para $X/L_0=0$ sendo cerca de 31% inferior ao valor máximo da configuração no mesmo valor de t_{p2} . Ao contrário do verificado para $t_{p2}=1$ mm a combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 (-0,68) regista o seu valor máximo para $X/L_0=0,87$, cerca de 35% inferior ao máximo registado da configuração para o mesmo valor de t_{p2} . Em $t_{p2}=4$ mm os picos de tensão nas zonas de transição entre adesivos são muito mais expressivos do que os existentes em $t_{p2}=1$ mm. A rigidez do aderente superior contribui para este fenómeno.

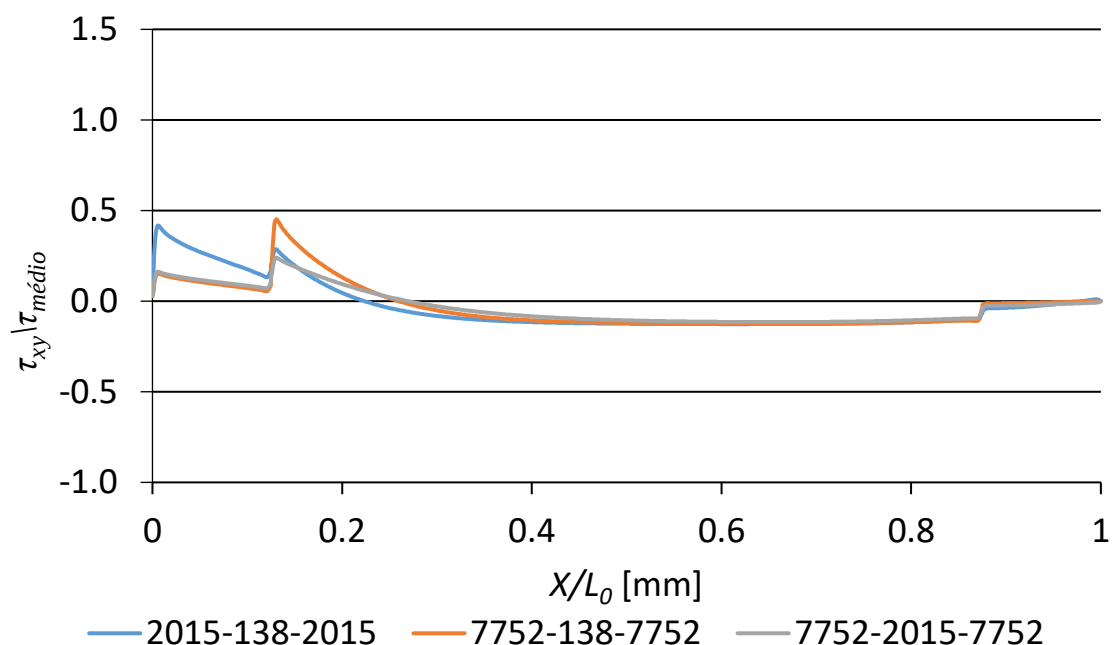


Figura 71 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=1$ mm.

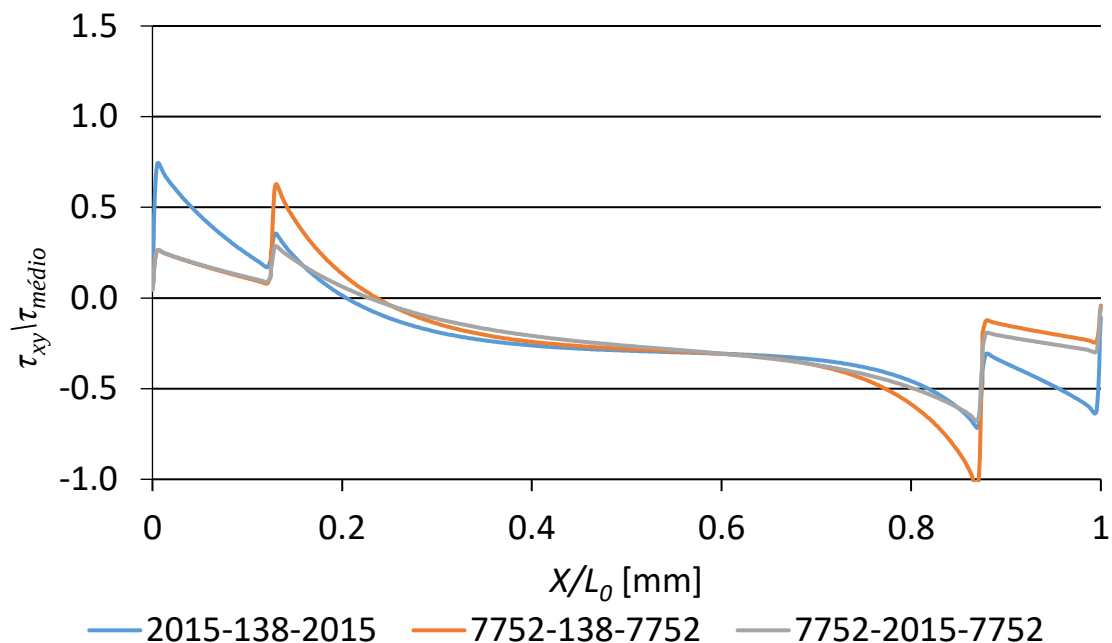


Figura 72 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 12,5-75-12,5 e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.3.2.2.3 Configuração 25%-50%-25%

Na Figura 73 e Figura 74 encontram-se apresentados os resultados para análise de tensões de corte das juntas com a técnica de bi-adesivo na configuração 25%-50%-25% para $t_{p2}=1$ e 4 mm.

Quando é feita a comparação entre esta configuração e a configuração anterior verifica-se que, para $t_{p2}=1$ mm, o pico máximo de tensões (0,43) é obtido com a combinação dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 ao contrário do que acontece na configuração anterior. É também de referir que o pico de tensão se regista para $X/L_0=0$ e não nas zonas de transição entre adesivos, como sucede para a configuração 12,5%-75%-12,5%. Para $t_{p2}=4$ mm, tal como para a configuração anterior, a tensão máxima (-0,98) é encontrada para a combinação do adesivo Sikaforce® 7752 com o adesivo Araldite® AV138. Para além disto este pico regista-se também na zona de transição entre adesivos. Os picos máximos registados para esta configuração são cerca de 7% inferiores aos registados na configuração 12,5%-75%-12,5%.

Para $t_{p2}=1$ mm as restantes combinações registam o ponto máximo de tensão nas zonas de transição entre adesivos. A combinação do adesivo Sikaforce® 7752 com o adesivo Araldite® AV138 (-0,22) regista este pico para $X/L_0=0,75$, sendo este valor cerca de 50% inferior ao valor máximo nesta configuração. No caso da combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 o seu pico máximo (0,18) encontra-se para $X/L_0=0,25$, com um valor cerca de 60% inferior ao máximo registado na configuração para o mesmo valor de t_{p2} .

Nas juntas de $t_{p2}=4$ mm a combinação dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 conduz um pico de tensão (0,75) para $X/L_0=0$, sendo o valor cerca de 25% inferior ao valor máximo da configuração para o mesmo var de t_{p2} . Para a combinação do adesivo Sikaforce 7752 e do adesivo Araldite® 2015 o valor máximo (-0,61) é registado em $X/L_0=0,75$ na transição entre adesivos.

