



MODELAÇÃO NUMÉRICAS DE JUNTAS STIFFENER EM T POR MODELOS DE DANO COESIVO

JOAQUIM ALBERTO MONTEIRO FERREIRA

novembro de 2019

MODELAÇÃO NUMÉRICA DE JUNTAS STIFFENER EM T POR MODELOS DE DANO COESIVO

Joaquim Alberto Monteiro Ferreira

1140730

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



MODELAÇÃO NUMÉRICA DE JUNTAS STIFFENER EM T POR MODELOS DE DANO COESIVO

Joaquim Alberto Monteiro Ferreira

1140730

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

2019

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Norberto Miranda Torres

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Mestre Mónica Gloria Cardoso

Assistente Convidado, ISEP

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Investigador, INEGI

AGRADECIMENTOS

A elaboração e conclusão desta dissertação só foi possível com o apoio e contributo de várias pessoas, às quais gostaria de apresentar o meu mais sincero agradecimento.

A todos os meus colegas e professores de curso que ao longo do mestrado me ajudaram e apoiaram por forma a atingir os meus objetivos e a concluir mais uma etapa da minha formação académica. O meu sincero obrigado por todo o apoio demonstrado.

Agradeço aos meus orientadores, o Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e a Mestre Mónica Gloria Cardoso, pelo apoio e disponibilidade que foi prestada ao longo de toda a realização da dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, pela oportunidade de frequentar tanto a Licenciatura, como o Mestrado em Engenharia Mecânica, cujos conhecimentos estão aplicados na dissertação.

Finalmente aos meus amigos e família por toda a dedicação, esforço, sacrifício e incentivo demonstrado ao longo deste percurso académico. Sem eles eu não teria alcançado os meus objetivos académicos.

A todos muito obrigado.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas; *Stiffeners*; Material compósito reforçado a fibras de carbono; Adesivos estruturais; Método de Elementos Finitos; Modelos de Dano Coesivo.

RESUMO

Nos dias de hoje, o método de união com recurso a adesivos tem uma presença muito forte nas mais variadas indústrias. Com esta técnica de união, o projeto de estruturas pode ser orientado para estruturas mais leves, relativamente às juntas aparafusadas ou soldadas, e também para estruturas com materiais diferentes. A ligação de materiais compósitos através de adesivos estruturais tem vindo a ter maior relevância na indústria, como a indústria aeronáutica, que faz uso de estruturas *stiffeners* em materiais compósitos usando ligações adesivas. Em qualquer área da indústria, a aplicação em larga escala de uma determinada técnica de ligação necessita de ferramentas fiáveis para o projeto e previsão da rotura.

Esta dissertação compara o desempenho de três adesivos estruturais, o Araldite® 2015, o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752, numa junta em T de substratos compósitos de matriz epóxida reforçada a fibras de carbono. O objetivo da dissertação é estudar numericamente, através do Método de Elementos Finitos (MEF) e Modelos de Dano Coesivo (MDC), o comportamento de diferentes configurações de junta em T quando sujeitas a solicitações de arrancamento. Estudou-se a modificação dos parâmetros geométricos de comprimento de sobreposição (L_0), espessura dos aderentes *stiffener* (t_0), espessura dos aderentes de pele (t_p) e raio de curvatura do aderente *stiffener* (R). Com a análise numérica são estudadas as distribuições de tensões, evolução do dano, modos de rotura e resistência.

O estudo numérico demonstrou que o parâmetro geométrico t_p tem maior influência no comportamento das juntas adesivas, sobretudo na resistência das juntas, onde se verificou que um aumento deste parâmetro aumenta o desempenho da ligação. Verificou-se também que, quanto maior for a flexibilidade e ductilidade do adesivo, maior é a influência dos parâmetros geométricos na resistência da junta. Relativamente ao tipo de adesivo, as juntas com o Sikaforce® 7752 demonstraram ter o melhor desempenho, seguidas pelas juntas com Araldite® 2015. O Araldite® AV138 demonstrou ter um desempenho relativamente inferior aos outros dois adesivos, com comportamento idêntico entre configurações de junta diferentes.

KEYWORDS

Adhesive joints; Stiffeners; Carbon fiber reinforced composite material; Structural adhesives; Finite Element Method; Cohesive Zone Models.

ABSTRACT

Nowadays, the adhesive bonding method has a strong presence in the most varied industries. With this joining technique, the design of structures can be oriented towards lighter structures with respect to bolted or welded joints, as well as structures with different materials. The bonding of composite materials with structural adhesives became more relevant in the industry, such as the aeronautical industry, which takes advantage of stiffener structures in composite materials using adhesive bonds. In any area of industry, large-scale application of a particular bonding technique requires reliable tools for the design and prediction of failure.

This dissertation compares the performance of three structural adhesives, Araldite® 2015, Araldite® AV138 and Sikaforce® 7752 on a T-joint with composite adherends composed of an epoxy matrix reinforced with carbon fibers. The aim of the dissertation is to numerically study, by the Finite Element Method (FEM) and Cohesive Zone Models (CZM), the behavior of different T-joint configurations when subjected to peel loads. The modification of the geometric parameters of overlap length (L_0), thickness of stiffener adherends (t_0), thickness of skin adherends (t_p) and radius of curvature of stiffener adherend (R) was studied. With the numerical analysis, the stress distributions, damage evolution, failure modes and strength are studied.

The numerical study showed that the geometric parameter t_p has the highest influence on the behavior of the adhesive joints, especially on the strength of the joints, since the increase of this parameter increases the bonding performance. It was also found that the higher the flexibility and ductility of the adhesive, the higher the influence of the geometric parameters on the joint strength. Regarding the type of adhesive, joints bonded with the Sikaforce® 7752 have been shown to have the best performance, followed by joints with the Araldite® 2015. The Araldite® AV138 has been shown to perform relatively poorly compared to the other two adhesives, with similar behavior between different joint configurations.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

3D	Três dimensões
CFRP	<i>Carbon fiber reinforced polymers</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FML	<i>Fiber Metal Laminate</i>
GFRP	<i>Glass fiber reinforced polymers</i>
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
SBS	<i>Strengthening-by-stiffening</i>
TFFV	Técnica do fecho da fenda virtual

Lista de Unidades

°	Grau
%	Porcentagem
°C	Grau celsius
g	Gramas
GPa	Giga-Pascal

J	Joule
kJ	Quilo-Joule
KN	Quilo-Newton
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
MPa	Mega-Pascal
N	Newton
N/mm	Newton por milímetro

Lista de Símbolos

B	Largura da camada adesiva
E	Módulo de Young
E_1	Módulo de elasticidade na direção longitudinal
E_2	Módulo de elasticidade na direção transversal
E_3	Módulo de elasticidade fora do plano
G	Módulo de elasticidade transversal
G_{12}	Módulo de elasticidade transversal no plano 12
G_{13}	Módulo de elasticidade transversal no plano 13
G_{23}	Módulo de elasticidade transversal no plano 23
G_c/G_r	Resistência à fratura/rotura
G_I	Taxa de libertação de energia pelo modo 1 de fratura
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{II}	Taxa de libertação de energia pelo modo 2 de fratura

G_{IIC}	Tenacidade ao corte
G_{III}	Taxa de libertação de energia pelo modo 3 de fratura
K_{COH}	Matriz que relaciona tensões e deformações
K_{nn}	Parâmetro de rigidez
K_{ss}	Parâmetro de rigidez
L_0	Comprimento de sobreposição
N	Direção normal
P	Carga aplicada
P_{max}/P_m	Força máxima/Carga máxima
R	Raio de curvatura do substrato pele
T	Temperatura
t_a	Espessura do adesivo
t_0	Espessura do substrato <i>stiffener</i> em T
t_p	Espessura do substrato de pele
x/L_0	Comprimento de sobreposição normalizado
λ	Parâmetro que representa a influência do módulo de elasticidade e da área de contacto de cada um dos aderentes
ν	Coefficiente de Poisson
ν_{12}	Coefficiente de Poisson no plano 12
ν_{13}	Coefficiente de Poisson no plano 13
ν_{23}	Coefficiente de Poisson no plano 23
δ	Deslocamento
δ_n	Deslocamento de tração

δ_{Pmax}	Deslocamento de resistência máxima
δ_s	Deslocamento de corte
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura
σ	Tensão
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y/σ_e	Tensão de cedência à tração
τ	Tensão de corte
τ_f	Tensão de rotura ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1- Diferentes tipos de ligação: ligação mecânica (à esquerda); ligação soldada (no centro) e ligação adesiva (à direita) [1].	9
Figura 2- Distribuição de esforços ao longo de uma ligação mecânica [2].	10
Figura 3 - Zona termicamente afetada num cordão de soldadura, vista de corte [4].	10
Figura 4- Junta adesiva ilustrativa interfase e interface (elaboração própria).	12
Figura 5 – Resistência numa junta adesiva solicitada a esforços de arrancamento (em cima) e numa junta adesiva solicitada a esforços de corte (em baixo) [2].	12
Figura 6 - <i>Stiffeners</i> unidos à pele do avião Cessna Citation III por adesivo [6].	13
Figura 7 - Exemplo de modelo da Lotus com juntas adesivas estruturais [5].	14
Figura 8 - Exemplo de juntas adesivas num barco pequeno [6].	14
Figura 9 - Instalação do escudo frontal do satélite Beagle 2 através de uma ligação adesiva [6].	15
Figura 10 - Exemplo de aplicação de adesivo em equipamentos eletrónicos [7].	15
Figura 11 - Sapato com a sola a descolar [6].	16
Figura 12 - Tipos de carregamento básicos de uma junta adesiva: compressão (a); tração (b); corte (c); arrancamento (d) e clivagem (e) [9].	17
Figura 13 - Efeito da descentralização das forças axiais em carregamentos de tração (caso da esquerda), onde pode originar efeito de clivagem (caso da direita) [1].	18
Figura 14 - Representação da distribuição de tensões ao longo da sobreposição [1].	19
Figura 15 - Diferente deformação ao longo da junta [10].	19
Figura 16 - Efeito do esforço de arrancamento [1].	19
Figura 17 - Representação da distribuição de tensões entre um carregamento de clivagem e um carregamento de arrancamento [1].	20
Figura 18 - Tipos de rotura numa junta: a) coesiva no adesivo; b) rotura adesiva;	20
Figura 19 - Juntas de topo e suas variantes [2].	21
Figura 20 - Efeito da deformação da junta não colinear [11].	22
Figura 21- Juntas de sobreposição [1].	22
Figura 22 - Juntas com tira [1].	22
Figura 23 - Ligações cilíndricas [1].	23

Figura 24- Diferentes tipos de junta em T [14].	23
Figura 25 - Ligações de canto [14].	24
(a)	(b)
Figura 26 - Exemplo de reforços: reforço para diminuir as tensões σ_y (a); reforço para diminuir o efeito de clivagem (b) [2].	25
Figura 27- Famílias e classificação de adesivos [16].	26
Figura 28 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [32]).	31
Figura 29 – Modelo coesivo triangular [44, 45].	32
Figura 30 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [68].	36
Figura 31 - Tipos de teste ao arrancamento, <i>T-peel test</i> –(a); <i>180° peel test</i> –(b);	37
Figura 32- Junta em T simples (a) e junta em T duplamente reforçado (b) [2].	38
Figura 33- Junta em T e os tipos de carregamento [13].	38
Figura 34 - Resultados do aumento da espessura do substrato de base para as várias configurações de junta em T [13].	39
Figura 35 - Resultados do posicionamento da folha de reforço [13].	39
Figura 36 - Representação esquemática do fabrico de uma junta em T [71].	40
Figura 37- Esquema da junta em T em compósito [72].	42
Figura 38 - Resultados da junta T, com geometria nominal, para refinamentos diferentes de malha: B1- malha menos refinada; B2- malha com maior refinamento [72].	42
Figura 39 - Resultados dos testes para diferentes geometrias de deltoides [71].	43
Figura 40 - Representação esquemática da junta em T com pinos de reforço [74].	43
Figura 41- Análise de elementos finitos (MEF) e medidas de força aplicada vs. curvas de deslocamento (a); MEF do comprimento da fenda vs. deslocamento aplicado e número de fileiras de pinos ativos (b) [74].	44
Figura 42 - Curvas $P-\delta$ nas ligações em T com e sem os pinos Z, ao longo de uma espessura total da ligação de: t=2 mm (a); t=4 mm (b); t=6 mm (c) e t=8 mm (d) [75].	44
Figura 43-Geometria de junta em T para carregamento em condições higrotérmicas [76].	45
Figura 44 - Resultados das simulações experimentais e por MEF, da junta com espessura de pele 2,4 mm em condições higrotérmicas [76].	45
Figura 45 - Resultados das simulações experimentais e por MEF, da junta com espessura de pele 3,6 mm em condições higrotérmicas [76].	46

Figura 46 – Junta adesiva em L [2].	46
Figura 47- Estudo de uma junta em L para vários carregamentos: junta carregada na direção x (à esquerda); junta carregada na direção y (no centro) e ligação adesiva (à direita) [77].	47
Figura 48 -Contornos de tensão na junta carregada na direção y: tensão normal em x, σ_x (a); tensão normal em y, σ_y (b); tensão de corte, τ_{xy} (c) (Todos as tensões estão em MPa) [77].	47
Figura 49 - Dimensões nominais da junta adesiva em L [77].	48
Figura 50 – Distribuição de tensões ao longo da sobreposição da junta, no estudo da influência de L_0 no caso carregamento carregada na direção y [77].	48
Figura 51 - Distribuição de tensões ao longo da sobreposição da junta, no estudo da influência de t_a no caso carregamento carregada na direção y [77].	48
Figura 52 - Distribuição de tensões ao longo da sobreposição da junta, no estudo da influência de t_0 no caso carregamento carregada na direção y [77].	49
Figura 53 - Exemplo de <i>stiffener</i> [6].	49
Figura 54 - Diferentes configurações de <i>stiffeners</i> ligados junta em T [78].	50
Figura 55- Exemplo de <i>stiffeners</i> numa aplicação de construção naval [78].	50
Figura 56 - <i>Strengthening-by-stiffening</i> com <i>stiffener</i> em T de GFRP [79].	51
Figura 57- Comparação dos resultados obtidos da utilização de <i>stiffener</i> com adesivos diferentes [79].	51
Figura 58- Configurações dos <i>stiffeners</i> : <i>stiffener</i> em CFRP (a); <i>stiffener</i> em alumínio [80].	52
Figura 59 - Teste <i>Stiffener Pull-Off</i> (spot) [80].	52
Figura 60 - Resultados obtidos para <i>stiffener compósito</i> : curva carga vs. deslocamento (a) e propagação da rotura (b) [80]	53
Figura 61- Resultados obtidos para <i>stiffener</i> de metal: curva carga vs. Deslocamento (a) e propagação da rotura (b) [80].	53
Figura 62- Resultados das simulações experimentais e por MEF: <i>stiffener</i> compósito (a); <i>stiffener</i> metálico (b) [80].	54
Figura 63- Geometrias típicas de junta em T na construção naval [81].	54
Figura 64 - Curvas σ - ϵ referentes aos adesivos em estudo [82].	60
Figura 65 - Junta em T da geometria de validação [82].	65
Figura 66 - Esquema do modelo da junta em T sem adesivo de preenchimento [92].	66
Figura 67 - Imagem do <i>software</i> ABAQUS® referente às partições definidas da junta [92].	66
Figura 68 - Esquema representativo das condições fronteiras aplicadas aos modelos [92].	66
Figura 69 - Malha refinada para: análise de resistência (a) e análise de tensões (b) [92].	67

Figura 70 -Chapas normalizadas de 0,2 mm de espessura coladas ao aderente base [92].	68
Figura 71 - Adesivo Araldite® 2015 aplicado em "zig-zag" no aderente base [92].	69
Figura 72 - Testes à tração (<i>pull-off</i>): máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (a); teste da junta em "T" (b) [92].	70
Figura 73 - Superfície de rotura do adesivo Araldite® AV138 para o valor $t_{p2}=2$ mm [92].	70
Figura 74 - Superfície de rotura do adesivo Araldite® 2015 para o valor $t_{p2}=1$ mm [92].	71
Figura 75 - Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em T para o adesivo Araldite® AV138 onde para $t_{p2}=1$ mm; 2 mm; 3 mm e 4 mm correspondem à curva (a); (b); (c) e (d) respetivamente [92].	71
Figura 76 - Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em T, para o adesivo Araldite® 2015 onde para $t_{p2}=1$ mm; 2 mm; 3 mm e 4 mm correspondem à curva (a); (b); (c) e (d) respetivamente [92].	72
Figura 77 - Resultados experimentais e numéricos, para a junta em T, ao longo das várias espessuras estudadas [82].	72
Figura 78 - Geometria da junta em L para a validação do método [83].	73
Figura 79 - condições fronteira da simulação da junta em L (adaptado de [83]).	74
Figura 80 – detalhe da malha e o seu refinamento no estudo da junta em L para o caso de $t_{p2}=1$ mm [83].	75
Figura 81 - Testes à tração (<i>pull-off</i>) à junta em "L" na máquina de ensaios Instron® 3367 (Norwood, MA, USA)[83].	76
Figura 82 - Superfície de rotura do adesivo Araldite® AV138 para o valor $t_{p2}=1$ mm [83].	77
Figura 83 -- Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em L para o adesivo Araldite® AV138 onde para $t_{p2}=1$ mm e 4 mm correspondem à curva (a) e (b) respetivamente [83].	77
Figura 84 --- Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em L para o adesivo SikaForce® 7752 onde para $t_{p2}=1$ mm e 4 mm correspondem à curva (a) e (b) respetivamente [83].	77
Figura 85 – Resultados experimentais e numéricos do estudo da junta em L para o adesivo Araldite® AV138 [83].	78
Figura 86 - Resultados experimentais e numéricos do estudo da junta em L para o adesivo e Sikaforce® 7752 [83].	78
Figura 87 - Geometria do <i>stiffener</i> com condições fronteira.	79
Figura 88 – Geometria de simulação numérica com cotas nominais.	80
Figura 89 - Descrição das camadas intralaminares e interlaminares.	81
Figura 90 - Detalhe das camadas interlaminares em volta da curvatura do substrato (deltoide).	82
Figura 91 -Normalização da posição ao longo da sobreposição da junta adesiva.	82

Figura 92 - Quadro de edição do tipo de secção do ABAQUS®.	83
Figura 93 - Representação de elementos coesivos para simular diferentes planos de rotura na junta. ...	83
Figura 94 - Orientação das fibras ao longo da geometria dos substratos (zona vermelha):orientação horizontal (a); e orientação vertical (b).	84
Figura 95 - Orientação das fibras ao longo da curvatura do deltoide.	84
Figura 96 - Condições fronteira e carga aplicada na análise numérica onde 1- apoio de encastramento; 2 – deslocamento vertical δ ; 3- eixo de simetria.	85
Figura 97- Painel de seleção do tipo de malha e formato da mesma.	85
Figura 98 – Painel de definição do tipo de elemento da malha.	86
Figura 99 - Demonstração das zonas de remoção de material, sendo o caso da direita particular onde a remoção do material na imagem de cima implicou a anulação dos elementos coesivos logo abaixo, o que tornou possível aplicar o caso da imagem de baixo sem a alteração dos resultados e sem erros de malha.	86
Figura 100 - Definição da quantidade de elementos na espessura das secções coesivas.	87
Figura 101 - Aumento gradual da malha ao longo da pele entre o encastramento e o início da sobreposição.	87
Figura 102- Aumento gradual do refinamento da malha ao longo da espessura a pele.	88
Figura 103 - Aumento gradual da malha ao longo da lâmina vertical do T.	88
Figura 104 - Aumento gradual da malha em dois sentidos, ao longo da espessura da camada do substrato entre elementos coesivos.	88
Figura 105 - Curva $P-\delta$ para a geometria de base.	90
Figura 106 - Distribuição das tensões de corte nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® AV138.	91
Figura 107 - Distribuição das tensões de arrancamento nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® AV138.	91
Figura 108 - Distribuição das tensões de corte nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® 2015.	92
Figura 109 - Distribuição das tensões de arrancamento nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® 2015.	92
Figura 110 - Distribuição das tensões de corte nas várias camadas coesivas para a junta com o Sikaforce® 7752.	93
Figura 111 - Distribuição das tensões de arrancamento nas várias camadas coesivas para a junta com o Sikaforce® 7752.	93
Figura 112 - <i>SDEG</i> para a geometria base com o Araldite® AV138.	94

Figura 113 - Propagação do dano na camada do adesivo ao longo do $\delta/\delta_{P_{max}}$, para o Araldite® AV138. .	94
Figura 114 - <i>SDEG</i> para a geometria base com o Araldite® 2015.	95
Figura 115 - Propagação do dano na camada 1 ao longo do $\delta/\delta_{P_{max}}$, para o Araldite® 2015.	95
Figura 116 - Propagação do dano na camada da curva do deltoide ao longo do $\delta/\delta_{P_{max}}$, para o Araldite® 2015.	96
Figura 117 - <i>SDEG</i> para a geometria base com o Sikaforce® 7752.	96
Figura 118 - Propagação do dano ao longo do $\delta/\delta_{P_{max}}$, para o Sikaforce® 7752: na camada 1 (a) e na camada da curva do deltoide (b).	97
Figura 119- Modo de rotura pelo adesivo no teste para $t_p=2$ mm do adesivo Araldite® AV138 (a) e modo de rotura adesivo/misto no teste para $t_p=4$ mm para o Sikaforce® 7752 (b).	98
Figura 120 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $t_p=3$ mm para o Araldite® 2015 (a) e o Modo de rotura pelo substrato no teste para $t_p=3$ mm para o Sikaforce® 7752 (b).	98
Figura 121 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b).	99
Figura 122 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de Pele de $t_p=3$ mm (a) e de $t_p=4$ mm (b).	100
Figura 123 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_p estudados com o Araldite® AV138.	100
Figura 124 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_p estudados com o Araldite® AV138.	101
Figura 125 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_p estudados com o Araldite® 2015.	101
Figura 126 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_p estudados com o Araldite® 2015.	102
Figura 127 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_p estudados com o Sikaforce® 7752.	102
Figura 128 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_p estudados com o Sikaforce® 7752.	103
Figura 129 - <i>SDEG</i> para $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b) com o Araldite® AV138.	103
Figura 130 - <i>SDEG</i> para $t_p=3$ mm (a) e $t_p=4$ mm (b) com o Araldite® AV138.	104
Figura 131 - <i>SDEG</i> para $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b) com o Araldite® 2015.	104
Figura 132 - <i>SDEG</i> para $t_p=3$ mm (a) e $t_p=4$ mm (b) com o Araldite® 2015.	104
Figura 133 - <i>SDEG</i> para $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.	105
Figura 134 - <i>SDEG</i> para $t_p=3$ mm (a) e $t_p=4$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.	105
Figura 135 – Resultados da P_{max} no estudo de t_p	106
Figura 136 - Modo de rotura pelo adesivo no teste para $t_0=2$ mm com o Araldite® AV138.	107

Figura 137 - Modo de rotura misto (substrato e adesivo) no teste para $t_0=0,5$ mm com o Araldite® 2015.	107
Figura 138 - Modo de rotura misto (substrato e adesivo) no teste para $t_0=1$ mm com o Sikaforce® 7752.	108
Figura 139 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $t_0=1$ mm com o Araldite® 2015.	108
Figura 140 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de “T” com $t_0=0,5$ mm.....	109
Figura 141 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de “T” com $t_0=1$ mm.....	109
Figura 142 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de “T” com $t_0=1,5$ mm.....	110
Figura 143 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de “T” com $t_0=2$ mm.....	110
Figura 144 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de “T” com $t_0=2,5$ mm.....	111
Figura 145 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_0 estudados com o Araldite® AV138.	111
Figura 146 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_0 estudados com o Araldite® AV138.	112
Figura 147 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_0 estudados com o Araldite® 2015.....	112
Figura 148 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_0 estudados com o Araldite® 2015.	113
Figura 149 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_0 estudados com o Sikaforce® 7752.....	113
Figura 150 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_0 estudados com o Sikaforce® 7752.	114
Figura 151 - <i>SDEG</i> para $t_0=0,5$ mm (a) e $t_0=1,0$ mm (b) com o Araldite® AV138.	115
Figura 152 - <i>SDEG</i> para $t_0=1,5$ mm (a) e $t_0=2,0$ mm (b) com o Araldite® AV138.	115
Figura 153 - <i>SDEG</i> para $t_0=2,5$ mm com o Araldite® AV138.	115
Figura 154 - <i>SDEG</i> para $t_0=0,5$ mm (a) e $t_0=1,0$ mm (b) com o Araldite® 2015.....	116
Figura 155 - <i>SDEG</i> para $t_0=1,5$ mm (a) e $t_0=2,0$ mm (b) com o Araldite® 2015.....	116
Figura 156 - <i>SDEG</i> para $t_0=2,5$ mm com o Araldite® 2015.....	116
Figura 157 - <i>SDEG</i> para $t_0=0,5$ mm (a) e $t_0=1,0$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.....	117
Figura 158 - <i>SDEG</i> para $t_0=1,5$ mm (a) e $t_0=2,0$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.....	117
Figura 159 - <i>SDEG</i> para $t_0=2,5$ mm com o Sikaforce® 7752.....	117
Figura 160 - Resultados de P_{max} no estudo de t_0	118
Figura 161 - Modo de rotura misto (pelo adesivo e pelo substrato) no teste para $L_0=20$ mm com o Sikaforce® 7752.....	120
Figura 162 - Modo de rotura pelo adesivo no teste para $L_0=40$ mm com o Araldite® AV138.....	120

Figura 163 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $L_0=40$ mm com o Araldite® AV138.....	120
Figura 164 - Curvas $P-\delta$ comprimento de sobreposição de $L_0=10$ mm.....	121
Figura 165 - Curvas $P-\delta$ comprimento de sobreposição de $L_0=20$ mm.....	122
Figura 166 - Curvas $P-\delta$ comprimento de sobreposição de $L_0=30$ mm.....	122
Figura 167 - Curvas $P-\delta$ comprimento de sobreposição de $L_0=40$ mm.....	123
Figura 168 - Distribuição das tensões de corte para os vários L_0 estudados com o Araldite® AV138.....	123
Figura 169- Distribuição das tensões de arrancamento para os vários L_0 estudados com o Araldite® AV138.	124
Figura 170 - Distribuição das tensões de corte para os vários L_0 estudados com o Araldite® 2015.	124
Figura 171 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários L_0 estudados com o Araldite® 2015.	125
Figura 172 - Distribuição das tensões de corte para os vários L_0 estudados com o Sikaforce® 7752.	125
Figura 173 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários L_0 estudados com o Sikaforce® 7752.	126
Figura 174 - $SDEG$ para $L_0=10$ mm (a) e $L_0=20$ mm (b) com o Araldite® AV138.	126
Figura 175 - $SDEG$ para $L_0=30$ mm (a) e $L_0=40$ mm (b) com o Araldite® AV138.	127
Figura 176 - $SDEG$ para $L_0=10$ mm (a) e $L_0=20$ mm (b) com o Araldite® 2015.....	127
Figura 177 - $SDEG$ para $L_0=30$ mm (a) e $L_0=40$ mm (b) com o Araldite® 2015.....	127
Figura 178 - $SDEG$ para $L_0=10$ mm (a) e $L_0=20$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.....	128
Figura 179 - $SDEG$ para $L_0=30$ mm (a) e $L_0=40$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.....	128
Figura 180 -Resultados da carga máxima no estudo do comprimento de sobreposição da junta.....	129
Figura 181 - Modo de rotura misto (pelo adesivo e pelo substrato) no teste para $R=9$ mm com o Sikaforce® 7752.	130
Figura 182 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $R=3$ mm com o Araldite® 2015.	130
Figura 183 - Modo de rotura pelo adesivo no teste para $R=3$ mm com o Araldite® AV138.	131
Figura 184 - Curvas $P-\delta$ para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b).....	131
Figura 185 - Curvas $P-\delta$ para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b).....	132
Figura 186 - Distribuição das tensões de corte para os vários R estudados com o Araldite® AV138.....	132
Figura 187 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários R estudados com o Araldite® AV138.	133
Figura 188 - Distribuição das tensões de corte para os vários R estudados com o Araldite® 2015.	133

Figura 189 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários R estudados com o Araldite® 2015.	134
Figura 190 - Distribuição das tensões de corte para os vários R estudados com o Sikaforce® 7752.	134
Figura 191 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários R estudados com o Sikaforce® 7752.	135
Figura 192 - <i>SDEG</i> para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b) com o Araldite® AV138.	135
Figura 193 - <i>SDEG</i> para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b) com o Araldite® AV138.	136
Figura 194 - <i>SDEG</i> para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b) com o Araldite® 2015.	136
Figura 195 - <i>SDEG</i> para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b) com o Araldite® 2015.	136
Figura 196 - <i>SDEG</i> para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.	137
Figura 197 - <i>SDEG</i> para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.	137
Figura 198 - -Resultados da carga máxima no estudo do raio do substrato em “T”.	138

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Resultados da análise numérica [81].	55
Tabela 2- Resumo dos resultados dos testes de compressão das juntas em T [81].	56
Tabela 3 - Tabela de propriedades do laminado (CFRP) [84].	60
Tabela 4- Propriedades intralaminares e interlaminares do material CFRP [85].	60
Tabela 5- Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [86, 88, 89]	61
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [86].	62
Tabela 7 - Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [84, 87].	62
Tabela 8 - Dimensões do estudo experimental para geometria da junta em T (adaptado de [82]).	65
Tabela 9 - Definições de incrementação no <i>software</i> ABAQUS® [92].	67
Tabela 10 - Dimensões do estudo experimental para geometria da junta em L (adaptado de [83]).	74
Tabela 11 - Valores geométricos estudados.	80
Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para as camadas de adesivo [82].	89
Tabela 13 - Dimensões da geometria de base.	89
Tabela 14 – Modos de rotura para diferentes espessuras de pele.	99
Tabela 15 - Modos de rotura para diferentes espessuras do “T”	108
Tabela 16 - Modos de rotura para diferentes comprimentos de sobreposição.	121
Tabela 17 - Modos de rotura para diferentes raios de curvatura do “T”.	131

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização do relatório.....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	11
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	13
2.1.3	Tipos de esforços.....	16
2.1.4	Modos de rotura	20
2.1.5	Configurações possíveis de junta	21
2.1.6	Adesivos estruturais	25
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	28
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	29
2.2.2	Mecânica da fratura	30
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	31
2.2.3.1	Tipos de leis coesivas	32
2.2.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	33
2.2.4	Mecânica do dano	34
2.2.5	Método de elementos finitos eXtendido	35
2.3	Juntas adesivas sujeitas a esforços normais	36
2.3.1	Ensaio de caracterização ao arrancamento.....	36
2.3.2	Juntas em T.....	38
2.3.3	Juntas em L.....	46

2.3.4	Stiffeners	49
3	DESENVOLVIMENTO	59
3.1	Validação com dados experimentais	59
3.1.1	Materiais	59
3.1.1.1	Aderentes.....	59
3.1.1.2	Adesivos	60
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	61
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	61
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	62
3.1.2	Formulação do modelo de dano triangular.....	63
3.1.3	Geometrias de validação	64
3.1.3.1	Junta em T.....	64
3.1.3.1.1	Condições de análise numérica.....	65
3.1.3.1.2	Testes experimentais	68
3.1.3.1.3	Resultados	70
3.1.3.2	Junta em L.....	73
3.1.3.2.1	Condições de análise numérica.....	74
3.1.3.2.2	Testes experimentais	75
3.1.3.2.3	Resultados.....	76
3.2	Estudo numérico de <i>stiffeners</i>	79
3.2.1	Geometria	79
3.2.2	Condições de análise numérica	83
3.2.3	Leis coesivas para os adesivos.....	89
3.2.4	Resultados numéricos para a geometria base	89
3.2.5	Estudo paramétrico das dimensões da junta	97
3.2.5.1	Espessura da pele	98
3.2.5.1.1	Modos de rotura	98
3.2.5.1.2	Curvas $P-\delta$	99
3.2.5.1.3	Análise de tensões	100

3.2.5.1.4	Estudo da variável de dano	103
3.2.5.1.5	Resistência da junta	105
3.2.5.2	Espessura do T	106
3.2.5.2.1	Modos de rotura	107
3.2.5.2.2	Curvas $P-\delta$	108
3.2.5.2.3	Análise de tensões	111
3.2.5.2.4	Estudo da variável de dano	114
3.2.5.2.5	Resistência da junta	118
3.2.5.3	Comprimento de sobreposição.....	119
3.2.5.3.1	Modos de rotura	119
3.2.5.3.2	Curvas $P-\delta$	121
3.2.5.3.3	Análise de tensões	123
3.2.5.3.4	Estudo da variável de dano	126
3.2.5.3.5	Resistência da junta	128
3.2.5.4	Raio de curvatura do T.....	129
3.2.5.4.1	Modos de rotura	130
3.2.5.4.2	Curvas $P-\delta$	131
3.2.5.4.3	Análise de tensões	132
3.2.5.4.4	Estudo da variável de dano	135
3.2.5.4.5	Resistência da junta	137
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	141
5	BIBLIOGRAFIA	145

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos últimos anos, tem havido uma crescente aplicação de ligações adesivas e utilização de materiais compósitos por todas as indústrias, como por exemplo a indústria aeronáutica, automóvel e da construção naval. Este facto pode ser explicado pelas vantagens das ligações adesivas em estruturas de material compósito.

Os materiais compósitos, sobretudo de polímeros reforçados com fibra de carbono (CFRP), são dos mais escolhidos por causa da sua alta rigidez e resistência específica. Para um melhor desempenho e menor peso das estruturas, estas podem ser compostas por componentes de reforço como os *stiffeners*. Estes componentes estruturais de material compósito podem ser ligados com recurso a ligações mecânicas, ligações adesivas, ou com uma combinação das duas. No entanto, as ligações adesivas para este tipo de aplicações têm claras vantagens, relativamente às ligações mecânicas, nomeadamente a facilidade da aplicação do adesivo, que permite reduzir os tempos de fabrico e de custo, assim como redução do peso associada à estrutura final. As ligações adesivas, devido às suas excelentes características mecânicas, têm vindo a ocupar um lugar de destaque em relação aos métodos de união tradicionais (soldadura, ligações aparafusadas, entre outros). As ligações adesivas apresentam menores concentrações de tensões, boa resistência à fadiga e possibilidade de unir diferentes tipos de materiais.

Com o aumento da utilização das ligações adesivas, a indústria necessita de ferramentas de previsão da resistência das estruturas com estas ligações. Na realização de projetos ou para o estudo científico é importante fazer um estudo numérico fiável, que simule as condições de solicitação reais. O Método de Elementos Finitos (MEF) tem sido usado cada vez mais ao longo dos anos, porque esta ferramenta é versátil, tem elevada precisão e pode ser aplicada tanto em casos simples como em outros mais complexos. Uma das técnicas disponíveis mais populares é a utilização de Modelos de Dano Coesivo (MDC), que combinam parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para obter de forma precisa a previsão do desempenho das ligações adesivas.

Com o MEF conseguem-se realizar modelos para simular diversos tipos de ligações, com diferentes adesivos, diferentes substratos e para várias configurações de junta. Assim, atualmente esta técnica numérica constitui a melhor alternativa para o estudo e previsão da resistência de juntas adesivas.

1.2 Objetivos

O presente trabalho visa aprofundar o estudo das juntas *stiffeners* em “T” (reforço para chapas finas em formato de “T”). São utilizados trabalhos de juntas similares e outros com materiais idênticos como ponto de partida, e desenvolver-se-á uma linha condutora para expor a base teórica da dissertação.

Numa primeira fase pretende-se confirmar a validade do método numérico a ser usado. Para tal, são descritos dois estudos previamente realizados, considerando juntas em T e em L, onde os resultados numéricos foram comparados com os resultados experimentais. A comparação entre o estudo numérico e os estudos experimentais permite averiguar se a abordagem numérica, a ser utilizada para o estudo das juntas em T e em L, produzem resultados que possam ser fiáveis.

A componente principal da dissertação consiste na realização do estudo numérico e posterior apresentação de resultados. Assim, com a simulação no *software* Abaqus® da junta adesiva para os vários adesivos estudados, pretende-se averiguar a influência da geometria da junta na resistência e modos de rotura desta.

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação foi dividida em 4 capítulos distintos, de forma a obter uma melhor interpretação do trabalho. Esta é organizada da seguinte forma:

No Capítulo 1 é apresentada a contextualização do tema a estudar e definidos os principais objetivos do trabalho.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica com os temas fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. Assim é feito um estado da arte de forma a introduzir a temática das ligações adesivas. É feita uma caracterização das juntas adesivas, onde são expostas as vantagens e desvantagens deste tipo de ligações, seguido de vários exemplos de aplicação destas nas várias indústrias. Além disso, apresentam-se os principais métodos analíticos e numéricos de previsão de resistência comumente utilizados em ligações adesivas. Por fim, neste capítulo são descritos os vários tipos de ensaios de caracterização ao arrancamento que as juntas adesivas podem estar sujeitas e é feita uma referência detalhada a estudos anteriormente realizados sobre juntas adesivas em *stiffeners*, juntas em L e juntas em T.

O capítulo 3 é dividido em 2 partes fundamentais. Na primeira parte é feita a validação do estudo numérico a ser utilizado para a caracterização de juntas em T e em L. Para tal, foi feita uma análise dos resultados obtidos de dois trabalhos realizados por outros autores, onde os estudos numéricos e os ensaios experimentais foram comparados a fim de comprovar a precisão do método numérico. Na segunda parte é realizado o estudo numérico, com a respetiva apresentação e discussão de resultados.

O capítulo 4 corresponde à conclusão, onde se apresentam os pontos importantes verificados no estudo numérico feito para uma junta *stiffener* em T, e são dadas sugestões de propostas de possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo vai ser contextualizado o tema das ligações adesivas, bem como os materiais compósitos. Um dos objetivos do estado da arte é expor a tecnologia das juntas adesivas e serão descritos os seguintes princípios: diferentes tipos de juntas adesivas, diferentes tipos de adesivos e os diferentes esforços a que as juntas estão sujeitas.

O principal foco deste capítulo recai sobre a influência da geometria da junta adesiva, como por exemplo a espessura do substrato ou o comprimento da ligação.

Neste capítulo dá-se também relevância aos materiais compósitos, uma vez que os substratos em estudo nesta dissertação são de materiais compósitos e as ligações adesivas são as mais indicadas na união destes materiais.

De modo a concluir a análise teórica por detrás deste estudo são descritos os principais métodos analíticos e numéricos, que têm como utilidade prever o comportamento das juntas através de simulações que emulam o comportamento das juntas para condições reais a que estas possam estar sujeitas.

2.1 Ligações adesivas

Um processo de ligação visa garantir a segurança e integridade de uma estrutura com a melhor união possível entre as peças envolvidas. No ímpeto de unir duas ou mais peças existem três tecnologias que abrangem a grande maioria das situações, tais como: ligações mecânicas, ligações soldadas e ligações adesivas. Todas as ligações referidas possuem vantagens e desvantagens tanto a nível de fabrico como a nível de qualidade de união. Neste capítulo enfatizam-se as ligações adesivas por serem o método usado na ligação das juntas em estudo. Na Figura 1 está representado um exemplo das três tecnologias de ligação.

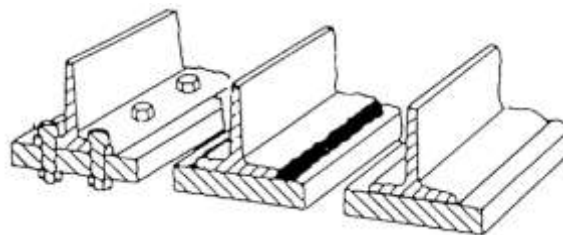


Figura 1- Diferentes tipos de ligação: ligação mecânica (à esquerda); ligação soldada (no centro) e ligação adesiva (à direita) [1].

As ligações mecânicas consistem na utilização de elementos conectores para suportar a carga entre as superfícies, como parafusos, pinos, rebites ou pregos. Estas ligações são amplamente usadas na indústria dada a sua simples aplicação e por possuírem inúmeras vantagens, tais como: desmontagem e remontagem, resistência a altas temperaturas, fácil reparação e rapidez na sua aplicação [1]. Quanto a desvantagens pode-se mencionar a necessidade de criar furações nas peças intervenientes e consequentemente a concentração de tensões. Este facto põe em causa a resistência da ligação, principalmente em relação à fadiga. Na Figura 2 estão representadas as tensões ao longo de uma junta mecânica [1, 2].

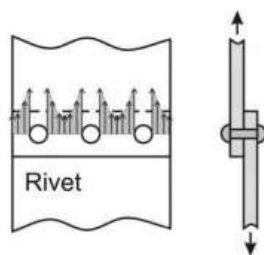


Figura 2- Distribuição de esforços ao longo de uma ligação mecânica [2].

Analisando as ligações soldadas, estas também estão muito difundidas na indústria tanto pelas suas vantagens como pela grande diversidade de processos para a realizar [3]. Uma soldadura é uma junta onde ambas as peças são fundidas parcialmente uma na outra, fazendo assim uma ligação forte e contínua. Esta tecnologia está limitada à compatibilidade dos aderentes. É necessário requerer mão-de-obra especializada, aumentando significativamente o custo do processo de fabrico [1].

Apesar da forte ligação entre aderentes, existem alguns defeitos incontornáveis, sendo de salientar a zona termicamente afetada (Figura 3), que se situa próximo ao cordão de soldadura, na qual o material sofre alterações ao seu comportamento devido à alta temperatura envolvida no processo [1, 4].

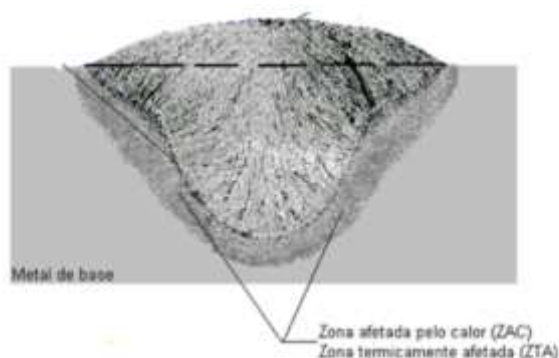


Figura 3 - Zona termicamente afetada num cordão de soldadura, vista de corte [4].

As ligações adesivas são uma tecnologia muito antiga, havendo evidências arqueológicas da sua utilização desde a época pré-histórica. Na Grécia antiga, mitos e lendas desvendam que a sociedade da época já tinha conhecimento das vantagens e

desvantagens da utilização dos adesivos. Um desses contos é o de Daedalus, que teria criado asas com auxílio de adesivos naturais. Já nesse tempo os adesivos eram sinal de grande potencial tecnológico. Ícaro, filho de Daedalus, teria sido avisado das limitações do adesivo, como de não aguentar grandes temperaturas, mas a sua ambição descuidada fê-lo ter um fim trágico. Este conto traz à tona um reflexo dos tempos modernos, onde os adesivos são desenvolvidos e amplamente usados pela indústria aeronáutica. De facto, com um esforço conjunto da comunidade científica, o desenvolvimento de novos adesivos sintéticos, na segunda metade do século XX, permitiu a aplicação em áreas estruturais e ultrapassar as limitações de temperatura e durabilidade dos adesivos naturais [1, 2, 5].

As ligações adesivas, como existem atualmente, são fruto da junção de vários ramos da ciência tais como a mecânica, a física e a química. A ciência da adesão é deveras extensa e complexa, sendo inviável tratar de todos os aspetos nesta dissertação [5].

A atração entre duas substâncias é devido a forças intermoleculares estabelecidas entre os dois materiais. Dessas forças intermoleculares existem as ligações primárias: as iónicas; as covalentes e as metálicas. Existem também as secundárias denominadas de *Van Der Waals*. Estas ligações secundárias são as responsáveis pela adesão dos adesivos com os substratos [2].

As ligações adesivas estruturais são amplamente usadas principalmente em indústrias de elevado valor acrescentado, onde existe uma grande utilização de materiais compósitos, tais como: aeronáutica, náutica, automóvel, entre outras. Geralmente, as aplicações adesivas são utilizadas em conjunto com os materiais compósitos, que evoluíram sobretudo com o desenvolvimento dos polímeros sintéticos desenvolvidos no século XX, pois a utilização de ligações soldadas nestes materiais é algo inviável e as ligações mecânicas causam a descontinuidade das fibras no local das furações [6].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Como mencionado anteriormente, uma ligação adesiva consiste em unir duas partes através de um adesivo. Essas duas partes antes da união são chamadas de substratos e, após a ligação, passam a ser denominadas por aderentes, embora os dois termos sejam utilizados sem distinção. Outros conceitos que são importantes de referir é a interfase e a interface. A interfase é uma fina camada na zona de contacto adesivo-aderente que engloba a interface. Essa região da interfase tem características muito distintas das partes maciças tanto do adesivo quanto do aderente. Já a interface é o plano de contacto entre o aderente e o adesivo [2].

Para melhor percepção dos conceitos, na Figura 4 é representada uma união adesiva onde é destacada a diferença entre interfase e a interface.

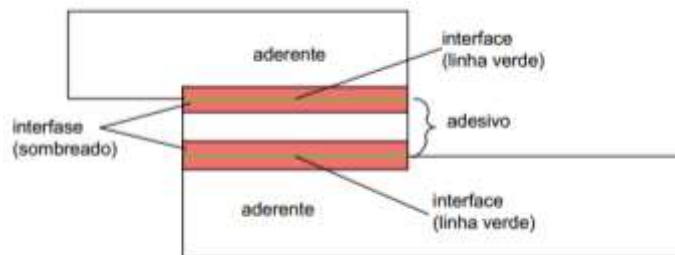


Figura 4- Junta adesiva ilustrativa interfase e interface (elaboração própria).

As ligações adesivas possuem várias vantagens e desvantagens. As principais vantagens destas ligações são a uniformidade na distribuição das tensões ao longo da área ligada, o que permite uma melhor resistência à fadiga. Um outro fator que acarreta uma maior resistência à fadiga é a capacidade de absorção de vibrações. Para além das vantagens a nível da resistência, surgem outras conveniências, sendo de salientar a possibilidade de ligar substratos com materiais muito distintos e criar estruturas com contornos regulares, evitando furos ou marcas devidas à soldadura [2].

Esta tecnologia, apesar do seu grande potencial, tem desvantagens que se devem levar em conta para que a sua aplicação seja correta. É necessário projetar a junta de forma a evitar ao máximo os esforços de arrancamento, pois uma junta adesiva tem maior resistência quando solicitada ao corte, enquanto em casos de tração, arrancamento ou clivagem a sua resistência é bem mais diminuta pois as tensões ficam concentradas numa área bem menor junto à extremidade (Figura 5). A junta também deverá ser dimensionada sabendo que estas apresentam resistência limitada a condições extremas de temperatura e humidade [2].

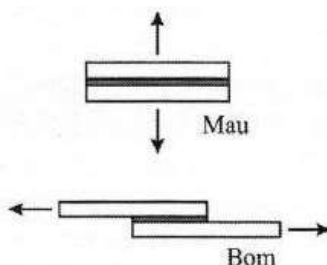


Figura 5 – Resistência numa junta adesiva solicitada a esforços de arrancamento (em cima) e numa junta adesiva solicitada a esforços de corte (em baixo) [2].

Deve-se ter em conta que uma junta adesiva na sua conceção necessita de cuidados na preparação da superfície de interface, bem como uma adequada cura do adesivo. Além dos cuidados no fabrico da junta, o controlo de qualidade das juntas adesivas é mais complexo de se realizar. O projeto de juntas adesivas pode ser problemático, uma vez que não existe um critério de dimensionamento universal que permita dimensionar qualquer estrutura [2].

A nível de classificação, os adesivos podem ser classificados conforme: a função, composição química, forma física, custo, aplicação, etc, dependendo das necessidades

de utilização. A classificação mais abrangente passa por distinguir se os adesivos são sintéticos ou naturais. Na indústria é de extrema importância a classificação dos adesivos pela sua função, podendo estes serem estruturais ou não estruturais. Para um adesivo ser considerado estrutural este deverá ter grande durabilidade e uma resistência ao corte superior a 7 MPa. Alguns dos adesivos estruturais mais comuns têm base epóxida, fenólica, poliuretana, anaeróbica, acrílica ou poliéster [2].

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Em quase todas as indústrias está presente a tecnologia das ligações adesivas. Uma das indústrias que mais faz uso destas ligações é a indústria aeronáutica, sendo esta também uma das principais responsáveis pelo grande desenvolvimento desta tecnologia ao longo das últimas décadas. Atualmente, as ligações adesivas são de extrema importância na fabricação das aeronaves visto que são utilizadas por toda a fuselagem, pois permitem unir materiais muito distintos e mantêm a leveza da estrutura. É comum a utilização de adesivos estruturais nos reforços das fuselagens das aeronaves, que são chamados de *stiffeners*. Os *stiffeners* vão ter um destaque nesta dissertação, através do estudo de uma ligação em “T” em material compósito, como é possível ver na Figura 6, que representa uma ligação do género no avião Cessna Citation III [6].

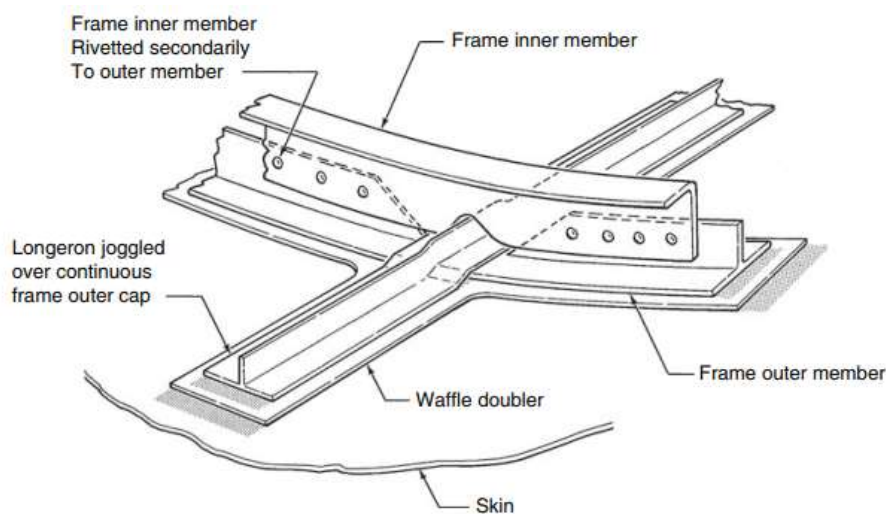


Figura 6 - *Stiffeners* unidos à pele do avião Cessna Citation III por adesivo [6].

Seguindo as tendências e procurando por soluções mais leves e robustas, a indústria automóvel tem vindo cada vez mais a utilizar ligações adesivas. Estas permitem melhorar o desempenho dos veículos, reduzir os consumos e as emissões de poluentes [2]. As marcas de carros desportivos como a Lotus têm uma forte preocupação com a redução de peso e encontraram nas juntas adesivas a solução para maximizar a performance dos seus veículos (Figura 7) [5].



Figura 7 - Exemplo de modelo da Lotus com juntas adesivas estruturais [5].

A utilização de materiais diferentes cria mais desafios a nível de acomodar diferentes coeficientes de expansão térmica. Nos automóveis as juntas adesivas permitem resolver este problema. A utilização de adesivos nos automóveis tem evoluído muito, sendo atualmente efetuadas ligações adesivas em aplicações ao nível estrutural na melhoria da segurança dos passageiros em caso de impacto. O estudo de adesivos ao impacto é uma das prioridades da indústria automóvel [6].

A indústria naval é uma das mais antigas e uma que sempre impulsionou o avanço tecnológico da Humanidade. As ligações adesivas na forma de vedantes estiveram sempre presentes nesta indústria, pois é necessário calafetar os cascos dos navios em madeira para evitar infiltrações. Um dos exemplos registados da calafetagem ocorre na época dos descobrimentos, onde se utilizou resina de pinheiro para criar alcatrão que serviu como vedante.

Atualmente na construção naval existe uma infinidade de materiais a ser utilizados, nomeadamente uma gama enorme de compósitos. Tal como nas aeronaves, a utilização de *stiffeners* é fundamental para melhorar a resistência das estruturas. Um facto a mencionar é que a melhor forma de unir materiais compósitos é através de adesivos, o que significa que a maior utilização destes materiais acarreta também mais projetos de ligações adesivas. Na Figura 8, estão representadas algumas das aplicações de juntas adesivas em embarcações pequenas atuais [2].



Figura 8 - Exemplo de juntas adesivas num barco pequeno [6].

Por toda a indústria dos transportes há um aumento da utilização de componentes compósitos e de ligações adesivas, tanto para diminuir o peso como para diminuir pontos críticos e fadiga nos componentes, originando maior custos de manutenção. Um

exemplo é a construção de carruagens de comboios que, por todo o mundo, vem utilizando as ligações adesivas na utilização de estruturas com *stiffeners* e como complemento das ligações mecânicas [6].

Uma outra indústria que faz uso de muitos materiais compósitos em busca de um maior avanço tecnológico e conhecimento para a Humanidade é a indústria aeroespacial. Esta indústria investe muito no desenvolvimento de adesivos muito avançados que têm de aguentar condições adversas. A construção de satélites leva em conta imensos fatores, um deles é o rácio entre resistência e leveza, onde ressaltam as soluções compósitas. Por vezes, os componentes dos satélites necessitam de um revestimento protetor. A Figura 9 mostra uma ligação adesiva de um revestimento no satélite Beagle 2 [6].



Figura 9 - Instalação do escudo frontal do satélite Beagle 2 através de uma ligação adesiva [6].

Uma indústria muito recente na história da humanidade é a indústria eletrónica, que trouxe grandes avanços tecnológicos em todas as áreas tecnológicas, e que obrigou a um grande desenvolvimento no que concerne às ligações adesivas. Com aparelhos cada vez mais pequenos e desempenhos melhores, o desafio de construir placas eletrónicas robustas e com propriedades próprias para o correto funcionamento dos aparelhos trouxe a necessidade de utilizar adesivos muito peculiares. Estes adesivos eletrónicos são agrupados em três grupos, sendo eles os adesivos condutores isotrópicos, condutores anisotrópicos (conduzem eletricidade só num sentido) e adesivos não condutores. Os adesivos condutores são geralmente usados para unir partes condutoras em montagem elétrica, enquanto os adesivos isolantes são utilizados para a proteção de circuitos ou fios [6]. Na Figura 10 estão representados alguns exemplos da versatilidade das juntas adesivas numa aplicação eletrónica.

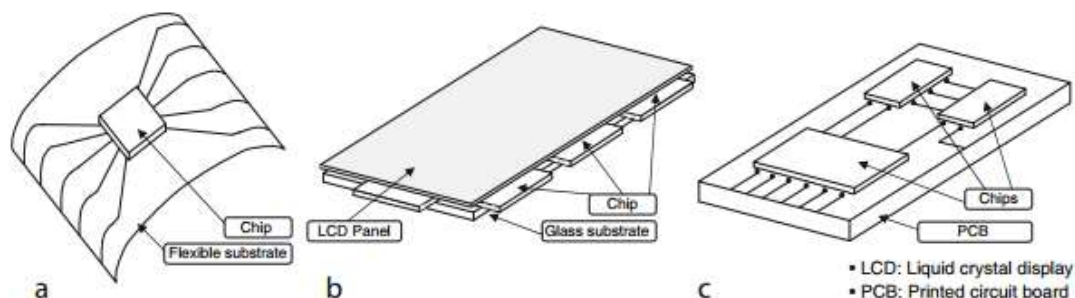


Figura 10 - Exemplo de aplicação de adesivo em equipamentos eletrónicos [7].

Na indústria do calçado a fixação da parte superior à sola por meio de adesivos, no fabrico de calçado, é uma das mais exigentes tecnologias de união adesiva. Diferentes materiais são usados para fabricar sapatos e a maioria deles varia de acordo com a natureza e composição de ano para ano por causa das diferentes condições impostas pela moda. Além disso, a forma geométrica e o *design* mudam frequentemente em sapatos masculinos e femininos e, portanto, diversas variedades de modelos podem ser fabricadas (calçados casuais, calçados desportivos, botas, calçados de segurança, calçados sanitários e ortopédicos). Para cada modelo de sapato, a junta adesiva deve ser especificamente projetada. Esses modelos de sapato são projetados duas vezes por ano (primavera e outono), sendo esta uma das razões da dificuldade em estabelecer uma metodologia unificada para a ligação adesiva de calçados, já que não há tempo para os fabricantes de calçados reagirem quando a descolagem aparecer, ou seja, a parte superior e a sola separadas durante o uso (Figura 11) [6].



Figura 11 - Sapato com a sola a descolar [6].

Na construção civil, há um alto potencial de desenvolvimento para o uso de ligação adesiva em muitas áreas. Estas podem, não apenas ser usadas em aplicações no campo da reabilitação de edifícios antigos, mas também na realização de novos métodos de construção. Um exemplo é o suporte de novas estruturas de janelas e de paredes com adesivos. A utilização de ligações adesivas no âmbito da construção civil tem vantagens ao nível da redução do tempo de fabrico e montagem, otimizando dos processos de fabrico ou implementação de conceitos de economia de recursos. O uso de materiais de construção inovadores e métodos de construção otimizados para reduzir o consumo de energia primária na indústria da construção no futuro só é possível através do uso intensivo de adesivos [8].

2.1.3 Tipos de esforços

A resistência de uma ligação adesiva é determinada pelas propriedades mecânicas dos materiais que compõem a junta, das propriedades da interfase e das tensões residuais dentro da junta. Para projetar uma junta prática, também é essencial conhecer o máximo possível sobre os requisitos de serviço, incluindo tensões antecipadas e

condições ambientais à qual estará sujeita [1]. O *design* da junta adesiva é de suma importância para a resistência da mesma. Numa junta adesiva é raro encontrar uma distribuição de tensões uniforme devido às cargas externas. De facto, é habitual encontrar uma distribuição não uniforme, criada pelas cargas externas na junta, que causam tensões locais muito superiores às tensões médias [2]. Essas concentrações de tensões inesperadas, na maioria dos casos, delimitam a força real que a junta aguenta [1].

Para o desenvolvimento do *design* de uma junta é preciso ter em conta as condições de trabalho, os custos de fabrico e o material dos substratos para as várias geometrias de juntas. Finalmente, deve-se estar ciente dos tipos de tensões previstos em serviço, suas magnitudes e suas orientações na junta [1]. Existem essencialmente quatro modos fundamentais de carregamento em juntas adesivas: tração/compressão corte, arrancamento e clivagem (Figura 12). Na prática as juntas estão sujeitas a qualquer combinação ou variação destes carregamentos [2].

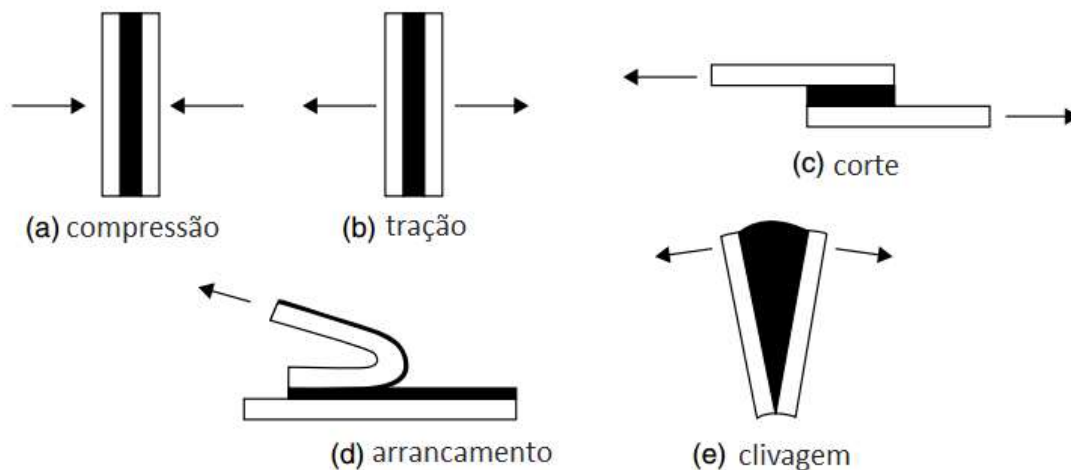


Figura 12 - Tipos de carregamento básicos de uma junta adesiva: compressão (a); tração (b); corte (c); arrancamento (d) e clivagem (e) [9].

- Tração e compressão

O carregamento de uma junta à compressão ou à tração acontece quando as forças atuam de forma uniforme ao longo da área colada e perpendicularmente ao plano da junta (exemplo **(a)** e **(b)** da Figura 12). No projeto de uma junta pretende-se que esta esteja sujeita ao corte. Contudo em certas situações isso não é possível, sendo que uma junta para suportar tração deve manter as superfícies dos substratos paralelas à distribuição dos esforços. Infelizmente, na prática a espessura do adesivo é difícil de ser controlada e raramente as cargas estão perfeitamente alinhadas de forma axial. Num carregamento à tração, quando o alinhamento não ocorre na perfeição cria-se uma concentração de esforços numa das extremidades e um momento aplicado na junta, essas concentrações de tensões reduzem consideravelmente a resistência da junta (Figura 13) [2].

No caso de uma junta à compressão, esta rompe se o carregamento não for uniforme. De facto, uma junta em compressão “pura” quase não necessita de adesivo [2].

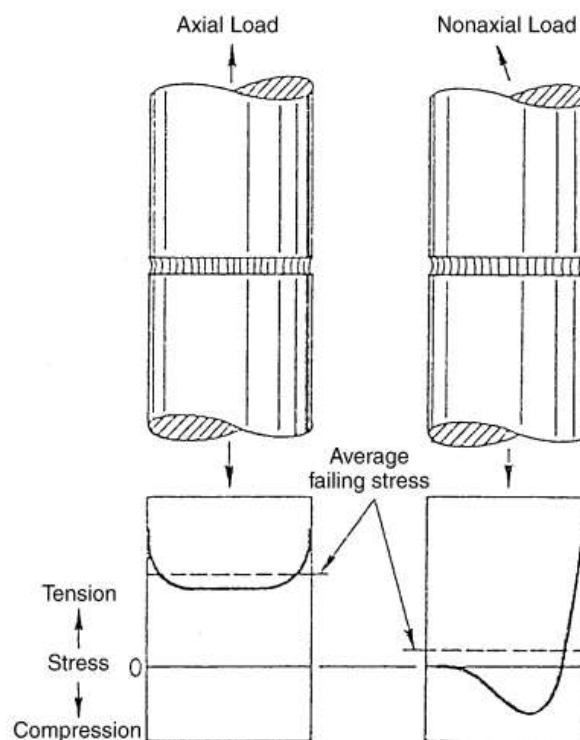


Figura 13 - Efeito da descentralização das forças axiais em carregamentos de tração (caso da esquerda), onde pode originar efeito de clivagem (caso da direita) [1].

- Corte

As tensões de corte desenvolvem-se quando as forças atuam no mesmo plano do adesivo (exemplo c da Figura 12). As juntas adesivas geralmente têm melhor desempenho em suportar estes tipos de esforços, visto que toda a área colada contribui para a resistência da junta e o alinhamento dos substratos é mais fácil de se manter. Para além de maior resistência, as juntas sujeitas a esforços de corte são mais fáceis e simples de obter, como por exemplo as juntas de sobreposição simples que são das mais comuns.

A distribuição de tensões ao longo do comprimento do adesivo, devido a um carregamento de corte, é caracterizado pela concentração de tensões nas extremidades (Figura 14). Este facto acontece devido a diferentes deformações dos substratos ao longo do comprimento de sobreposição (L_0). A deformação dos aderentes é maior nas extremidades da junta, o que gera maiores tensões nesses pontos (Figura 15). Por este fator, a largura da sobreposição tem maior efeito na resistência da junta, pois com o aumento da largura da sobreposição os picos de tensão ocorridos nas extremidades são distribuídos por uma área maior, enquanto a transferência de esforços ao longo de L_0 não se altera.

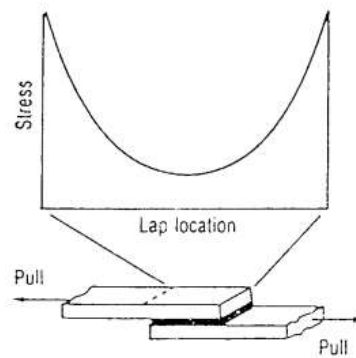


Figura 14 - Representação da distribuição de tensões ao longo da sobreposição [1].

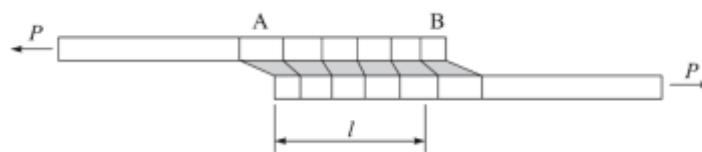


Figura 15 - Diferente deformação ao longo da junta [10].

- Arrancamento

O esforço de arrancamento ocorre quando pelo menos um dos dois aderentes é flexível e estes estão sujeitos a um esforço de tração concentrado numa das extremidades (ver exemplo (d) da Figura 12). Assim, o carregamento é suportado só pelas extremidades do adesivo (Figura 16). Estes esforços são ainda mais nocivos do que os de clivagem [2].

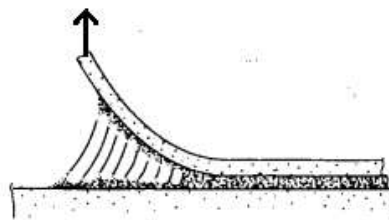


Figura 16 - Efeito do esforço de arrancamento [1].

- Clivagem

Os esforços de clivagem e de arrancamento são os mais prejudiciais na performance de uma junta adesiva. O esforço de clivagem ocorre quando dois aderentes rígidos são sujeitos a um momento fletor perpendicular ao plano do adesivo, ou a um esforço de tração concentrado numa das extremidades (ver exemplo (e) da Figura 12) [2]. Estes esforços concentram-se nas extremidades da junta em áreas pequenas, o que causa a deterioração da junta adesiva, assim como ocorre com o esforço de arrancamento. Contudo, no caso da clivagem o esforço é distribuído por uma área superior ao longo da sobreposição da junta (Figura 17) [1].



Figura 17 - Representação da distribuição de tensões entre um carregamento de clivagem e um carregamento de arrancamento [1].

2.1.4 Modos de rotura

As juntas adesivas, ao estarem sujeitas aos diferentes tipos de carregamento anteriormente mencionados, podem sofrer vários tipos de rotura. Os principais tipos de rotura possíveis de ocorrer são: roturas coesivas no adesivo, roturas adesivas que ocorrem na interface, roturas mistas e roturas coesivas no aderente (Figura 18) [2].

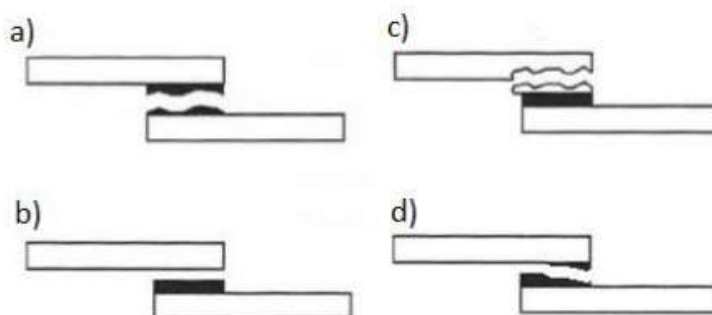


Figura 18 - Tipos de rotura numa junta: a) coesiva no adesivo; b) rotura adesiva; c) rotura no substrato; d) rotura mista [2].

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, resultando daí uma rotura em que ambas as superfícies dos substratos ficam cobertas de adesivo;

A rotura adesiva surge na interface entre o adesivo e um dos substratos, resultando numa rotura em que a superfície de um dos substratos não apresenta quaisquer resíduos de adesivo. Este tipo de rotura geralmente ocorre devido à má preparação das superfícies dos substratos, como por exemplo lixagem e limpeza inadequadas;

A rotura do substrato, tal como o nome indica, ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais resistente que a o próprio substrato, mantendo-se a junta adesiva intacta e ocorrendo a rotura do substrato ou em parte;

A rotura mista consiste na ocorrência de rotura com regiões coesivas e adesivas. Este tipo de rotura pode ocorrer por exemplo quando há uma zona da ligação cuja preparação foi ineficaz ou devido à má mistura do adesivo [2].

2.1.5 Configurações possíveis de junta

No desenvolvimento de uma junta adesiva, deve-se privilegiar uma configuração da junta em que a solitação ocorre na direção mais favorável possível. Tendo isso em conta, existem inúmeras possibilidades para a realização das juntas. Entre as mais comuns na indústria destacam-se juntas de topo, juntas de sobreposição, juntas com tira, juntas de reforço, juntas cilíndricas, juntas em T e juntas de canto. No entanto, existem algumas geometrias que podem ser consideradas impraticáveis e com um custo bastante elevado. A pessoa responsável pelo projeto da junta deve ter em consideração todos os aspetos referidos anteriormente, de modo a ter maior qualidade no projeto da junta [1, 2]. Descrevem-se de seguida os principais tipos de juntas:

- Juntas de topo

Das configurações apresentadas, as juntas topo-a-topo são as mais simples de fabricar, embora não sejam as que apresentam melhores resultados. Este tipo de juntas adesivas não suporta esforços de flexão, pois estes induzem clivagem no adesivo. Para reduzir a possibilidade de ocorrer rotura na junta por clivagem podem-se fazer modificações aos aderentes das juntas, como ilustrado na Figura 19.

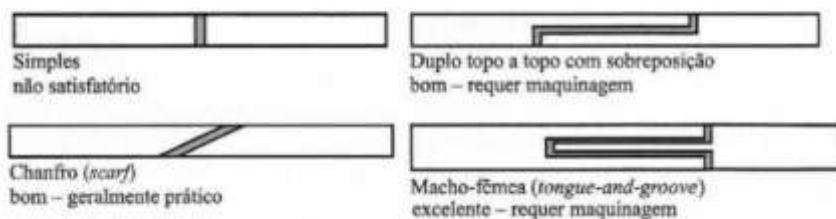


Figura 19 - Juntas de topo e suas variantes [2].

- Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição são o formato mais utilizado na indústria por serem de fácil fabricação e possuírem desempenho em projeto bastante satisfatório, uma vez que o adesivo é solicitado sobretudo ao corte. Contudo, a junta mais simples, denominada de junta de sobreposição simples (JSS), tem forças não colineares, o que resulta no surgimento de deflexão na junta, o que por sua vez origina o aparecimento de forças de arrancamento nas extremidades (Figura 20). Para diminuir esse efeito e aumentar a resistência da junta é comum adotarem-se outras configurações, como as indicadas na Figura 21 [1, 2].

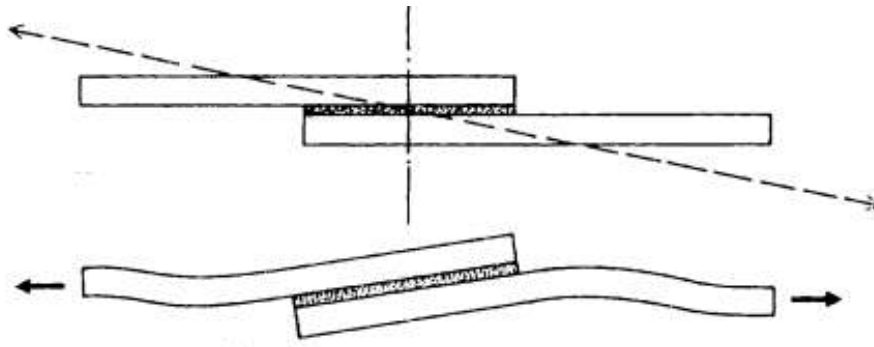


Figura 20 - Efeito da deformação da junta não colinear [11].

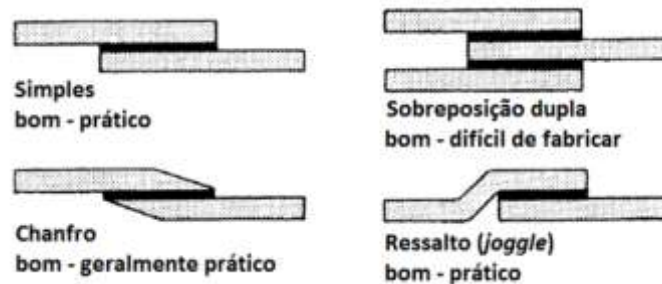


Figura 21- Juntas de sobreposição [1].

- Junta com tira (*strap joint*)

Uma junta com tira é uma junta topo a topo que é sujeita a esforços de arrancamento com uma tira a suportar os esforços de corte. Este tipo de junta tem diversas variantes como os exemplos da Figura 22. Estas configurações de juntas são muito utilizadas em reparações em fuselagens de aeronaves com emendas de alumínio ou de compósito [12].

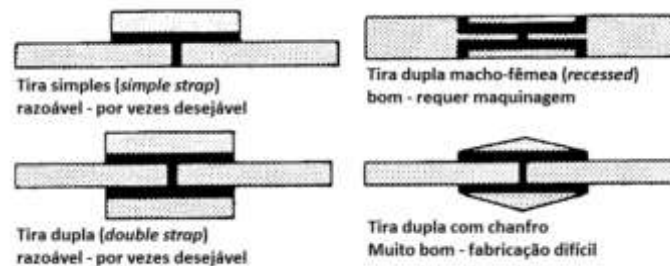


Figura 22 - Juntas com tira [1].

- Juntas cilíndricas

Este tipo de ligação é usado na colagem de varões e tubos. Na Figura 23 estão apresentadas algumas configurações para este tipo de junta adesiva. De notar que as juntas cilíndricas têm melhor desempenho do que as ligações topo a topo, mas requerem maior custo de maquinagem.

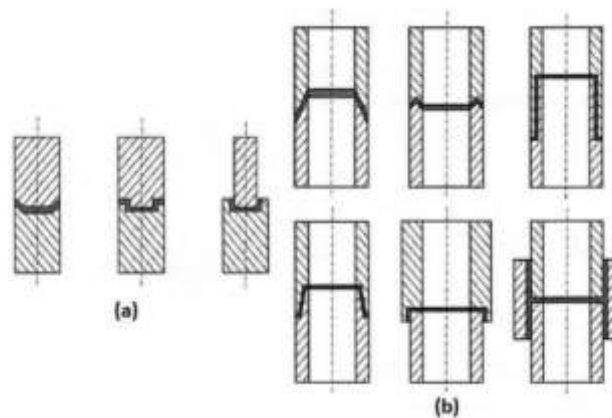


Figura 23 - Ligações cilíndricas [1].

- Juntas em T

Este tipo de junta é caracterizado por uma orientação tipicamente perpendicular dos dois componentes (ângulo de 90°). O carregamento pode ser transverso (T) ou normal (N). Normalmente este tipo de junta é reforçado para minimizar das forças de arrancamento e maximizar resistência da junta adesiva. Na Figura 24 estão representados alguns exemplos de juntas em T [2, 13].

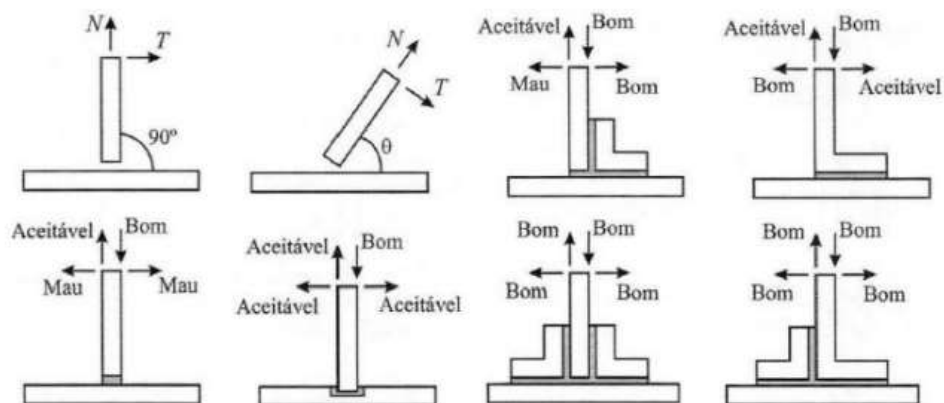


Figura 24- Diferentes tipos de junta em T [14].

- Juntas de canto

Semelhantes às juntas em T, as juntas de canto diferenciam-se na ligação efetuada nas extremidades dos aderentes [1, 14]. Na Figura 25 é possível observar alguns exemplos de configuração destas juntas.

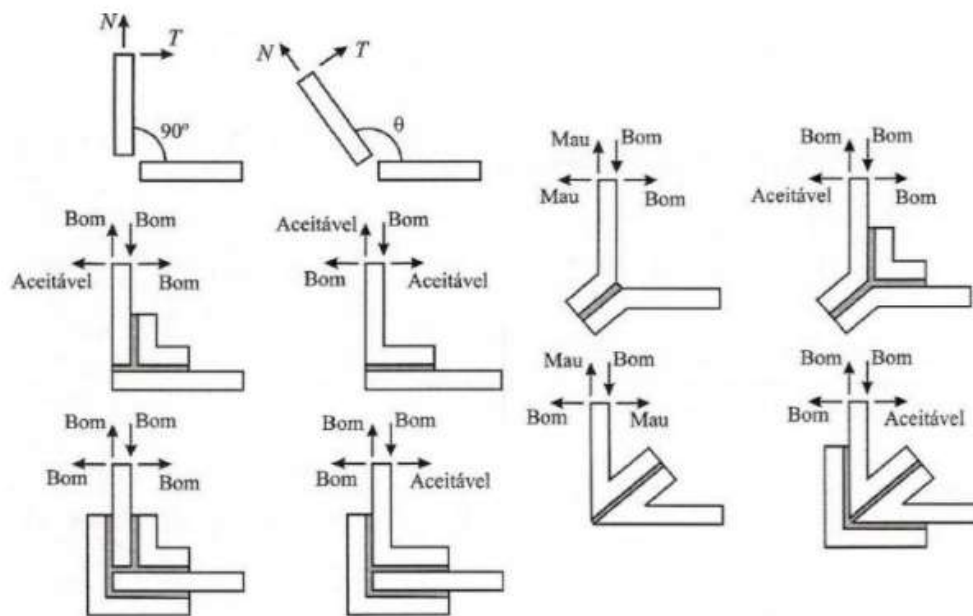


Figura 25 - Ligações de canto [14].

- Juntas de reforço

A solicitação à tração de juntas entre aderentes finos e componentes espessos introduz geralmente tensões normais segundo a espessura (σ_y). Na Figura 26– (a) são apresentadas soluções alternativas que permitem a diminuição das tensões σ_y . É também uma prática comum a junta adesiva de reforços sobre aderentes finos com o objetivo de aumentar a sua rigidez. Todavia, nestes casos, as solicitações de flexão podem eventualmente induzir clivagem no adesivo. Na Figura 26– (b), apresentam-se algumas soluções para diminuir a clivagem das juntas reforçadas. Consegue-se melhorar a resistência às forças de flexão aumentando a área da união adesiva, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base [2]. Existem várias formas de juntas de reforço, sendo uma delas a junta *stiffener*, que é a configuração estudada nesta dissertação. Como tal, esta junta tem um capítulo dedicado em 2.3.4.

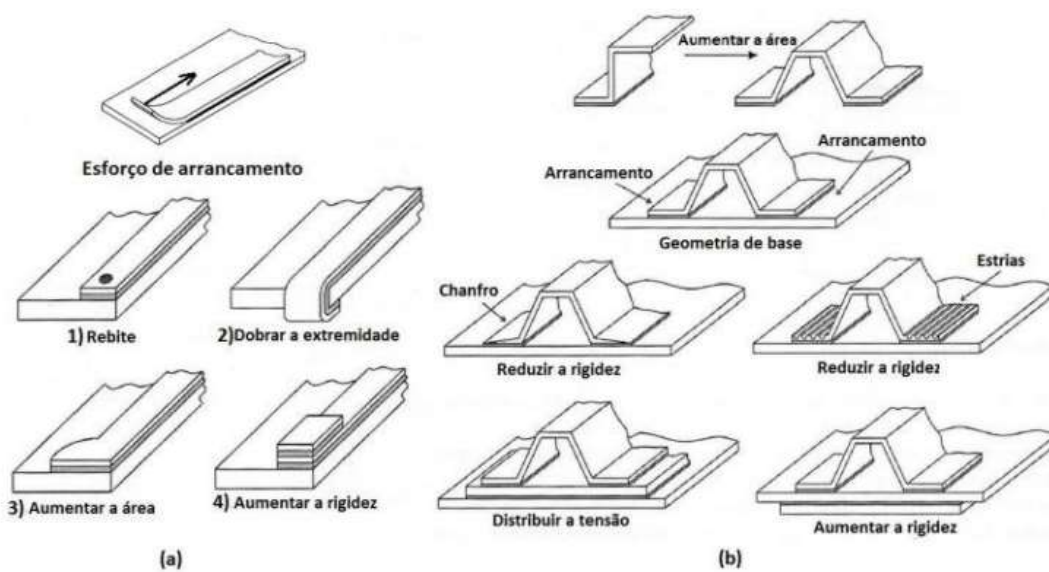


Figura 26 - Exemplo de reforços: reforço para diminuir as tensões σ_y (a); reforço para diminuir o efeito de clivagem (b) [2].

2.1.6 Adesivos estruturais

Existe uma grande variedade de adesivos, bem como diversos critérios para os agrupar. Os adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, tipo de estrutura molecular, composição química, entre outros critérios. Normalmente os adesivos caracterizam-se segundo o seu desempenho, dividindo-se em dois grupos distintos, os estruturais e não estruturais [15]. Os adesivos estruturais são usados em aplicações permanentes e que necessitam de grande resistência. Estes são geralmente termoendurecíveis, que necessitam de reticulação química com a adição de um endurecedor e/ ou aplicação de calor. Alguns elastómeros termoendurecíveis de alto desempenho, tais como poliuretanos, também poderão ser classificados como adesivos estruturais [2]. Na Figura 27 estão representados alguns adesivos estruturais e não estruturais, bem como a família de materiais a que pertencem.

São classificados como adesivos estruturais, todos os adesivos que tenham grande durabilidade e uma resistência ao corte superior a 7 MPa [2]. Adesivos estruturais são também adesivos compostos por materiais que não sofram fluência sob ação de cargas bastante elevadas. Os adesivos estruturais são geralmente utilizados em ambientes com condições adversas e são sujeitos a solicitações significativas e em juntas que necessitem de elevada durabilidade [6, 15].

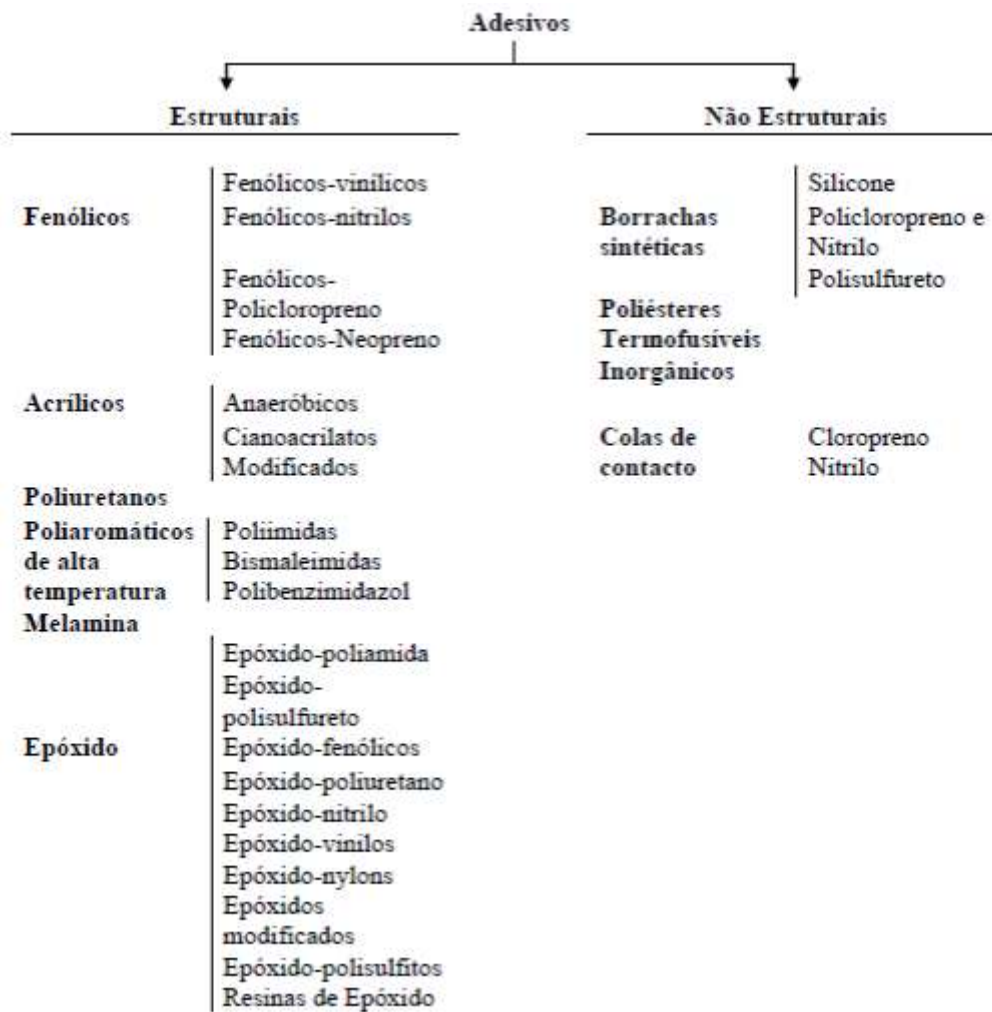


Figura 27- Famílias e classificação de adesivos [16].

Existem inúmeros adesivos estruturais, em que os tipos de adesivos mais comuns são os baseados em epóxidos, fenólicos, acrílicos, poliaromáticos de alta temperatura e poliuretanos.

Os adesivos epóxidos têm uma vasta aplicação no mercado, sendo comercialmente introduzidos em 1946. Os epóxidos são uma família de adesivos muito versáteis pois aderem muito bem em quase todos os substratos, com exceção dos polímeros e dos elastómeros que têm uma energia de superfície muito baixa. Estes adesivos podem ser facilmente modificados, por forma a obterem uma vasta gama de propriedades [2].

Os epóxidos curados são termoendurecíveis. Têm uma excelente resistência à tração e ao corte, mas uma fraca resistência ao arrancamento. Ao longo de vários anos, foram efetuadas diversas experiências com o objetivo de melhorar as propriedades menos favoráveis destes adesivos, até que no final da década de setenta, estes passaram a ter um melhor desempenho com a introdução de butadieno, produto industrial muito usado na produção de borracha [5]. Outras características a ressaltar são a sua baixa

densidade, ótima resistência a químicos e à humidade. Na cura não têm evaporação de voláteis e têm baixa contração durante a mesma [1, 2].