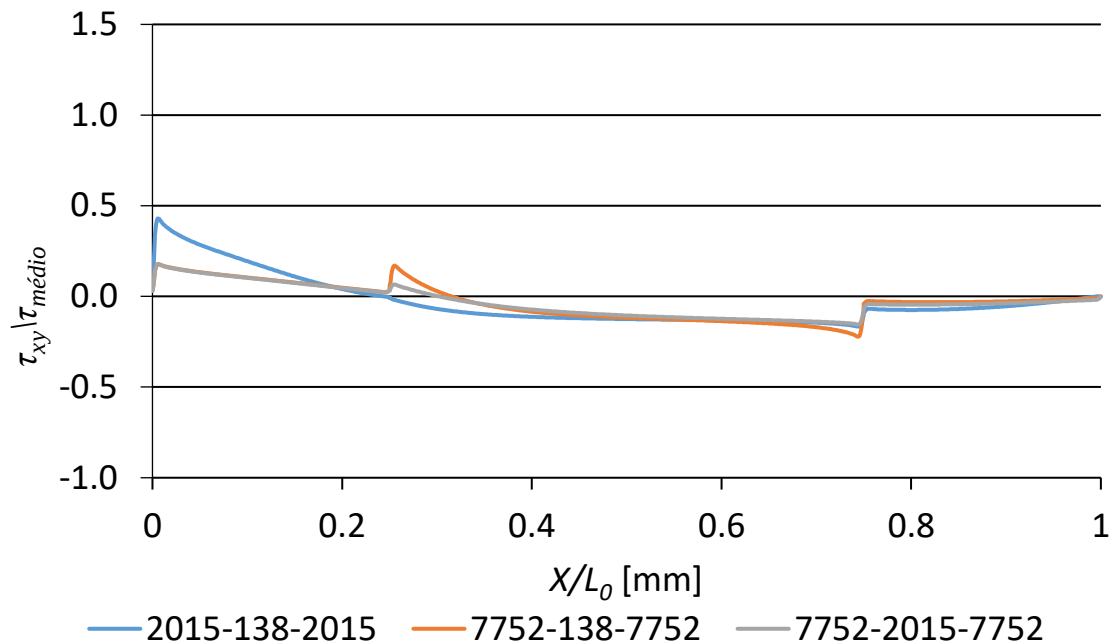


Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 25-50-25 e $t_{p2}=1$ mm.

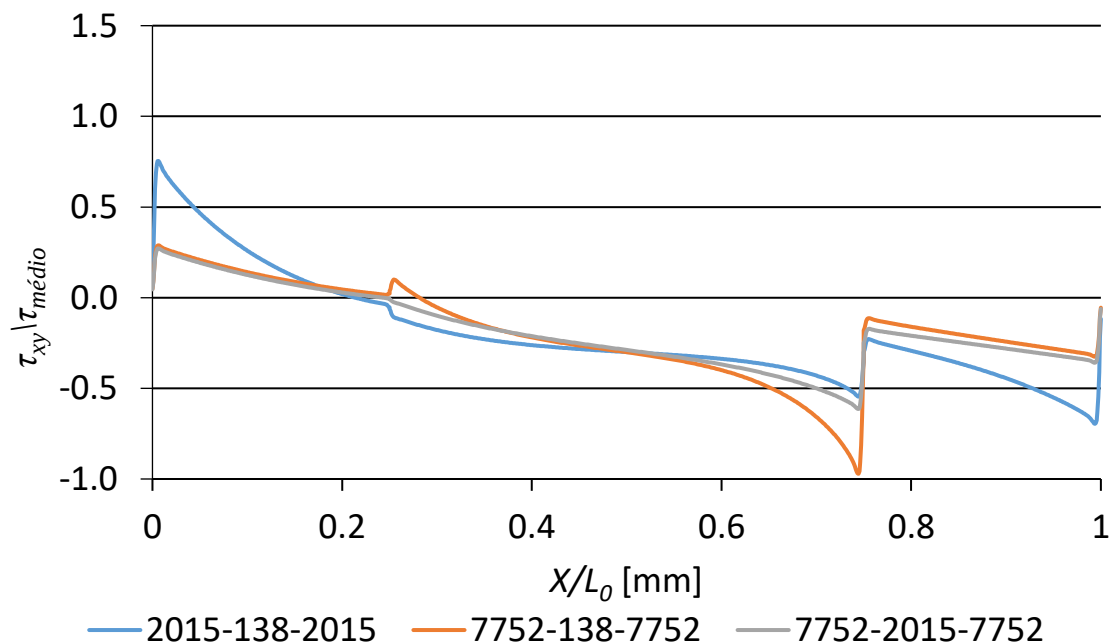


Figura 74 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 25-50-25 e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.3.2.2.4 Configuração 33%-34%-33%

Na Figura 75 e Figura 76 encontram-se apresentados os resultados para análise de tensões de corte das juntas com a técnica de bi-adesivo na configuração 33%-34%-33% para $t_{p2}=1$ e 4 mm. Em análise inicial, os valores máximos de tensão para esta configuração verificam-se nas mesmas situações que na configuração anterior. Para $t_{p2}=1$ mm o valor máximo regista-se em $X/L_0=0$ para a combinação dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 (0,43), um valor muito próximo do obtido na configuração 25%-50%-25%. Em junta com $t_{p2}=4$ mm o pico máximo de tensões (-0,93) é obtido para a combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® AV138 para $X/L_0=0,67$, ou seja, na zona de transição entre adesivos. Para t_{p2} mais elevado, o valor do pico de tensão é cerca de 5% inferior ao registado com a configuração 25%-50%-25%.

Também à semelhança do que acontece na configuração 25%-50%-25%, em $t_{p2}=1$ mm a combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 (-0,27) regista o seu máximo de tensão na zona de transição entre os adesivos, ou seja, para $X/L_0=0,67$. O valor do pico é cerca de 65% inferior ao máximo registado para a configuração para o mesmo valor de t_{p2} . Para $X/L_0=0,67$ é obtido o máximo de tensões da combinação do adesivo Sikaforce® 7752 com o adesivo Araldite® 2015 (-0,18) sendo este cerca de 60% inferior ao máximo registado para a configuração. Nesta combinação o pico presente em $X/L_0=0$ é muito próximo do pico máximo registado para esta configuração para t_{p2} igual. Para $t_{p2}=4$ mm a combinação dos adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 regista o seu máximo de tensões (0,75) para $X/L_0=0$. O seu valor é 20% inferior ao máximo obtido para este valor de t_{p2} . A combinação do adesivo Sikaforce® 7752 com o adesivo Araldite® 2015 regista o seu pico máximo (-0,58) em $X/L_0=0,67$, sendo o valor deste pico cerca de 40% inferior ao máximo obtido para o mesmo valor de t_{p2} .

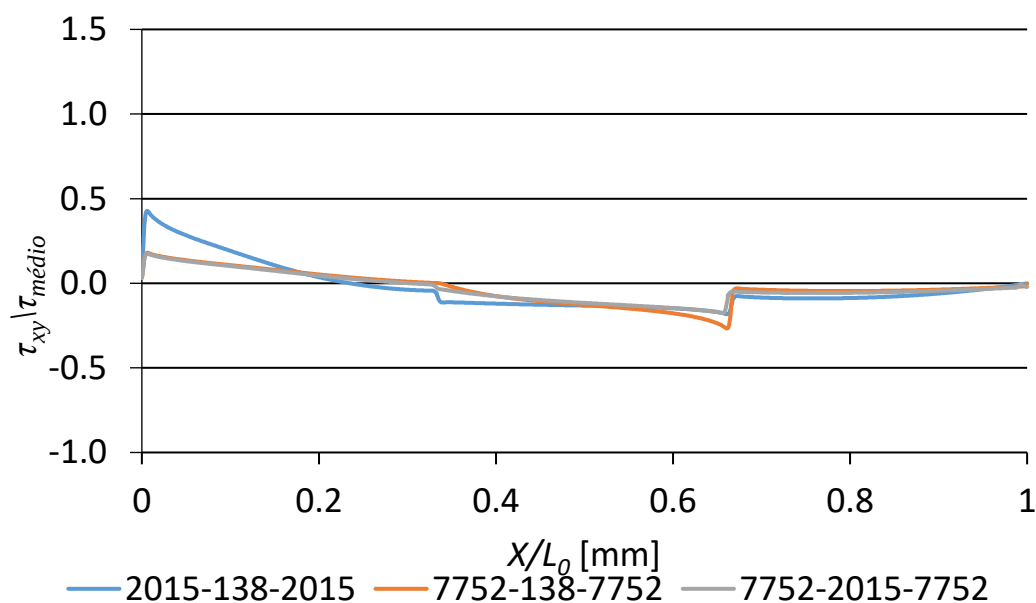


Figura 75 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=1$ mm.