Os epóxidos comerciais são compostos por uma resina epóxida e um endurecedor. O endurecedor pode estar junto com a resina originando um adesivo de um componente, ou o endurecedor pode ser fornecido num recipiente separado. Neste caso, a resina e o endurecedor devem ser misturados antes da aplicação do adesivo. Os adesivos de uma parte são curados a altas temperatura, enquanto os de duas partes são curados à temperatura ambiente ou a altas temperaturas [2].

Os adesivos fenólicos são adesivos que apresentam um baixo custo, boa resistência mecânica, boa resistência a elevadas temperaturas e a agentes ambientais. Os adesivos fenólicos apresentam como principais desvantagens a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. O processo de cura deve ser realizado a temperaturas elevadas. A fim de evitar a retenção de vapor de água na junta e aparecimento de vazios na zona de colagem, deve-se utilizar aderentes porosos ou aplicar de pressão durante a cura [2].

Os adesivos acrílicos também são muito utilizados pela indústria mecânica, sendo vulgarmente divididos em acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados.

Os adesivos baseados em monómero acrilato chamam-se de **anaeróbicos** porque curam quando o ar é retirado da resina [2].

Os cianoacrilatos permitem colagens bastante rápidas, apresentando-se sob a forma de líquidos mono-componente ou na versão tixotrópica sem solventes. Apresentam excelente resistência à tração, mas baixa resistência ao arrancamento, custo elevado e comportamento frágil, levando a uma fraca resistência ao impacto. Normalmente apresentam baixa resistência ao calor e à humidade [2].

Acrílicos modificados possuem elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento, boa resistência ao impacto e possuem uma grande variedade de aplicações. Como desvantagens destacam-se a baixa resistência mecânica quando sujeita a altas temperaturas e apresentam elevada inflamabilidade [2].

Os adesivos poliuretanos, tal como os epóxidos, incluem sistemas que estão disponíveis como 100% de sólidos ou baseados em solventes e como formulações de uma ou duas partes.

Os adesivos poliuretanos possuem como características mais relevantes uma boa flexibilidade, elevada resistência ao arrancamento, abrasão, choques e vibrações. Adesivos à base de poliuretano formam ligações difíceis com alta resistência ao arrancamento. Estes possuem melhor resistência a baixas temperaturas do que outros adesivos, apresentando resistência mecânica excepcional a temperaturas criogênicas. Apenas os adesivos de silicone têm melhor desempenho a baixas temperaturas, contudo apresentam a resistência à tração menor que os poliuretanos. Apresentam

ainda bom comportamento em condições ambientais mais severas com uma temperatura de serviço entre -200° a 80° C [1]. Têm uma elevada resistência ao corte, que pode atingir valores na ordem dos 20 MPa. O seu processo de cura pode ser a temperatura ambiente ou a elevadas temperaturas. Devido à sua boa molhabilidade e flexibilidade, os poliuretanos aderem de forma eficaz a polímeros que geralmente são complicados de fazer união adesiva.

Alguns adesivos de poliuretano degradam substancialmente quando expostos a ambientes de alta humidade. Esta sensibilidade à humidade ocorre com o adesivo curado e os componentes não curados. Uma vez que um componente de poliuretano esteja aberto ao ar, ele deve ser usado imediatamente. Para evitar que a humidade contamine o adesivo poliuretano, este normalmente é conservado numa mantas de nitrogénio seco [1].

Os adesivos poli aromáticos de elevada temperatura, como por exemplo os adesivos Poliimidadas, são os adesivos que apresentam o melhor comportamento a elevadas temperaturas ($\geq 200^{\circ}$ C). Estes adesivos são caros e difíceis de manusear, estando disponíveis no mercado sob a forma líquida e de filme. São geralmente utilizados em aplicações leves sujeitas a temperaturas elevadas, como chips, eletroímãs e outros componentes eletrónicos. A cura destes adesivos é difícil pois requer períodos elevados com alta pressão e altas temperaturas [2].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

O processo evolutivo das juntas adesivas está intimamente relacionado com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis que permitam aumentar a eficiência na sua utilização, possibilitando assim ultrapassar o paradigma das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, tudo isto relacionado com a falta de modelos materiais precisos e de critérios de rotura adequados que se faziam notar há algumas décadas. As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [17], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O Método de Elementos Finitos (MEF) [18] é a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [19], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-

se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas adesivas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [20]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

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

2.2.1 *Mecânica dos meios contínuos*

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [17], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [21] usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [22]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [19], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [23]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [24] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [25]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [26] e por Rice [27] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [28], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [29] e Dugdale [30], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [31].

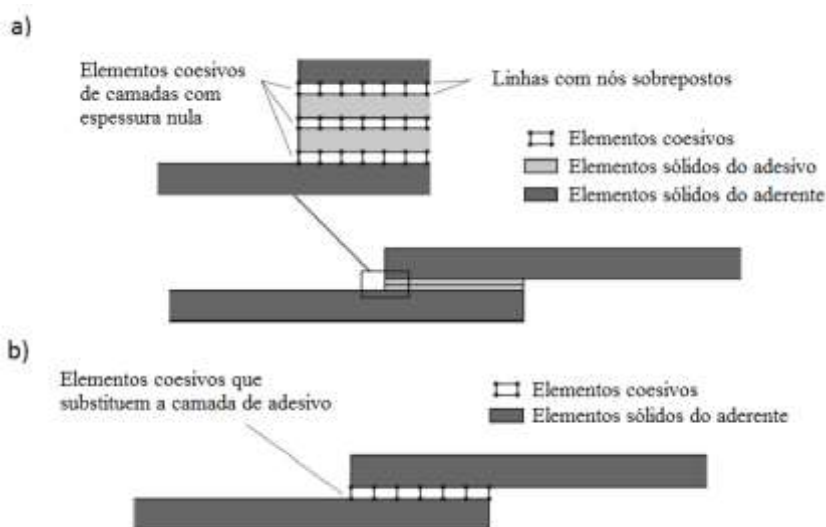


Figura 28 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [32]).

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [33]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 28), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [34], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [35].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais.

As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [36]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [37].

2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [38], triangular [39], exponencial [40], polinomial [41] e trapezoidal [35]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [42].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [43]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [44] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 29).

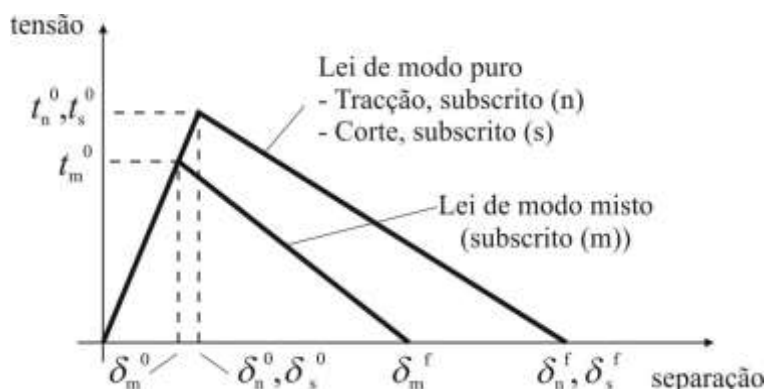


Figura 29 – Modelo coesivo triangular [44, 45].

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [46].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [47] e modo II [48].

2.2.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [49]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [50], alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB), *End-Notched Flexure* (ENF) e JSS, alcançando bons resultados [35, 51].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devidos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [52]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [53]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [54]. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [52], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} .

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 utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [55] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramshad et al. [56] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [31].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [57]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [58] ou do número de ciclos para análises de fadiga [59, 60]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [61].

Hua et al. [62] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [63] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.2.5 Método de elementos finitos eXtendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a P_{max} , respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [64]. Belytschko e Black [65], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [66]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [67].

Campilho et al. [68] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 30). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

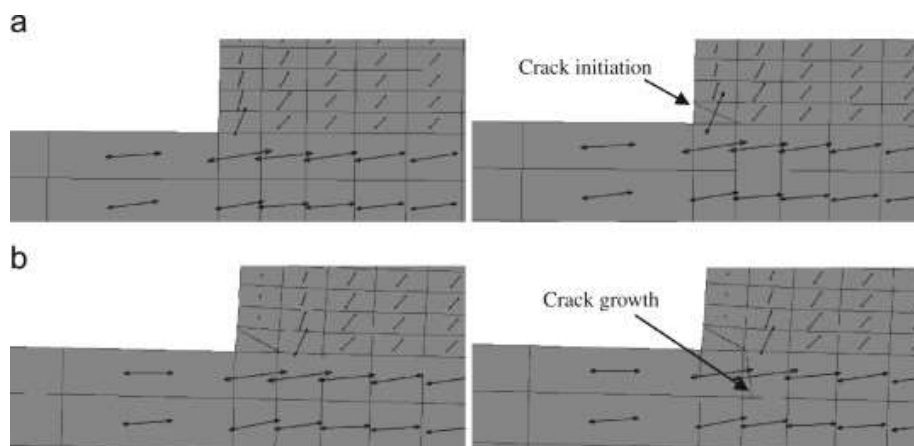


Figura 30 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [68].

2.3 Juntas adesivas sujeitas a esforços normais

As juntas adesivas podem ter várias formas, e todas essas configurações as juntas podem estar solicitadas com um ou mais tipos de carregamentos: tração, compressão, corte, arrancamento ou clivagem [2]. Contudo, existem alguns casos em que as juntas adesivas são mais sujeitas a esforços normais.

Para melhor dimensionamento das juntas adesivas é necessário conhecer a capacidade que estas têm em suportar cargas de arrancamento e/ou de clivagem, visto que estas são carregamentos críticos [2]. As juntas em T e L apresentam semelhanças entre elas, sendo que estas estão maioritariamente submetidas a esforços de arrancamento, muito por causa das geometrias associadas a estas juntas. Este tipo de juntas é normalmente caracterizado pela orientação perpendicular dos aderentes (90°), embora esta possa ser diferente de 90° . O seu carregamento pode ser efetuado segundo a direção normal ou transversa.

2.3.1 Ensaios de caracterização ao arrancamento

Os testes ao arrancamento (*peel test*) são amplamente utilizados para controle de qualidade, e são usados para avaliar e descrever o desempenho dos adesivos ao arrancamento. Podem ser usadas várias formas do teste *peel*, como mostrado esquematicamente na Figura 31. Há uma série de normas internacionais ASTM e ISO descrevendo os procedimentos necessários para os vários tipos de testes de arrancamento. As normas **ASTM C 903** e **ISO 8510-2** descrevem o teste de 180° *peel*, enquanto a norma **ISO 8510-1** se refere ao mesmo tipo de montagem, mas impõe que o teste seja feito com um ângulo a 90° . Existem também padrões específicos para o teste *T-peel* (**ASTM D1876**), o teste de arrancamento de *climbing drum* (**ASTM D 1781**) e o método de teste de rolos flutuantes (**ISO 4578**). Além disso, existe um procedimento

específico para testar materiais selantes num ângulo de 180° , descrito na norma **ASTM C 794** [69].

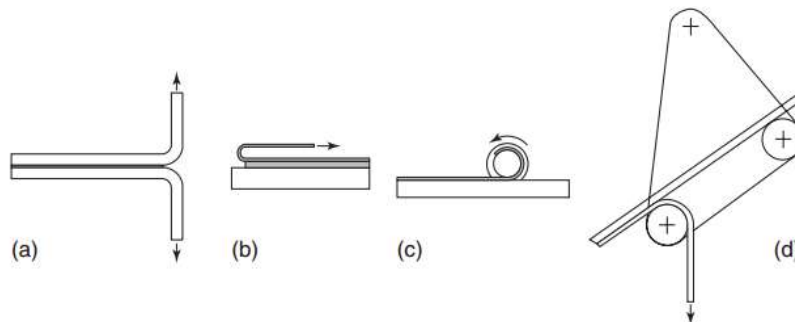


Figura 31 - Tipos de teste ao arrancamento, T-peel test –(a); 180° peel test –(b); climbing drum –(c); ensaio de rolete flutuante –(d) [69].

O ensaio de arrancamento a 180° (180° peel test) consiste na dobragem de um dos substratos com características mais flexíveis, formando assim um ângulo de 180° . Este ensaio é usado para caracterização de adesivos não estruturais, tais como vedantes. É um ensaio adequado para determinar a resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva em que um dos substratos é rígido e outro é flexível [6].

O ensaio de rolete flutuante, também designado por *floating roller test*, permite determinar a resistência ao arrancamento numa ligação entre um substrato flexível e um substrato rígido. O mecanismo de rolete utilizado permite ter um ângulo constante de arrancamento que se mantém durante o ensaio. O dispositivo permite ainda a afinação do ângulo desejado para realizar o arrancamento. Neste ensaio, pretende-se obter a carga média ao longo do período em que a força de arrancamento se mantém estável [2, 69].

O ensaio de arrancamento climbing drum test é utilizado para caracterizar a resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva entre um substrato flexível e um substrato rígido. Este tipo de ensaio é mais utilizado em estruturas *sandwich* onde se pretende conhecer a resistência de separação entre a pele e o núcleo. Geralmente é aplicado com o objetivo de controlar a qualidade da ligação adesiva. Um exemplo típico é a determinação da qualidade de cura em adesivos frágeis. Um valor reduzido de força de arrancamento pode significar a existência de uma cura incompleta do adesivo [2, 6, 69].

O ensaio de arrancamento em junta tipo T (T-peel test) é bastante conhecido e pode ser utilizado para caracterizar a resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva em substratos flexíveis. O ensaio de arrancamento de junta em T realiza-se numa máquina universal de tração e a velocidade de aplicação da carga deve ser constante. A resistência é medida através da razão entre a força média e o comprimento de sobreposição da junta [69].

2.3.2 Juntas em T

As juntas em T são caracterizadas pela orientação perpendicular dos dois componentes. Este tipo de junta pode ter várias configurações, isto porque existe a necessidade de melhorar o comportamento da junta em T simples (Figura 32 a). Uma das formas mais comuns de melhorar o desempenho da junta é a colocação de reforços nos dois lados do elemento perpendicular (Figura 32 b) [2].

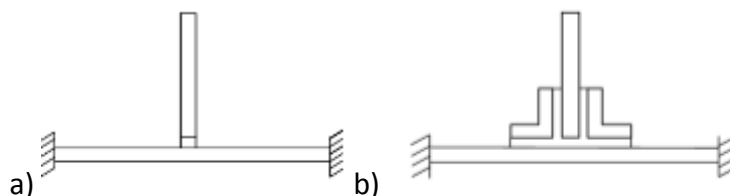


Figura 32- Junta em T simples (a) e junta em T duplamente reforçada (b) [2].

Juntas em T são juntas em que os membros podem estar em 90° (ou com um ângulo diferente de 90°). O carregamento é geralmente no plano perpendicular da base (P), mas pode ser transversal (T), como mostrado na Figura 33. O projeto de uma junta em T é mais complicado do que as de juntas de sobreposição simples ou juntas tubulares. Quando as juntas são solicitadas de forma a criar tensões de arrancamento, como no caso de carregamento lateral, estas obtêm maus resultados. Esforços transversais compressivos geralmente não causam rotura. As forças de compressão normalmente só causarão problemas quando o substrato de base (também denominado de pele) se dobrar. As juntas T não foram extensivamente analisadas, embora sejam usadas em muitas aplicações, como por exemplo na indústria automóvel [70].

Neste capítulo são expostos vários trabalhos científicos sobre este tipo de ligação.

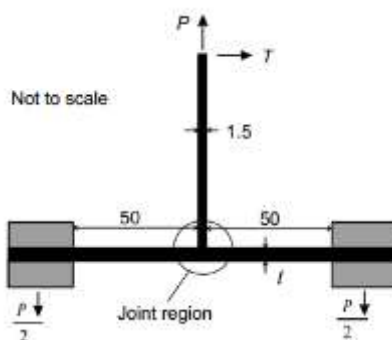


Figura 33- Junta em T e os tipos de carregamento [13].

da Silva e Adams [13] estudaram a junta em T e os possíveis reforços para aumentar a resistência da junta, considerando que o material dos substratos é em alumínio e o adesivo é de base epóxico. Concluiu-se que nas juntas padrão em T, a rotura é ditada pela rigidez e resistência do aderente de base e, quando a sua espessura foi aumentada de 1,5 mm para 10 mm, a carga suportada foi aumentada em 10 vezes para a maioria dos casos considerados (Figura 34). Os projetos que usaram dois reforços de suporte

reduziram o momento de flexão e aumentaram a resistência. Uma placa fina de reforço, com 1,5 mm, foi adicionada no aderente de base no lado oposto do "T", este deu à junta mais resistência (Figura 35). Os projetistas de juntas T precisam observar o comportamento dos aderentes, especialmente no que diz respeito à rigidez, ao projetar para um determinado tipo de carga [13].

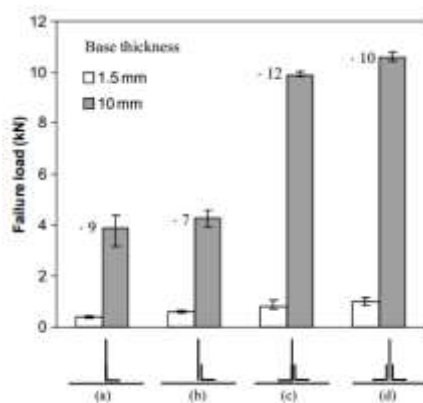


Figura 34 - Resultados do aumento da espessura do substrato de base para as várias configurações de junta em T [13].

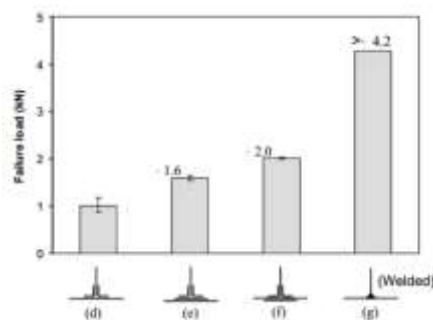


Figura 35 - Resultados do posicionamento da folha de reforço [13].

Diversos artigos debruçaram-se sobre a construção e análise de ligações adesivas em T em materiais compósitos, sendo eles laminados ou *sandwich*. Trask et al. [71] e Hélénon et al. [72] realizaram estudos em juntas em T de compósitos laminados, que são usados numa ampla gama de aplicações estruturais. Uma das dificuldades no projeto estrutural é dimensionar juntas com substratos de materiais diversos, quer seja ligações compósito-a-compósito ou composto a outros materiais. Um caso particular é aquele de uma junção a 90°, onde é exigida uma construção em laminado ou em sanduíche, por forma a transferir a carga para um laminado adjacente ou um painel de sanduíche. Este é um caso de projeto particularmente desafiante, uma vez que num laminado compósito as cargas no plano são normalmente suportadas maioritariamente pelas fibras. Assim, quando as cargas têm uma direção diferente das fibras, o desempenho mecânico da ligação fica muito mais fraco. Este efeito é visível na espessura da estrutura adjacente, podendo ainda aparecer cargas de flexão na junta [71].

Na produção de um substrato em T através de material compósito é comum o surgimento duma região entre as camadas do laminado, na ligação das três pernas do T. Esta região é normalmente designada por deltoide, pois o seu formato é similar a um triângulo com dois lados curvos. Normalmente para que esse espaço não fique com um vazio, este é normalmente preenchido.

Trask et al. [71] investigaram a influência de defeitos induzidos pelo processo de fabrico (localizados dentro da região deltoide) nos mecanismos de rotura que ocorrem na estrutura de uma junta em T de material compósito, quando carregados à tração, variando a quantidade de material colocada na região deltoide para uma geometria externa fixa em T. Além da compreensão técnica dos defeitos induzidos pelo processo, a sua interação em características de projeto e modos de danos, os dados experimentais também são usados na validação de modelos de elementos finitos [72]. A Figura 36 fornece uma representação esquemática do processo de fabrico da junta em T. A montagem da fase 1 é a fabricação de autoclave (fabrico manual de material compósito) de placa composta de 16 camadas $(60/0/-60/0)_{3x}$ usando ferramentas planas. Seguidamente, na primeira etapa da fase 2 é feito o fabrico do inserto deltoide composto por fibras unidireccionais, comprimidas contra rolos de aço sob pressão de vácuo de 1 bar. Na segunda etapa da fase 2 faz-se a construção da parte vertical em que as camadas de compósito são posicionadas contra ferramentas preparadas, formando o laminado e metade da secção vertical, no formato de L. Na fase 3 ocorre a montagem das secções verticais esquerda e direita, com deltoide e placa compósita adjacente (fixando-a na superfície inferior) localizado em posição para processamento de autoclave. Na última etapa (fase 4) foi removida uma amostra da junta em T pronta para operações de corte e maquinagem em amostras individuais.

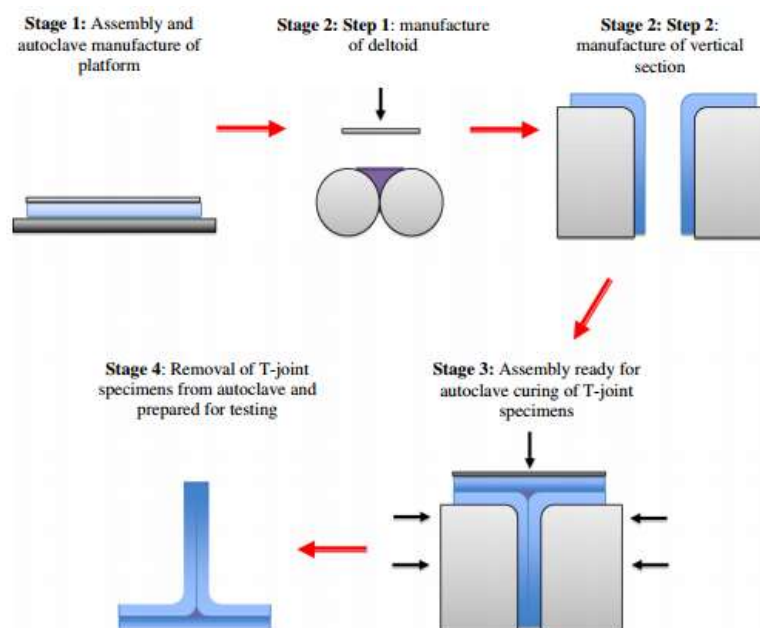


Figura 36 - Representação esquemática do fabrico de uma junta em T [71].

Trask et al. [71] destacaram o efeito de vários tipos de rotura devido a defeitos no fabrico, e ainda verificaram que, para uma redução de 26% na área do deltoide, sem alteração na geometria externa e um deslocamento das camadas de 0,3 mm mais internas, observou-se um desempenho mecânico semelhante ao da amostra nominal inicial, mas com aumento da variação estatística. A redução na área do deltoide em 46% e um deslocamento das camadas de 0,8 mm mais internas, novamente sem alteração visível na geometria externa, resultou numa redução de 33% na capacidade de carga da junta em T em comparação com a geometria nominais. As conclusões deste estudo sugerem que uma redução na área do deltoide pode ser tolerada dentro de certos limites [71].

Segundo Potter et al. [73] gerou-se uma taxonomia de estados de defeito em peças compósitas, no qual se destaca a necessidade de recategorizar a definição atual de defeitos em falhas induzida no *design*, em que é mais adequado serem consideradas como características. No contexto das estruturas das juntas em T, projeto deve prever defeitos induzidos pelo *design*, ou seja:

- Erros geométricos:
 - Desalinhamento das fibras;
 - Fibras enrugadas;
 - Erros de direção da fibra ao redor do *fillet*;
- Deformação e tensões residuais;
- Defeitos de fabrico:
 - Vazios;
 - Delaminação;
 - Variação da pressão de consolidação ao redor do *fillet*.

Hélénon et al. [72] também analisaram o comportamento de juntas em T de compósito. O estudo inclui uma investigação numérica rigorosa sobre a resposta estrutural de uma peça em T (Figura 37) submetida a uma carga "*pull-off*". Inicialmente, é realizada uma análise de tensão elástica linear, mostrando tensões muito altas na extremidade livre. A fim de prever o modo de rotura e P_{max} foi feita uma análise mais aprofundada, usando elementos de interface para simular a rotura intralaminar. Foi demonstrado que para determinar os valores de resistência máxima é necessária uma malha muito fina. Deve-se reduzir o tamanho da malha para garantir que o início da fenda prevista ocorra de forma independente da malha, o que leva a uma boa correlação com os resultados experimentais sem sacrificar a realização do teste. Este estudo também mostra que a rotura da peça em T é controlada pela propagação da fenda [72].

Hélénon et al. [72] usaram valores de resistência realísticos no modelo, o que requer uma malha extremamente fina para permitir que ocorra a iniciação. Usando valores de resistência reduzida, foram obtidas boas previsões de cedência e rotura, independente do refinamento da malha na extremidade livre da amostra. Finalmente, foi mostrado que a peça em T rompe por delaminação (Figura 38) e não no início do dano, uma vez

que o valor da tensão na extremidade livre varia com o nível de refinamento da malha. A inserção adequada de reforço de espessura, como costura ou pino Z, poderá deter ou até mesmo eliminar danos induzidos por delaminação [72].

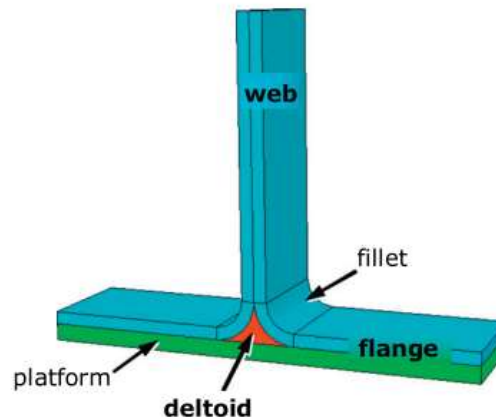


Figura 37- Esquema da junta em T em compósito [72].

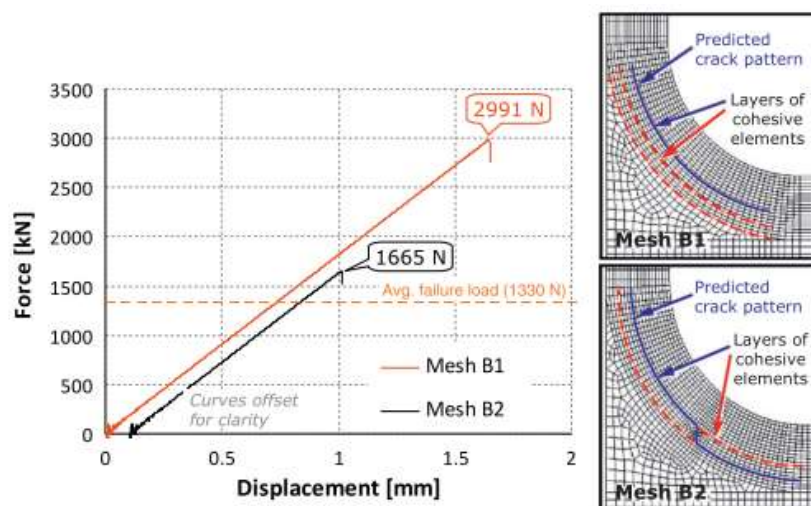


Figura 38 - Resultados da junta T, com geometria nominal, para refinamentos diferentes de malha: B1- malha menos refinada; B2- malha com maior refinamento [72].

Na Figura 39, verifica-se que as juntas em T, com os deltoides nominais, atingiram um P_{max} de 1330 N, as juntas com o deltoide 26% menor do que o nominal atingiram um P_{max} de 1296 N, enquanto as juntas com o deltoide 46 % menor do que o nominal atingiram um P_{max} de 891 N, o que traduz numa redução de 33% na capacidade de carga das configurações nominais. A tendência observada na Figura 39 sugere que a redução da área deltoide pode ser tolerada dentro de certos limites. Notou-se que a redução da área deltoide também causou a introdução de roturas localizadas, isto é, roturas vertical no deltoide ou fenda, na camada de fibras a 90°, no canto do início da curvatura do deltoide [71].

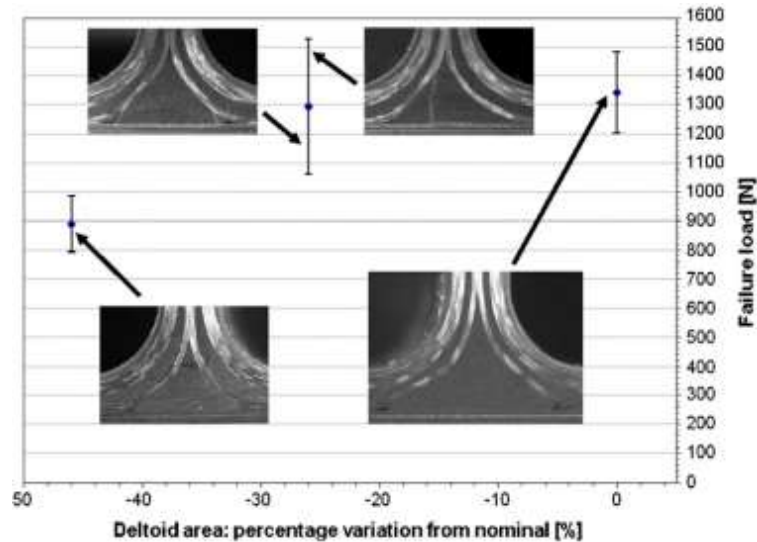


Figura 39 - Resultados dos testes para diferentes geometrias de deltoides [71].

Bianchi et al. [74] apresentaram um modelo de elementos finitos (MEF) para analisar a deformação estrutural, propriedades de resistência e comportamento de fratura por delaminação de juntas em T compostas e reforçadas com pinos-z (Figura 40). Foi usado um modelo de célula unitária para calcular as forças de tração desenvolvidas pelos pinos de reforço. Esta força é resultado de tensões interfacial de fricção (*pull-out*) de um único pino dentro de uma célula unitária representativa da junta. A análise em macro escala envolve a modelação da rotura por delaminação na junta, usando uma zona coesiva, que é baseado na análise da carga de tração de um único pino. O modelo de elementos finitos foi validado usando resultados experimentais para uma junta em T de fibra de carbono / epóxico submetida a uma carga *pull-off*. O modelo calculou com precisão a carga de início da rotura, a carga final e o modo de fratura da junta.

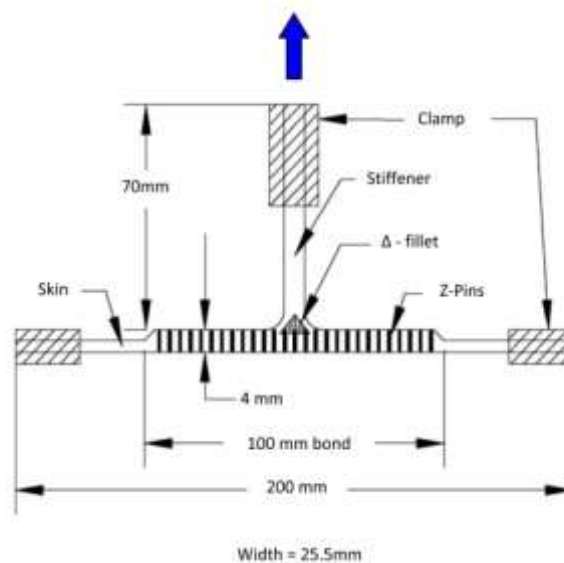


Figura 40 - Representação esquemática da junta em T com pinos de reforço [74].

Foi desenvolvido um modelo em MEF que pode analisar as propriedades estruturais e o comportamento da fratura em juntas compósitas em forma de T quando submetidas a uma carga de tração. O modelo demonstrou-se capaz de prever a curva $P-\delta$ (Figura 41).

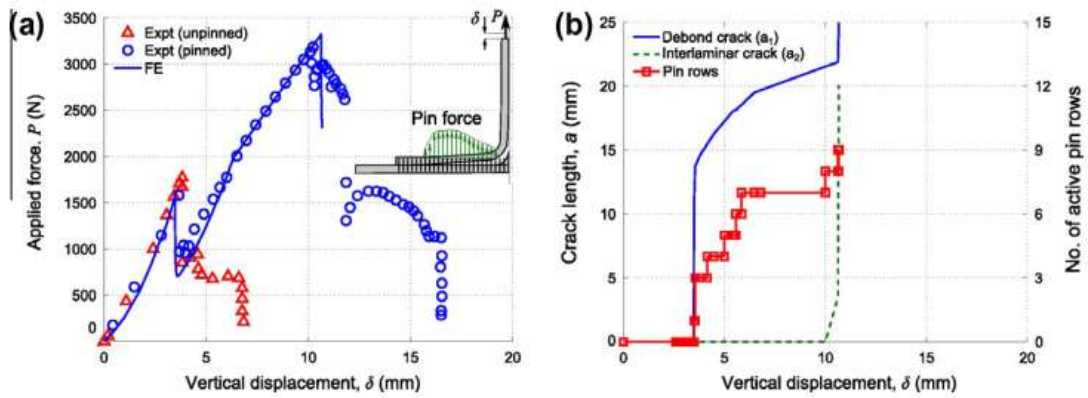


Figura 41- Análise de elementos finitos (MEF) e medidas de força aplicada vs. curvas de deslocamento (a); MEF do comprimento da fenda vs. deslocamento aplicado e número de fileiras de pinos ativos (b) [74].

Koh et al. [75] estudaram o efeito do reforço por pinos Z para diferentes geometrias de junta em T. A Figura 42 representa os resultados do estudo.

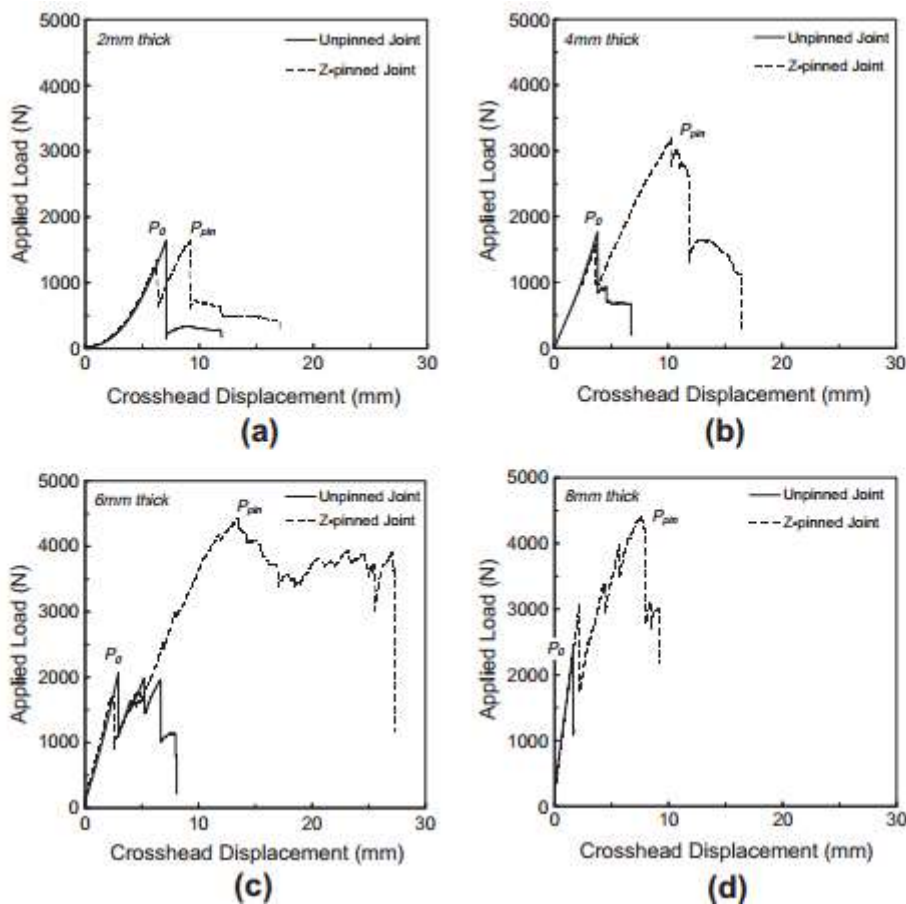


Figura 42 - Curvas $P-\delta$ nas ligações em T com e sem os pinos Z, ao longo de uma espessura total da ligação de: $t=2$ mm (a); $t=4$ mm (b); $t=6$ mm (c) e $t=8$ mm (d) [75].

Rao et al. [76] fizeram uma investigação experimental e uma análise de elementos finitos não-lineares de juntas em T em ambientes higrotérmicos (Figura 43). Este estudo consiste numa junta em T submetida a um carregamento de tração (*pull-out*). Estudou-se o comportamento da junta até à rotura final para dois casos, um sob ambiente seco e o outro em circunstâncias higrotérmicas.

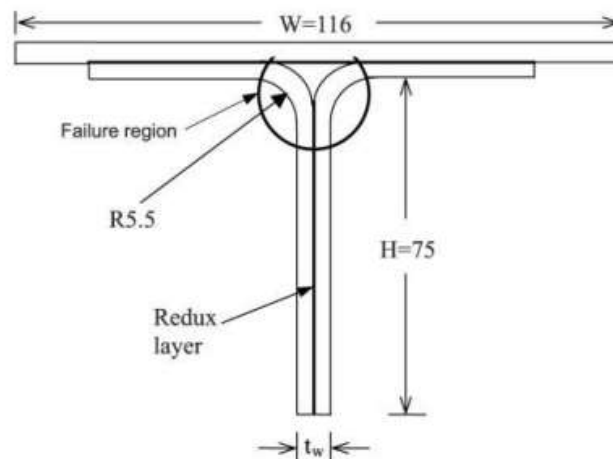


Figura 43-Geometria de junta em T para carregamento em condições higrotérmicas [76].

Rao et al. [76] fizeram um estudo do efeito da geometria na junta adesiva para as condições ambientais adversas, onde estudaram a espessura de pele de 2,4 e de 3,6 mm. Os resultados do estudo numérico e do ensaio experimental, para a espessura de pele 2,4 e de 3,6 mm, estão representados na Figura 44 e na Figura 45, respetivamente.

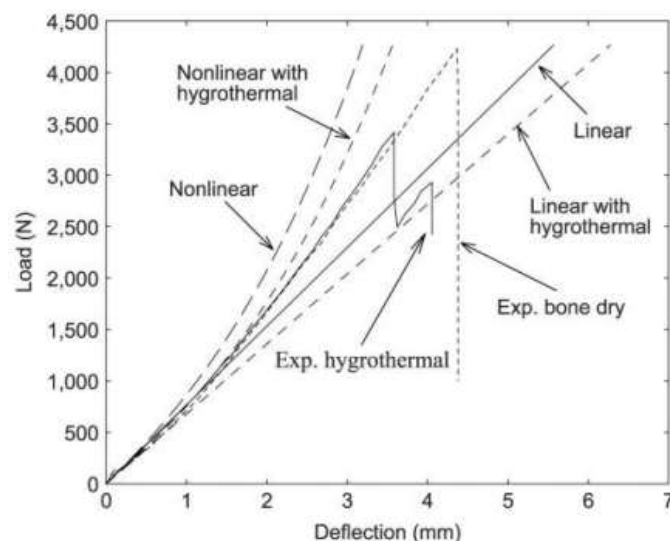


Figura 44 - Resultados das simulações experimentais e por MEF, da junta com espessura de pele 2,4 mm em condições higrotérmicas [76].

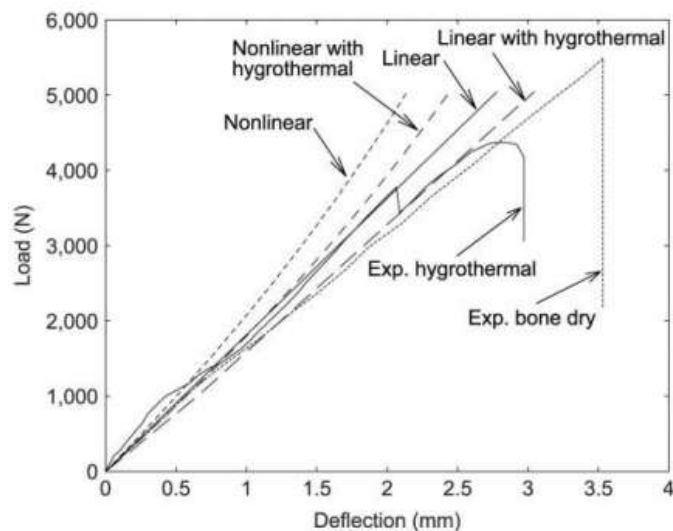


Figura 45 - Resultados das simulações experimentais e por MEF, da junta com espessura de pele 3,6 mm em condições higrotérmicas [76].

A partir dos dados experimentais e análise numérica, Rao et al. [76] concluíram que um aumento na espessura da pele aumenta o valor de P_{max} e diminui a propagação da fenda. A zona de interface entre o T e a pele próxima da área de preenchimento (deltoide) introduz descontinuidades geométricas entre os materiais, onde geralmente têm a zona crítica para o início da rotura. Os fatores ambientais como temperatura e humidade podem comprometer severamente a resistência da junta adesiva. Os resultados experimentais mostram que há uma redução de cerca de 20% no P_{max} na junta adesiva devido a condições higrotérmicas. Observa-se que o início da rotura ocorre na interface T/pele, tanto no elemento do T como no elemento de pele devido às tensões normais, transversais e de corte interlaminares.

2.3.3 Juntas em L

As juntas adesivas em L são um caso particular das juntas em T. Estas juntas têm como particularidade o facto de possuírem uma aba de um dos lados (Figura 46). Este tipo de solução tem resultados razoáveis apesar de estar descompensado num dos lados [2].

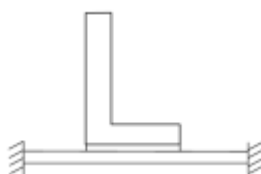


Figura 46 – Junta adesiva em L [2].

Li et al. [77] estudaram as tensões em juntas adesivas em L, nas quais uma placa em ângulo reto é unida a uma placa de base com um adesivo, utilizando o método de elementos finitos (MEF). Foi assumido que o adesivo e os aderentes tinham

propriedades elásticas lineares. A junta em L foi analisada sob três condições de carga, das quais duas lineares e uma de flexão (Figura 47).

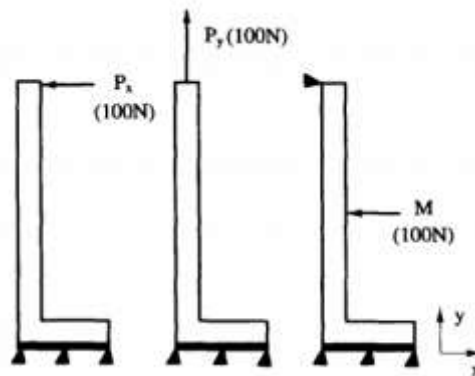


Figura 47- Estudo de uma junta em L para vários carregamentos: junta carregada na direção x (à esquerda); junta carregada na direção y (no centro) e ligação adesiva (à direita) [77].

No estudo de Li et al. [77], as distribuições de tensão na junta adesiva em L, são dadas por contornos de tensão sob as três condições de carga (Figura 48). Verificou-se que ocorrem altas concentrações de tensão no canto interno da placa angular para carregamento na direção x (P_x) e no momento fletor (M), sugerindo que a ruptura não ocorreria na união adesiva. Entretanto, ao solicitar a junta na direção y (P_y), as tensões normais máximas são concentradas na camada adesiva, na extremidade do lado da esquerda na junta, sendo expectável que a ruptura ocorra nessa extremidade.

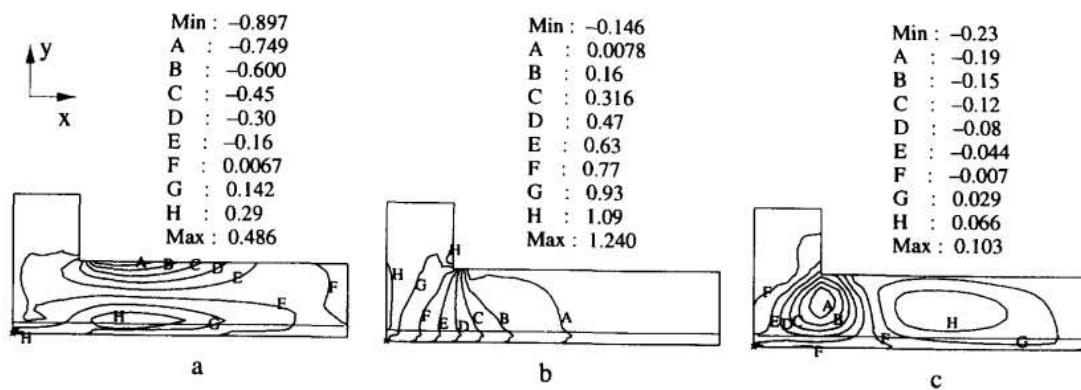


Figura 48 -Contornos de tensão na junta carregada na direção y: tensão normal em x, σ_x (a); tensão normal em y, σ_y (b); tensão de corte, τ_{xy} (c) (Todos as tensões estão em MPa) [77].

Uma vez que a geometria da junta adesiva afeta a análise e a resistência da mesma, Li et al. [77] investigaram a influência da geometria nas distribuições de tensão ao longo do comprimento de sobreposição (L_0), da espessura do adesivo (t_a) e da espessura do aderente em L (t_0). Li et al. [77] estudaram a influência geométrica em juntas com L_0 de 6, 8, 10, 12, 14 e 16 mm, com t_a de 0,05; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4 e 0,5 mm e com t_0 de 2; 2,5; 3; 3,5 e 4 mm. As medidas nominais da junta adesiva em L, do estudo de Li et al. [77], estão expostas na Figura 49.

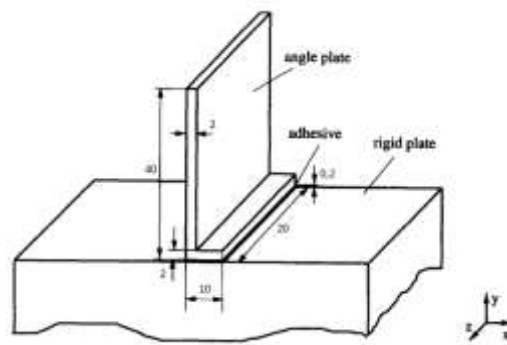


Figura 49 - Dimensões nominais da junta adesiva em L [77].

No estudo da influência de L_0 , t_a e t_0 numa junta adesiva com carregamento na direção y , as tensões resultantes estão expostas na Figura 50, Figura 51 e Figura 52, respetivamente [77].

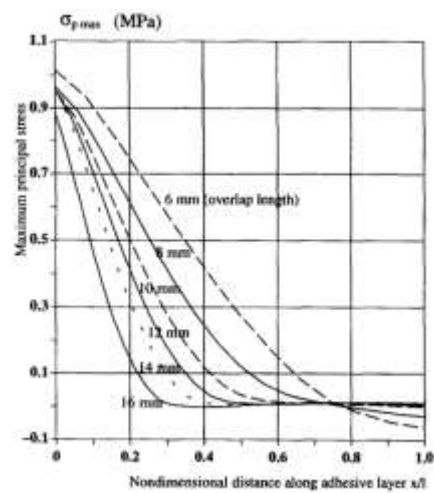


Figura 50 – Distribuição de tensões ao longo da sobreposição da junta, no estudo da influência de L_0 no caso carregamento carregada na direção y [77].

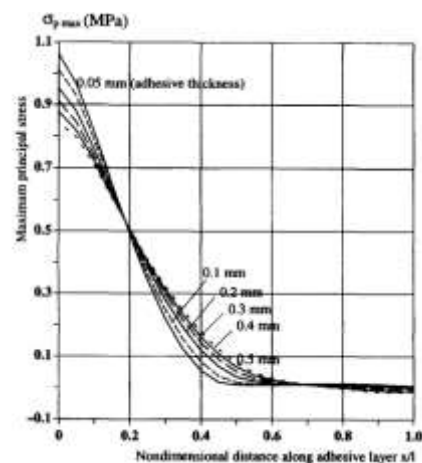


Figura 51 - Distribuição de tensões ao longo da sobreposição da junta, no estudo da influência de t_a no caso carregamento carregada na direção y [77].

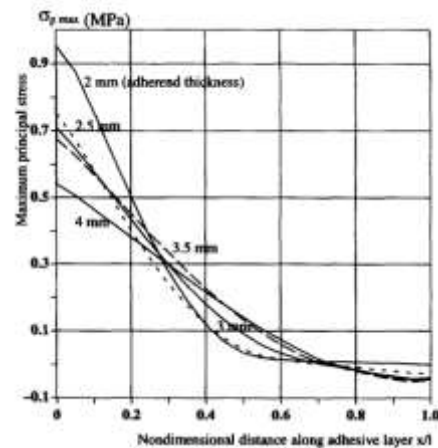


Figura 52 - Distribuição de tensões ao longo da sobreposição da junta, no estudo da influência de t_0 no caso carregamento carregada na direção y [77].

Ao analisar os resultados de Li et al. [77] observa-se que ao aumentar o L_0 o t_0 e o t_a os picos tensões, na extremidade da junta, diminuem. Neste estudo, conclui-se que o parâmetro geométrico estudado que maior influência tem sobre o pico de tensão, é t_0 , e o de menor influência é L_0 .

2.3.4 Stiffeners

Stiffeners são reforços de placas finas (peles) para lhes conferir maior rigidez (Figura 53). Existe várias configurações de *stiffeners* (Figura 54), um dos formatos mais comuns é o *stiffener* em *flat bar* ligado com uma junta em T.

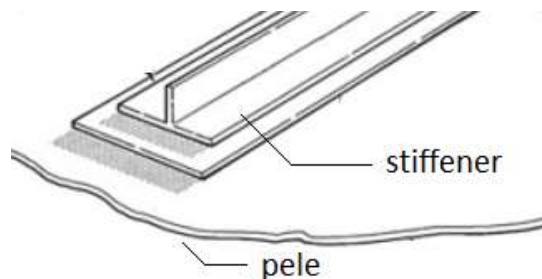


Figura 53 - Exemplo de *stiffener* [6].

Estes tipos de reforços são utilizados quando se pretende resistência e rigidez aliadas a um baixo peso global da estrutura, o que levou várias indústrias como a aeronáutica e a naval a desenvolverem e estudarem muitas soluções de *stiffeners*. Estes reforços são aplicados em inúmeras situações. Um exemplo muito comum é a utilização de *stiffeners* nos cascos das embarcações (Figura 55). Uma das grandes áreas em estudo de *stiffeners* é a aplicação de caracterização de estruturas em materiais compósitos.

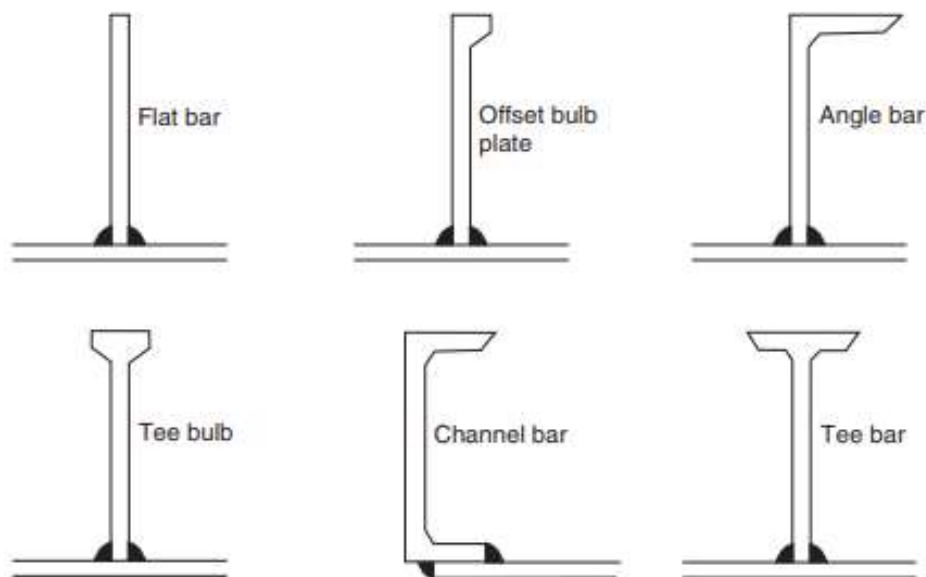


Figura 54 - Diferentes configurações de *stiffeners* ligados junta em T [78].

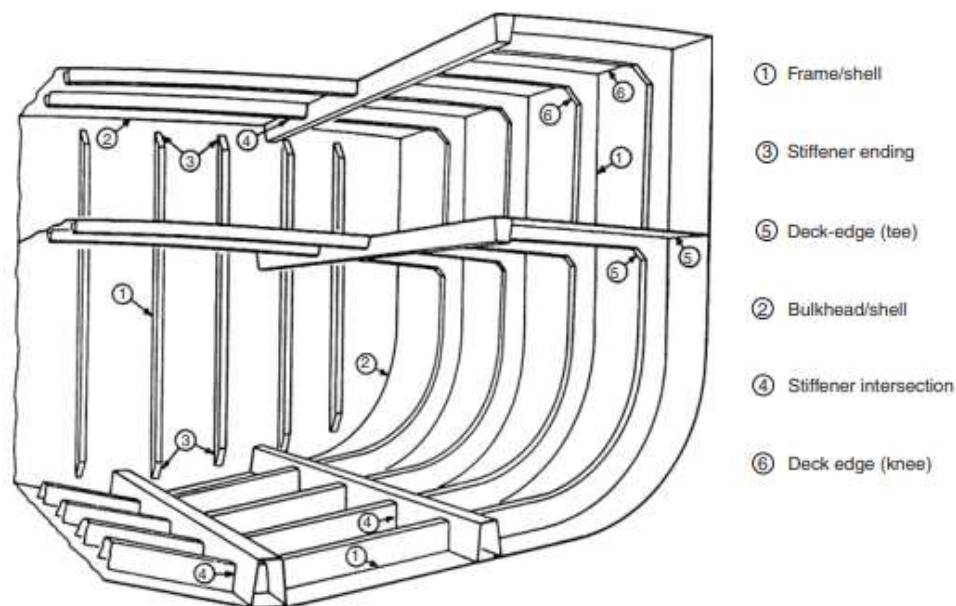


Figura 55- Exemplo de *stiffeners* numa aplicação de construção naval [78].

Existem artigos científicos que se debatem sobre este assunto e neste capítulo são mencionados alguns exemplos desses trabalhos científicos. Ulger e Okeil [79] estudaram um novo conceito de reforço, *strengthening-by-stiffening* (SBS), que é aplicado a painéis de tela prismáticos em vigas de aço de paredes finas por meio ligação adesiva e de material compósito *glass fiber reinforced polymers* (GFRP) (Figura 56).

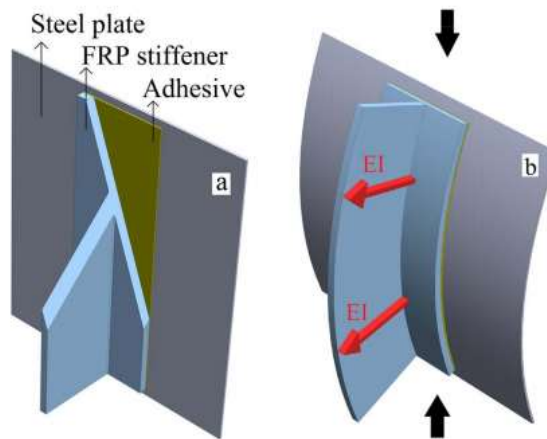


Figura 56 - *Strengthening-by-stiffening* com stiffener em T de GFRP [79].

A investigação consistiu analisar (experimentalmente e por MEF) o comportamento da placa de aço sem e com o *stiffener*, bem como a diferença entre dois adesivos na união do *stiffener* (Figura 57).

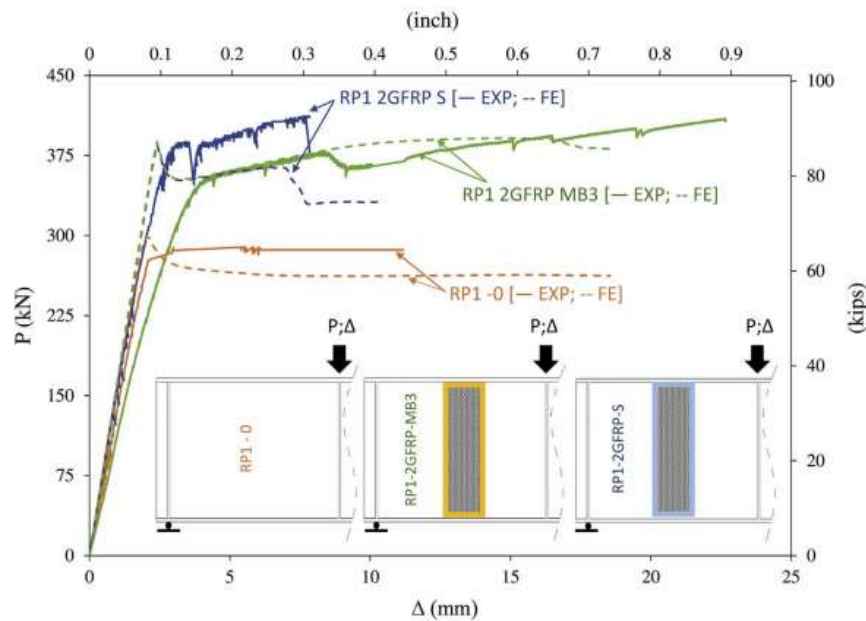


Figura 57- Comparação dos resultados obtidos da utilização de *stiffener* com adesivos diferentes [79].

A pesquisa de Freitas e Sinke [80] avaliou o desempenho de duas conexões pele-*stiffener* unidas por adesivo. São analisados dois *stiffeners*, um de material compósito (GFRP) e outro de *stiffener* de alumínio (Figura 58), que são ligados a uma pele de *fiber metal laminate* (FML). As juntas adesivas foram testadas usando o *stiffener pull-off tests* (SPOT), que é uma configuração típica usada para simular o comportamento estrutural de componentes em grande escala sujeitos a carregamento fora do plano (Figura 59), como a pressão interna de uma fuselagem ou uma zona de baixa pressão da borda de ataque. Na junta híbrida (*stiffener compósito e FML*), o dano começa na zona central do *stiffener* compósito. Surge uma delaminação instável, que se propaga do centro do

stiffener para a extremidade, através das camadas interlaminares do *Stiffener* (> 90% da rotura é inter/intralaminar) e, em áreas limitadas, o dano ocorre no adesivo (<10% de rotura no adesivo). Na junta metálica, a rotura começa no adesivo nas extremidades da sobreposição. A rotura instável propaga-se das extremidades para o centro da sobreposição. A falha completa ocorre no adesivo (100% de rotura coesiva). O P_{max} associado ao *stiffener* compósito (90% de rotura é inter/intralaminar) é 40 a 60% menor do que o P_{max} da junta com *stiffener* em alumínio (onde a rotura é 100% coesiva). Esta pesquisa identifica que, para usar a capacidade total de juntas híbridas adesivas, a adesão entre as fibras de carbono do laminado compósito, a força intralaminar, deve ser melhorada de modo a competir com as mais eficientes longarinas de alumínio.

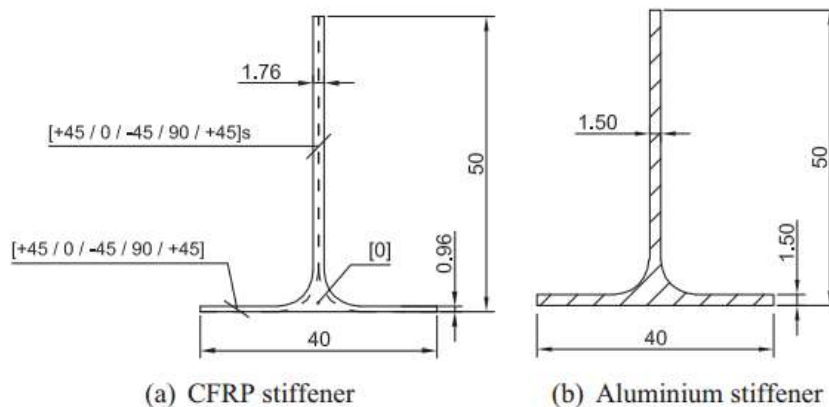


Figura 58- Configurações dos *stiffeners*: *stiffener* em CFRP (a); *stiffener* em alumínio [80].

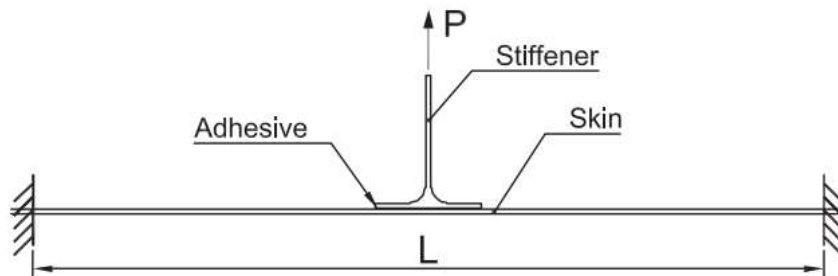


Figura 59 - Teste *Stiffener Pull-Off* (spot) [80].

Assim, de Freitas e Sinke [80] testaram os dois tipos de *stiffener* em T com dois adesivos (AF 163-2 e o EA 9696), numa análise geométrica onde variaram o L (100 mm, 200 mm e 300 mm). Os resultados obtidos para o *stiffener* compósito são representados na Figura 60 e os do *stiffener* metálico na Figura 61.

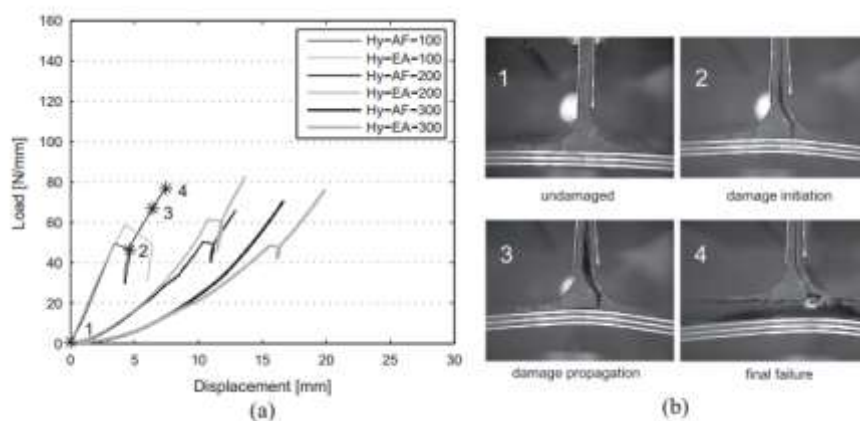


Figura 60 - Resultados obtidos para *stiffener* compósito: curva carga vs. deslocamento (a) e propagação da rotura (b) [80]

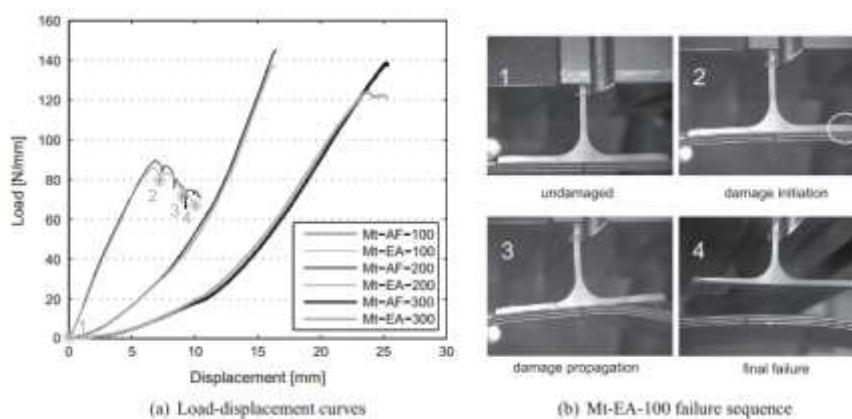


Figura 61- Resultados obtidos para *stiffener* de metal: curva carga vs. Deslocamento (a) e propagação da rotura (b) [80].

O artigo também apresenta resultados de uma análise por MEF, utilizando o ABAQUS®, onde a junta é descrita como um modelo tridimensional. Para as peças feitas de materiais isotrópicos, como o *stiffener* de alumínio e camada adesiva, foram utilizados elementos C3D20R ou C3D20 (elementos de 20 nós contínuos de 3 dimensões com ou sem integração reduzida, respetivamente). Os elementos de integração reduzida foram substituídos por elementos de integração completa na proximidade da linha de adesão, onde são esperadas altas tensões de arrancamento e tensão de corte. As peças compostas de material compósito (materiais ortotrópicos) foram modeladas usando elementos C3D20R e com o comando *composite layup* no ABAQUS®. Foram realizadas diferentes simulações para cada vão, *stiffener* e cada adesivo. O tamanho da malha foi o mesmo para todos os modelos.

Os resultados da análise por MEF são mostrados na Figura 62 e só foram realizados para um dos adesivos.

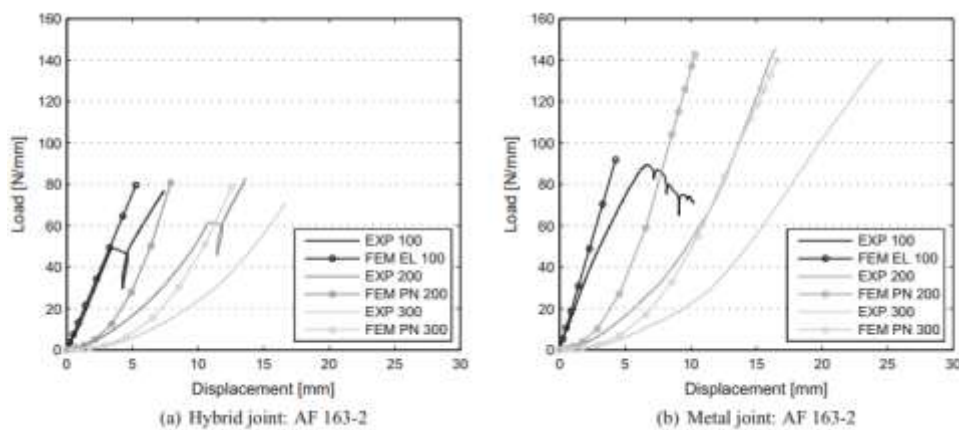


Figura 62- Resultados das simulações experimentais e por MEF: *stiffener* compósito (a); *stiffener* metálico (b) [80].

Usando propriedades de material elástico linear e geometria linear, a simulação conseguiu prever com precisão a rigidez de flexão da junta híbrida para 100 mm de extensão. As simulações com melhores resultados para as juntas com 200 e 300 mm de extensão, levaram em consideração os efeitos da geometria não linear, simulando com mais precisão a rigidez da pele. Além disso, o uso de propriedades elasto-plásticas melhora ligeiramente os resultados da simulação. No entanto, as previsões de rigidez estão bastante acima dos resultados experimentais [80].

Shenoi e Violette [81] examinaram a influência da geometria da junta em T na capacidade de transferir cargas fora do plano para uma junta do anteparo do casco (Figura 63). Em pequenas embarcações, estes anteparos são estruturas *stiffeners* que contribuem para a rigidez geral do conjunto do casco e do convés, onde o casco tem de reter a sua forma após o carregamento. Estes *stiffeners* são de particular importância em embarcações de alta velocidade ou iates à vela, uma vez que a capacidade de distribuir a carga depende da eficiência da junta em T.

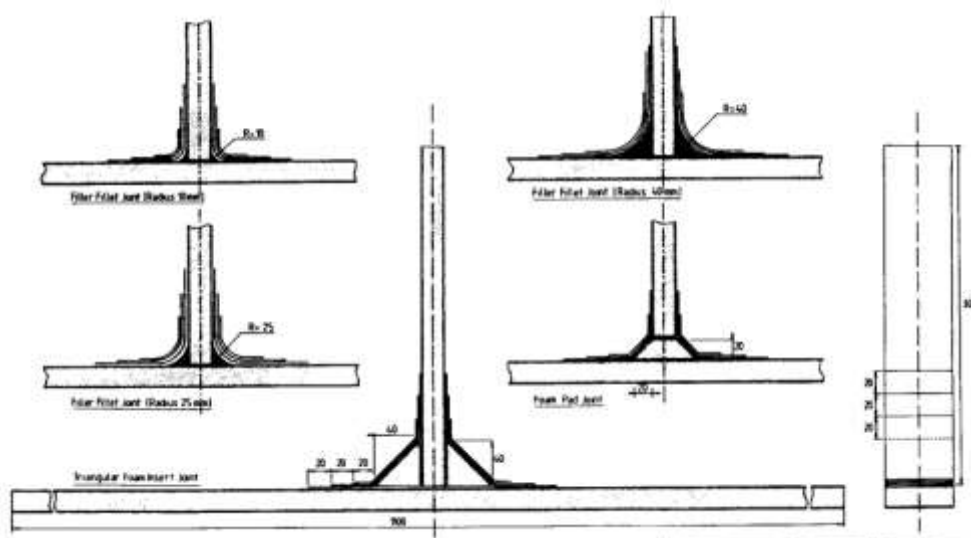


Figura 63- Geometrias típicas de junta em T na construção naval [81].

São usadas três geometrias típicas de juntas em T na construção naval. Shenoi e Violette [81] estudaram cinco juntas diferentes tendo em conta essas geometrias típicas (Figura 63). A escolha do tipo de geometria para um barco ou aplicação em particular depende de vários fatores, incluindo o requisito de resistência e o nível de tecnologia envolvido no estaleiro de construção do barco. No entanto, a especificações mais importantes para escolher o tipo de geometria da junta adequada são as relações: capacidade de carga/rigidez; capacidade de carga/peso e capacidade de carga/custo [81]. A análise foi feita considerando que a junta era composta pelos materiais que se descrevem de seguida. O laminado da base (do casco) é constituído por:

- Fibra de vidro unidirecional, 500 g/m² a 0°;
- Tecido de fibra de vidro 166 g/m² a 45°;
- Núcleo de espuma de PVC, 80 kg m³ e com espessura de 20 mm;
- Tecido de fibra de vidro, 166 g/m² a 45°;
- Fibra de vidro unidirecional, 500 g/m² a 0°.

Os detalhes do laminado da antepara são:

- Tecido de fibra de vidro, 292 g/m² a + 45°;
- Tecido de fibra de vidro, 292 g/m² a - 45°;
- Núcleo de espuma de PVC, 80 kg/m³ e com espessura 20 mm;
- Tecido de fibra de vidro, 292 g/m² a -45°;
- Tecido de fibra de vidro, 292 g/m² a + 45°.

O adesivo é de uma resina de base epóxida de baixa viscosidade com uma temperatura de pós-cura relativamente baixa, tipicamente de 45° a 50° C para melhorar as propriedades mecânicas. Devido à complexa geometria da junta adesiva, a análise foi feita usando uma simplificação da estrutura para modelar a junta *triangular foam* e a junta *foam pad*. O laminado da junta foi determinado como sendo igual em todas as geometrias, sendo de três camadas de tecido de vidro, com E de 292 gm⁻², $d=\pm 45^\circ$ e com uma sobreposição de 20 mm [81].

Os detalhes destes conjuntos foram introduzidos no modelo numérico (por MEF) com o objetivo de estimar as cargas máximas. A Tabela 1 lista as cargas para os cinco tipos de juntas [81].

Tabela 1 - Resultados da análise numérica [81].

	Joint Type	Load (N)
A	Triangular foam joint	1000
B	Foam pad joint	1050
C1	Filler fillet radius 10	995
C2	Filler fillet radius 25	1005
C3	Filler fillet radius 40	1055

As cinco diferentes configurações de junta foram fabricadas em condições de laboratório usando a técnica de saco a vácuo. Todos os ensaios foram realizados numa

máquina de testes JJ Instruments M30K, onde foi aplicada uma a carga de compressão no *stiffener* em T (o anteparo) e as duas extremidades da flange (o painel do casco) sendo simplesmente apoiadas nas extremidades. O carregamento foi mantido até à rotura [81]. O P_{max} , o deslocamento para o P_{max} e declives da curva $P-\delta$ estão resumidos na Tabela 2.

Tabela 2- Resumo dos resultados dos testes de compressão das juntas em T [81].

Type	Specimen	Failure Load (N)	Maximum Deflection (mm)	Slope (N/mm)
A	Triangular Foam Insert	852	85.10	10.012
B	Foam Pad	1080	91.00	11.868
C1	Filler Fillet Radius 10 mm	1070	95.41	11.215
C2	Filler Fillet Radius 25 mm	920	93.00	9.832
C3	Filler Fillet Radius 40 mm	1000	101.00	9.901

Neste estudo observa-se que os modelos numéricos apresentam valores de P_{max} ligeiramente superiores aos ensaios experimentais. Este facto pode ser pela falta de considerações adicionais na análise numérica [81].

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é feita a descrição do modelo coesivo usado na execução dos estudos numéricos realizados em ABAQUS®. São também caracterizados os aderentes em material compósito de matriz epóxida reforçado com fibras de carbono ou *carbon fiber reinforced polymers* (CFRP) e os adesivos em causa: Araldite® 2015, Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752. A validação do modelo coesivo é realizada através de comparações de dados numéricos e experimentais pré-existentes, relativos à resistência de juntas em T [82] e em L [83]. Após a validação do método em causa é efetuado um estudo numérico de juntas *stiffeners* em “T”, nomeadamente um estudo paramétrico da variação da geometria, a nível das tensões desenvolvidas, variável de dano e resistência das juntas.

3.1 Validação com dados experimentais

O objetivo principal desta secção é a de confirmar que o método numérico e a lei coesiva utilizada são de facto aplicáveis ao estudo de uma junta adesiva em T, através de uma comparação com vários estudos experimentais já realizados, como o de Carneiro e Campilho [82] e o Domingues et al. [83] que usam os adesivos epóxidos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o adesivo poliuretano Sikaforce® 7752. Este estudo comparativo permite demonstrar que os métodos numéricos implementados representam com precisão o comportamento das juntas adesivas em T.

3.1.1 Materiais

Para a realização do estudo numérico e respetiva validação foram experimentados três adesivos diferentes, o Araldite® 2015, o Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752 em substratos de material compósito (laminado) de matriz epóxida e reforçado com fibras de carbono (CFRP).

3.1.1.1 Aderentes

Os aderentes compósitos analisados são pré-impregnados de carbono epóxido unidirecional (SEAL® Texipreg HS 160 RM; Legnano, Itália) com 0,15 mm de espessura por deposição manual e endurecimento em prensa de placas quentes por 1 h a 130 ° C e a pressão de 2 bar. A Tabela 3 fornece as propriedades ortotrópicas elásticas de uma lâmina unidirecional para condições de cura idênticas [84]. As propriedades são relativas às seguintes direções: **1** - direção das fibras, **2** - direção perpendicular das fibras no plano da geometria e **3**- direção perpendicular fora do plano.

Tabela 3 - Tabela de propriedades do laminado (CFRP) [84].

Módulo de Young, E (MPa)	Coefficiente de Poisson, ν	Módulo de Elasticidade Transversal, G (MPa)
$E_1=1,09E+05$	$\nu_{12}=0,342$	$G_{12}=4315$
$E_2=8819$	$\nu_{13}=0,342$	$G_{13}=4315$
$E_3=8819$	$\nu_{23}=0,380$	$G_{23}=3200$

Para melhor rigor na caracterização do substrato em CFRP é admitido que este tenha as propriedades intralaminares e interlaminares descritas na Tabela 4. Estas propriedades foram determinadas e validadas por Campilho et al. [85] através de estudos experimentais.

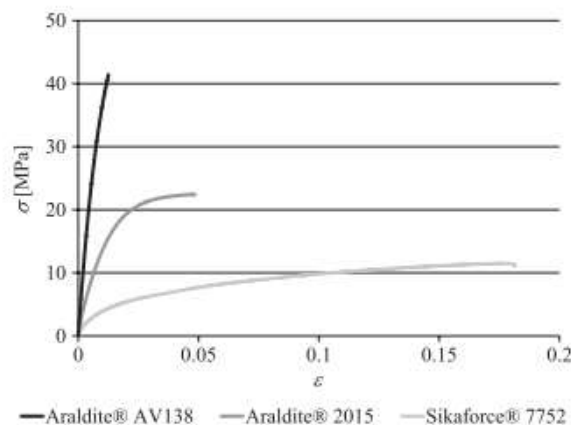
Tabela 4- Propriedades intralaminares e interlaminares do material CFRP [85].

Modelo puro	I	II
d_i (N/mm ³)	10^6	10^6
$\sigma_{r,i}$ (MPa)	42,6	39,3
G_{ic} (N/mm)	0,54	0,93

3.1.1.2 Adesivos

Todos os adesivos utilizados nos ensaios são de bi-componente (resina + endurecedor), dois de base epóxico (Araldite® AV138 e Araldite® 2015) [86], e um de base de poliuretano (Sikaforce® 7752) [84, 87]. Os três adesivos apresentam uma viscosidade baixa, o que facilita a sua deposição nas superfícies a ligar, permitindo variar facilmente a espessura de adesivo. De seguida é demonstrada a caracterização mecânica dos três adesivos.

As curvas σ - ϵ dos provetes maciços de adesivo, ensaiados à tração são apresentadas na Figura 64.

Figura 64 - Curvas σ - ϵ referentes aos adesivos em estudo [82].

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 é considerado um adesivo estrutural e fabricado pela empresa Huntsman Advanced Materials, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil, mas de elevada resistência (Tabela 5), sendo adequado para ligar diferentes materiais tais como metais, polímeros ou compósitos. É um adesivo de base epóxico, termoendurecível e composto por dois elementos, resina AV138 e endurecedor HV998. É um adesivo que quando é misturado numa combinação na proporção de 100g:40g (recomendação do fabricante), apresenta uma elevada rigidez e uma boa resistência mecânica e química, permitindo ainda a cura à temperatura ambiente. Este adesivo suporta elevadas temperaturas de trabalho e ambientes bastante agressivos. As vantagens que se destacam neste adesivo são a excelente resistência química, baixa emissão de gases e perda de voláteis, resistência a temperaturas até 120°C, temperatura de cura acima de 5°C e boa capacidade de preenchimento e baixo escorrimento.

Tabela 5- Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [86, 88, 89]

Propriedade	Unidade S.I.	Valor
Módulo de Young, E	GPa	4,89 ± 0,81
Coefficiente de Poisson, ν	----	0,35 ^a
Tensão de Cedência à Tração, σ_e	MPa	36,49 ± 2,47
Tensão de Ruptura à Tração, σ_f	MPa	39,45 ± 3,18
Deformação de Ruptura à Tração, ϵ_f	%	1,21 ± 0,10
Módulo de Elasticidade Transversal, G	GPa	1,56 ± 0,01
Tensão de Cedência ao Corte, τ_e	MPa	25,10 ± 0,33
Tensão de Ruptura ao Corte, τ_f	MPa	30,20 ± 0,40
Deformação de Ruptura ao Corte, γ_f	%	7,80 ± 0,70
Tenacidade à Tração, G_{IC}	N/mm	0,20 ^b
Tenacidade ao Corte, G_{IIC}	N/mm	0,38 ^b

^a - Dados do fabricante; ^b - Estimado na referência [89]

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 é considerado um adesivo estrutural fabricado pela empresa Huntsman Advanced Materials, caracteriza-se pela sua baixa contração, pelo seu comportamento moderadamente dúctil e pela alta resistência ao corte e à clivagem (Tabela 6) [86].

É um adesivo de base epóxico, termoendurecível e composto por dois elementos, vendido em cartucho. A sua cura é feita à temperatura ambiente, e a sua mistura é realizada através de uma pistola manual, o que permite uma aplicação simples com recurso a um bico que mistura os dois componentes numa proporção de 50g:50g.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [86]

Propriedade	Unidade S.I.	Valor
Módulo de Young, E	GPa	$1.85 \pm 0,21$
Coeficiente de Poisson, ν	----	0,33 ^a
Tensão de Cedência à Tração, σ_e	MPa	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de Ruptura à Tração, σ_f	MPa	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de Ruptura à Tração, ε_f	%	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de Elasticidade Transversal, G	GPa	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de Cedência ao Corte, τ_e	MPa	$14,60 \pm 1,30$
Tensão de Ruptura ao Corte, τ_f	MPa	$17,90 \pm 1,80$
Deformação de Ruptura ao Corte, γ_f	%	$43,90 \pm 3,40$
Tenacidade à Tração, G_{IC}	N/mm	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao Corte, G_{IIC}	N/mm	$4,70 \pm 0,34$

^a - Dados do Fabricante

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O Sikaforce® 7752 L60 é um adesivo poliuretano estrutural tixotrópico de dois componentes, formado por uma resina polioli com cargas e endurecedor de base isocianato, com baixa emissão de gases e perdas voláteis, destacando-se também uma boa resistência a altas temperaturas [90]. Trata-se de um adesivo que apesar de apresentar uma estrutura bastante estável e flexível, possui uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento. Faneco et al. [87] caracterizaram este adesivo. As propriedades mecânicas do adesivo são apresentadas na Tabela 7 [84, 87].

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [84, 87]

Propriedade	Unidade S.I.	Valor
Módulo de Young, E	GPa	0.49 ± 0.09
Coeficiente de Poisson, ν	----	0,30 ^a
Tensão de Cedência à Tração, σ_e	MPa	3.24 ± 0.48
Tensão de Ruptura à Tração, σ_f	MPa	11.48 ± 0.25
Deformação de Ruptura à Tração, ε_f	%	19.18 ± 1.40
Módulo de Elasticidade Transversal, G	GPa	0.19 ± 0.01
Tensão de Cedência ao Corte, τ_e	MPa	5.16 ± 1.14
Tensão de Ruptura ao Corte, τ_f	MPa	10.17 ± 0.64
Deformação de Ruptura ao Corte, γ_f	%	54.82 ± 6.38
Tenacidade à Tração, G_{IC}	N/mm	2.36 ± 0.17
Tenacidade ao Corte, G_{IIC}	N/mm	5.41 ± 0.47

^a - Dados do Fabricante

3.1.2 Formulação do modelo de dano triangular

Como foi anteriormente referido, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [32]. Existem vários MDC, aplicados em diferentes situações, consoante o comportamento dos materiais em causa ou das interfaces a serem simuladas [42], como o modelo linear, parabólico [38], triangular [39], exponencial [40], polinomial [41] e trapezoidal [35] de forma a obter resultados mais precisos.

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [43]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [44] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 29).

A lei pura é caracterizada pelo facto de a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na respetiva lei coesiva. O modo misto utiliza critérios energéticos e de tensões para combinar as leis puras de tração e de corte [46]. Neste caso, os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e uma relativa à deformação de corte, sendo estas determinadas por via de uma análise cinemática do elemento. É preciso realçar que em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezáveis.

Antes da existência de dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como em (1) [86].

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

A matriz \mathbf{K}_{COH} tem a rigidez da ligação adesiva. Num caso mais específico, em que uma formulação local é usada para simular fraturas numa espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores muito elevados, com a finalidade de não criar deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [86]. Para o caso de uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, têm-se uma aproximação fiável aos parâmetros de rigidez admitindo $k_{nn}=E$, $k_{ss}=G$ e $k_{ns}=0$, em que E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Assim, ao considerar estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [46].

Na lei em modo misto, a inicialização do dano pode ser definida por diferentes critérios, sendo o mais comum o critério quadrático de tensões [86].

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

onde “<>” são os parênteses de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. Este critério é reconhecido pela sua precisão, como indicado em trabalhos anteriores [91]. Quando t_n^0 é atingido (Figura 29), segundo a expressão (2), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de homólogos (Figura 29) é prevista por um critério linear energético, em função de G_{IC} e G_{IIC}

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

Através do método enunciado é possível estudar a variável do dano ao longo da junta adesiva. Um dos parâmetros para este estudo é a *stiffness degradation (SDEG)*. Este critério revela a degradação dum elemento coesivo entre 0 e 1, sendo 0 o valor para quando não existe dano no elemento e 1 para quando ocorre a rotura total. Os valores de *SDEG* definem de forma percentual a plastificação do adesivo, sendo que se o valor de *SDEG* do adesivo estiver dentro dos limites, significa que este se encontra em processo de amaciamento.

3.1.3 Geometrias de validação

Para a validação do método numérico em estudo, são apresentados dois estudos de juntas solicitadas à tração (*pull-off*), realizados em trabalhos anteriores: a primeira é uma junta adesiva em T com substratos em alumínio desenvolvida por Carneiro e Campilho [82], a outra é uma junta adesiva em L com substratos de alumínio e CFRP estudada por Domingues et al. [83].

3.1.3.1 Junta em T

A geometria de validação das leis coesivas, representativas dos adesivos, foi desenvolvida por Carneiro e Campilho [82]. Esta validação consiste em comparar os resultados experimentais com os resultados numéricos de uma junta em T, representada na Figura 65 e na Tabela 8.

Os valores do raio dos substratos é descrito como R , a espessura da camada de adesivo é descrita como t_a , a espessura do substrato “L” é denominado de t_{p2} , a espessura do substrato de base é denominado de t_{p1} , o comprimento do aderente de base é descrito como L_T , o comprimento de sobreposição da junta é representado por L_0 , a altura

perpendicular à base dos substratos em “L” é designada de L_A e a largura da junta testada é representada por B .

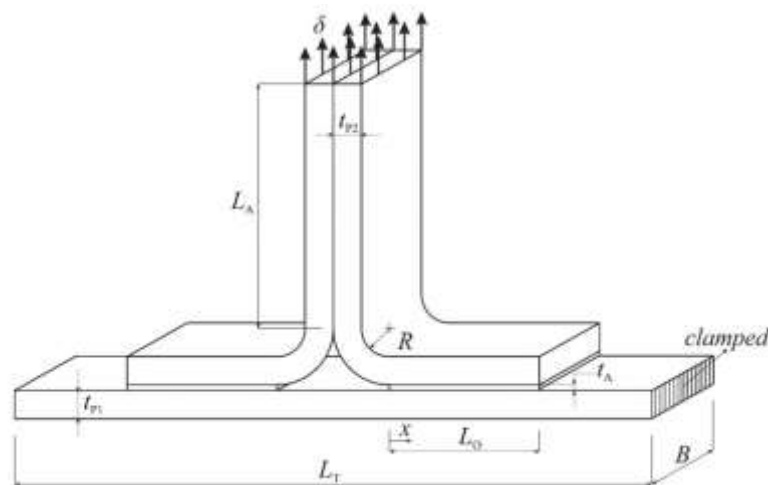


Figura 65 - Junta em T da geometria de validação [82].

Tabela 8 - Dimensões do estudo experimental para geometria da junta em T (adaptado de [82]).