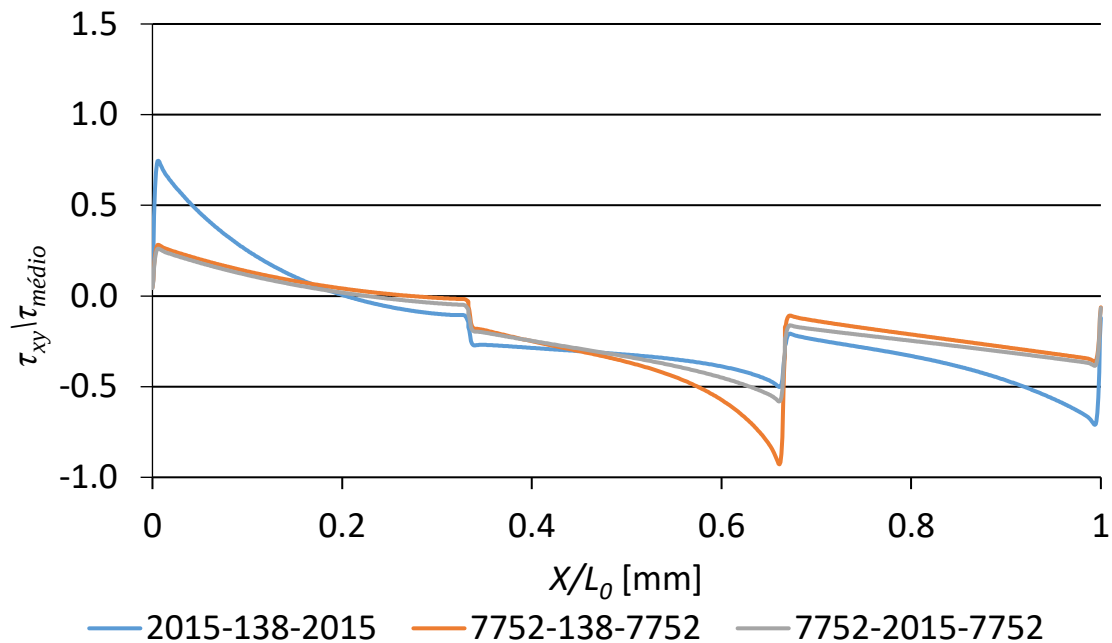


Figura 76 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração 33-34-33 e $t_{p2}=4$ mm.

A primeira constatação é que os picos de tensão de corte são mais elevados para as juntas de $t_{p2}=4$ mm do que nas juntas de $t_{p2}=1$ mm. Isto verifica-se não só nos picos de tensão das extremidades, mas também nos picos de tensão nas zonas de transição entre adesivos. Constata-se também que a configuração influencia não só o valor dos picos de tensão como também a sua posição, especialmente em juntas de $t_{p2}=4$ mm onde os picos de tensão se posicionam nas zonas de transição entre adesivos. Verifica-se que, em várias combinações e configurações, há segundos picos de tensões muito próximos do pico máximo registado.

3.2.3.3 Previsão da resistência

Neste ponto são apresentados os resultados de resistência ($P_{\text{máx}}$) obtidos no estudo numérico feito no decorrer da dissertação. Para efeitos de comparação, as variações de resultados serão sempre expressas em percentagem em relação ao valor obtido para o adesivo Araldite® AV138 para o respectivo valor de t_{p2} , visto que este adesivo apresenta o valor de $P_{\text{máx}}$ mais baixo de todas as combinações estudadas.

3.2.3.3.1 Configuração 12,5%-75%-12,5%

Na Figura 77 são apresentados os resultados obtidos de $P_{\text{máx}}$ em simulação ABAQUS® para a configuração 12,5%-75%-12,5% e adesivos simples.

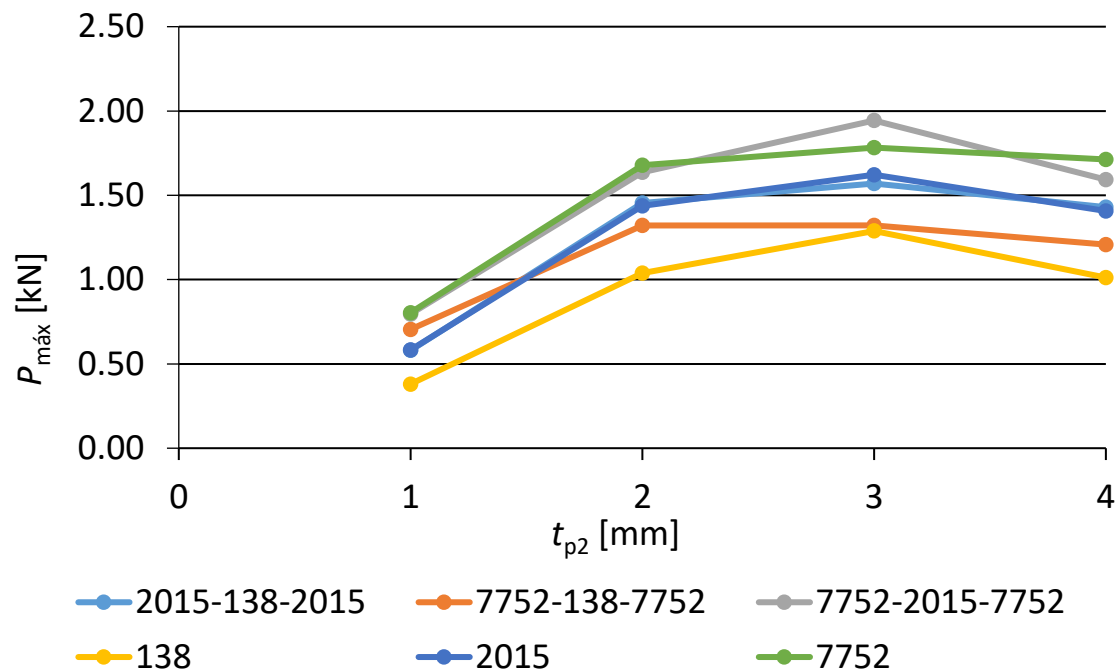


Figura 77 - Resultados de $P_{máx}$ obtidos para a configuração 12,5-75-12,5.

Pode verificar-se que as juntas que usam o adesivo Araldite® AV138, devido à sua baixa ductilidade, são as que obtêm a menor resistência. É também possível perceber que, para esta configuração, a combinação do adesivo Sikaforce® 7752 com Araldite® 2015 apresenta a melhor resistência para $t_{p2}=3$ mm ($P_{máx}=1943,46$ N), sendo um aumento de 8% face ao melhor resultado de adesivo único. Para as restantes espessuras a utilização da técnica de bi-adesivo não traz vantagens visto que a utilização do adesivo Sikaforce® 7752 obtém resultados superiores a qualquer combinação.