Estudos geométricos	Parâmetros	Valor (mm)
	Espessura da pele, t_{p1}	3
	Espessura do substrato, t_{p2}	1; 2; 3 e 4
	Espessura do adesivo, t_a	0.2
Estudo da junta em T	Raio do T, R	5; 5,5; 7 e 7,5
	Largura de sobreposição, B	25
	Altura do T, L_a	60
	Comprimento ente apoios, L_t	100
	Comprimento de sobreposição, L_o	25

3.1.3.1.1 Condições de análise numérica

A análise numérica da validação do método foi realizada através do *software* ABAQUS®. Este programa informático permite fazer o estudo através do método de elementos finitos com recurso ao MDC para a previsão da resistência de todo o tipo de ligações adesivas.

Carneiro [92] expõe como a análise numérica foi desenvolvida para simular as condições do estudo de uma junta adesiva em T. A construção dos modelos numéricos foi levada a cabo tendo em consideração as condições de simetria verticais, o que permitiu considerar apenas metade da estrutura e assim simplificar a geometria e diminuir o esforço computacional requerido. Na Figura 66 está representada metade de uma junta em T. Dado esta ser simétrica, só é necessário modelar um L e metade do aderente base.

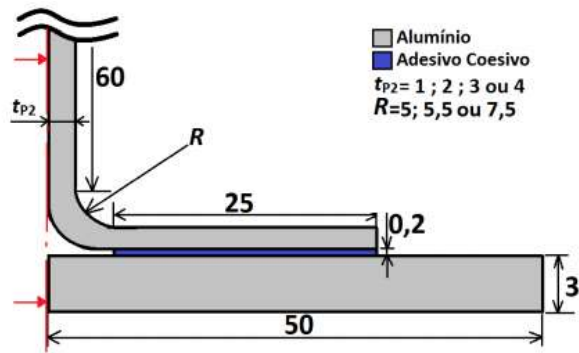


Figura 66 - Esquema do modelo da junta em T sem adesivo de preenchimento [92].

O primeiro passo é definir a geometria da junta, que é descrita detalhadamente no subcapítulo 3.1.3. Após a geometria definida é necessário enunciar os materiais dos substratos e dos adesivos. Também deve-se classificar o tipo de elemento de cada material, como por exemplo Sólido ou Coesivo (Figura 66).

Após a definição dos materiais é necessário associá-los a *part's* que consiste na realização do desenho da estrutura através dos limites exteriores e posterior divisão em partições, como está representado na Figura 67. É neste passo que se fazem as alterações no valor de t_{p2} , que toma valores de 1, 2, 3 ou 4 mm. É importante referir que a camada de adesivo é modelada com propriedades coesivas e com espessura de 0,2 mm, e que se considerou uma secção do tipo coesivo.

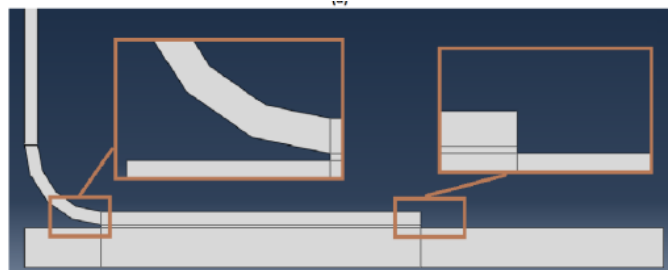


Figura 67 - Imagem do software ABAQUS® referente às partições definidas da junta [92].

A carga simulada no *software* da junta em estudo e as restantes condições fronteira estão representados na Figura 68, sendo este passo definido na aba *load* do *software*.

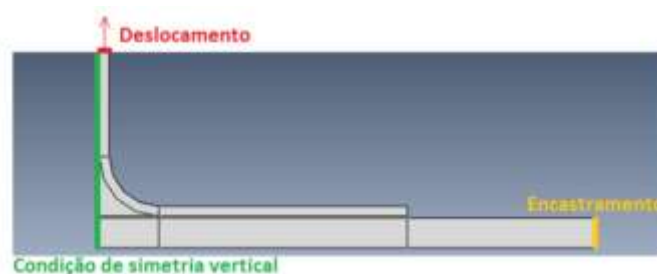


Figura 68 - Esquema representativo das condições fronteiras aplicadas aos modelos [92].

No módulo *step* é introduzido o número máximo de incrementos que o modelo pode conter, assim como os limites de tamanho destes. Na construção do modelo numérico a incrementação é um aspeto importante a ter em conta. Ao definir a incrementação do modelo, é necessário definir um tamanho de incremento mínimo o suficiente para que o *software* não tenha problemas de convergência na zona de propagação do dano. Por outro lado, o limite superior de incrementos que a análise pode conter deve ser suficientemente elevado para que esta não termine por exceder o número de incrementos permitido. Na Tabela 9 são referidos os valores utilizados na incrementação.

Tabela 9 - Definições de incrementação no *software* ABAQUS® [92].

Nº de incrementos	10000
Tamanho inicial do incremento	0,0025
Tamanho mínimo do incremento	10^{-20}
Tamanho máximo do incremento	0,0025

O último passo antes da realização do estudo propriamente dito é a criação da malha. Esta consiste num conjunto interligado de elementos que podem ter propriedades diferentes.

A definição do tipo de malha e da forma dos elementos desta, é feita no comando *mesh control* do ABAQUS®. Na zona do deltoide a malha tem uma configuração *Free* e de geometria predominantemente quadrangular, enquanto no restante da junta a configuração é *structured* com geometria quadrangular. A Figura 69 mostra refinamentos típicos de malha para a análise de rotura (a) e de tensões (b) [92].

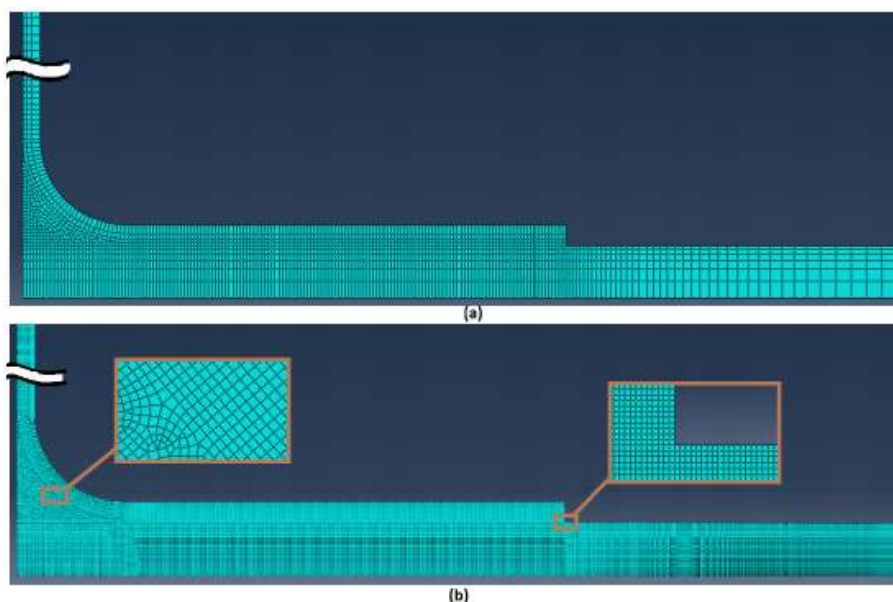


Figura 69 - Malha refinada para: análise de resistência (a) e análise de tensões (b) [92].

A malha tem dois tipos de refinamento, um para o estudo do dano e resistência da junta e um outro refinamento para o estudo das tensões que é dez vezes mais refinada. Esta última precisa de ser muito refinada para poder obter precisão dos picos de tensão, nas extremidades da zona de sobreposição.

3.1.3.1.2 Testes experimentais

As amostras das juntas em T estudadas para a validação do método numérico, são referentes aos estudos de Carneiro e Campilho [82] e Carneiro [92]. Para o adesivo Araldite® AV138, a preparação da mistura é feita manualmente numa proporção de resina/endurecedor de 10g/4g. Após a mistura do adesivo, a aplicação é feita manualmente. Já o adesivo Araldite® 2015 é fornecido em bisnagas 50 ml + 50 ml, que são aplicadas através do uso de uma pistola manual de pressão, que faz a respetiva homogeneização através do bico de mistura dos dois componentes.

Para as juntas em T o processo de fabrico é descrito pelos seguintes passos:

- Corte dos vários aderentes usados na construção da junta em T. Cada junta é constituída por dois aderentes de comprimento igual para formar os aderentes em L e de um aderente de base onde os aderentes em L são colados;
- Dobragem dos aderentes em L numa prensa manual;
- Lixagem dos aderentes nas superfícies de colagem dos aderentes;
- Limpeza das superfícies lixadas com papel embebido em acetona;
- Corte de uma fita calibrada com 0,2 mm de espessura para garantir os valores desejados de t_A e L_0 ;
- Aplicação de desmoldante (Loctite Frekote® 770-NC) nas fitas calibradas de 0,2 mm;
- Marcação da posição de colagem das fitas calibradas no provete de base;
- Fixação das fitas calibradas com uso de adesivo cianoacrilato (Figura 70);

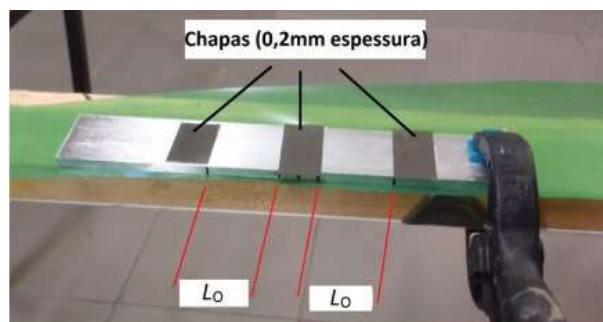


Figura 70 -Chapas normalizadas de 0,2 mm de espessura coladas ao aderente base [92].

- Aplicação do adesivo nas superfícies de colagem dos aderentes. Neste ponto a aplicação do adesivo diferiu nos dois tipos de adesivos. No caso das juntas com o adesivo Araldite® 2015, este é aplicado em “zig-zag” e diretamente no

aderente “base” (Figura 71). Quanto ao adesivo Araldite® AV138, este é aplicado diretamente nas superfícies dos aderentes em forma de L;



Figura 71 - Adesivo Araldite® 2015 aplicado em "zig-zag" no aderente base [92].

- Montagem dos vários aderentes e posterior fixação com recurso a molas;
- Após o processo de cura das juntas (temperatura ambiente durante pelo menos 7 dias), procedeu-se à remoção dos excessos de adesivo nas juntas com o auxílio de um alicate;
- Após a remoção dos excessos de adesivo, deve-se retirar as fitas calibradas de 0,2 mm de espessura. Esta etapa da preparação das juntas deve ser feita de forma cuidada para não danificar a colagem da junta, pelo que nos casos em que esta operação se revelou complicada, as fitas não foram extraídas. Posteriormente à remoção das chapas procedeu-se a uma limpeza lateral das juntas e à limpeza de filetes de adesivo restante com o auxílio de um mandril;

Após o fabrico das juntas é efetuado o teste à tração (*pull-off*) onde os aderentes de base são encastrados nas extremidades (Figura 72).

Para a realização dos ensaios devem ser definidas as velocidades de ensaio para os vários tipos de junta. Nas juntas adesivas com Araldite® AV138 foi usada a velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. No caso das juntas com o adesivo Araldite® 2015 foram testadas a uma velocidade de 1 mm/min. O deslocamento da pinça é realizado sempre a velocidade constante até que ocorra a rotura total das juntas, ou seja, até que ocorra separação total dos aderentes em T com o aderente de base.

O encastramento das juntas é garantido por um suporte em alumínio construído para esse efeito (Figura 72). Este suporte prende os aderentes de base, entre pontos de encastramento, através de barras móveis aparafusadas de forma a permitir um comprimento livre das juntas em “T” de 100 mm. Após o ensaio de cada uma das juntas, a sua remoção é possível através do desaperto dos parafusos das barras do suporte em alumínio e do desaperto das garras superiores da máquina de ensaios.

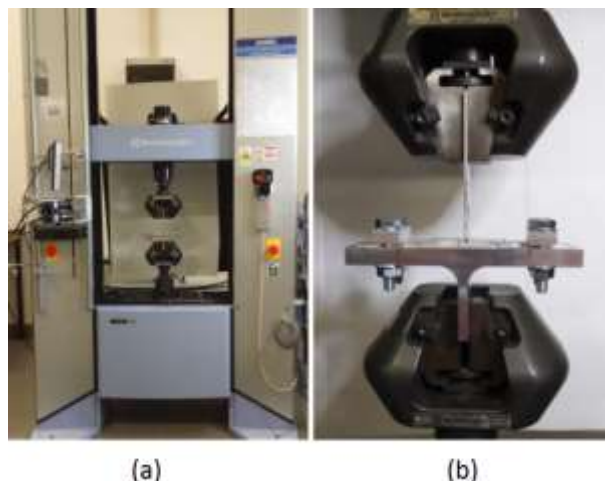


Figura 72 - Testes à tração (*pull-off*): máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (a); teste da junta em “T” (b) [92].

3.1.3.1.3 Resultados

Para cada adesivo e para cada valor de t_{p2} obtiveram-se vários gráficos representativos do comportamento dos diversos provetes ensaiados. Neste subcapítulo são analisadas as curvas $P-\delta$ (P-delta), os modos de rotura e a resistência das juntas em função de t_{p2} .

3.1.3.1.3.1 Modos de rotura

Segundo Carneiro [92], todos os ensaios de junta em T (para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015) tiveram uma rotura coesiva. Após a rotura os substratos, estes apresentavam adesivo em ambas as superfícies o que significa que a ligação adesiva é mais forte do que a resistência interna dos próprios adesivos. Este modo de rotura resulta de uma boa preparação das superfícies dos aderentes, que permite uma melhor molhagem do adesivo nos aderentes. O modo de rotura foi idêntico para todos os ensaios dos quatro valores de t_{p2} . Na Figura 73 está representada a superfície de rotura do adesivo Araldite® AV138 para o valor $t_{p2}=2$ mm que é representativa do resultado de todos os ensaios.



Figura 73 - Superfície de rotura do adesivo Araldite® AV138 para o valor $t_{p2}=2$ mm [92]

Na Figura 74 está representada a superfície de rotura do adesivo Araldite® 2015 para o valor $t_{p2}=1$ mm que é representativa do resultado de todos os ensaios.



Figura 74 - Superfície de rotura do adesivo Araldite® 2015 para o valor $t_{p2}=1$ mm [92].

3.1.3.1.3.2 Curvas p delta ($P-\delta$)

A partir da análise das curvas $P-\delta$ das juntas coladas nos estudos de Carneiro [92], verifica-se que existe uma boa concordância entre ensaios, no que diz respeito à rigidez inicial e valor de P_{max} (carga máxima atingida no teste).

Para os adesivos epóxicos (Araldite® AV138 e Araldite® 2015) a junta apresenta inicialmente um comportamento elástico até que se atinja P_{max} . O comportamento elástico caracteriza-se por uma evolução aproximadamente linear dos valores de P em relação a δ . Após se atingir o P_{max} a junta apresenta um comportamento plástico até atingir um ponto onde ocorre a rotura total.

Na Figura 75 representam-se as curvas $P-\delta$ registadas dos ensaios dos provetes de juntas em T coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de t_{p2} definidos.

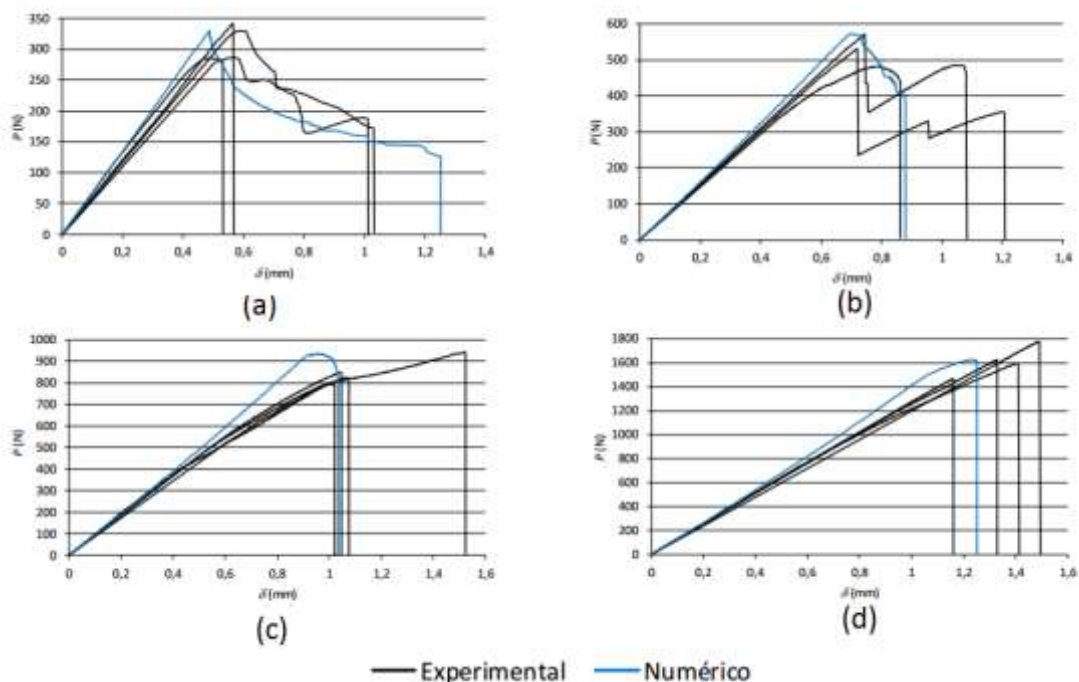


Figura 75 - Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em T para o adesivo Araldite® AV138 onde para $t_{p2}=1$ mm; 2 mm; 3 mm e 4 mm correspondem à curva (a); (b); (c) e (d) respetivamente [92].

As curvas $P-\delta$ dos ensaios experimentais e numéricos referentes para o adesivo Araldite® 2015, da junta em T, estão expostos na Figura 76.

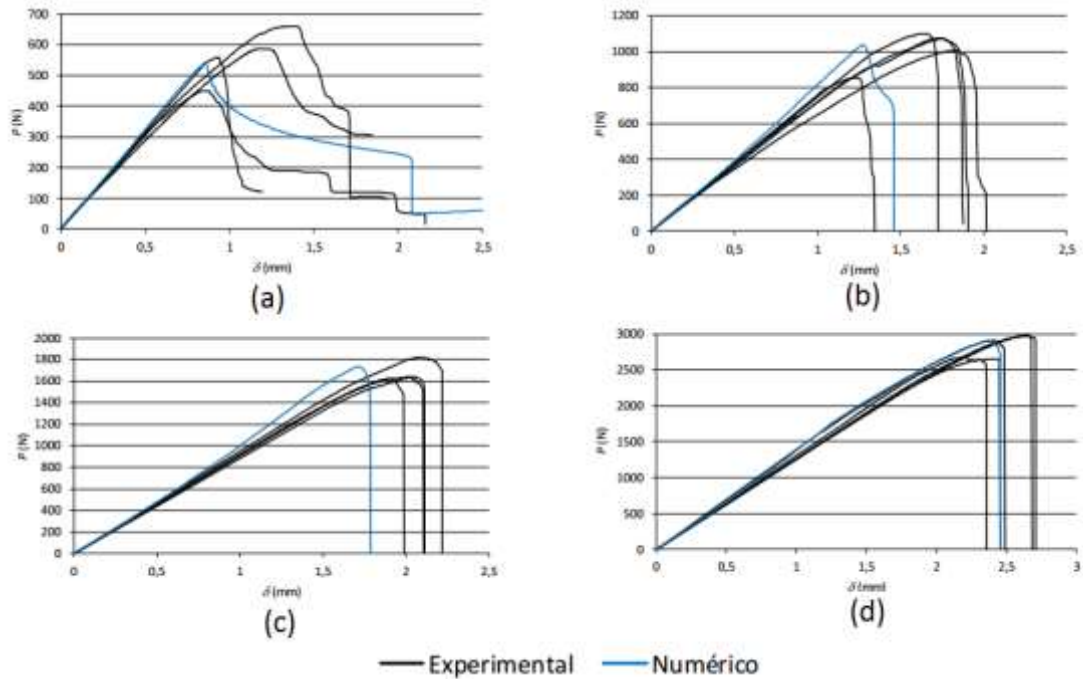


Figura 76 - Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em T, para o adesivo Araldite® 2015 onde para $t_{p2}=1$ mm; 2 mm; 3 mm e 4 mm correspondem à curva (a); (b); (c) e (d) respectivamente [92].

3.1.3.1.3.3 Resistência da junta

Neste capítulo é feita uma comparação dos resultados da resistência máxima das juntas entre a análise numérica e os ensaios experimentais. É analisado o P_{max} (força máxima atingida no teste *pull-off*) para as várias espessuras dos substratos estudados, sendo estas descritas como t_{p2} .

Os resultados paramétricos, para as juntas em T com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 são representados na Figura 77, onde o P_m corresponde ao P_{max} .

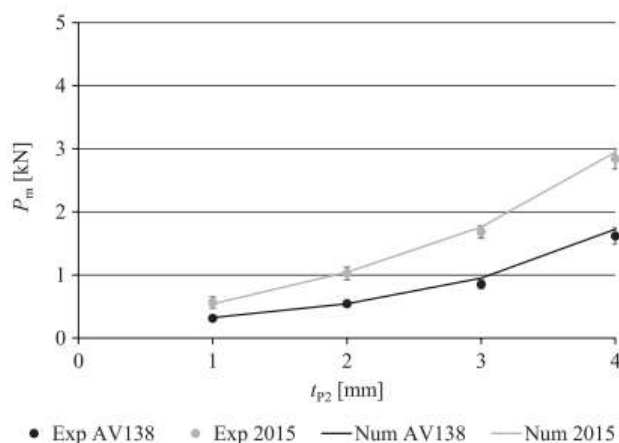


Figura 77 - Resultados experimentais e numéricos, para a junta em T, ao longo das várias espessuras estudadas [82].

Considerando os valores de P_{max} das juntas adesivas com Araldite® AV138, verifica-se que os valores numéricos são superiores aos valores experimentais para todos os

valores de t_{p2} exceto quando este parâmetro toma valores de 2 mm, que neste caso regista um valor experimental mais elevado em 0,4%. Entre os restantes valores de t_{p2} , 1, 3 e 4 mm, os valores de resistência experimentais foram inferiores aos valores numéricos em 4,4%, 10,4% e 6,3%, respetivamente. Em função dos reduzidos desvios obtidos, em que a diferença máxima é de 10,4%, pode-se confirmar que o método numérico é fiável para previsão de resistência do tipo de juntas em T coladas com o adesivo Araldite® AV138 [82].

Para as juntas adesivas em T coladas com o adesivo Araldite® 2015, os valores de P_{max} do estudo numéricos são superiores aos valores experimentais em todos os valores de t_{p2} , exceto para $t_{p2}=1$ mm, que regista um valor experimental mais elevado em 4,3%. Entre os restantes valores de t_{p2} (2, 3 e 4 mm) os valores de resistência experimentais foram inferiores aos valores numéricos em 2,2%, 4,5% e 3,5%, respetivamente. A diferença máxima entre valores numéricos e experimentais das juntas adesivas com o adesivo Araldite® 2015 é de 4,5%, o que permite afirmar que o método numérico é fiável para previsão de resistência neste tipo de juntas [82].

3.1.3.2 Junta em L

Para além da validação das leis coesivas dos adesivos também é necessário validar o comportamento do material compósito, de que são constituídos os substratos. Domingues et al. [83] estudaram experimentalmente e numericamente uma ligação adesiva em L com substratos em alumínio e CFRP. A geometria estudada é similar à junta em T sendo possível fazer a validação por este método (Figura 78 e Tabela 10).

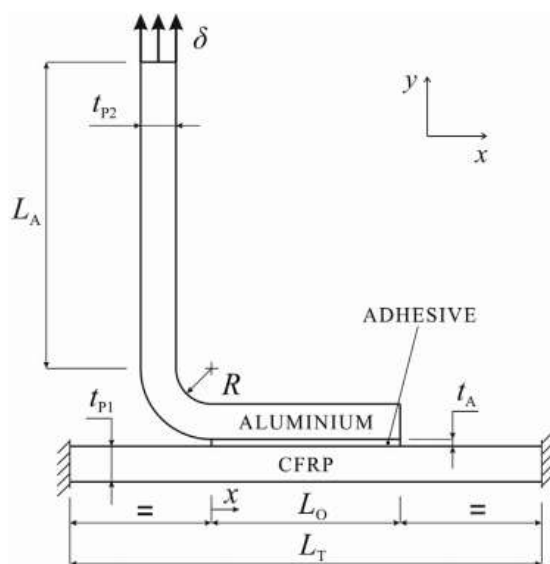


Figura 78 - Geometria da junta em L para a validação do método [83].

Tabela 10 - Dimensões do estudo experimental para geometria da junta em L (adaptado de [83]).

Estudos geométricos	Parâmetros	Valor (mm)
Estudo da junta em L	Espessura da pele, t_{p1}	3
	Espessura do substrato, t_{p2}	1; 2; 3 e 4
	Espessura do adesivo, t_a	0,2
	Raio do T, R	5
	Largura de sobreposição, B	25
	Altura do T, L_a	60
	Comprimento ente apoios, L_t	80
	Comprimento de sobreposição, L_o	25

3.1.3.2.1 Condições de análise numérica

Para a junta adesiva em L as condições de análise numérica são idênticas às enunciadas para a junta em T no capítulo 3.1.3.1.1.

Domingues et al. [83] descreve que modelação feita em Abaqus® realizou-se para um modelo 2D com as dimensões indicadas para a junta em L no capítulo 3.1.3.2. Este modelo tem como condições fronteira o encastramento e o deslocamento δ imposto (Figura 79).

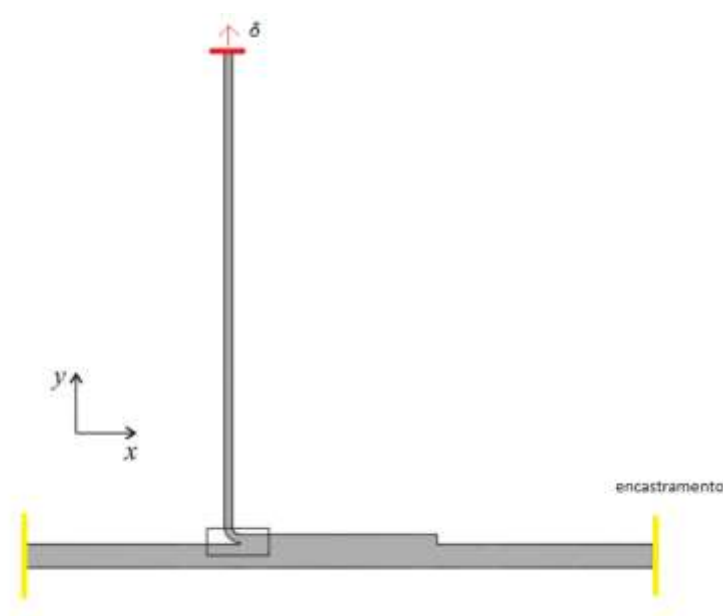


Figura 79 - condições fronteira da simulação da junta em L (adaptado de [83]).

O modelo numérico da junta adesiva em L tem uma malha *structured* com geometria quadrangular. Esta é construída segundo as mesmas condições da junta em T, tendo um refinamento maior para o estudo das tensões (dez vezes superior), de forma a obter os picos de tensão ao longo da junta (Figura 80).

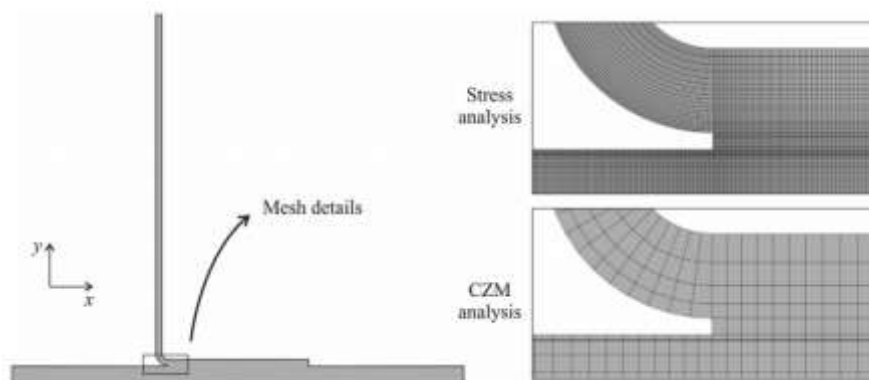


Figura 80 – detalhe da malha e o seu refinamento no estudo da junta em L para o caso de $t_{p2}=1$ mm [83].

3.1.3.2.2 Testes experimentais

As amostras das juntas em L estudadas para a validação do método numérico, são referentes ao estudo de Domingues et al. [83]. Segundo este estudo, o processo de fabrico das juntas semelhante entre si, com a exceção da preparação e aplicação dos adesivos nos aderentes. Para o adesivo Araldite® AV138, a preparação da mistura é feita da mesma forma à indicada no capítulo anterior (3.1.3.1.2), manualmente numa proporção de resina/endurecedor de 10g/4g. Após a mistura do adesivo, a aplicação é feita manualmente. O adesivo Sikaforce®-7752 tem a preparação muito similar à do adesivo Araldite® AV138, mudando apenas a proporção de resina/endurecedor para 10g/2g.

Para as juntas em L o processo de fabrico é descrito pelos seguintes passos:

- Preparo de uma placa em CFRP unidirecional de pré-impregnado usando uma prensa quente;
- Corte de um aderente de base onde o aderente em L é colado;
- Corte dos vários aderentes usados na construção da junta em L;
- Dobragem dos aderentes em L numa prensa manual;
- Preparo das superfícies de colagem dos aderentes;
- Limpeza das superfícies lixadas com papel embebido em acetona;
- Corte de uma fita calibrada com 0,2 mm de espessura para garantir os valores desejados de t_A e L_O ;
- Aplicação de desmoldante nas fitas calibradas de 0,2 mm;
- Marcação da posição de colagem das fitas calibradas no provete de base;
- Aplicação do adesivo nas superfícies de colagem dos aderentes, estes são aplicados diretamente nas superfícies dos aderentes em forma de L;
- Montagem dos vários aderentes e posterior fixação com recurso a molas;
- Após o processo de cura das juntas, procedeu-se à remoção dos excessos de adesivo nas juntas;

- Após a remoção dos excessos de adesivo, deve-se retirar as fitas calibradas de 0,2 mm de espessura. Esta etapa da preparação das juntas deve ser feita de forma cuidadosa para não danificar a colagem da junta. Posteriormente, procedeu-se a uma limpeza lateral das juntas e à limpeza de filetes de adesivo restante com o auxílio de um mandril.

Após o fabrico das juntas é efetuado o teste à tração (*pull-off*) onde os aderentes de base são encastrados nas extremidades (Figura 81).

Nas juntas adesivas com Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 foram usadas velocidades de 0,5 mm/min. O deslocamento da pinça é realizado sempre a velocidade constante até que ocorra a rotura total das juntas, ou seja, até que ocorra separação total do aderente em L com o aderente de base.

O encastramento das juntas é garantido por um suporte em alumínio construído para esse efeito (Figura 81). Este suporte prende os aderentes de base, entre pontos de encastramento, através de barras móveis aparafusadas de forma a permitir um comprimento livre das juntas em “L” de 80 mm. Após o ensaio de cada uma das juntas, a sua remoção é possível através do desaperto dos parafusos das barras do suporte em alumínio e do desaperto das garras superiores da máquina de ensaios.

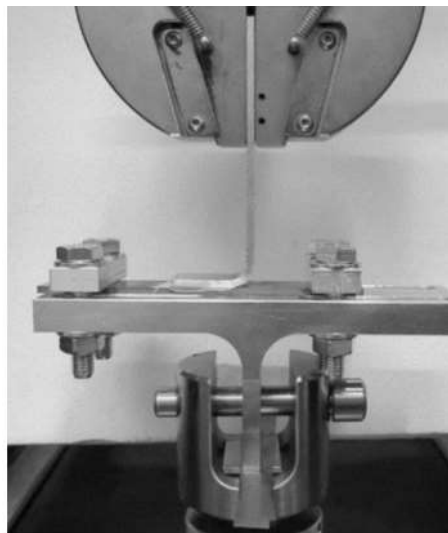


Figura 81 - Testes à tração (*pull-off*) à junta em “L” na máquina de ensaios Instron® 3367 (Norwood, MA, USA)[83].

3.1.3.2.3 Resultados

3.1.3.2.3.1 Modos de rotura

No estudo de Domingues et al. [83] as juntas em “L” tiveram rotura coesiva, ou seja com ambas as superfícies cobertas de adesivo. Assim conclui-se que houve uma boa preparação das superfícies. O modo de rotura foi idêntico para todos as juntas testadas, sendo a Figura 82 representativa de todos os estudos.



Figura 82- - Superfície de rotura do adesivo Araldite® AV138 para o valor $t_{p2}=1$ mm [83]

3.1.3.2.3.2 Curvas p delta ($P-\delta$)

A partir da análise das curvas $P-\delta$ das juntas coladas no estudo Domingues et al. [83], averigua-se que existe uma boa relação entre ensaios, no que diz respeito à rigidez inicial e valor de P_{max} (carga máxima atingida no teste).

Os ensaios experimentais e análises numéricas da junta em L geraram as curvas $P-\delta$ apresentadas na Figura 83 e Figura 84, correspondentes à junta com adesivo Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752, respetivamente [83].

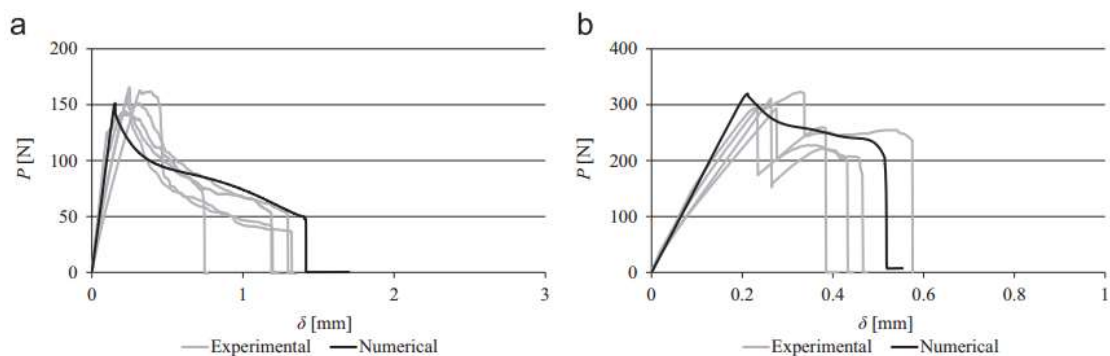


Figura 83 -- Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em L para o adesivo Araldite® AV138 onde para $t_{p2}=1$ mm e 4 mm correspondem à curva (a) e (b) respetivamente [83].

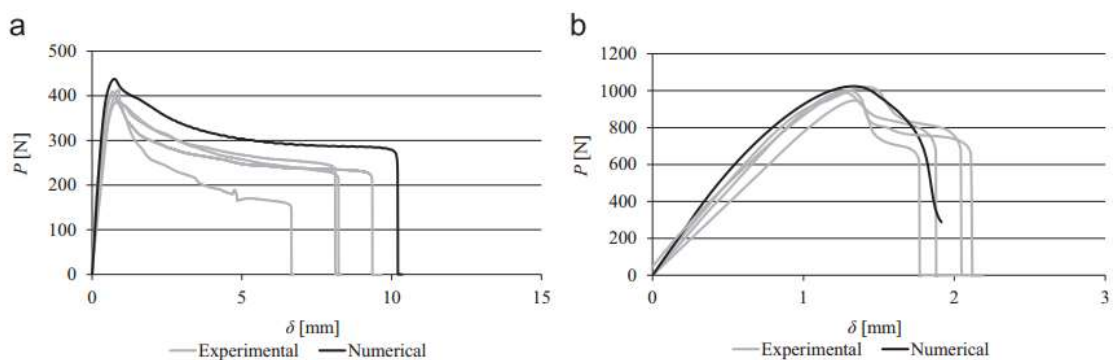


Figura 84 --- Curvas $P-\delta$ do teste experimentais e numéricos, da junta em L para o adesivo SikaForce® 7752 onde para $t_{p2}=1$ mm e 4 mm correspondem à curva (a) e (b) respetivamente [83].

3.1.3.2.3.3 Resistência da junta

Os resultados das juntas em L são expostos neste capítulo. É feita uma comparação dos resultados da resistência máxima das juntas entre a análise numérica e os ensaios experimentais. É feita uma análise do P_{max} para os vários parâmetros estudados dos substratos. Os resultados do estudo de Domingues et al. [83], para a junta adesiva em L com os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 estão representados na Figura 85 e na Figura 86 respetivamente. As figuras mostram a evolução do P_m (que corresponde ao P_{max}) para as juntas em L unidas com o Araldite® AV138 (Figura 85) e o Sikaforce® 7752 (Figura 86), fornecendo uma comparação entre os dados experimentais (média e desvio de P_{max}) e as previsões numéricas. As cargas máximas numéricas em regime elástico também são apresentadas, estas correspondem à carga do início da plastificação adesiva (*numerical yield*).

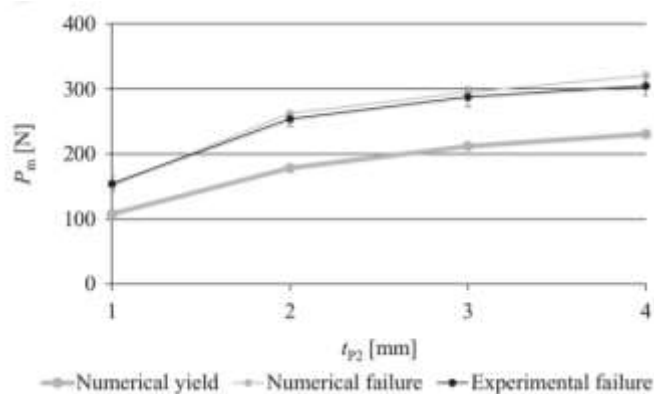


Figura 85 – Resultados experimentais e numéricos do estudo da junta em L para o adesivo Araldite® AV138 [83].

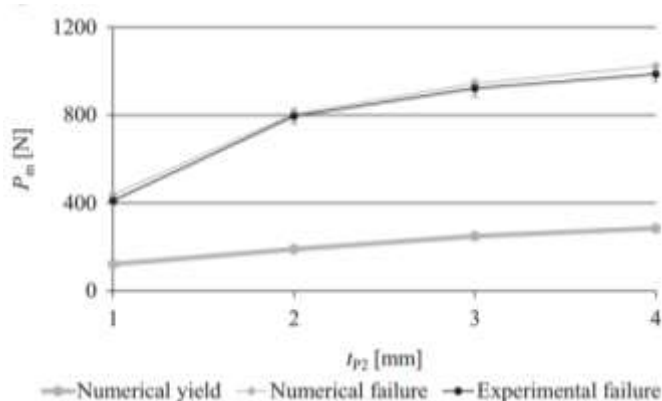


Figura 86 - Resultados experimentais e numéricos do estudo da junta em L para o adesivo e Sikaforce® 7752 [83].

Os resultados numéricos da MDC mostraram-se consistentes com os dados experimentais para ambos os adesivos. Os desvios máximos para cada adesivo em estudo, em média sobre os valores experimentais, foram de 5,3% para o Araldite® AV138, junta em L com $t_{p2}=4$ mm e 6,25% para Sikaforce® 7752, junta em L com $t_{p2}=1$ mm. Considerando todas as configurações testadas, os desvios eram tipicamente inferiores a 4%. Estes resultados mostram que a técnica de MDC para previsão de força

é uma ferramenta abrangente e precisa para o projeto de juntas compósitas sob cargas de arrancamento.

3.2 Estudo numérico de *stiffeners*

Após a validação do método utilizado, através de estudos anteriormente realizados, inicia-se a descrição o desenvolvimento do estudo numérico numa junta *stiffener* e T. Neste estudo pretende-se simular uma junta *stiffener* e T através de do *software* Abaqus®. São apresentadas as geometrias consideradas neste estudo, seguida das condições da simulação, e por fim são exibidos os resultados obtidos.

3.2.1 Geometria

A geometria estudada foi uma junta em T que representa um *stiffener*. Esta ligação estará sujeita a um deslocamento δ que impõe uma carga de arrancamento na junta, denominada de *pull-off* (Figura 87). Esta junta é composta por dois aderentes, uma chapa fina denominada de “Pele”, e o substrato *stiffener* que, para maior desempenho na ligação, tem duas abas produzindo um formato de “T” invertido. Este segundo substrato é denominado de “T” pelo seu formato, e tem um *fillet* (curvatura na zona do canto das abas) cujo raio é chamado de “R”. O adesivo tem espessura de $t_A=0,2$ mm e o comprimento de sobreposição é o dobro de L_0 . O estudo numérico foi realizado para metade da geometria impondo condições de simetria (Figura 87). Para melhor interpretação na Figura 88 é representada a estrutura pela simetria, com os valores dos parâmetros fixos e com as siglas dos parâmetros variáveis. Para melhor entendimento é nomeado cada valor de cota da geometria estudada, sendo o valor do raio corresponde a R , a espessura do substrato “T” corresponde a t_0 , a espessura de “Pele” é t_p e de comprimento de sobreposição é representado por L_0 . Foi feito um estudo numérico sobre a influência geométrica em torno destas características (Figura 88). Os valores das cotas estudadas estão descritos na Tabela 11. O comprimento entre apoios (L_T) corresponde a 200 mm, e a altura do *stiffener* (L_A) é de 30 mm.

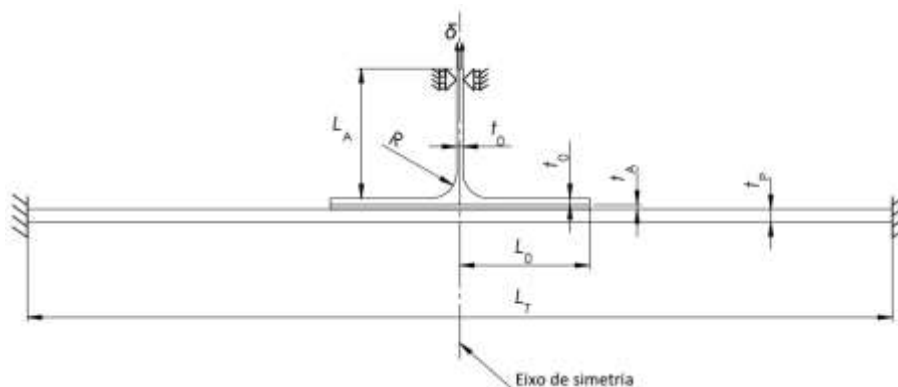


Figura 87 - Geometria do *stiffener* com condições fronteira.

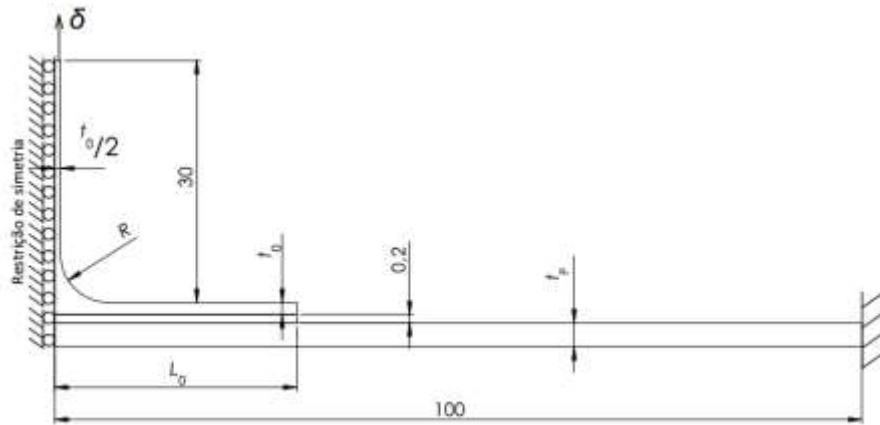


Figura 88 – Geometria de simulação numérica com cotas nominais.

Tabela 11 - Valores geométricos estudados.

Estudos geométricos	t_p	t_0	R	L_0
Valores iniciais	3 mm	1,5 mm	6 mm	30 mm
Estudo da espessura da pele	3 mm	1,5 mm	6 mm	30 mm
	1 mm			
	2 mm			
	4 mm			
Estudo da espessura de T	3 mm	0,5 mm	6 mm	30 mm
		1 mm		
		1,5 mm		
		2 mm		
		2,5 mm		
Estudo do raio R	3 mm	1,5 mm	3 mm	30 mm
			6 mm	
			9 mm	
			12 mm	
Estudo da sobreposição do adesivo L	3 mm	1,5 mm	6 mm	10 mm
				20 mm
				30 mm
				40 mm

Para além da geometria externa da junta é necessário ter em conta certas condições de simulação. Pelo facto de os substratos serem laminados de material compósito leva a que seja necessário simular as possíveis roturas interlaminares e intralaminares no modelo numérico (Figura 89). As camadas intralaminares (camadas 2 a 5) servem para

estudar a delaminação do compósito, enquanto as camadas interlaminares (camada 1 e camada curva do deltoide) servem para estudar a possível rotura entre as camadas críticas do compósito. As camadas são numeradas de 1 a 5, sendo que a camada 1 tem espessura de 0,125 mm e as restantes camadas têm 0,02 mm. A camada 1 e a camada da curva do deltoide são muito importantes, porque são as camadas coesivas que contornam o deltoide, e conseqüentemente podem sofrer rotura. A camada da curva do deltoide tem de espessura 0,125 mm e está representada na Figura 90.

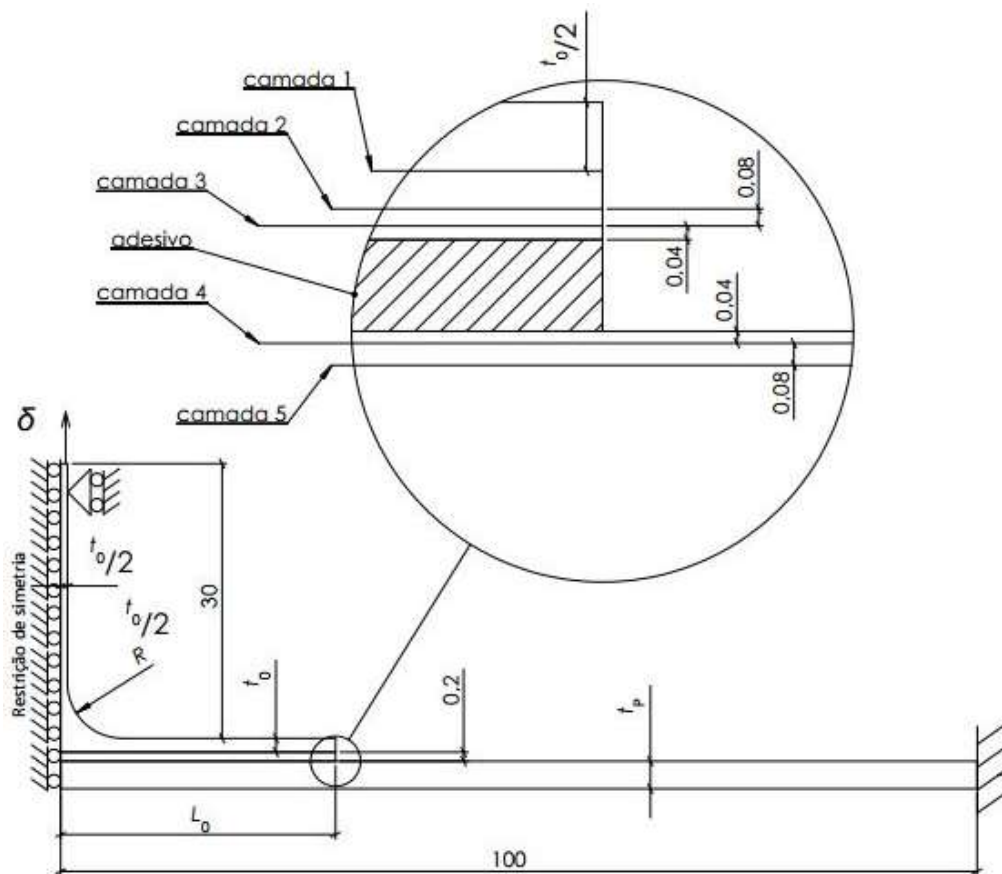


Figura 89 - Descrição das camadas intralaminares e interlaminares.

A camada 1 e a camada da curva do deltoide têm espessura 0,125 mm, que corresponde à espessura de uma camada de fibras no laminado. As restantes camadas de 2 a 5 têm, teoricamente, espessura 0 mm por serem planos de propagação de fendas por delaminação. Contudo, para simular esse comportamento no *software* foi admitido que essas camadas possuem 0,02 mm de espessura.

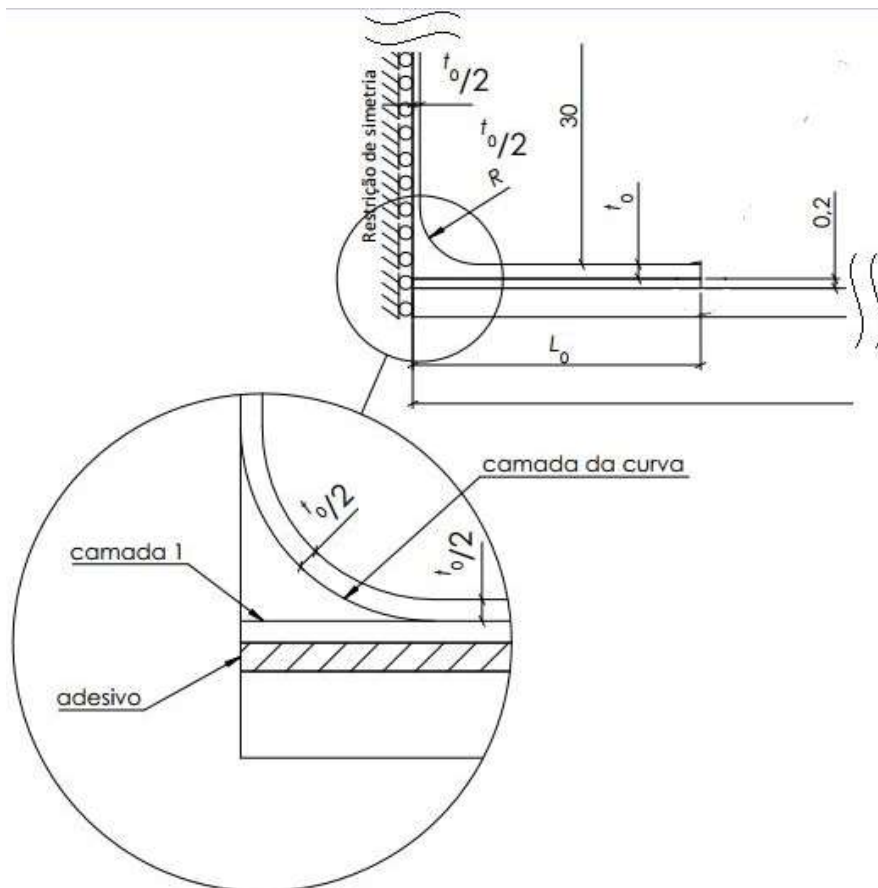


Figura 90 - Detalhe das camadas interlaminares em volta da curvatura do substrato (deltoide).

Na análise dos resultados dos testes numéricos, a posição ao longo da sobreposição da junta é normalizada (x/L_0). Assim, a posição é definida de 0 até 1 dando de forma percentual a localização de L_0 (Figura 91).

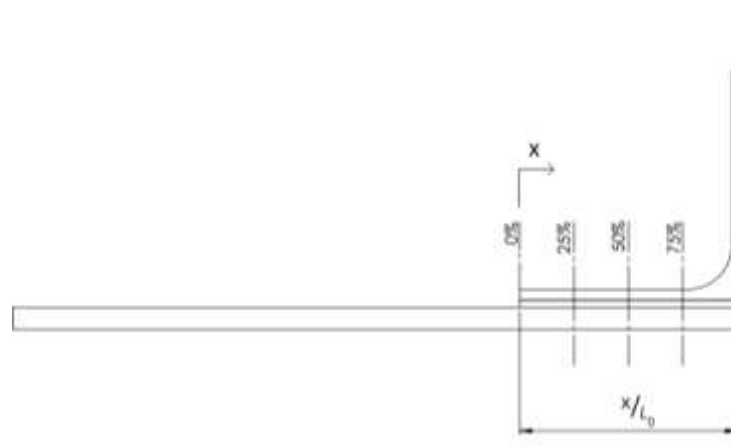


Figura 91 -Normalização da posição ao longo da sobreposição da junta adesiva.

3.2.2 Condições de análise numérica

Para a caracterização das juntas em “T” foi feita uma análise a nível da propagação do dano, das tensões, da variável do dano e da resistência da junta.

O primeiro passo é definir a geometria da junta, que é descrita detalhadamente no subcapítulo anterior (3.2.1). Após a geometria definida é necessário enunciar os materiais dos substratos e dos adesivos, classificando posteriormente o tipo de secção correspondente a de cada material, como por exemplo Sólida ou Coesiva (Figura 92).

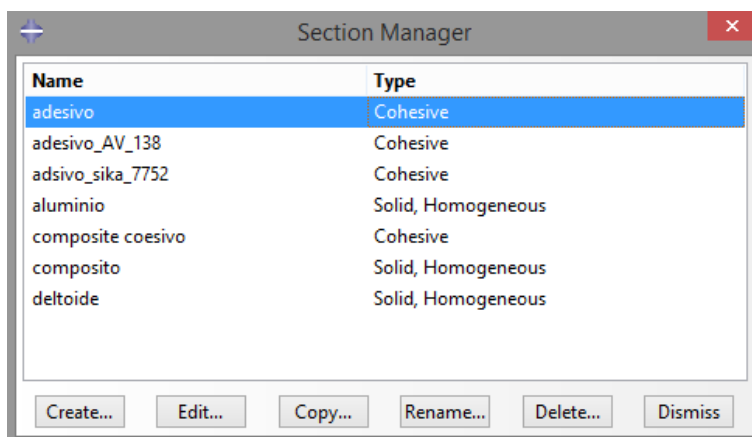


Figura 92 - Quadro de edição do tipo de secção do ABAQUS®.

Na definição de materiais, é de realçar que os substratos são por norma modelados como elementos sólidos, nos quais são inseridas camadas coesivas para simular a rotura em planos específicos da junta (Figura 93).

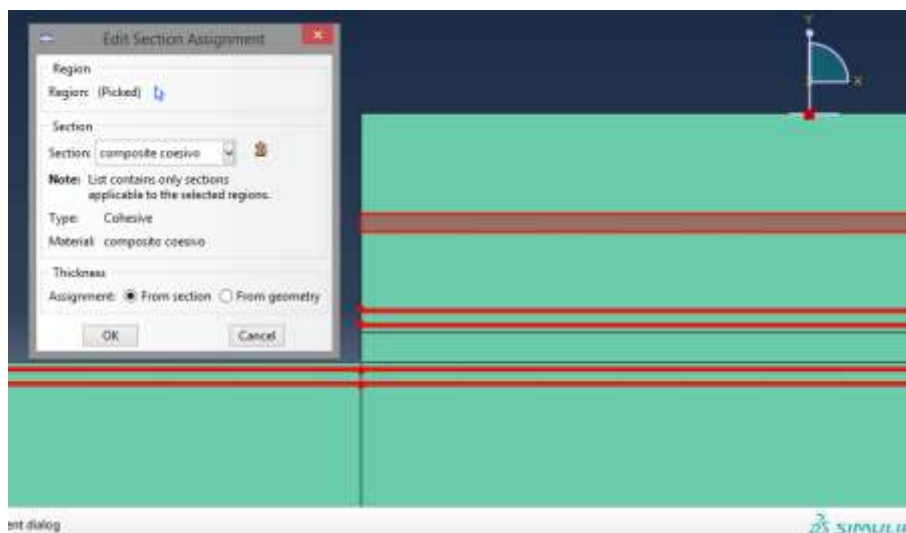


Figura 93 - Representação de elementos coesivos para simular diferentes planos de rotura na junta.

Os valores usados para a definição dos materiais foram descritos com pormenor no capítulo 3.1.1. Um ponto a ter em atenção na caracterização dos materiais é que para materiais não isotrópicos (ortotrópicos) é necessário definir as direções das

propriedades. Assim, para o caso dos substratos é definido que as fibras tenham a orientação na direção indicada na Figura 94, enquanto no deltoide as fibras tenham a direção perpendicular ao plano (direção Z). A direção **1** é a orientação no sentido das fibras e a direção **2** é a direção perpendicular às fibras.

Para a definição da orientação das fibras ao longo da curva que contorna o deltoide recorre-se à ferramenta da definição de coordenadas cilíndricas. Após a definição de um eixo de coordenadas cilíndricas é determinado que as fibras têm a orientação tangencial ao raio (**T**) (Figura 95).

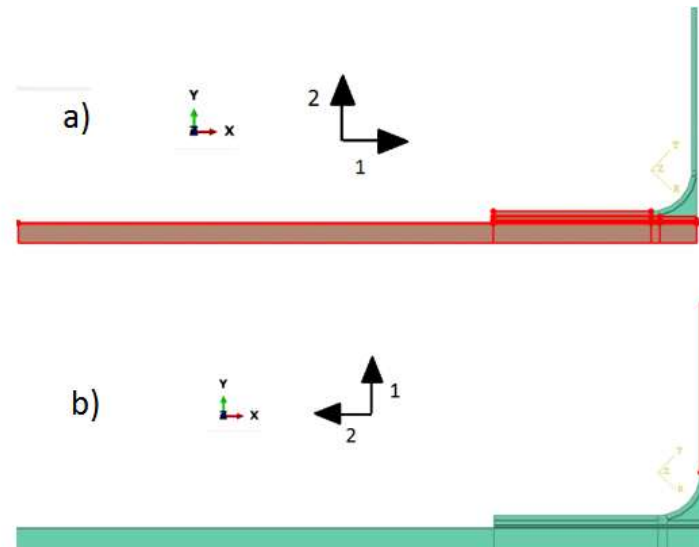


Figura 94 - Orientação das fibras ao longo da geometria dos substratos (zona vermelha):orientação horizontal (a); e orientação vertical (b).

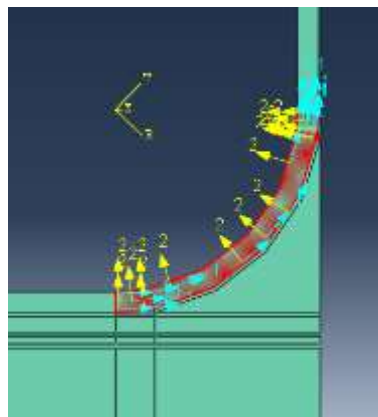


Figura 95 - Orientação das fibras ao longo da curvatura do deltoide.

O estudo numérico consiste na simulação de um teste *pull-off* numa estrutura simétrica. A carga simulada no *software*, da junta em estudo, e as restantes condições fronteira, estão representadas na Figura 96. Ou seja, é aplicada à estrutura uma restrição de encastramento numa extremidade (Figura 96 - 1), um deslocamento no topo do substrato T (Figura 96 - 2) e uma restrição de simetria no eixo de simetria da estrutura (Figura 96 - 3).

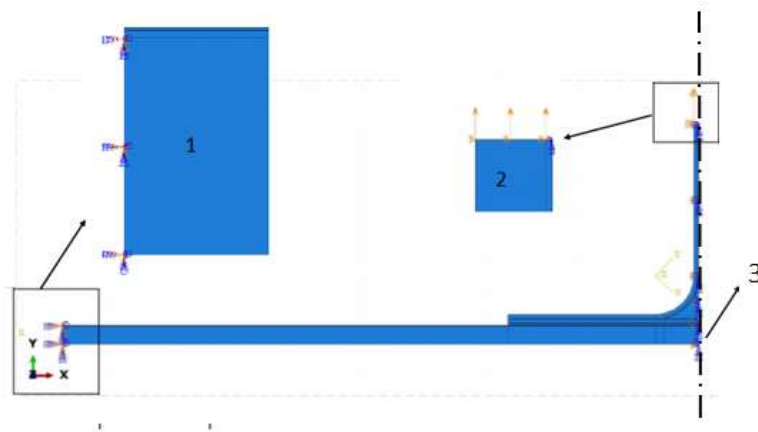


Figura 96 - Condições fronteira e carga aplicada na análise numérica onde 1- apoio de encastramento; 2 – deslocamento vertical δ ; 3- eixo de simetria.

O último passo antes da realização do estudo propriamente dito consiste na criação da malha. Esta consiste num conjunto interligado de elementos que podem ter propriedades diferentes.

A definição do tipo de malha e da forma dos elementos da malha é feita no comando *mesh control* do ABAQUS®. A Figura 97 representa o painel de definição destes parâmetros no *software*. Para a camada de adesivo a malha é constituído por elementos quadriláteros do tipo *sweep*. As camadas intralaminares e as interlaminares dos substratos, que seguem uma lei coesiva, também têm a definição de malha igual à do adesivo. Os substratos têm uma estruturação de malha do tipo *structured* em que os elementos são quadriláteros, exceto nas zonas intralaminares referidas anteriormente e na zona do “deltoide”. Na zona do deltoide a malha tem uma configuração *Free* e geometria predominantemente quadrangular.

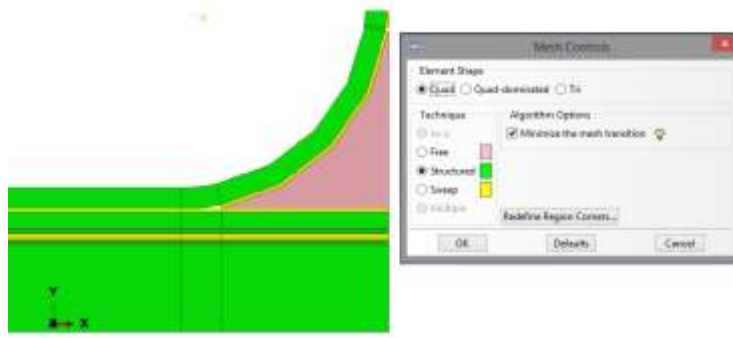


Figura 97- Painel de seleção do tipo de malha e formato da mesma.

Através do comando *assign element type* do ABAQUS® é definido o tipo de elemento de cada secção da malha (Figura 98). Tendo este estudo dois tipos de elementos, os adesivos, as camadas interlaminares e as camadas intralaminares são definidas como *cohesive* (coesivo) e as restantes partes dos substratos são definidos como *plane strain* (estado plano de deformação).

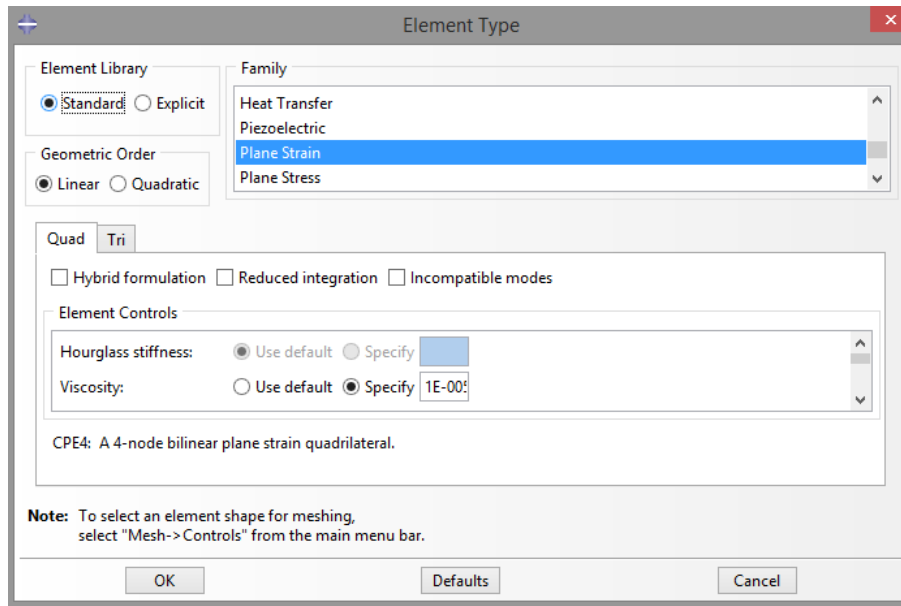


Figura 98 – Painel de definição do tipo de elemento da malha.

Para além da definição da malha foi necessário resolver um problema de coerência de malha. Na zona de interseção das camadas interlaminares, nas extremidades do deltoide, foi necessário remover uma parte do material coesivo (Figura 99). Esta medida é necessária para contornar o problema da malha, sendo que o material removido da simulação é desprezável para pôr em causa os resultados finais. Este erro de malha ocorre pois geram-se nós de elementos coesivos de forma descontrolada, enquanto os elementos coesivos só funcionam se houver apenas um elemento entre as camadas elásticas.

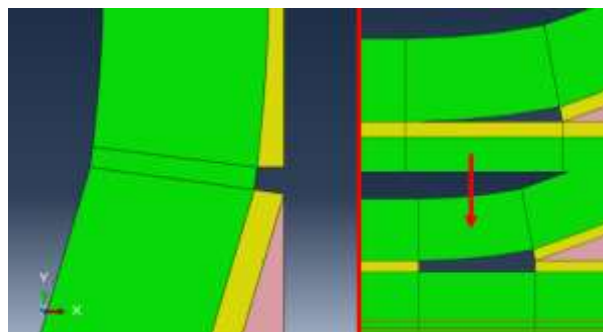


Figura 99 - Demonstração das zonas de remoção de material, sendo o caso da direita particular onde a remoção do material na imagem de cima implicou a anulação dos elementos coesivos logo abaixo, o que tornou possível aplicar o caso da imagem de baixo sem a alteração dos resultados e sem erros de malha.

De seguida, é necessário definir o tamanho (refinamento) da malha. A malha tem dois tipos de refinamento, um para o estudo do dano e resistência da junta, e outro para o estudo das tensões que é dez vezes mais refinada. A malha do estudo das tensões tem de ser muito refinada para capturar com precisão os picos de tensão nas extremidades da zona de sobreposição.

O refinamento da malha não é constante ao longo da geometria em estudo. É usado um recurso do *software* chamado de *seed edges* para definir o tamanho dos elementos.

Para o estudo da resistência, é definido que, na camada do adesivo, os tamanhos dos elementos formem quadrados, com os lados de tamanho 0,2 mm. É também imposto que em todas as secções coesivas só tenham um elemento de malha ao longo da espessura (Figura 100).

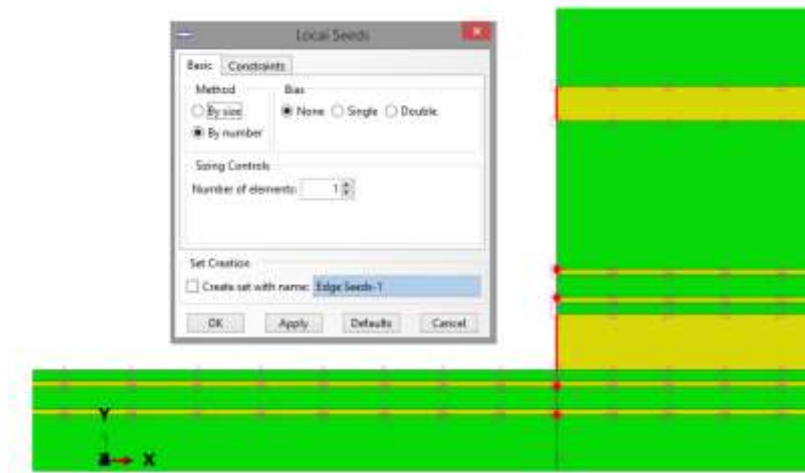


Figura 100 - Definição da quantidade de elementos na espessura das secções coesivas.

É também usado um refinamento gradual em áreas de menor relevância, a nível de concentrações de esforços. Esse refinamento gradual é denominado de *bias*. Estes recursos foram usados na construção da malha da pele entre o apoio encastrado e início da sobreposição do adesivo (Figura 101), assim como ao longo da espessura da pele (Figura 102). No substrato "T" ao longo da lâmina vertical, também existe um *bias* desde a extremidade até ao início da curvatura do deltoide (Figura 103).

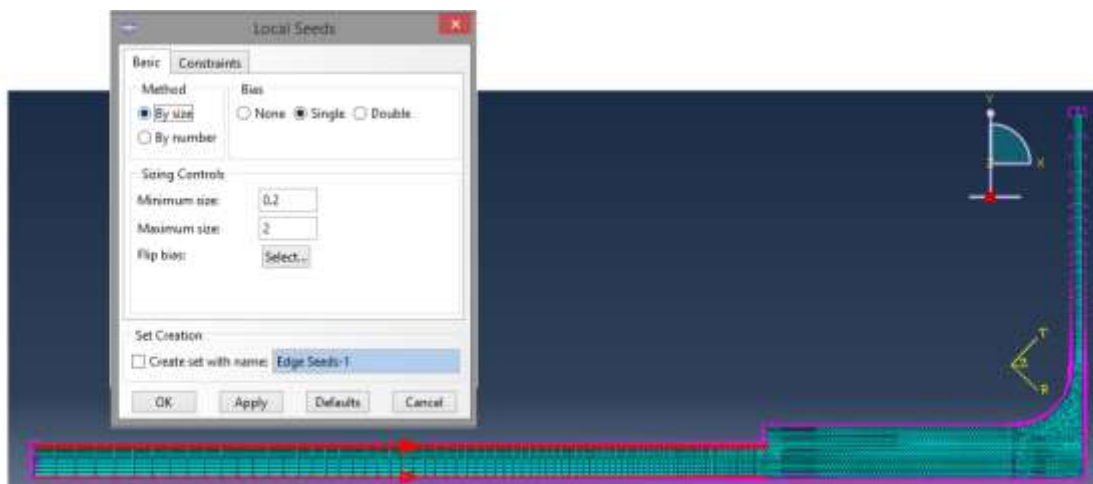


Figura 101 - Aumento gradual da malha ao longo da pele entre o encastramento e o início da sobreposição.

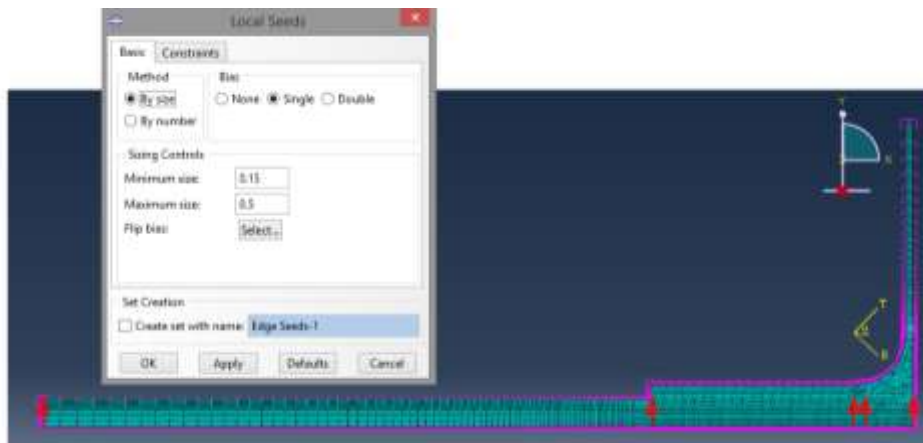


Figura 102- Aumento gradual do refinamento da malha ao longo da espessura a pele.



Figura 103 - Aumento gradual da malha ao longo da lâmina vertical do T.

No estudo da distribuição de tensões a malha é dez vezes mais refinada. Assim, para o estudo de espessuras maiores do substrato T é usado um *double bias* entre as camadas coesivas do material compósito (Figura 104).

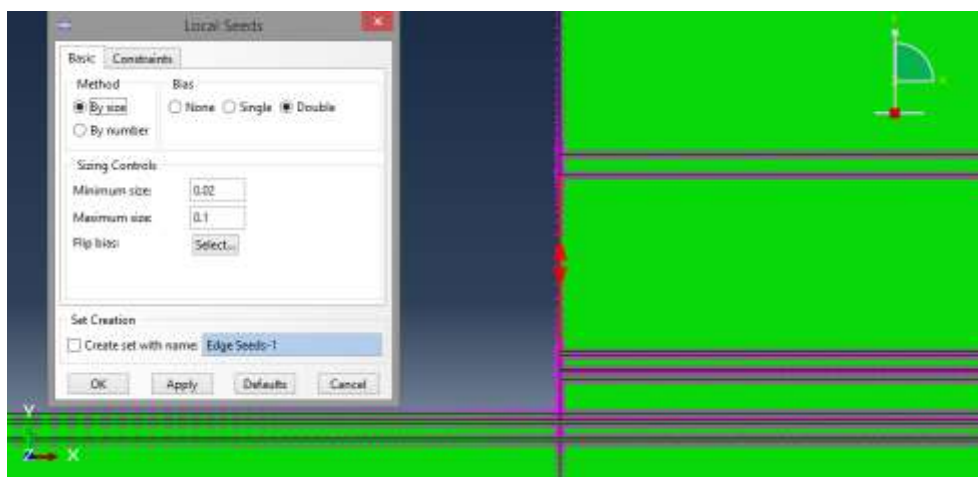


Figura 104 - Aumento gradual da malha em dois sentidos, ao longo da espessura da camada do substrato entre elementos coesivos.

3.2.3 Leis coesivas para os adesivos

Os MDC são baseados em relações entre tensões e deslocamentos relativos, que conectam nós homólogos dos elementos coesivos. As leis coesivas simulam o comportamento elástico até um pico de carga e subsequente amaciamento, para modelar a degradação gradual das propriedades do material até a completa falha. Este método é descrito detalhadamente no capítulo 3.1.2. Os parâmetros coesivos do modelo MDC para os adesivos analisados neste estudo numérico são descritos na Tabela 12.

Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para as camadas de adesivo [82].

Propriedade	Unidade S.I.	Araldite® AV138	Araldite® 2015	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E	MPa	4890	1850	490
Módulo de Elasticidade Transversal, G	MPa	1560	650	190
Tensão de Rotura à Tração, $\sigma_f(t_n^0)$	MPa	39,45	21,63	11,48
Tensão de Rotura ao Corte, $\tau_f(t_s^0)$	MPa	30,20	17,9	10,17
Tenacidade à Tração, G_{IC}	N/mm	0,20	0,43	2,36
Tenacidade ao Corte, G_{IIC}	N/mm	0,38	4,70	4,51

3.2.4 Resultados numéricos para a geometria base

Com a geometria de base descrita em 3.2.1 obteve-se um ponto de partida. A partir desse ponto estudou-se os efeitos das variações geométricas na junta adesiva.

Com a geometria de base, com as dimensões indicadas na Tabela 13, estudou-se o comportamento para os vários adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752). A curva P - δ para os três adesivos está representada na Figura 105. Através da curva P - δ observa-se que o adesivo Araldite® AV138 teve o menor P_{max} e o Sikaforce® 7752 obteve o maior P_{max} .

Tabela 13 - Dimensões da geometria de base.

Estudos geométricos	t_p	t_0	R	L_0
Valores iniciais	3 mm	1,5 mm	6 mm	30 mm

Para esta geometria, a junta com o adesivo Araldite® AV138 rompeu pela camada de adesivo enquanto as juntas com os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 romperam pela camada 1 e pela camada da curva do deltoide.

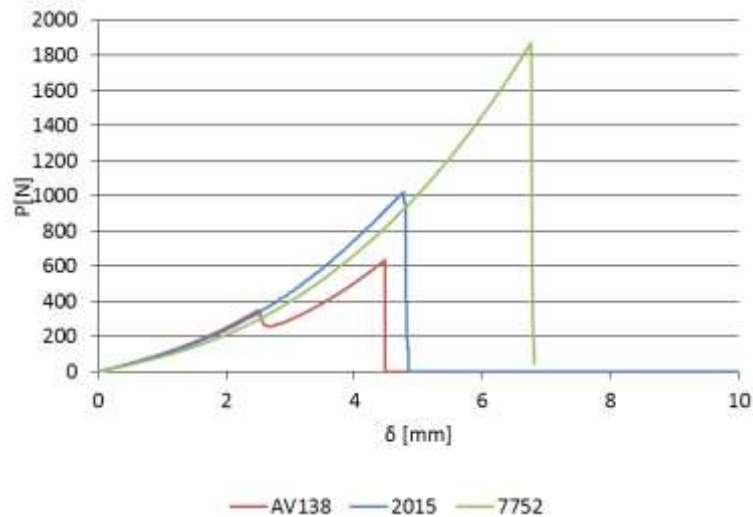


Figura 105 - Curva P - δ para a geometria de base.

Analisando as curvas P - δ conclui-se que a rotura da junta ocorre de forma frágil logo após atingir o P_{\max} . A junta adesiva com Araldite® AV138 teve uma pequena quebra de resistência e tornou a resistir até atingir o P_{\max} . Esta quebra corresponde ao início da rotura do adesivo na extremidade da junta. Nesta altura, existe uma ligeira quebra de P e um segundo aumento de P devido à carga transmitida pelo deltoide, o que fez a junta resistir até à quebra frágil. As juntas adesivas com Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 tiveram um comportamento quase linear, rompendo quando o substrato quebrava de forma frágil na camada 1, sendo a rotura iniciada na zona do início da curva do deltoide e propagado até à extremidade.

É feita uma análise da distribuição das tensões no adesivo e nas camadas interlaminares e nas intralaminares, de forma a entender como ocorre a rotura no adesivo e no substrato. No estudo da distribuição de tensões ao longo L_0 , as tensões de corte (τ) e de arrancamento (σ_y) são representados de forma normalizada à tensão média de arrancamento ($\sigma_{y\text{med}}$) da camada do adesivo. Esta normalização permite a comparação das tensões entre as camadas e entre os três adesivos. A normalização salienta os picos de tensão permitindo uma melhor perceção da distribuição das tensões.

Para o adesivo Araldite® AV138, os resultados das tensões de corte são dados na Figura 106 e as tensões de arrancamento na Figura 107. Pode-se verificar que na extremidade da sobreposição da junta é onde tem os maiores picos de tensão de corte, sendo eles na camada do adesivo e na camada 4. Um outro pico de tensão de corte ocorre no início da curvatura do substrato “T” afetando principalmente a camada 1.

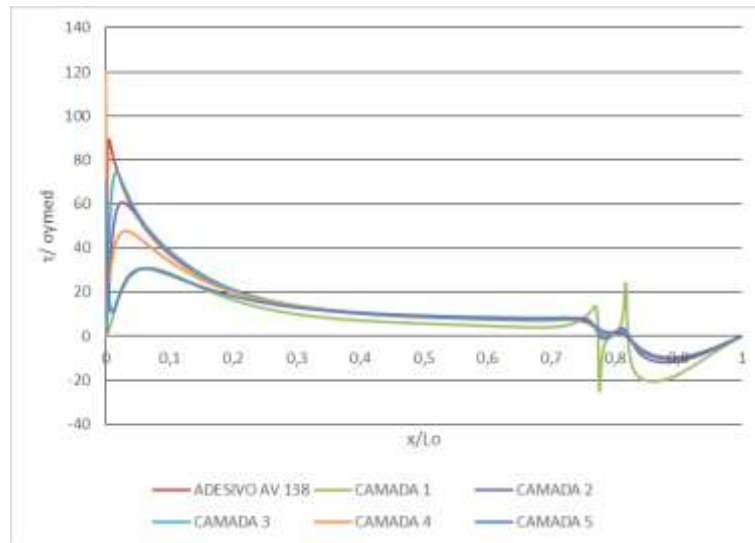


Figura 106 - Distribuição das tensões de corte nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® AV138.

Ao analisar as tensões de arrancamento, verifica-se que existem picos de tensão na extremidade da sobreposição, nas camadas do adesivo, na camada 4 e na camada 5 e picos no início da curva do substrato “T”.

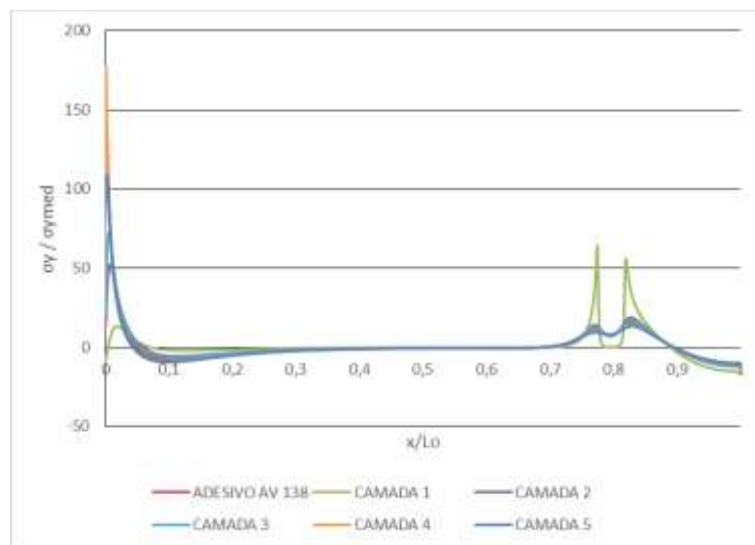


Figura 107 - Distribuição das tensões de arrancamento nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® AV138.

Para o adesivo Araldite®2015, os resultados das tensões de corte são mostrados na Figura 108 e das tensões de arrancamento na Figura 109.

O adesivo Araldite®2015 tem um comportamento muito parecido com o adesivo Araldite® AV138. Uma diferença nas tensões entre os dois adesivos é que no adesivo Araldite® AV138 os picos de tensão na extremidade da junta têm maior valor do que no adesivo Araldite®2015. Em contrapartida, junto ao início da curva do deltoide o adesivo Araldite®2015 tem picos de tensão de arrancamento superiores do que os registados no adesivo Araldite® AV138.

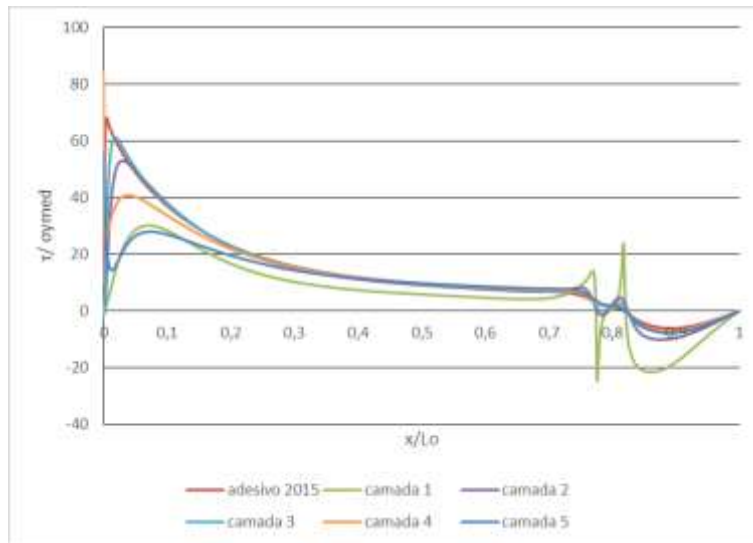


Figura 108 - Distribuição das tensões de corte nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® 2015.

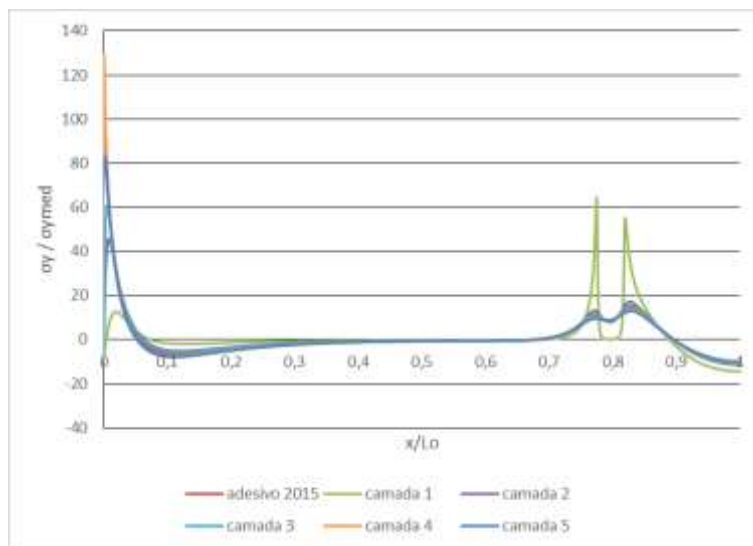


Figura 109 - Distribuição das tensões de arrancamento nas várias camadas coesivas para a junta com o Araldite® 2015.

Para o adesivo Sikaforce® 7752 os resultados das tensões de corte são dadas na Figura 110 e as tensões de arrancamento na Figura 111. Este adesivo tem, a nível de tensões, um comportamento distinto dos outros adesivos estudados. Ao longo da sobreposição as tensões de corte têm uma distribuição suave, sendo que os maiores valores estão na extremidade. As camadas 1,2 e 3 têm um ligeiro pico de tensões de corte no início da curvatura do substrato.

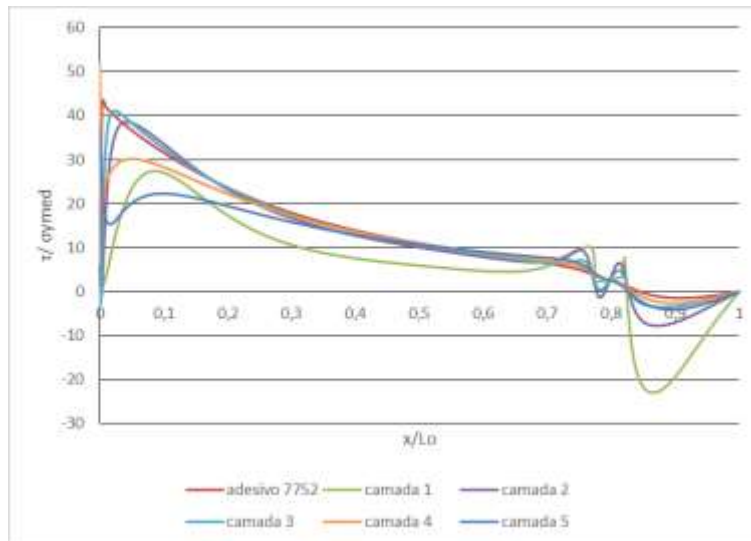


Figura 110 - Distribuição das tensões de corte nas várias camadas coesivas para a junta com o Sikaforce® 7752.

Nas tensões de arrancamento do adesivo Sikaforce® 7752 destacam-se os picos de tensão na extremidade da sobreposição e no início da curva do substrato. Na camada 1 o pico de tensão no início da curva é da mesma ordem de valor do pico de tensão da extremidade.