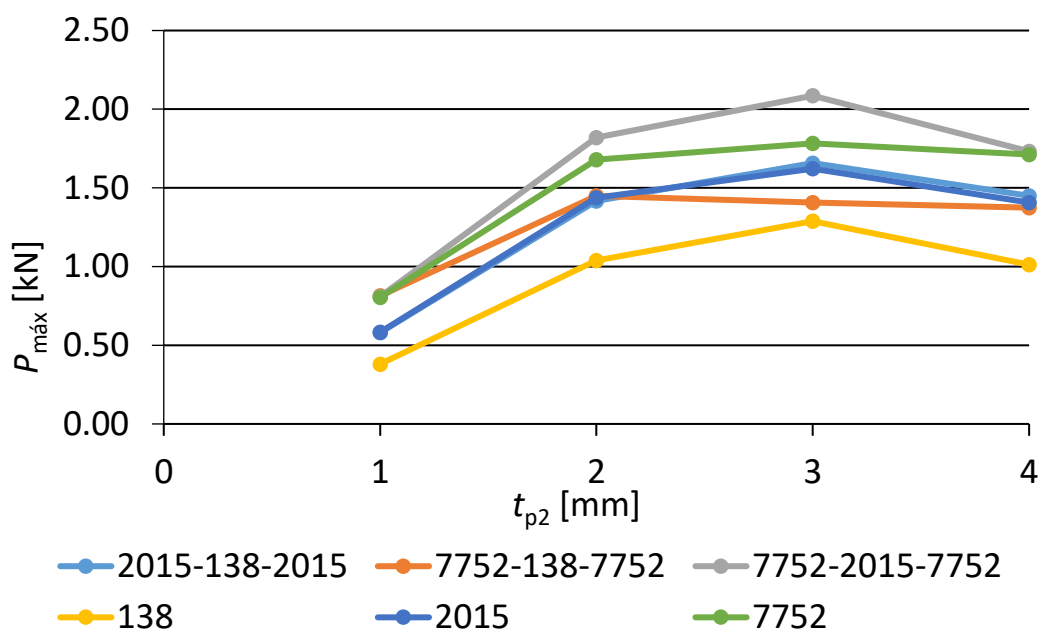
Na Tabela 15 são apresentados os valores de $P_{máx}$ e, para efeitos de comparação, o respectivo aumento de resistência em relação à utilização apenas do adesivo Araldite® AV138 no respectivo valor de t_{p2} . Para $t_{p2}=3$ mm, a combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 apresenta uma melhoria de cerca de 9% contra o valor máximo apresentado para os adesivos simples. No entanto para os restantes valores de t_{p2} (1,2 e 4 mm) a técnica de bi-adesivo (adesivo Sikaforce® 7752 e adesivo Araldite® 2015) apresenta uma perda de 1%, 3% e 7% quando comparada à utilização do adesivo Sikaforce® 7752 isoladamente.

Tabela 15 - Valores de $P_{\text{máx}}$ e aumentos de resistência obtidos para a configuração 12,5-75-12,5

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	580,11 N (53%)	1453,93 N (40%)	1569,6 N (22%)	1429,4 N (41%)
7752-138-7752	704,47 N (85%)	1320,87 N (27%)	1320,53 N (3%)	1207,56 N (19%)
7752-2015- 7752	796,18 N (109%)	1636,25 N (58%)	1943,46 N (51%)	1592,09 N (57%)
138	380,39 N (0%)	1038,69 N (0%)	1288,21 N (0%)	1012,07 N (0%)
2015	582,65 N (53%)	1437,40 N (38%)	1621,86 N (26%)	1407,29 N (39%)
7752	803,91 N (111%)	1678,74 N (62%)	1782,81 N (38%)	1712,64 N (69%)

3.2.3.3.2 Configuração 25%-50%-25%

Na Figura 78 são apresentados os resultados de $P_{\text{máx}}$ para a configuração 25%-50%-25% e comparação com as juntas de adesivo simples. É possível verificar que, com esta configuração, à semelhança da anterior, o valor máximo de $P_{\text{máx}}$ ocorre para $t_{p2}=3$ mm ($P_{\text{máx}}=2085,64$ N) com um aumento de 7% face ao da configuração anterior. De acordo com o constatado para a configuração 12,5%-75%-12,5% as juntas com a utilização isolada do adesivo Araldite® AV138 são as que registam o valor de $P_{\text{máx}}$ mais baixo.

Figura 78 - Resultados de $P_{\text{máx}}$ obtidos para a configuração 25-50-25.

Apresentam-se na Tabela 16 os valores de $P_{\text{máx}}$ e os respectivos aumentos de $P_{\text{máx}}$ comparativamente ao resultado do adesivo Araldite® AV138 para o mesmo valor de t_{p2} .

Tabela 16 - Valores de $P_{\text{máx}}$ e aumentos de resistência obtidos para a configuração 25-50-25.

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	580,92 N (53%)	1417,99 N (37%)	1657,63 N (29%)	1449,34 N (43%)
7752-138-7752	813,93 N (114%)	1449,32 N (40%)	1407,15 N (9%)	1373,53 N (36%)
7752-2015- 7752	809,51 N (113%)	1819,22 N (75%)	2085,64 N (62%)	1731,72 N (71%)
138	380,39 N (0%)	1038,69 N (0%)	1288,21 N (0%)	1012,07 N (0%)
2015	582,65 N (53%)	1437,40 N (38%)	1621,86 N (26%)	1407,29 N (39%)
7752	803,91 N (111%)	1678,74 N (62%)	1782,81 N (38%)	1712,64 N (69%)

Nesta configuração de adesivos a utilização da técnica de bi-adesivo é vantajosa visto que para todos os valores de t_{p2} , a utilização da combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 com Araldite® 2015 obteve os valores mais elevados de $P_{\text{máx}}$ excepto para $t_{p2}=1$ mm onde é preferível a aplicação da combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® AV138. Os valores obtidos pela técnica de bi-adesivo são superiores em 1%, 8%, 17% e 1%, para $t_{p2}=1, 2, 3$ e 4 mm, respectivamente, ao valor mais elevado de $P_{\text{máx}}$ obtido pela utilização de um adesivo isolado.

3.2.3.3.3 Configuração 33%-34%-33%

Na Figura 79 são apresentados os resultados de $P_{\text{máx}}$ obtidos para a configuração 33%-34%-33%. À semelhança das configurações anteriores a resistência máxima da junta é encontrada para $t_{p2}=3$ mm para a combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 ($P_{\text{máx}}=1968,68$ N). O valor máximo de $P_{\text{máx}}$ obtido nesta configuração é 6% inferior ao registado na configuração anterior. Tal como nas configurações já apresentadas, valores mais baixos de $P_{\text{máx}}$ para os vários valores de t_{p2} são encontrados para a utilização isolados do adesivo Araldite® AV138.

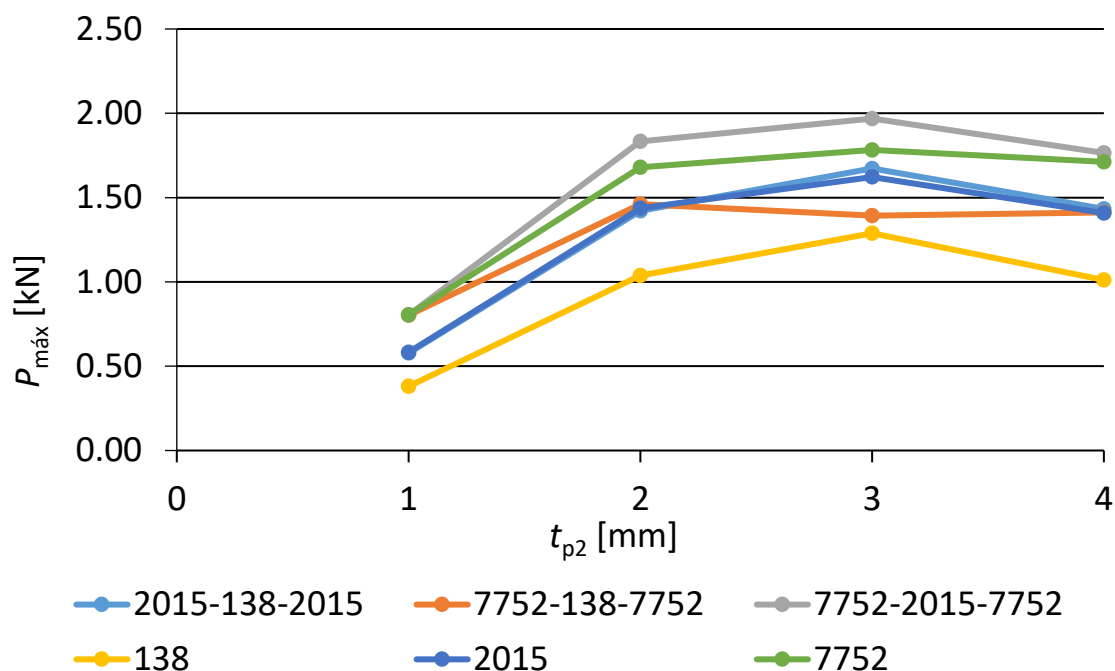


Figura 79 - Resultados de $P_{máx}$ obtidos para a configuração 33-34-33.

Apresentam-se na Tabela 17 valores de $P_{máx}$ e respectivo aumento de resistência em relação à utilização apenas do adesivo Araldite® AV138 para os vários valores de $P_{máx}$.

Tabela 17 - Valores de $P_{máx}$ e aumentos de resistência obtidos em simulação ABAQUS® para a configuração 33-34-33

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	578,47 N (52%)	1420,76 N (37%)	1672,80 N (30%)	1432,86 N (42%)
7752-138-7752	802,08 N (111%)	1461,00 N (41%)	1392,51 N (8%)	1412,56 N (40%)
7752-2015-7752	803,94 N (111%)	1832,58 N (76%)	1968,68 N (53%)	1764,87 N (74%)
138	380,39 N (0%)	1038,69 N (0%)	1288,21 N (0%)	1012,07 N (0%)
2015	582,65 N (53%)	1437,40 N (38%)	1621,86 N (26%)	1407,29 N (39%)
7752	803,91 N (111%)	1678,74 N (62%)	1782,81 N (38%)	1712,64 N (69%)

A utilização da técnica de bi-adesivo com esta configuração traz benefícios, excepto para $t_{p2}=1$ mm, onde o adesivo Sikaforce® 7752 obtém praticamente a mesma resistência da sua combinação com o adesivo Araldite® 2015. Para $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm encontra-se um aumento de 9%, 10% e 3% relativamente às juntas de adesivo simples com maior valor

de $P_{\text{máx}}$ (adesivo Sikaforce® 7752). É importante notar que os valores máximos de $P_{\text{máx}}$ obtidos nesta configuração são 1% e 6% inferiores aos registados para a configuração 25%-50%-25% para $t_{p2}=1$ e 3 mm, respectivamente. No entanto para $t_{p2}=2$ e 4 mm os valores máximos de $P_{\text{máx}}$ obtidos são 1% e 2% superiores, respectivamente.

3.2.3.3.4 Comparação de combinações

Cruzando os dados recolhidos das várias configurações é possível perceber que nem em todas as situações a técnica de bi-adesivo apresenta vantagens. Quando são utilizadas pequenas quantidades do adesivo mais dúctil (configuração 12,5%-75%-12,5%), verifica-se que, para $t_{p2}=1, 2$ e 4 mm, a utilização de um adesivo isolado, no caso Sikaforce® 7752, obtém melhores resultados que qualquer combinação de adesivos. Na Tabela 18 são apresentadas as melhores selecções de adesivos para cada configuração e valor de t_{p2} , tendo em conta os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos e a sua melhoria face à utilização do adesivo Araldite® AV138 isoladamente.

Tabela 18 - Melhor selecção de adesivos para as várias configurações tendo em conta resultados de $P_{\text{máx}}$.

Configuração/ t_{p2}	1	2	3	4
12,5%-75%-12,5%	7752 (111%)	7752 (62%)	7752-2015-7752 (51%)	7752 (69%)
25%-50%-25%	7752-138-7752 (114%)	7752-2015-7752 (75%)	7752-2015-7752 (62%)	7752-2015-7752 (71%)
33%-34%-33%	7752-2015-7752 (111%)	7752-2015-7752 (76%)	7752-2015-7752 (53%)	7752-2015-7752 (74%)

Pode-se concluir que, de forma geral, os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos com a configuração 12,5%-75%-12,5% são inferiores aos obtidos para as restantes configurações. Além disto, a combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 é a que apresenta os valores mais elevados de $P_{\text{máx}}$ para todos os valores de t_{p2} . Apesar disto há casos em que a aplicação individual do adesivo Sikaforce® 7752 obtém valores de $P_{\text{máx}}$ superiores. É também importante ressaltar que, dependendo de t_{p2} , pode ser mais vantajosa a utilização da configuração 25%-50%-25% ou a 33%-34%-33%.

3.2.3.4 Previsão da energia dissipada

Neste capítulo são apresentados os valores de U obtidos no estudo numérico. Para efeitos de comparação as variações de resultados serão sempre expressas em percentagem em relação ao valor obtido para o adesivo Araldite® AV138 para o respectivo valor de t_{p2} .

3.2.3.4.1 Configuração 12,5%-75%-12,5%

Na Figura 80 são apresentados os resultados de U obtidos para a configuração 12,5-75-12,5. É possível de verificar que, à semelhança do que se observa na análise de $P_{m\acute{a}x}$, também na energia absorvida as juntas que utilizam Araldite® AV138 apresentam os menores valores. Isto deve-se à falta de ductilidade deste adesivo. Ao contrário do que se verifica para $P_{m\acute{a}x}$, o valor máximo de U encontra-se para $t_{p2}=2$ mm, existindo um aumento de 1% em relação ao valor de $t_{p2}=3$ mm.

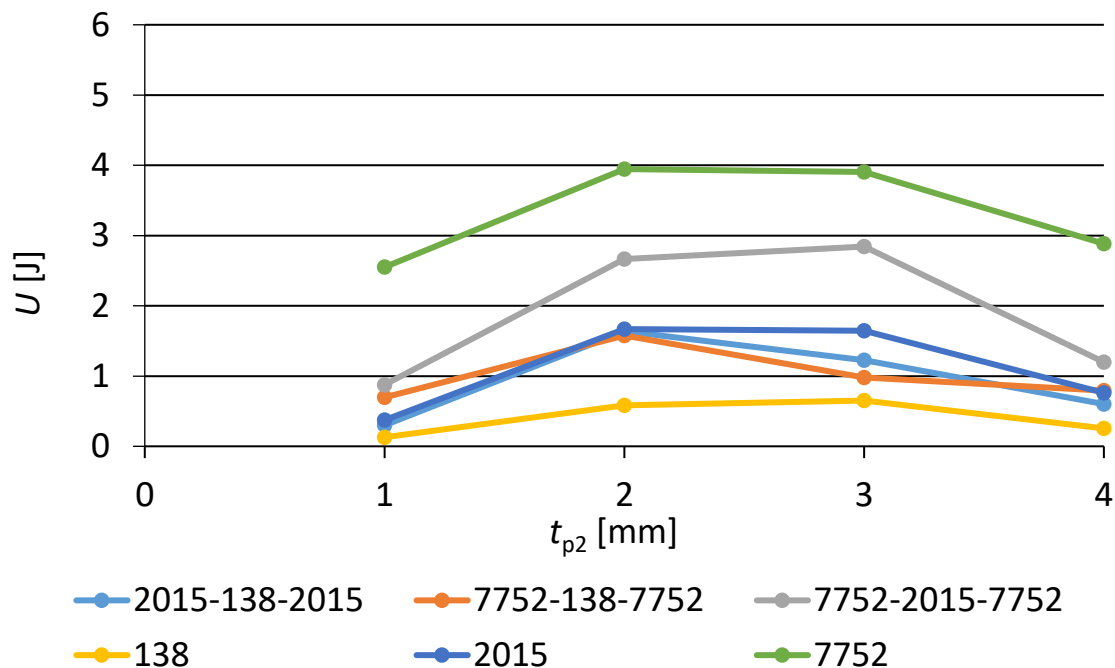


Figura 80 - Resultados de U obtidos para a configuração 12,5-75,12,5.