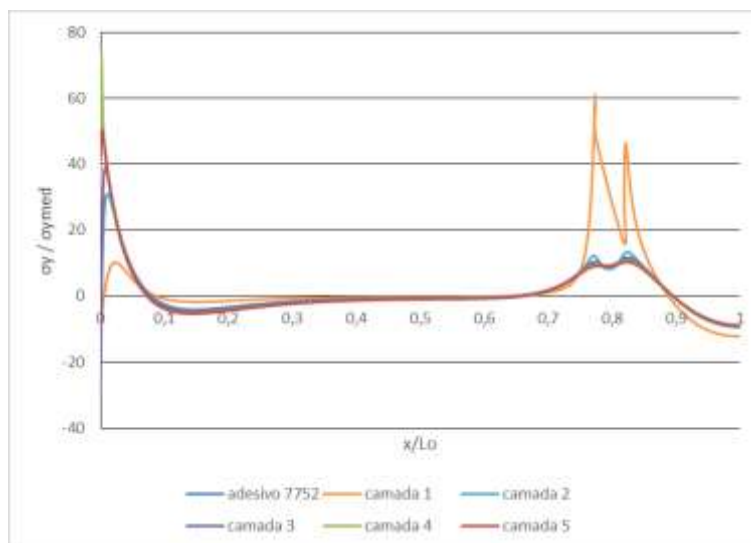


Figura 111 - Distribuição das tensões de arrancamento nas várias camadas coesivas para a junta com o Sikaforce® 7752.

Para o adesivo Sikaforce® 7752, as tensões de arrancamento críticas são na camada 1, porque na zona do início da curva do deltoide, estas apresentam picos de tensão muito superiores às tensões registadas na extremidade da junta. Este facto pode justificar o início da rotura, que ocorre no início da curva do deltoide e que é a principal causa da rotura total da junta adesiva.

No estudo da variável do dano obteve-se os resultados para cada um dos adesivos e a propagação da degradação das propriedades dos materiais para a geometria de base.

Estes resultados apresentam a degradação nas diferentes camadas coesivas explicadas em 3.2.1. Os valores de degradação estudados, relativos à degradação quando a junta atinge o P_{max} , correspondem aos valores para o deslocamento de P_{max} ($\delta_{P_{max}}$). Estes servem como ponto de comparação para a avaliação da propagação do dano.

No adesivo Araldite® AV138 é notória a degradação quase total do adesivo no ponto do P_{max} . A camada da curva do deltoide e a camada 1 apresentam degradação elevada na zona do início da curvatura do substrato T. Na Figura 112 está representada a degradação das várias camadas coesivas, na junta com o adesivo Araldite® AV138, no instante em que é atingida a P_{max} .

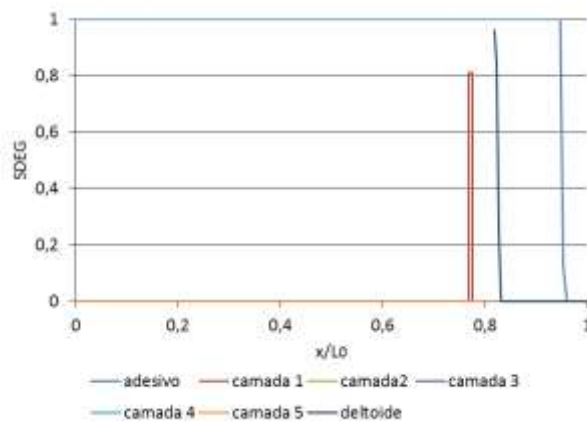


Figura 112 - SDEG para a geometria base com o Araldite® AV138.

Na Figura 113 está representada a distribuição da variável SDEG em função do valor de $\delta/\delta_{P_{max}} \times 100$ (%) para o adesivo Araldite® AV138, no sentido de analisar o comportamento de propagação de dano ao longo de x/L_0 . Neste estudo observa-se que a degradação abrupta ocorre como uma fenda, que se propaga até à separação total dos substratos. De 50% até 65% de $\delta_{P_{max}}$, a degradação do adesivo propaga-se rapidamente até à zona do início da curva do substrato em "T". Após a carga máxima (100%) a separação total da junta ocorre abruptamente.

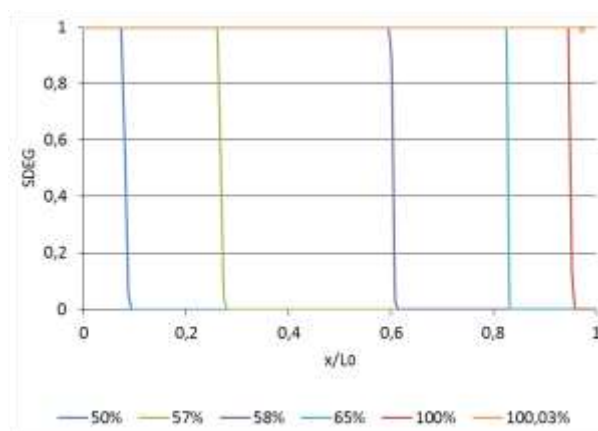


Figura 113 - Propagação do dano na camada do adesivo ao longo do $\delta/\delta_{P_{max}}$, para o Araldite® AV138.

Considerando a junta com o adesivo Araldite® 2015, ao atingir P_{max} , a camada do adesivo apresenta, na extremidade da junta, uma degradação severa, mas sem rotura total. A rotura total existe na camada da curva do deltoide. Neste ponto a camada 1 tem dano severo na zona de início da curva do substrato “T”, esse dano é superior ao registado para o adesivo Araldite® AV138. Na Figura 114 está representada a degradação das várias camadas coesivas, na junta com o adesivo Araldite® 2015, para $\delta_{P_{max}}$.

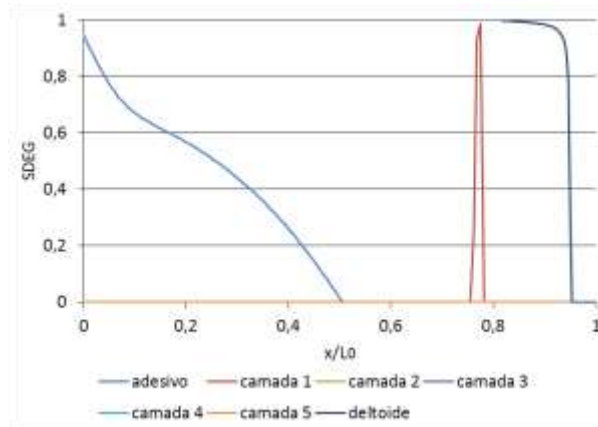


Figura 114 - SDEG para a geometria base com o Araldite® 2015.

Na Figura 115 e na Figura 116 estão representadas a distribuição da variável SDEG, em função do valor de $\delta/\delta_{P_{max}} \times 100$ (%), para a camada 1 e para a camada da curva do deltoide, respetivamente. Neste estudo observa-se que a degradação total ocorre no substrato, propagando-se primeiro pela camada da curva do deltoide e depois pela camada 1 até à extremidade da junta. Após a carga máxima (100%) a separação total da junta ocorre abruptamente pela camada 1, devido à alta fragilidade do elemento coesivo.

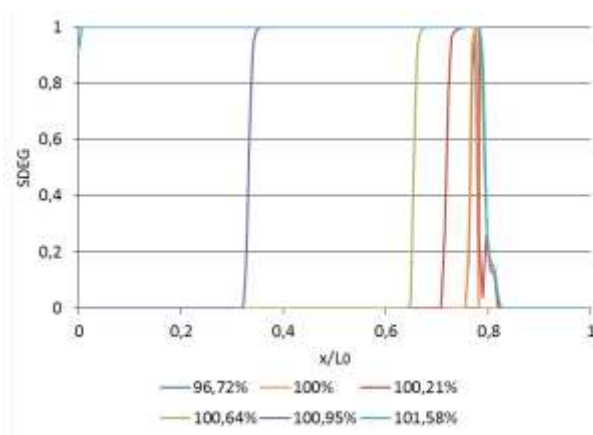


Figura 115 - Propagação do dano na camada 1 ao longo do $\delta/\delta_{P_{max}}$, para o Araldite® 2015.

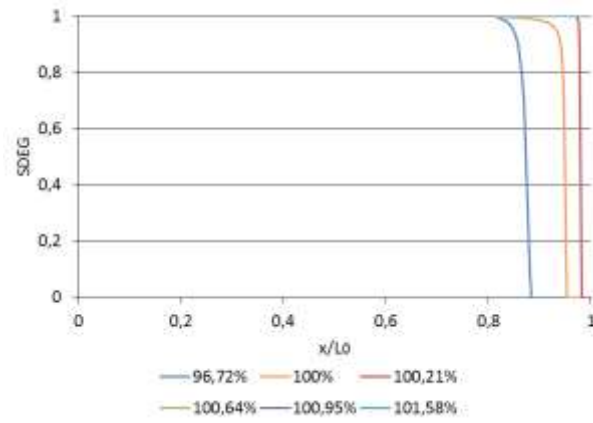


Figura 116 - Propagação do dano na camada da curva do deltoide ao longo do δ/δ_{Pmax} , para o Araldite® 2015.

Para o caso do adesivo Sikaforce® 7752 a degradação do adesivo propagou-se mais ao longo da sobreposição da junta mas com amplitude menor do que o caso dos outros adesivos. Contudo, na camada 1 e na camada da curva do deltoide é onde existe maior dano entre os três adesivos, tendo-se inclusivamente observado a rotura na camada 1. Na Figura 117 está representada a degradação das várias camadas coesivas, na junta com o adesivo Sikaforce® 7752, para δ_{Pmax} .

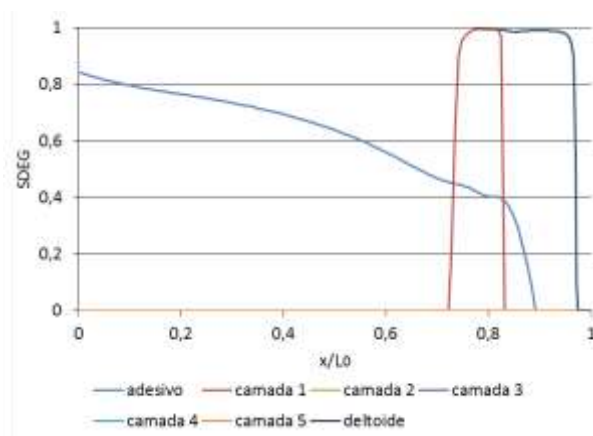


Figura 117 -. SDEG para a geometria base com o Sikaforce® 7752.

Relativamente à junta com adesivo Sikaforce® 7752, na Figura 118 (a) e na Figura 118 (b) estão representadas a distribuição da variável SDEG, em função do valor de $\delta/\delta_{Pmax} \times 100$ (%), para a camada 1 e para a camada da curva do deltoide, respetivamente. Neste estudo observa-se que a degradação total ocorre no substrato, propagando-se primeiro pela camada da curva do deltoide e depois pela camada 1 até à extremidade da junta. Após a carga máxima (100%) a separação total da junta ocorre abruptamente pela camada 1 e pela camada da curva do deltoide, devido à alta fragilidade do elemento coesivo.

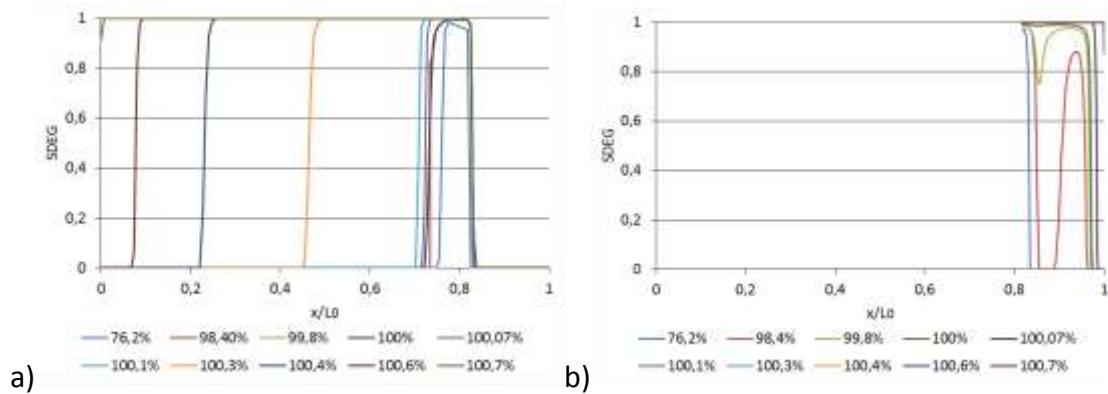


Figura 118 - Propagação do dano ao longo do $\delta/\delta_{P_{max}}$, para o Sikaforce® 7752: na camada 1 (a) e na camada da curva do deltoide (b).

Com os resultados para a junta adesiva com geometria de base, conclui-se assim que, quanto maior a ductilidade do adesivo, maior é a resistência da junta. Este facto é justificado com a distribuição de tensões obtidas, pois quanto maior a rigidez do adesivo maiores são os picos de tensão, e quanto menor a rigidez do adesivo mais distribuídas são as tensões ao longo da sobreposição da junta.

Não se observa a plastificação nas curvas $P-\delta$, mas para adesivos com rigidez menor (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752), que consequentemente conferem maior resistência à junta, a rotura ocorreu pelo substrato em camadas interlaminares. Nestes casos, a resistência na camada do adesivo é maior do que a da camada 1 e a camada da curva do deltoide, devido a uma degradação gradual e esforços mais distribuídos ao longo de L_0 . É demonstrado que a rotura pela camada do adesivo Araldite® AV138 e pelas camadas interlaminares ocorre de forma abrupta, e tem progressão rápida após atingir a carga máxima. Assim, conclui-se que as camadas interlaminares têm um comportamento frágil. Tomando como ponto de referência o valor de P_{max} da junta com o adesivo Araldite® AV138, o aumento percentual do P_{max} para as juntas com adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 61,2% e 194,6%, respetivamente.

3.2.5 Estudo paramétrico das dimensões da junta

Neste capítulo são expostos os resultados do estudo numérico aos parâmetros da junta. Estes resultados são agrupados pelo parâmetro analisado. É definido uma geometria base, descrita em 3.1.3, e a partir dessa geometria é avaliada a alteração de vários parâmetros como a espessura da pele (t_p), espessura do "T" (t_0), o comprimento de sobreposição (L_0) e o raio da curvatura do "T" (R).

Dentro de cada grupo de estudo é avaliado o modo de rotura, as curvas $P-\delta$, a análise de tensões, o estudo da variável de dano e a resistência da junta. Todas as geometrias foram simuladas com os três adesivos enunciados em 3.1.1.

3.2.5.1 Espessura da pele

A pele é o nome atribuído ao substrato de base, que foi sujeito a um estudo para diferentes espessuras (t_p), de 1, 2, 3 e 4 mm. O estudo pretende entender a influência que t_p tem na rigidez da estrutura e qual é o comportamento dos adesivos na junta.

3.2.5.1.1 Modos de rotura

Segundo a simulação, a junta pode romper por uma das camadas coesivas dos substratos ou pela camada do adesivo. Ao longo das simulações obtiveram-se 3 modos de rotura, nomeadamente a rotura pela camada do adesivo (Figura 119 a), a rotura pelo substrato e pelo adesivo, denominada de rotura mista (Figura 119 b) e a rotura pelo substrato (Figura 120 a e Figura 120 b). Na Figura 120 (b) está representada uma rotura no substrato onde houve dano severo na camada do adesivo. Por outro lado, na Figura 119 (b) a rotura completa ocorreu e na camada da curva do deltoide, que fez romper a camada do adesivo pelo centro da sobreposição (perto do eixo de simetria).

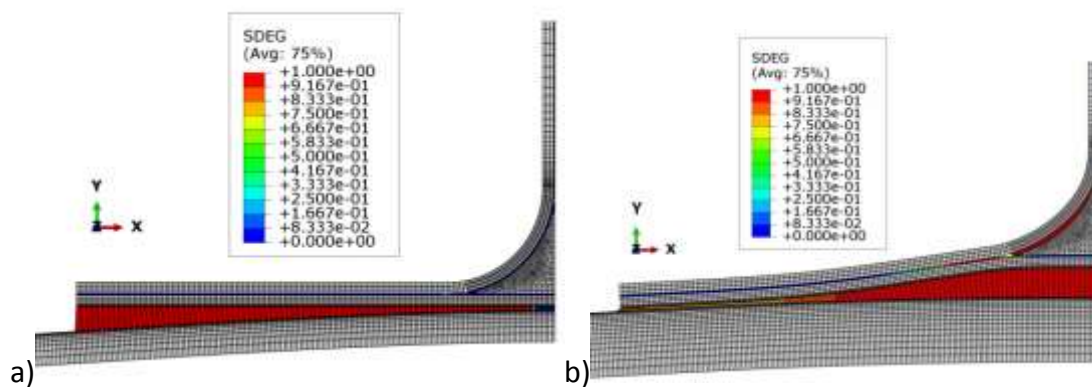


Figura 119- Modo de rotura pelo adesivo no teste para $t_p=2$ mm do adesivo Araldite® AV138 (a) e modo de rotura adesivo/misto no teste para $t_p=4$ mm para o Sikaforce® 7752 (b).

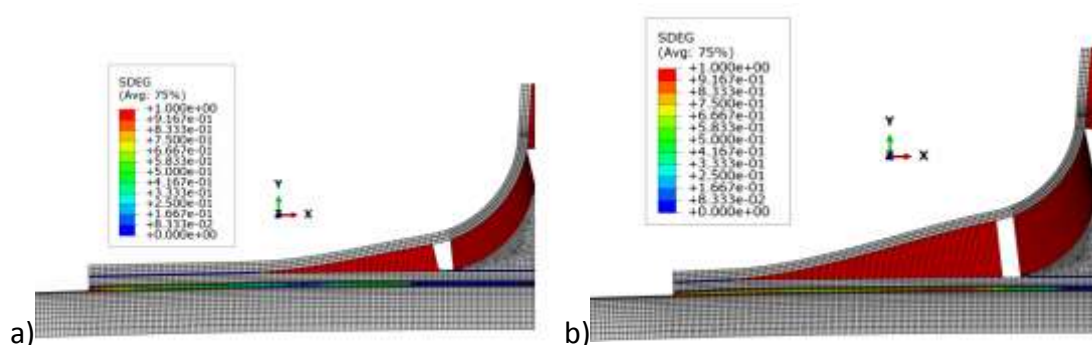


Figura 120 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $t_p=3$ mm para o Araldite® 2015 (a) e o Modo de rotura pelo substrato no teste para $t_p=3$ mm para o Sikaforce® 7752 (b).

A Tabela 14 indica os modos de rotura e o valor de P_{max} de cada espessura de pele testada.

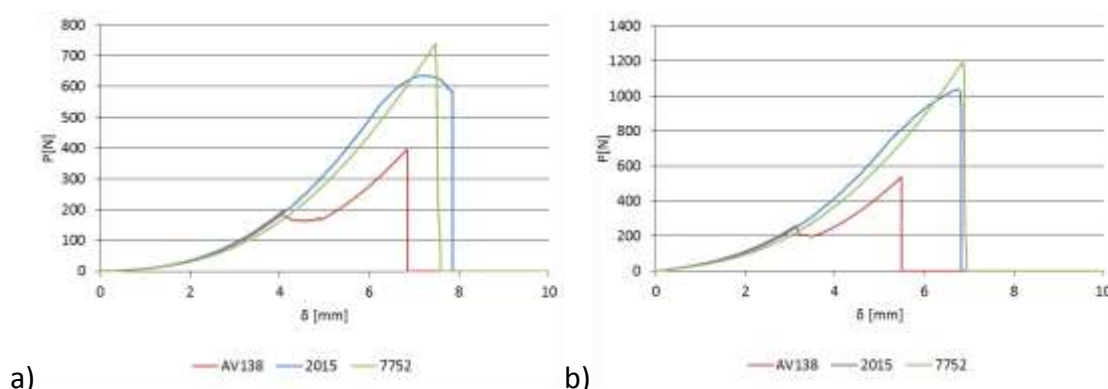
Tabela 14 – Modos de rotura para diferentes espessuras de pele.

t_p [mm]	AV138		2015		7752	
	P_{max} [N]	Zona de rotura	P_{max} [N]	Zona de rotura	P_{max} [N]	Zona de rotura
1	398,10	adesivo	634,80	adesivo	739,24	substrato
2	537,08	adesivo	1036,93	adesivo	1199,63	substrato
3	634,72	adesivo	1022,97	substrato	1869,63	substrato
4	719,71	adesivo	1232,32	substrato	2372,63	adesivo/misto

3.2.5.1.2 Curvas P - δ

Para cada uma das espessuras de pele foi gerada uma curva P - δ (Figura 121 a, Figura 121 b, Figura 122 a e Figura 122 b). Pela análise das curvas, pode-se observar que o comportamento do adesivo Sikaforce® 7752 se mantém idêntico para todas as espessuras de pele. A curva da junta adesiva com Araldite® AV138 também mantém o seu comportamento ao longo das várias espessuras, mas possuindo uma forma característica. Para o caso da junta adesiva com Araldite® 2015, as curvas P - δ têm comportamentos diferentes para os diferentes t_p , devido aos diferentes modos de rotura registados para esses t_p .

De facto, a curva da junta adesiva com Araldite® AV138 tem uma primeira fase similar ao adesivo Araldite® 2015, mas a certo ponto dá-se uma quebra de resistência. Contudo, a junta continua a suportar esforços crescentes até atingir P_{max} . Esta ligeira quebra de P , registada na curva P - δ da junta adesiva com Araldite® AV138, ocorre com início da propagação da fenda e, quando a fenda chega ao início da curvatura do deltoide, P volta a ter uma tendência crescente. A junta com adesivo Araldite® 2015 e $t_p=1$ mm tem uma curva parabólica antes de atingir o P_{max} devido à elasticidade da pele e do comportamento mais dúctil do adesivo. Para as restantes espessuras o adesivo Araldite® 2015 tem uma forma da curva similar à do Sikaforce® 7752.

Figura 121 - Curvas P - δ para a geometria de $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b).

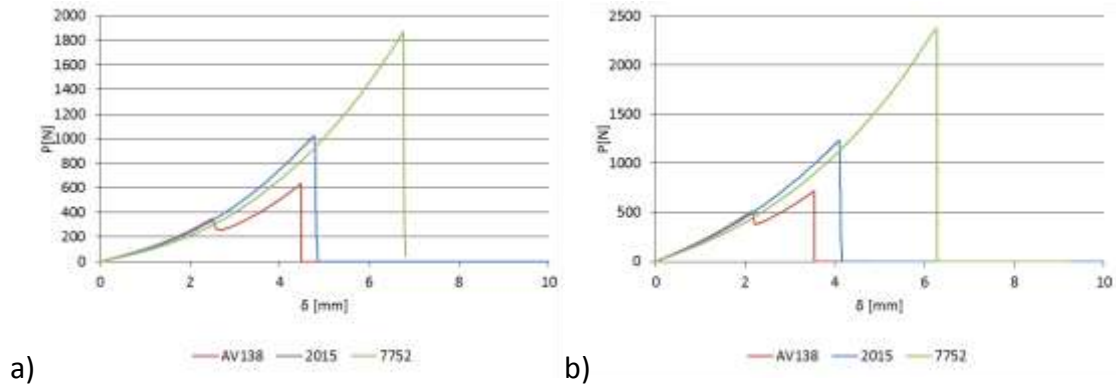


Figura 122 - Curvas P - δ para a geometria de Pele de $t_p=3$ mm (a) e de $t_p=4$ mm (b).

3.2.5.1.3 Análise de tensões

No estudo de t_p para o adesivo Araldite® AV138 são obtidas as tensões de corte e de arrancamento ao longo da sobreposição da junta (Figura 123 e Figura 124, respetivamente). Conclui-se que, quanto menor for a espessura de pele maior é o pico de tensão na extremidade da junta. Também se observa que quanto maior a espessura da pele mais é atenuado o efeito da curvatura do substrato “T”.

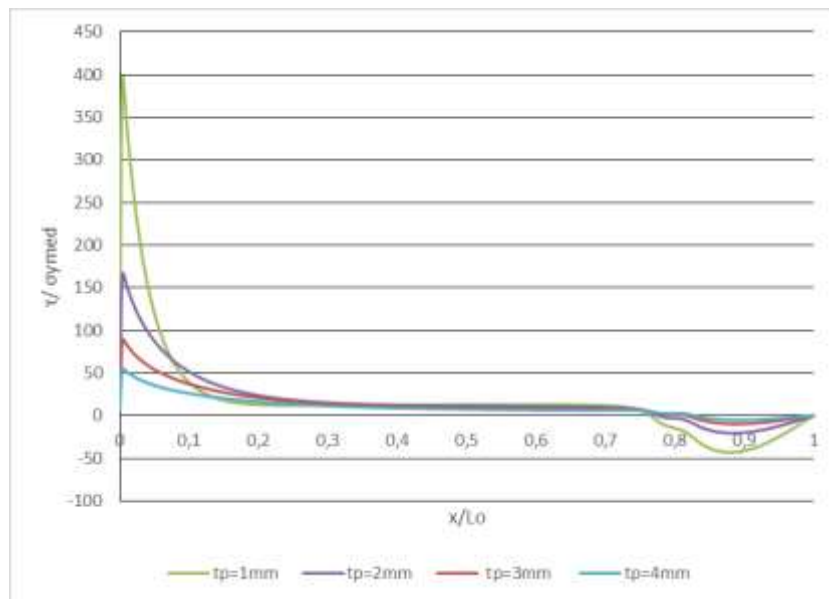


Figura 123 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_p estudados com o Araldite® AV138.

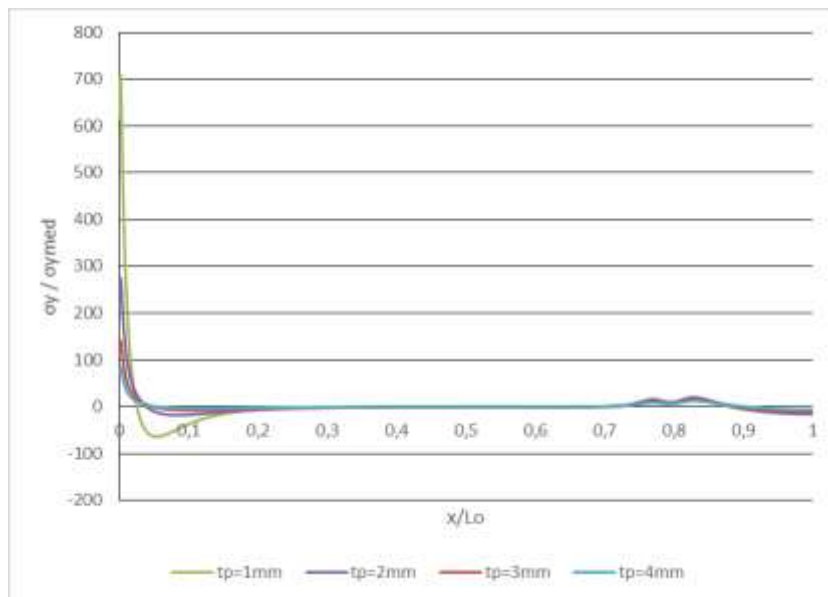


Figura 124 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_p estudados com o Araldite® AV138.

Para o t_p de pele com o adesivo Araldite® 2015 retirou-se as tensões de corte e de arrancamento que podem ser observadas na Figura 125 e Figura 126 respetivamente. O comportamento das tensões segue o mesmo sentido do adesivo Araldite® AV138, onde existe maior pico de tensão nas extremidades da junta para as espessuras de pele menores.

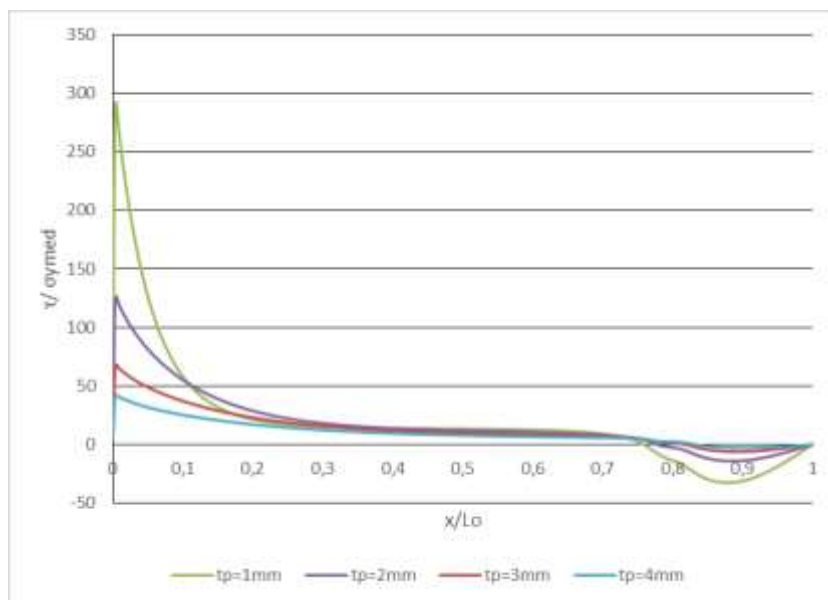


Figura 125 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_p estudados com o Araldite® 2015.

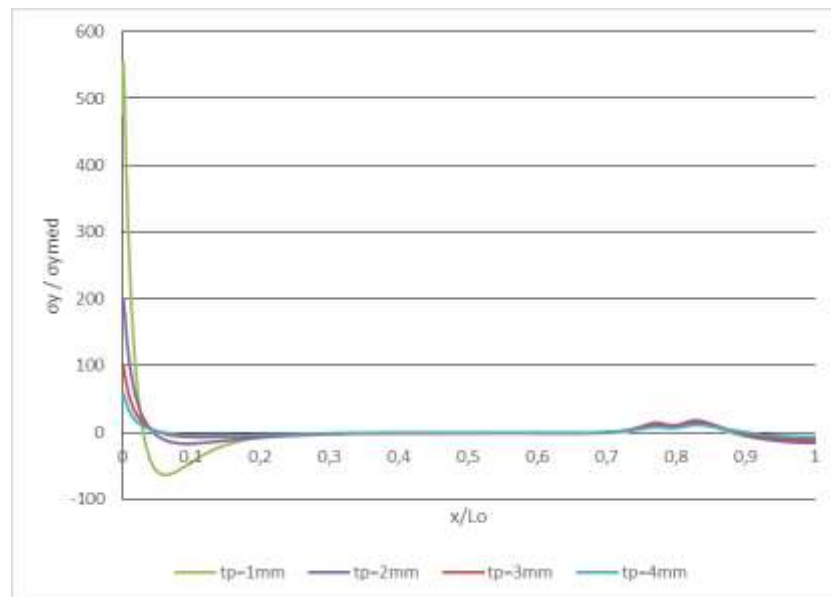


Figura 126 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_p estudados com o Araldite® 2015.

Para o estudo de t_p de uma junta com o adesivo Sikaforce® 7752 obtiveram-se as tensões de corte e de arrancamento, que podem ser observadas na Figura 127 e Figura 128, respetivamente. Os resultados obtidos revelam que, quanto menor t_p , maior será o pico de tensão na extremidade da junta.

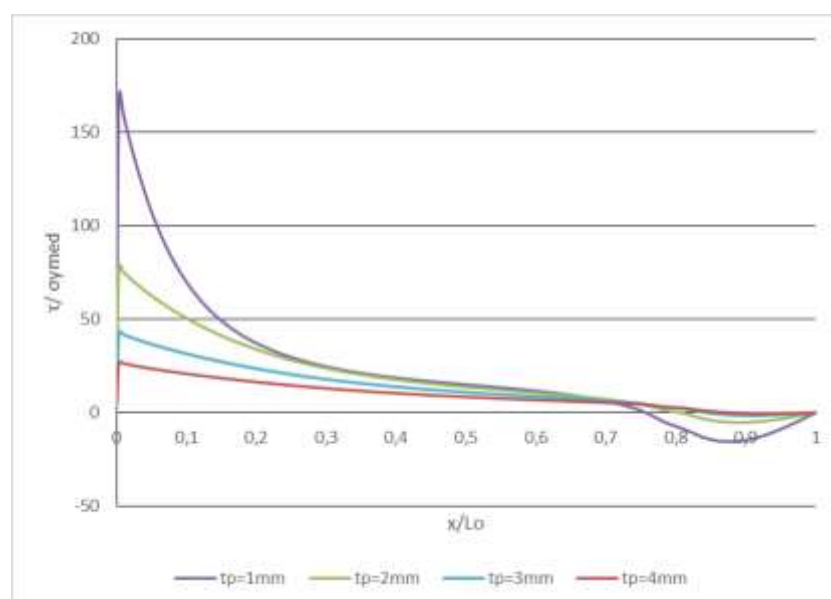


Figura 127 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_p estudados com o Sikaforce® 7752.

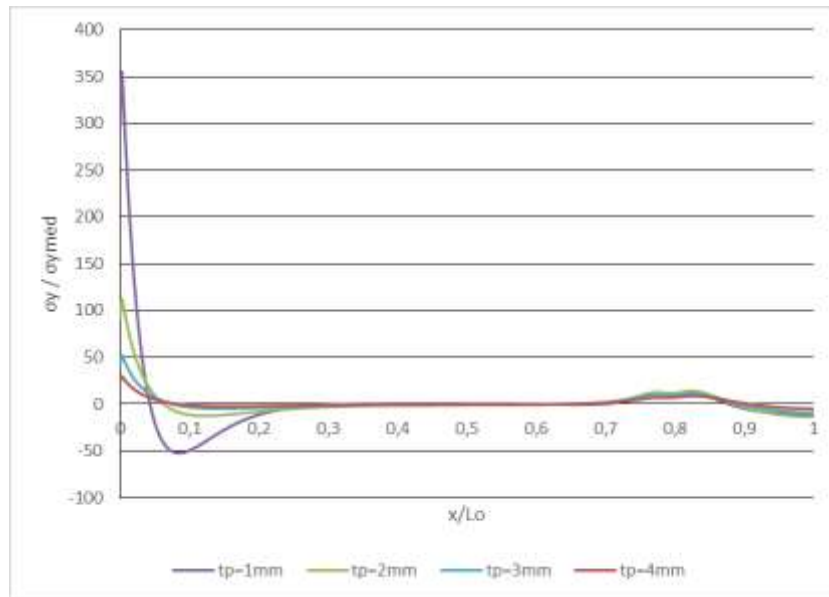


Figura 128 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_p estudados com o Sikaforce® 7752.

3.2.5.1.4 Estudo da variável de dano

No estudo da variável de dano obteve-se os resultados para cada um dos adesivos e a propagação da degradação para os vários valores de t_p . Assim, é feita uma análise da degradação nas camadas coesiva e no adesivo quando a junta atinge o P_{max} em função de t_p .

Os estudos da variabilidade de dano ao longo de t_p para o adesivo Araldite® AV138 estão representados na Figura 129 (a), Figura 129 (b), Figura 130 (a) e Figura 130 (b). Neste estudo pode-se observar que a rotura em todos os casos ocorreu pelo adesivo (que está com degradação máxima em quase toda a extensão). É ainda visível o dano no início da camada da curva do deltoide para todos os t_p . Existe dano na camada 1 no início da camada da curva do deltoide, que se agrava com o aumento de t_p .

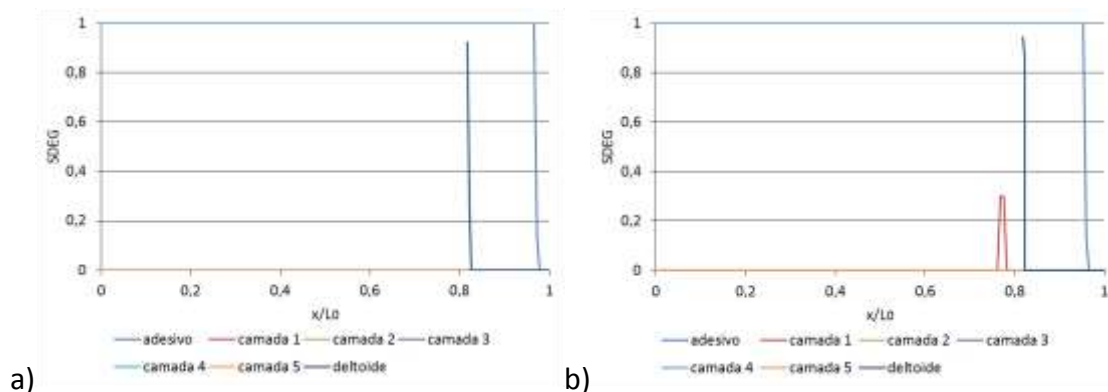


Figura 129 - SDEG para $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b) com o Araldite® AV138.

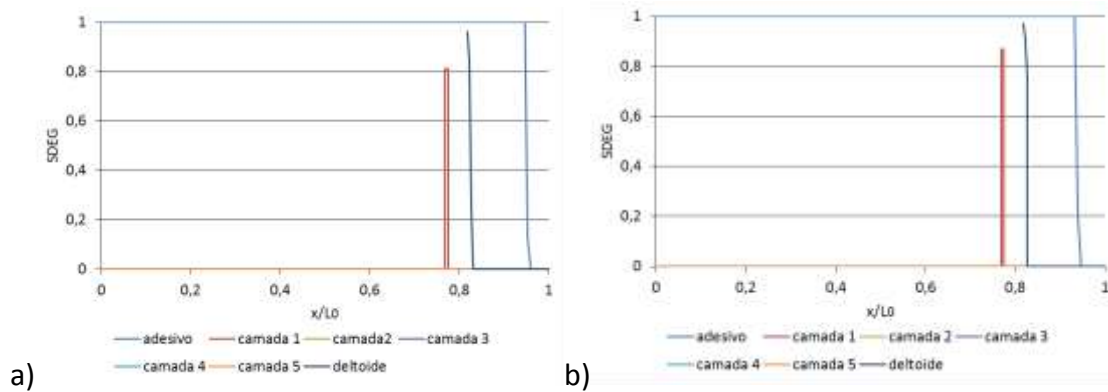


Figura 130 - SDEG para $t_p=3$ mm (a) e $t_p=4$ mm (b) com o Araldite® AV138.

Os estudos da variabilidade de dano em função de t_p estudadas para o adesivo Araldite® 2015 estão representados na Figura 131 (a), Figura 131 (b) Figura 132 (a) e Figura 132 (b). Neste estudo é possível ver que, para $t_p=1$ mm e 2 mm, a rotura ocorreu pelo adesivo e com dano muito alto na camada da curva do deltoide. Já para $t_p=3$ mm e 4 mm o adesivo não se degradou por completo enquanto a camada da curva do deltoide já tinha iniciado a rotura total. A camada 1 têm mais dano quanto maior for o t_p .

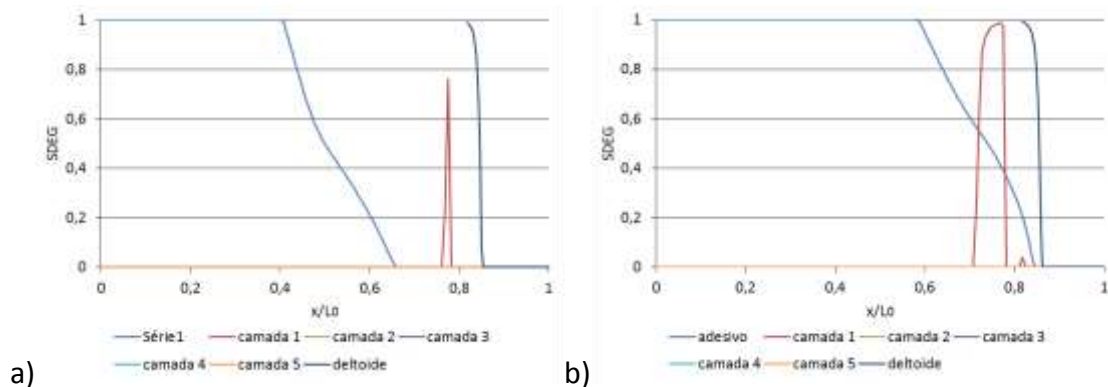


Figura 131 - SDEG para $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b) com o Araldite® 2015.

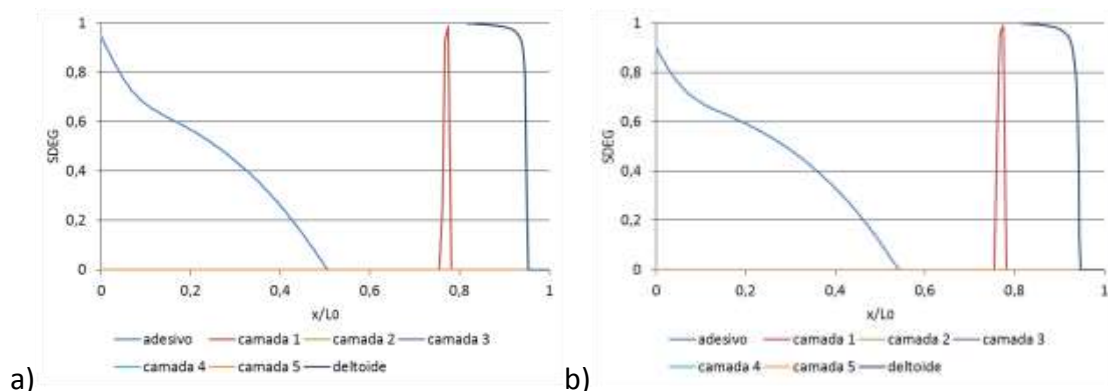


Figura 132 - SDEG para $t_p=3$ mm (a) e $t_p=4$ mm (b) com o Araldite® 2015.

O estudo da variabilidade de dano em função de t_p para o adesivo Sikaforce® 7752 é descrito pelas Figura 133 (a), Figura 133 (b), Figura 134 (a) e Figura 134 (b). Os resultados

obtidos revelam que a camada da curva do deltoide e a camada 1 atingem a rotura total no início da curva do substrato em “T”. A camada do adesivo propaga-se com o aumento de t_p apesar de não atingir a rotura total em nenhum ponto. Para $t_p=4$ mm, a camada do adesivo tem dano em todo o comprimento de sobreposição da junta, enquanto a camada da curva do deltoide e a camada 1 já atingiram a rotura total no início da curva do deltoide. Apesar da camada da curva do deltoide ter atingido primeiro a rotura total, a propagação do dano no adesivo foi mais rápida.