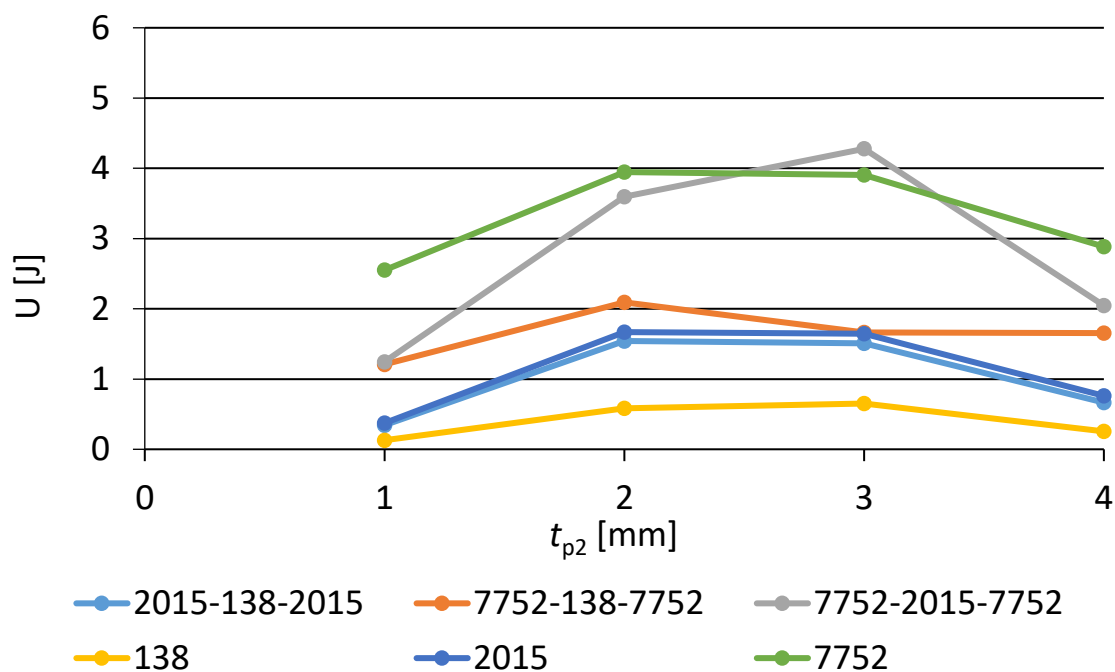
Na Tabela 19 podem ver-se os valores de U obtidos no estudo numérico realizado para a configuração 12,5-75-12,5 e respectiva comparação com o adesivo Araldite® AV138. Nesta configuração, a técnica de bi-adesivo não traz melhorias para a junta, sendo preferível a utilização do adesivo Sikaforce® 7752 isolado. Quando comparados os resultados da melhor combinação de adesivos (adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015) existe uma redução de 65%, 32%, 27% e 58% para $t_{p2}=1, 2, 3$ e 4 mm respectivamente.

Tabela 19 - Valores de U e variações obtidos para a configuração 12,5-75-12,5.

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	0,30 J (132%)	1,64 J (180%)	1,22 J (88%)	0,60 J (134%)
7752-138-7752	0,70 J (440%)	1,58 J (169%)	0,98 J (50%)	0,79 J (208%)
7752-2015-7752	0,88 J (579%)	2,67 J (355%)	2,84 J (337%)	1,20 J (368%)
138	0,13 J (0%)	0,59 J (0%)	0,65 J (0%)	0,26 J (0%)
2015	0,37 J (189%)	1,67 J (185%)	1,65 J (153%)	0,76 J (196%)
7752	2,55 J (1875%)	3,95 J (574%)	3,90 J (500%)	2,89 J (1024%)

3.2.3.4.2 Configuração 25%-50%-25%

Na Figura 81 são apresentados os resultados de U obtidos na simulação ABAQUS® para a configuração 25-50-25.

Figura 81 - Resultados de U obtidos para a configuração 25-50-25

À semelhança do que acontece na configuração anterior, as juntas que utilizam o adesivo Araldite® AV138 são as que absorvem quantidades menores de energia. Para

$t_{p2}=3$ mm regista-se o valor máximo de U (4,28 J), sendo um aumento de 10% face ao máximo registado para o adesivo Sikaforce® 7752 aplicado isoladamente. Na Tabela 20 podem ver-se os valores de U obtidos no estudo numérico realizado para a configuração 25-50-25.

Tabela 20 - Valores de U e variações obtidos em simulação ABAQUS® para a configuração 25-50-25

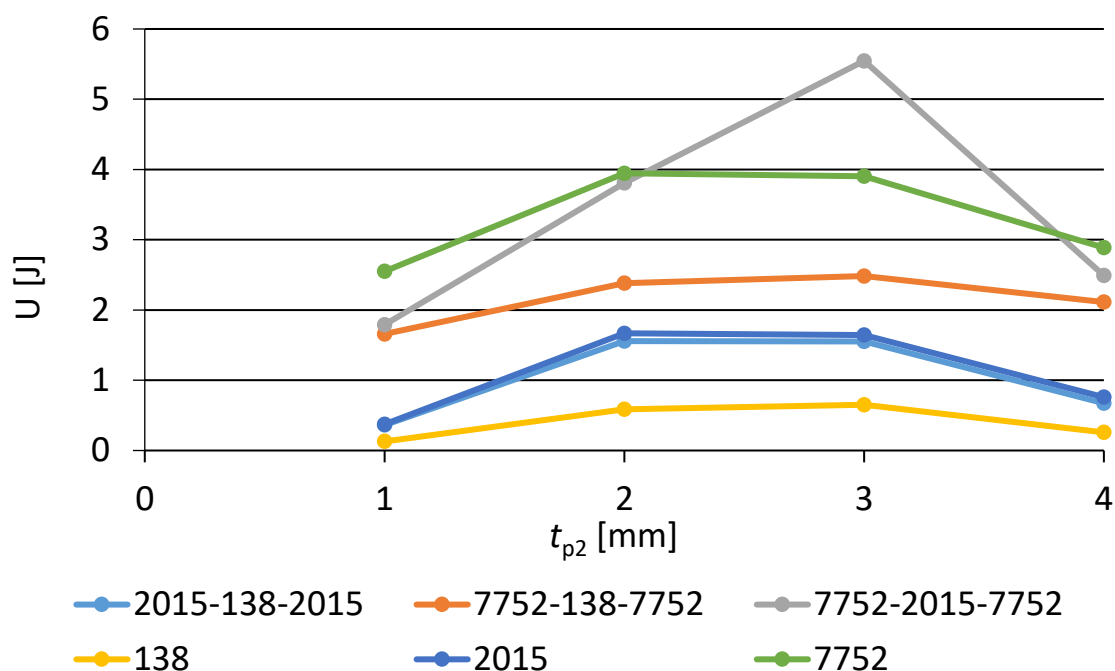
Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	0,34 J (166%)	1,54 J (163%)	1,51 J (131%)	0,66 J (158%)
7752-138-7752	1,21 J (836%)	2,09 J (257%)	1,66 J (155%)	1,65 J (544%)
7752-2015-7752	1,25 J (865%)	3,59 J (514%)	4,28 J (557%)	2,05 J (697%)
138	0,13 J (0%)	0,59 J (0%)	0,65 J (0%)	0,26 J (0%)
2015	0,37 J (189%)	1,67 J (185%)	1,65 J (153%)	0,76 J (196%)
7752	2,55 J (1875%)	3,95 J (574%)	3,90 J (500%)	2,89 J (1024%)

A técnica de bi-adesivo, nesta configuração, apenas revela vantagens para $t_{p2}=3$ mm, enquanto nos restantes t_{p2} a utilização do adesivo Sikaforce® 7752 isolado leva a absorção de maiores quantidades de energia.

3.2.3.4.3 Configuração 33%-34%-33%

Na Figura 82 são apresentados os resultados de U obtidos na simulação ABAQUS® para a configuração 33-34-33. Para $t_{p2}=3$ mm, tal como na configuração anterior, regista-se o valor mais elevado de U (5,55 J), correspondente a uma melhoria de 42% face ao uso isolado do adesivo Sikaforce® 7752 e de 30% face ao valor máximo da configuração 25%-75%-25%.

Na Tabela 21 podem ver-se os valores de U obtidos no estudo numérico realizado para a configuração 33-34-33. Nesta configuração, tal como na anterior, apenas é vantajosa a utilização da técnica de bi-adesivo para $t_{p2}=3$ mm. Para os restantes valores de t_{p2} os valores de U das várias combinações são inferiores ao registado pelo uso isolado do adesivo Sikaforce® 7752.

Figura 82 - Resultados de U obtidos para a configuração 33-34-33.Tabela 21 - Valores de U e variações obtidos em simulação ABAQUS® para a configuração 33-34-33.

Combinação/ t_{p2}	1	2	3	4
2015-138-2015	0,36 J (180%)	1,56 J (166%)	1,55 J (138%)	0,67 J (162%)
7752-138-7752	1,66 J (1184%)	2,38 J (307%)	2,48 J (281%)	2,11 J (723%)
7752-2015-7752	1,79 J (1287%)	3,81 J (550%)	5,55 J (752%)	2,49 J (870%)
138	0,13 (0%)	0,59 J (0%)	0,65 J (0%)	0,26 J (0%)
2015	0,37 J (189%)	1,67 J (185%)	1,65 J (153%)	0,76 J (196%)
7752	2,55 J (1875%)	3,95 J (574%)	3,90 J (500%)	2,89 J (1024%)

3.2.3.4.4 Comparação de configurações

Quando se analisam os dados de U das juntas é possível verificar que a técnica de bi-adesivo não traz vantagens em todas as opções. Apenas para as juntas com $t_{p2}=3$ mm é vantajosa utilização da técnica de bi-adesivo. Para todas as restantes combinações a utilização isolada do adesivo Sikaforce® 7752 traduz-se num valor mais elevado de

energia absorvida. Na Tabela 22 são apresentadas as melhores selecções de adesivos para cada configuração e valor de t_{p2} , tendo em conta os valores de U obtidos.

Tabela 22 - Melhor selecção de adesivos para as várias configurações tendo em conta resultados de U .

Configuração/ t_{p2}	1	2	3	4
12,5%-75%-12,5%	7752 (1875%)	7752 (574%)	7752 (500%)	7752 (1024%)
25%-50%-25%	7752 (1875%)	7752 (574%)	7752-2015-7752 (557%)	7752 (1024%)
33%-34%-33%	7752 (1875%)	7752 (574%)	7752-2015-7752 (752%)	7752 (1024%)

Pode observar-se que para as configurações 25%-75%-25% e 33%-34%-33%, ao contrário do que se verifica para os valores de $P_{máx}$, apenas para $t_{p2}=3$ mm a técnica de bi-adesivo apresenta vantagens. A combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 é a combinação que apresenta melhores resultados.

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Esta dissertação teve como objectivo realizar um estudo numérico (MDC) de juntas adesivas em T com aderentes em alumínio usando a técnica de bi-adesivo. Foram utilizados no estudo três adesivos distintos, o Araldite® AV138, com um comportamento rígido e frágil, o Araldite® 2015, com um comportamento moderadamente dúctil apesar de menor resistência, e o Sikaforce® 7752, com resistência moderada, mas ductilidade e flexibilidade elevadas. Realizou-se uma validação experimental dos modelos numéricos através do estudo de Carneiro [1], através do ensaio experimental de provetes de adesivo único. Para realizar o estudo numérico foi usado o *software* ABAQUS®. No trabalho numérico foram analisados os modos de rotura, distribuições de tensões, previsões de resistência e de energia dissipada, cujas conclusões principais são descritas de seguida:

- Relativamente aos modos de rotura, os resultados numéricos mostram que em todos os casos a rotura da junta se inicia na camada de adesivo. É também evidenciado que, com o aumento de t_{p2} , que o início da rotura transita da zona interior para a exterior da camada de adesivo. É importante chamar a atenção que, para as juntas bi-adesivo, a maioria das roturas se inicia na zona de transição entre adesivos;
- A análise das tensões de arrancamento mostrou que a ductilidade dos adesivos utilizados influencia o tamanho dos picos de tensões registados. Adesivos mais frágeis como o Araldite® AV138 e as suas combinações registam picos de tensão mais elevados que os restantes estudados. Percebe-se também que t_{p2} influencia a localização dos picos de tensão, na medida em que para $t_{p2}=1$ mm estes localizam-se no interior da camada de adesivo, enquanto para $t_{p2}=4$ mm estes picos encontram-se no lado exterior. É também relevante mencionar que t_{p2} não influencia apenas a localização, mas também o tamanho dos picos de tensão registados, sendo que para valores mais elevados de t_{p2} se registam picos mais elevados, não só nas extremidades da ligação, mas também para os picos registados nas zonas de transição entre adesivos;
- Na análise de tensões de corte, verifica-se que t_{p2} influencia o tamanho e posição dos picos de tensões. Para $t_{p2}=1$ mm verificam-se valores máximos de tensão na zona interior da ligação. Por outro lado, $t_{p2}=4$ mm estes valores encontram-se no lado exterior da ligação adesiva. Para $t_{p2}=4$ mm registam-se segundos picos de

tensão na zona interior da ligação e nas zonas de transição entre adesivos (no caso das juntas bi-adesivo). Estes últimos, em algumas combinações e configurações de junta, atingem valores idênticos aos picos máximos;

- Em termos de resistência das juntas, concluiu-se que a técnica de bi-adesivo apresenta vantagens apenas em algumas situações. No melhor registo, o da configuração 25%-50%-25%, a técnica bi-adesivo revelou uma melhoria de 17% face à utilização dos adesivos isoladamente para $t_{p2}=3$ mm. No entanto, para a configuração 12,5%-75%-12,5% e $t_{p2}=4$ mm regista-se uma perda de 7% face ao resultado obtido na aplicação de um adesivo único;
- Relativamente a U , verificou-se que apenas para dois casos a técnica de bi-adesivo traz vantagem em relação à aplicação de um adesivo único, no caso o adesivo Sikaforce® 7752. Estes dois casos registaram-se para $t_{p2}=3$ mm e para as configurações 25%-75%-25% e 33%-34%-33%, juntas para as quais o valor de $P_{\text{máx}}$ é também o máximo. Nestes casos há uma melhoria de 10% e de 42%, respectivamente, face ao maior valor de U registado nas juntas de adesivo único.

De forma resumida, a combinação dos adesivos Sikaforce® 7752 e Araldite® 2015 revelou ser a que apresenta melhores resultados a melhorar as juntas estudadas. Apesar disso a sua aplicação, em alternativa ao uso isolado do adesivo Sikaforce® 7752, não revela melhoria em todos os casos. Verificou-se que, para juntas com $t_{p2}=3$ mm, a sua aplicação tem sempre vantagens, tendo-se obtido resultados de $P_{\text{máx}}$ 9%, 17% e 10% superiores face à aplicação isolada do adesivo Sikaforce® 7752 para as configurações 12,5%-75%-12,5%, 25%-50%-25% e 33%-34%-33%, respectivamente. No entanto, na configuração 12,5%-75%-12,5%, para os restantes valores de t_{p2} não se verifica melhoria.

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como sugestão para trabalhos futuros, sugerem-se:

- A utilização de materiais diferentes para os substratos (compósito ou aço);
- A utilização de substratos diferentes (alumínio com compósito);
- Variação de outros parâmetros geométricos (t_a , L_0);
- Utilização de adesivos de propriedades diferentes.

BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Carneiro, M.A.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*. 2016, Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
2. Akpınar, S.A., Murat Demir; Özel, Adnan, *A study on 3-D stress distributions in the bi-adhesively bonded T-joints*. *Applied Mathematical Modelling*, 2013. **37**(24): p. 10220-10230.
3. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdão, Holanda: Elsevier.
4. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova York, USA: McGraw-Hill.
5. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto, Portugal: Publindústria Portugal.
6. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
7. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
8. Martínez, L.C., J.C.D.R. Romero, e J.R. Montes, *Procesos industriales para materiales no metálicos:(2ª Edición)*. 2010, Madrid, Espanha: Vision Libros.
9. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2014, Nova York, USA: William Andrew.
10. Abaqus®, *Abaqus® documentation*. 2013, Vélizy-Villacoublay, França: Dassault Systèmes.
11. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
12. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. 2005, Amsterdão, Holanda: Elsevier.
13. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. *Luftfahrtforschung* 15, 1938: p. 41-47.
14. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
15. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1984. **4**(2): p. 65-78.
16. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, 2012. **72**(7): p. 788-791.
17. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, Londres, Inglaterra: Chapman & Hall.

18. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
19. 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.
20. 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.
21. 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.
22. 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.
23. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
24. 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.
25. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
26. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
27. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
28. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
29. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
30. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
31. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
32. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
33. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
34. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*.

- International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
35. 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.
36. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
37. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
38. de Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques, e P. De Castro, *Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
39. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
40. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
41. Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
42. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
43. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction-separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
44. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
45. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
46. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
47. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
48. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
49. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
50. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.

51. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
52. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
53. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
54. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
55. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
56. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Nova Jérĩa, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
57. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
58. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
59. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
60. De Sousa, C., R. Campilho, E. Marques, M. Costa, L.F.J.P.o.t.l.o.M.E. da Silva, Part I: Journal of Materials: Design, e Applications, *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints*. 2017. **231**(1-2): p. 210-223.
61. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973, Washington, USA: National Aeronautics and Space Administration.
62. Crocombe, A., *Global yielding as a failure criterion for bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1989. **9**(3): p. 145-153.
63. Ayatollahi, M. e A. Akhavan-Safar, *Failure load prediction of single lap adhesive joints based on a new linear elastic criterion*. 2015. **80**: p. 210-217.
64. Reis, P.N., J. Ferreira, F.J.I.J.O.A. Antunes, e Adhesives, *Effect of adherend's rigidity on the shear strength of single lap adhesive joints*. 2011. **31**(4): p. 193-201.
65. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, e L.F.M. da Silva, *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
66. O'Mahoney, D.C., K.B. Katnam, N.P. O'Dowd, C.T. McCarthy, e T.M. Young, *Taguchi analysis of bonded composite single-lap joints using a combined interface-adhesive damage model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **40**: p. 168-178.

67. Sugiman, S., A.D. Crocombe, e I.A. Aschroft, *Modelling the static response of unaged adhesively bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **98**: p. 296-314.
68. Heshmati, M., R. Haghani, M. Al-Emrani, e A. André, *On the strength prediction of adhesively bonded FRP-steel joints using cohesive zone modelling*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018. **93**: p. 64-78.
69. Broughton, W., R. Mera, e G. Hinopoulos, *Creep testing of adhesive joints T-peel test*. 1999, National Physical Laboratory: Teddington, Reino Unido.
70. Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Nova Jérsea, USA: John Wiley & Sons, Ltd.
71. Li, W., L. Blunt, e K. Stout, *Analysis and design of adhesive-bonded tee joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1997. **17**(4): p. 303-311.
72. Domingues, N., R. Campilho, R. Carbas, L.J.I.J.o.A. Da Silva, e Adhesives, *Experimental and numerical failure analysis of aluminium/composite single-L joints*. 2016. **64**: p. 86-96.
73. Carneiro, M. e R. Campilho, *Analysis of adhesively-bonded T-joints by experimentation and cohesive zone models*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017. **31**(18): p. 1998-2014.
74. Burns, L., A. Mouritz, D. Pook, e S.J.C.S. Feih, *Bio-inspired design of aerospace composite joints for improved damage tolerance*. 2012. **94**(3): p. 995-1004.
75. Hu, P., Q. Shao, W. Li, e X. Han, *Experimental and numerical analysis on load capacity and failure process of T-joint: Effect produced by the bond-line length*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012. **38**: p. 17-24.
76. Ascione, F. e G.J.C.S. Mancusi, *Curve adhesive joints*. 2012. **94**(8): p. 2657-2664.
77. Ramezani, F., M. Ayatollahi, A. Akhavan-Safar, L.J.I.J.o.A. da Silva, e Adhesives, *A comprehensive experimental study on bi-adhesive single lap joints using DIC technique*. 2020. **102**: p. 102674.
78. Chaves, F.P., L.M. da Silva, P.T.J.P.o.t.l.o.M.E. de Castro, Part L: Journal of Materials: Design, e Applications, *Adhesively bonded T-joints in polyvinyl chloride windows*. 2008. **222**(3): p. 159-174.
79. Tsai, M. e J.J.C.s. Morton, *The effect of a spew fillet on adhesive stress distributions in laminated composite single-lap joints*. 1995. **32**(1-4): p. 123-131.
80. Cheuk, P., L.J.C.S. Tong, e Technology, *Failure of adhesive bonded composite lap shear joints with embedded precrack*. 2002. **62**(7-8): p. 1079-1095.
81. Zheng, G., C. Liu, X. Han, e W. Li, *Effect of spew fillet on adhesively bonded single lap joints with CFRP and aluminum-alloy immersed in distilled water*. International Journal of Adhesion, Adhesives, 2020. **99**: p. 102590.
82. You, M., Z.-M. Yan, X.-L. Zheng, H.-Z. Yu, Z.J.I.J.o.A. Li, e Adhesives, *A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends*. 2008. **28**(1-2): p. 71-76.
83. Ferreira, L., R. Campilho, D. Barbosa, R. Rocha, e F.J.P.M. Silva, *Static strength improvement of tubular aluminium adhesive joints by the outer chamfering technique*. 2019. **38**: p. 629-636.
84. Lavalette, N.P., O.K. Bergsma, D. Zarouchas, e R.J.C.S. Benedictus, *Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints*. 2020. **240**: p. 112077.

85. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
86. ASTM, *Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials [Metric]*. 2004.
87. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, L.F.J.I.j.o.a. da Silva, e adhesives, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. 2013. **44**: p. 48-56.
88. Neto, J., R.D. Campilho, L.J.I.J.o.A. Da Silva, e Adhesives, *Parametric study of adhesive joints with composites*. 2012. **37**: p. 96-101.
89. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
90. Campilho, R., *Método de Elementos Finitos-Ferramentas para Análise Estrutural*. 2012, Porto, Portugal: Publindústria Edições Técnicas, Porto.
91. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
92. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. De Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.