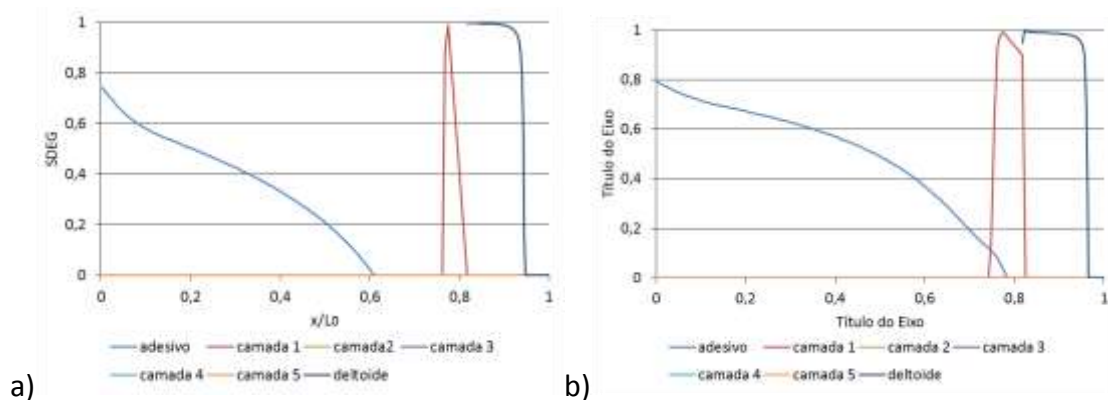


Figura 133 - SDEG para $t_p=1$ mm (a) e $t_p=2$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

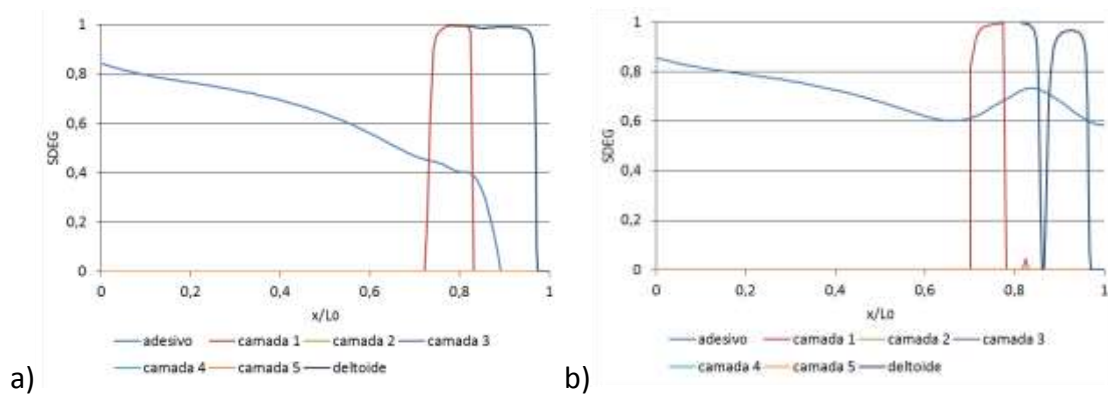


Figura 134 - SDEG para $t_p=3$ mm (a) e $t_p=4$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

3.2.5.1.5 Resistência da junta

Os resultados da carga máxima (P_{max}) em função de t_p estão expostos na Figura 135. Observa-se que, quanto maior o t_p , maior é o P_{max} . No caso de $t_p=3$ mm para o adesivo Araldite® 2015, houve uma ligeira diminuição de 2% da resistência relativamente ao caso de $t_p=2$ mm. Este efeito pode ser justificado pela mudança de tipo de rotura, que passa de uma rotura pelo adesivo para uma rotura pelo substrato. Tomando como ponto de referência o valor de resistência da junta com $t_p=1$ mm, a resistência para o adesivo Araldite® AV138 das juntas com t_p de 2, 3 e 4 mm aumenta em 34,9%, 59,4% e 80,8%, respetivamente. Para a junta adesiva com Araldite® 2015, o aumento percentual dos valores de P_{max} , relativamente à junta com $t_p=1$ mm, é de 63,4%, 61,2% e de 94,1% para as juntas com t_p de 2, 3 e 4 mm, respetivamente. Para o adesivo Sikaforce® 7752 o

aumento percentual dos valores de P_{max} , relativamente à junta com $t_p=1$ mm, é de 94,1%, 152,9% e de 220,9% para as juntas com t_p de 2, 3 e 4 mm, respetivamente.

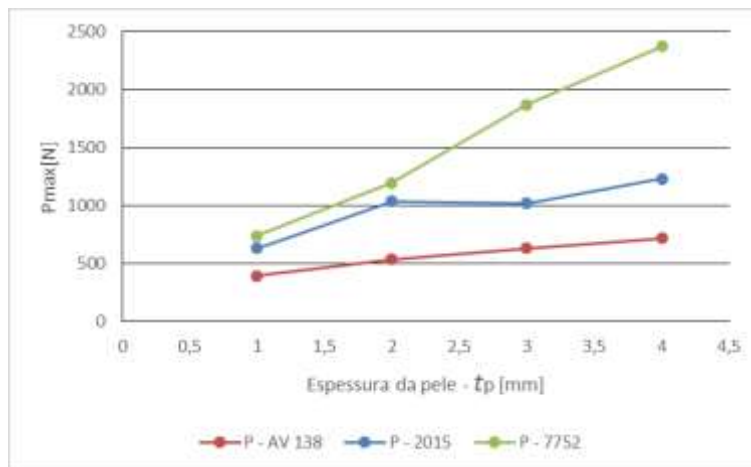


Figura 135 – Resultados da P_{max} no estudo de t_p .

Neste estudo é demonstrado que o aumento de t_p provoca uma melhor distribuição do dano no adesivo, bem como um aumento do dano nas camadas interlaminares. Este facto mostra que, para t_p maiores, a junta está mais sujeita a esforço de clivagem, enquanto para t_p menores a junta está mais sujeita a esforços de arrancamento. Com um esforço maior de clivagem, em detrimento do esforço de arrancamento, os esforços nas camadas coesivas da junta são mais distribuídas ao longo de L_0 . Quanto maior a rigidez da pele menor é o pico de tensão nas extremidades. Contudo, a diminuição da tensão de arrancamento no início da curva do deltoide não é tão expressiva, fazendo do início da curva do deltoide o local crítico de tensões para t_p , ou seja, com valores mais elevados.

Para todos os estudos da geometria de t_p , as juntas adesivas com Sikaforce® 7752 registaram os valores de P_{max} mais elevados, enquanto as juntas com adesivo Araldite® AV138 registaram os valores de P_{max} mais baixos. Tomando como ponto de referência o valor de P_{max} da junta com o adesivo Araldite® AV138, a maior diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 93,1% (para $t_p=2$ mm) e de 229,7% (para $t_p=4$ mm), respetivamente. Tomando o mesmo ponto de referência o valor de P_{max} , da junta com o adesivo Araldite® AV138, a menor diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 59,5% (para $t_p=1$ mm) e de 85,7% (para $t_p=1$ mm), respetivamente.

3.2.5.2 Espessura do T

O substrato “T” corresponde ao *stiffener* propriamente dito, e foi sujeito a um estudo para diferentes espessuras (t_0), 0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm. O estudo pretende entender a influência que t_0 tem na rigidez da estrutura e qual é o comportamento dos adesivos na junta.

3.2.5.2.1 Modos de rotura

Os resultados da simulação da junta revelam que a ligação pode romper por uma das camadas coesivas dos substratos ou pela camada do adesivo. Ao longo das simulações obtiveram-se três modos de rotura, havendo a rotura pela camada do adesivo (Figura 136), a rotura pelo substrato (Figura 139) e a rotura conjunta pelo substrato e pelo adesivo, denominada de rotura mista (Figura 137 e Figura 138).

Na Figura 136 está representada uma rotura pela camada do adesivo, onde as outras camadas coesivas têm dano mínimo ou nulo.

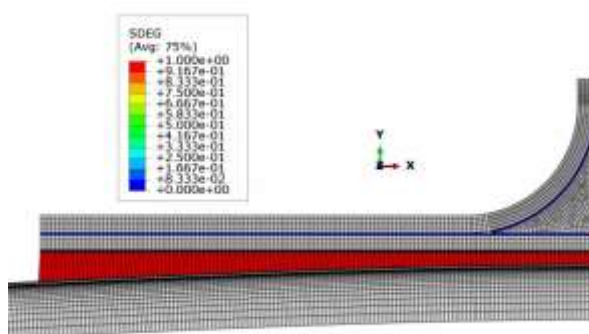


Figura 136 - Modo de rotura pelo adesivo no teste para $t_0=2$ mm com o Araldite® AV138.

Na Figura 137 está representada uma rotura pelo substrato e pelo adesivo, um comportamento que ocorreu para os três adesivos quando t_0 é igual a 0,5 mm. Verifica-se que a rotura da camada coesiva ocorre na zona de maior deformação junto ao deltoide, que corresponde ao início da curva do substrato. A camada do adesivo inicia a rotura na zona interior do deltoide. É de se notar que o dano é mínimo na extremidade da junta.

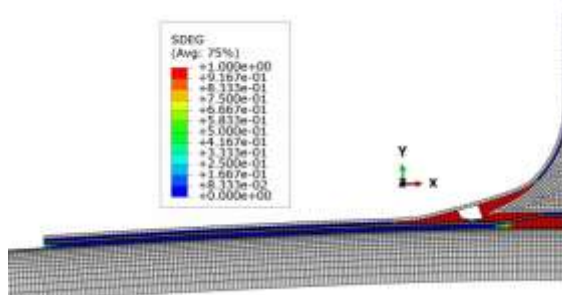


Figura 137 - Modo de rotura misto (substrato e adesivo) no teste para $t_0=0,5$ mm com o Araldite® 2015.

Na Figura 138 está representado o modo de rotura misto idêntico ao demonstrado na Figura 137. Contudo, existem algumas diferenças devidas à espessura e consequentemente à rigidez. Diferente da rotura anterior, esta apresenta maior rigidez no início da curvatura do deltoide, o que leva a uma propagação da fenda pela camada do adesivo. Neste tipo de rotura é explícito o dano por delaminação na camada 3.

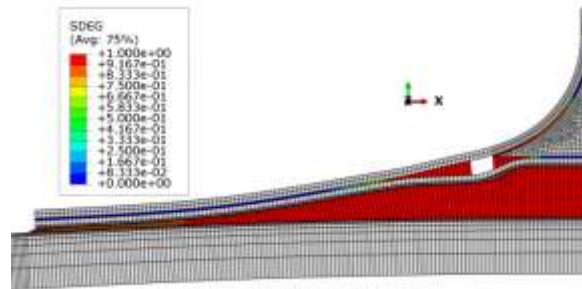


Figura 138 - Modo de rotura misto (substrato e adesivo) no teste para $t_0=1$ mm com o Sikaforce® 7752.

Na Figura 139 está representada uma rotura pelo substrato. A fenda propaga-se pela camada 1 e pala camada da curva do deltoide a partir do início da curva do substrato. Também se observa que a camada do adesivo tem uma ligeira degradação na extremidade da junta.

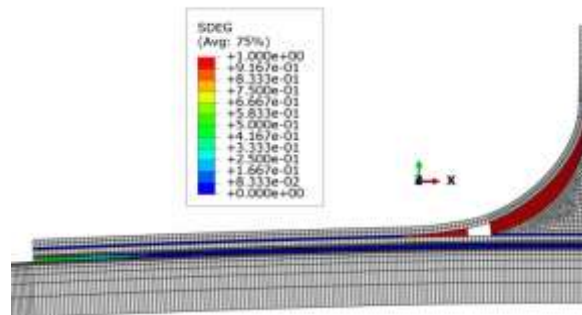


Figura 139 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $t_0=1$ mm com o Araldite® 2015.

Na Tabela 15 estão expostos os modos de rotura e os P_{max} para todos os t_0 , em cada adesivo estudado.

Tabela 15 - Modos de rotura para diferentes espessuras do "T"

t_0 [mm]	AV138		2015		7752	
	P_{max} [N]	zona de rotura	P_{max} [N]	zona de rotura	P_{max} [N]	zona de rotura
0,5	1214,0	misto	1280,1	misto	1385,1	misto
1	632,1	adesivo	997,1	substrato	2129,7	misto/adesivo
1,5	634,7	adesivo	1023,0	substrato	1869,6	substrato
2	635,1	adesivo	939,9	adesivo	1471,8	substrato
2,5	632,4	adesivo	930,5	adesivo	1368,1	substrato

3.2.5.2.2 Curvas $P-\delta$

Para cada valor de t_0 foi gerada uma curva $P-\delta$. As curvas representadas na Figura 140, Figura 141, Figura 142, Figura 143 e Figura 144 correspondem a t_0 de 0,5; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm, respetivamente. Nestas curvas é revelado que, para todas as espessuras estudadas,

o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta o P_{\max} maior e o adesivo Araldite® AV138 o P_{\max} menor.

Na Figura 140, correspondente a um t_0 de 0,5 mm, mostra-se que as curvas se sobrepõem para os vários adesivos e que os P_{\max} são muito próximos entre si.

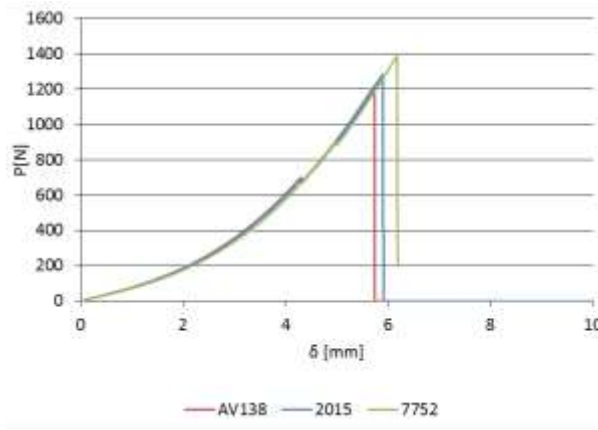


Figura 140 - Curvas P - δ para a geometria de "T" com $t_0=0,5$ mm.

Na Figura 141 é revelado que, nas curvas para o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, existe uma quebra intermédia de P devido ao início da rotura frágil dos adesivos na extremidade do adesivo.

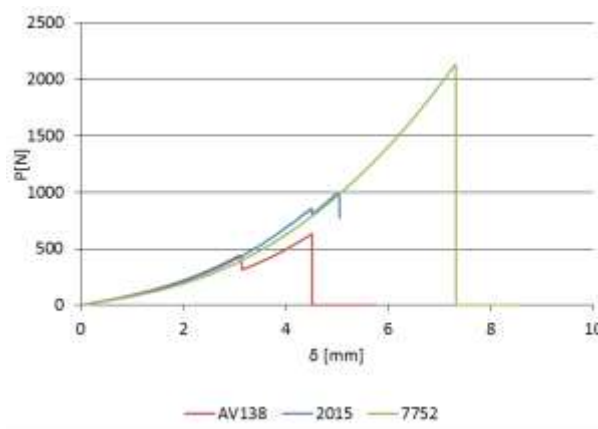


Figura 141 - Curvas P - δ para a geometria de "T" com $t_0=1$ mm.

Na Figura 142 é demonstrado que as curvas para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 têm um comportamento similar, com uma quebra abrupta típica de roturas frágeis. O adesivo Araldite® AV138 apresenta uma quebra de resistência e torna a resistir até atingir o P_{\max} . Este efeito ocorre quando a fratura se propaga até ao início da curva do "T".

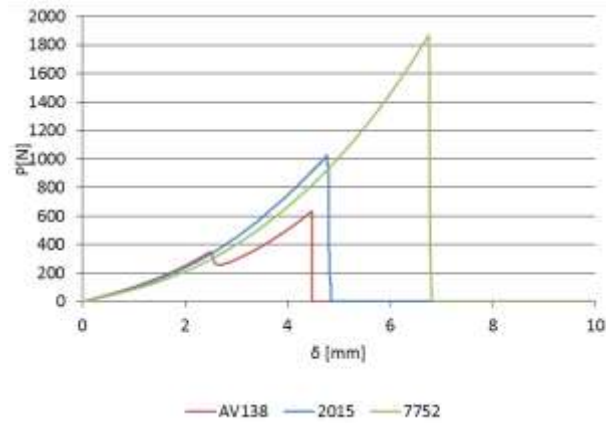


Figura 142 - Curvas P - δ para a geometria de "T" com $t_0=1,5$ mm

Na Figura 143 é revelado que os comportamentos dos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 seguem um comportamento idêntico às simulações de t_0 igual a 1,5 mm. O adesivo Araldite® 2015 apresenta uma quebra seguida de uma tendência crescente até atingir o P_{\max} , que corresponde ao início da rotura pelo adesivo. A rotura do adesivo Araldite® 2015 inicia-se pela extremidade da junta e a fenda propaga-se lentamente até ao início da curva do deltoide.

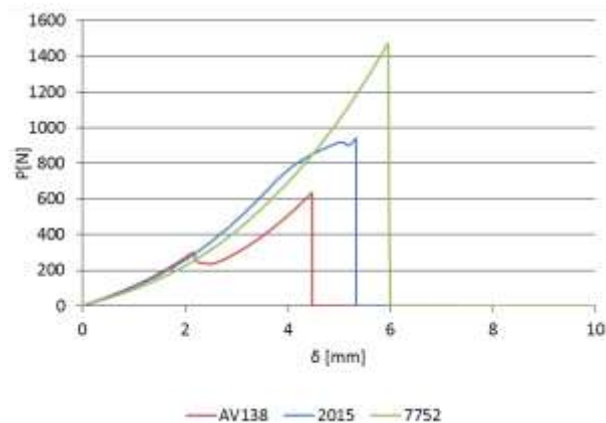


Figura 143 - Curvas P - δ para a geometria de "T" com $t_0=2$ mm.

Na Figura 144 mostra que os adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 seguem um comportamento idêntico às simulações de $t_0=2$ mm. O adesivo Araldite® 2015 inicia a rotura pela extremidade da junta, e a fenda propaga-se lentamente até ao início da curva do deltoide. Porém, ao atingir o início da curva do deltoide a junta resiste até ao P_{\max} , culminando numa quebra abrupta.

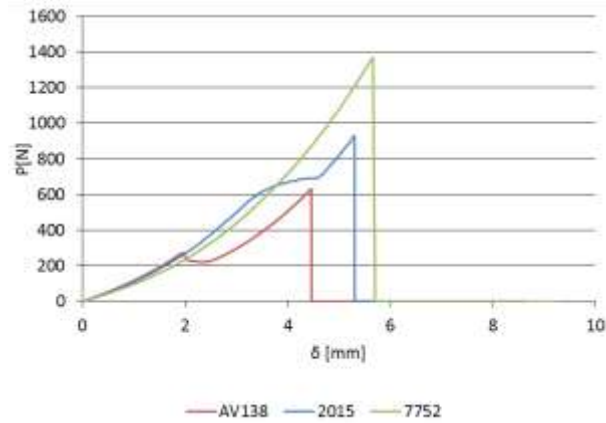


Figura 144 - Curvas $P-\delta$ para a geometria de "T" com $t_0=2,5$ mm.

3.2.5.2.3 Análise de tensões

No estudo das espessuras do substrato "T" para o adesivo Araldite® AV138, são retiradas as tensões de corte e de arrancamento ao longo da sobreposição da junta (Figura 145 e Figura 146, respetivamente). Analisando as tensões obtém-se a informação que, quanto maior é o t_0 , maior é o pico de tensão na extremidade da junta. Também se observa que, quanto maior o t_0 , mais atenuado é o pico de tensão que ocorre junto da curvatura do substrato "T".

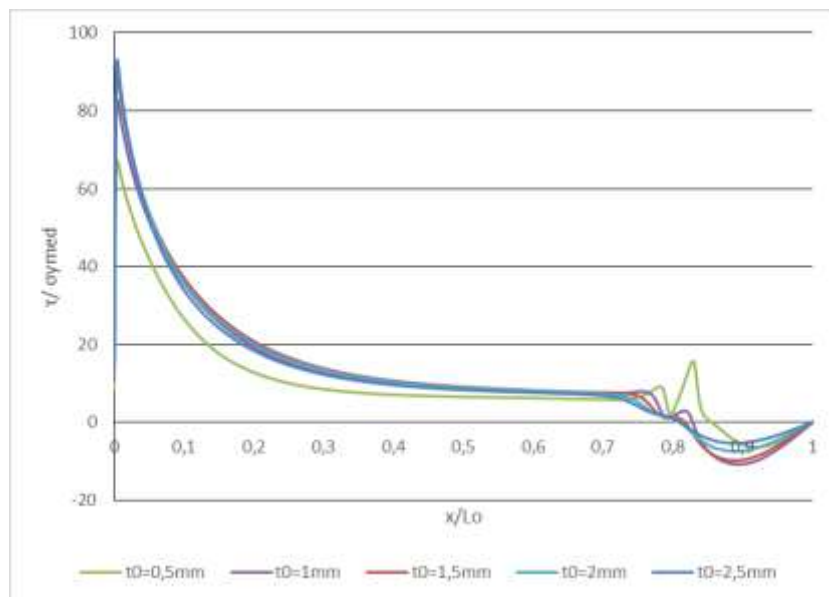


Figura 145 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_0 estudados com o Araldite® AV138.

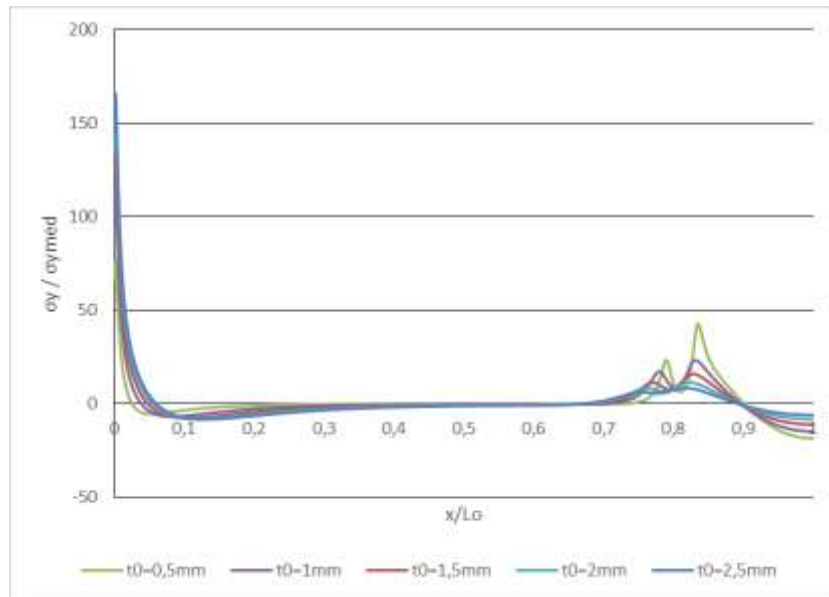


Figura 146 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_0 estudados com o Araldite® AV138.

Para o estudo de t_0 com o adesivo Araldite® 2015 obtiveram-se as tensões de corte e de arrancamento, que são expostas na Figura 147 e na Figura 148, respetivamente. Pode-se concluir que, quanto maior é t_0 , maior é o pico de tensão na extremidade da junta. Também se observa que, quanto maior o t_0 , menor é o pico de tensão que ocorre junto da curvatura do substrato "T".

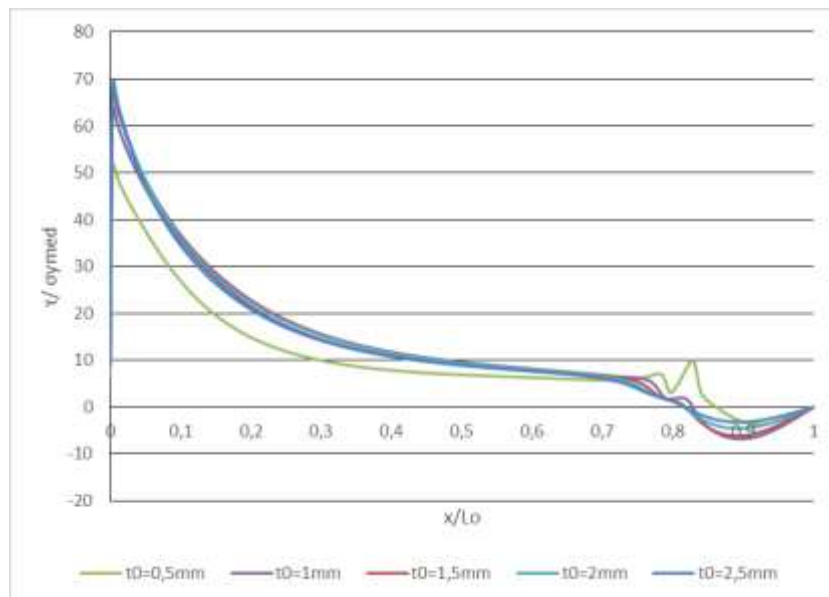


Figura 147 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_0 estudados com o Araldite® 2015.

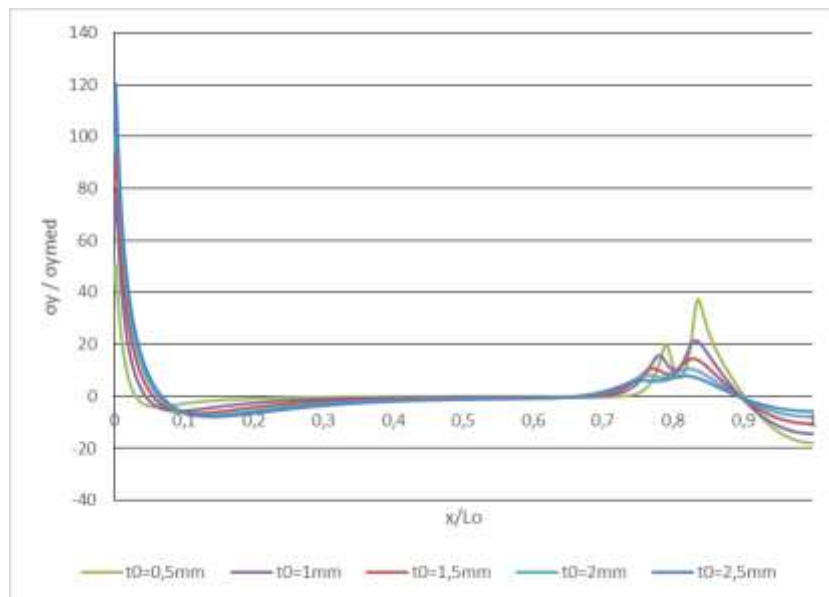


Figura 148 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_0 estudados com o Araldite® 2015.

Para o estudo de t_0 com o adesivo Sikaforce® 7752 retiraram-se as tensões de corte e de arrancamento, que estão representadas na Figura 148 e na Figura 149, respetivamente.

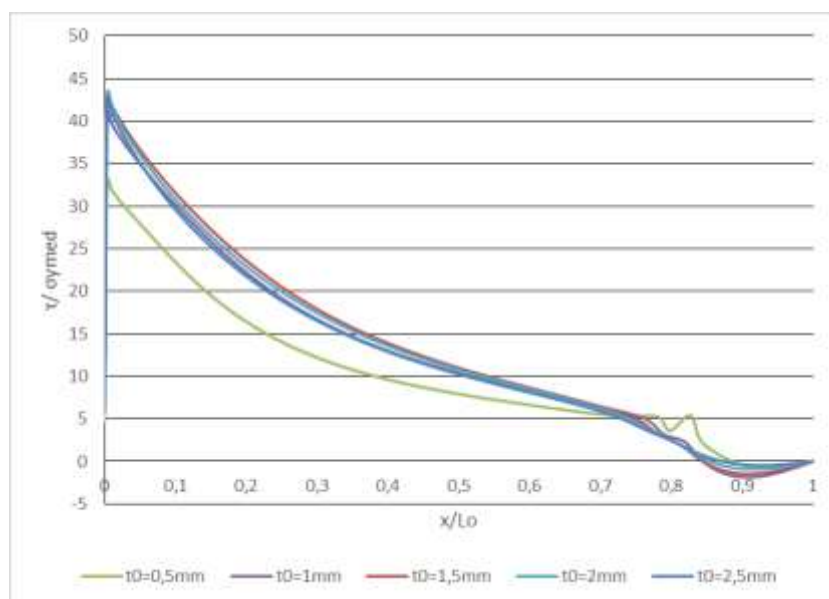


Figura 149 - Distribuição das tensões de corte para os vários t_0 estudados com o Sikaforce® 7752.

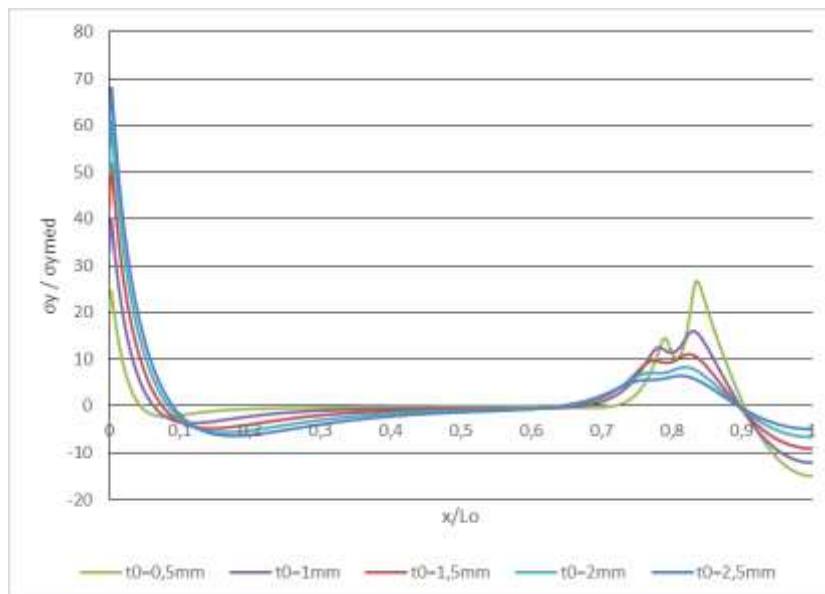


Figura 150 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários t_0 estudados com o Sikaforce® 7752.

Os resultados obtidos revelam que, quanto menor o t_0 maior será o pico de tensão de arrancamento na extremidade da junta e menor é o pico de tensão de arrancamento na zona de início da curvatura do substrato. É também observado que as de tensões de corte são idênticas entre os diferentes t_0 . Contudo, para $t_0=0,5$ mm, o registo é diferente, pois observa-se um pico de tensão na extremidade da junta inferior e um pico maior na zona do início da curva do substrato. Para $t_0=0,5$ mm observa-se ainda que o pico de tensão de arrancamento na zona de início da curvatura é superior ao pico de tensão na extremidade da junta.

3.2.5.2.4 Estudo da variável de dano

O estudo da variável de dano para os diferentes valores de t_0 é realizado através da análise da degradação das camadas coesivas quando a junta atinge o P_{\max} .

Os estudos da variabilidade de dano para o adesivo Araldite® AV138 com $t_0=0,5$; 1; 1,5; 2 e 2,5 mm estão representados na Figura 151 (a), Figura 151 (b), Figura 152 (a), Figura 152 (b) e Figura 153, respetivamente. Para o caso deste adesivo pode-se observar que, quanto maior o t_0 , menor é o dano na camada 1, na camada 2 e na camada da curva do deltoide. Para o caso da junta com $t_0=0,5$ mm o dano na camada do adesivo ocorre só na extremidade da sobreposição, enquanto na camada 1 e na camada da curva do deltoide o dano é notoriamente mais severo. Para as restantes espessuras de “T” a camada do adesivo é a que tem maior dano, apresentando rotura em quase toda a extensão da sobreposição da junta. Excetuando o caso de $t_0=0,5$ mm, os resultados obtidos mostram que o dano nas camadas 1, 2 e da curva do deltoide não atingiram a rotura total em nenhum ponto.

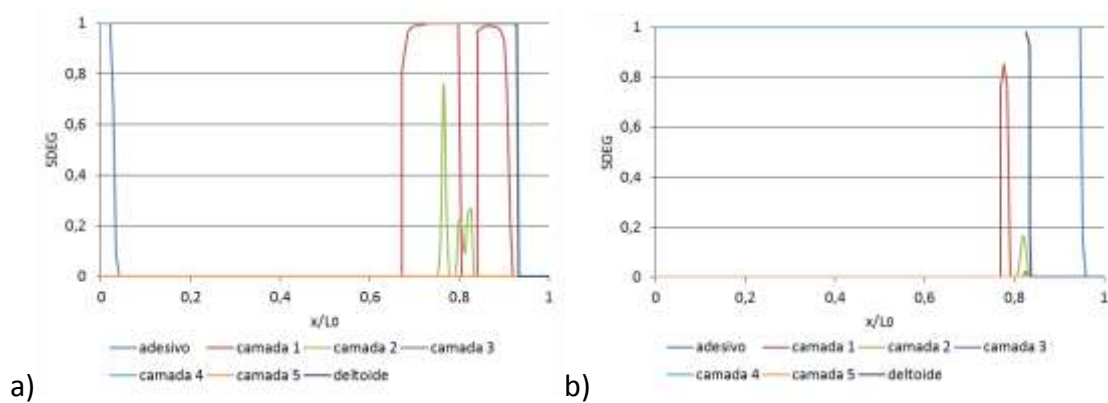


Figura 151 - SDEG para $t_0=0,5$ mm (a) e $t_0=1,0$ mm (b) com o Araldite® AV138.

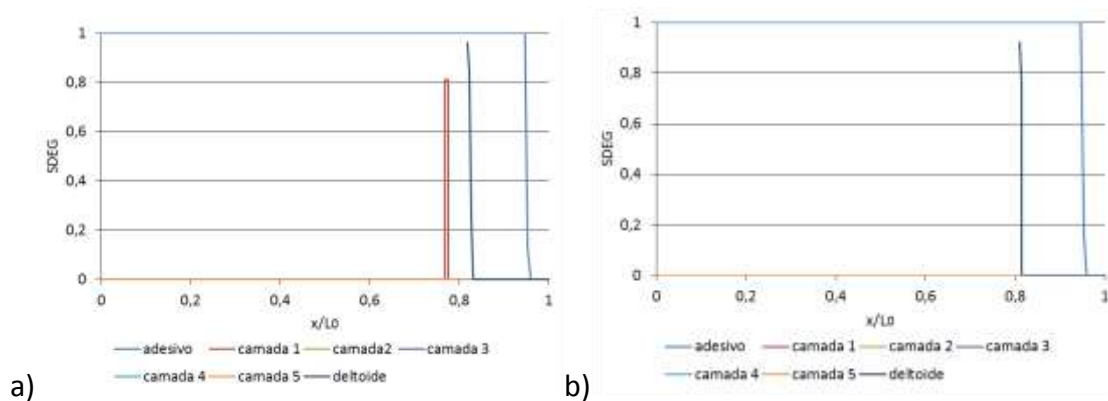


Figura 152 - SDEG para $t_0=1,5$ mm (a) e $t_0=2,0$ mm (b) com o Araldite® AV138.

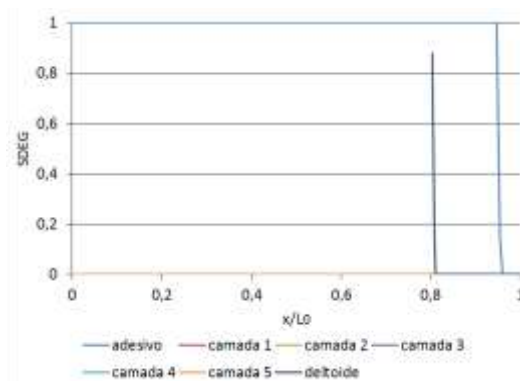


Figura 153 - SDEG para $t_0=2,5$ mm com o Araldite® AV138.

Os resultados do estudo da variabilidade de dano, ao longo de t_0 , para o adesivo Araldite® 2015 estão representados na Figura 154 (a), Figura 154 (b), Figura 155 (a), Figura 155 (b) e Figura 156. Neste estudo é possível observar que quanto maior o t_0 , maior é o dano na camada do adesivo e menor é o dano nas camadas 1, 2, 3 e na camada da curva do deltoide. Para o caso de $t_0=0,5$ mm observa-se que, na camada 1 e na camada da curva do deltoide, o dano foi total na zona junto ao início da curvatura do “T”, e que ainda houve dano considerável na camada 2 e na camada 3. Para $t_0=0,5$ mm, 1 mm e de 1,5 mm o dano na camada do adesivo foi essencialmente na extremidade da

sobreposição e não atingiu a rotura. Já no caso de $t_0=2$ mm e de 2,5 mm a rotura total ocorreu na camada do adesivo, ficando a camada 1 e a camada da curva do deltoide sem atingir a rotura total.

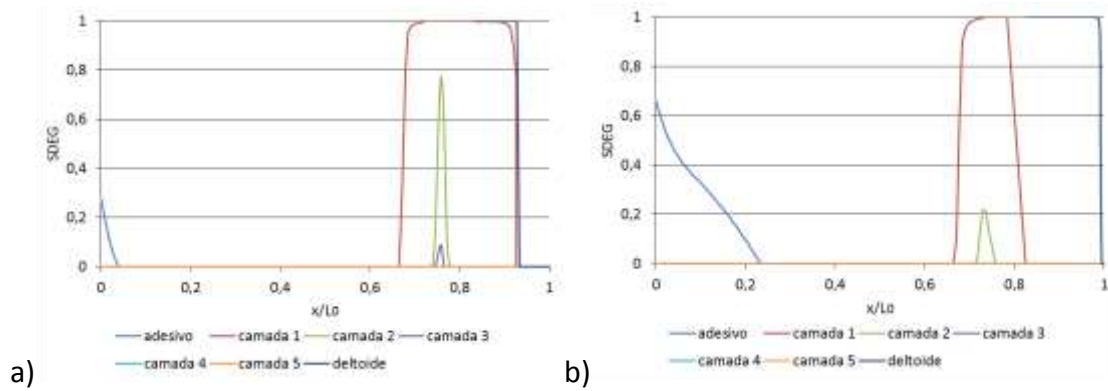


Figura 154 - SDEG para $t_0=0,5$ mm (a) e $t_0=1,0$ mm (b) com o Araldite® 2015.

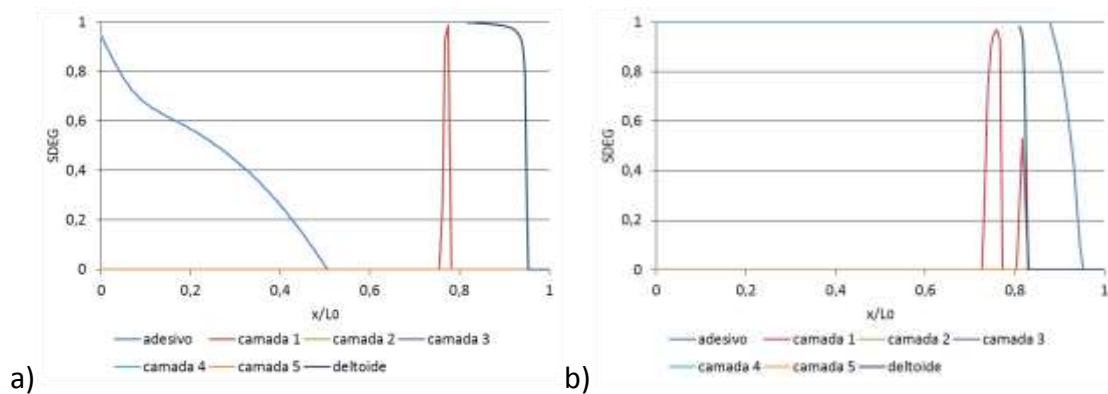


Figura 155 - SDEG para $t_0=1,5$ mm (a) e $t_0=2,0$ mm (b) com o Araldite® 2015.

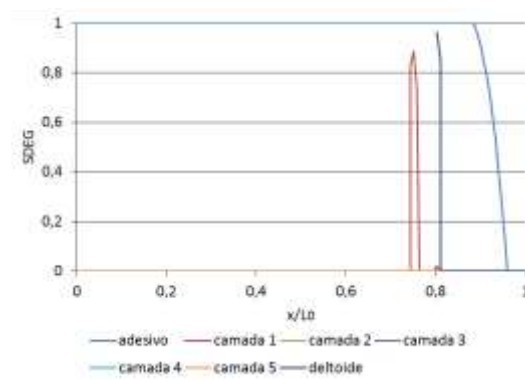


Figura 156 - SDEG para $t_0=2,5$ mm com o Araldite® 2015.

O estudo da variabilidade de dano ao longo de t_0 , para as juntas adesivas com Sikaforce® 7752, está representado na Figura 157 (a), Figura 157 (b), Figura 158 (a), Figura 158 (b) e Figura 159. Com a exceção da junta com $t_0=0,5$ mm, quanto maior for o t_0 menor é o dano na camada do adesivo e nas camadas 1 e 2. Porém, o dano na camada da curva do deltoide é maior. Em todas as espessuras de “T” estudadas para este adesivo a camada

da curva do deltoide teve rotura total iniciada na zona do início da curvatura do “T”. No caso da simulação com $t_0=0,5$ mm observa-se que a camada 1 e a camada da curva do deltoide atingiram a rotura do início da curva deltoide, a camada 2 teve degradação elevada na zona do início da curva deltoide e a camada do adesivo teve dano maior junto ao deltoide do que na extremidade da sobreposição da junta.

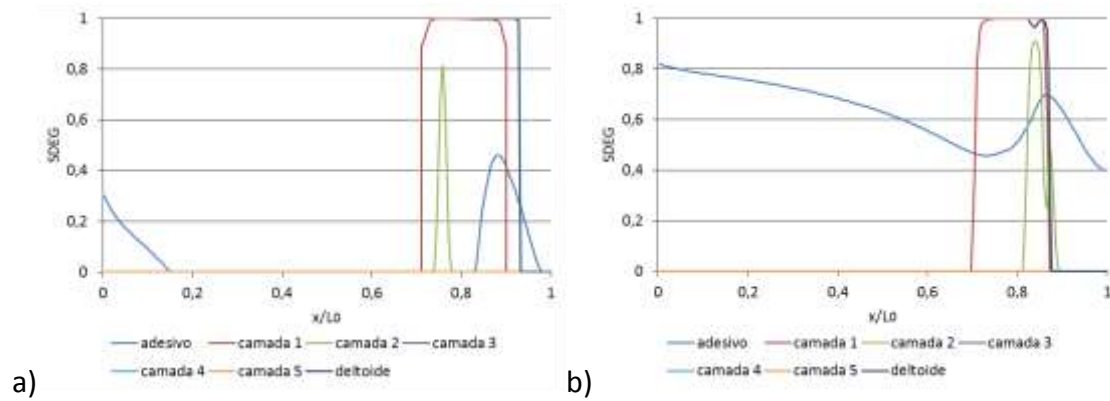


Figura 157 - SDEG para $t_0=0,5$ mm (a) e $t_0=1,0$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

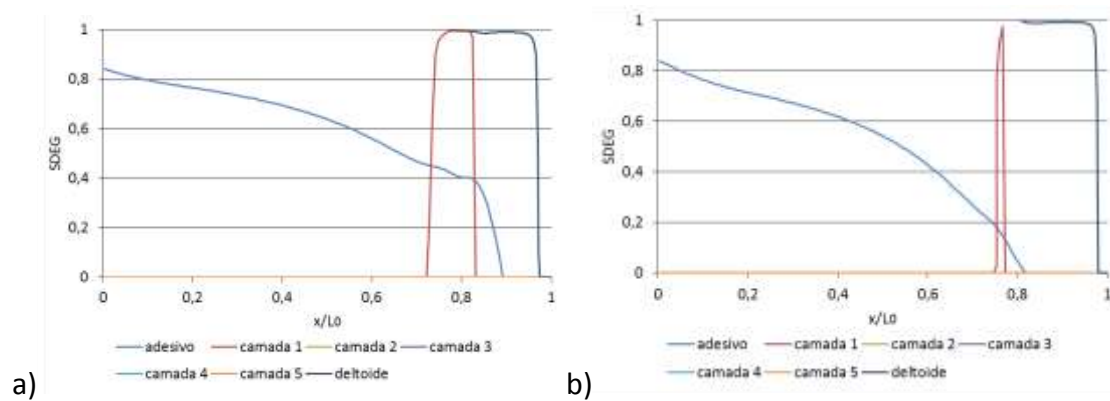


Figura 158 - SDEG para $t_0=1,5$ mm (a) e $t_0=2,0$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

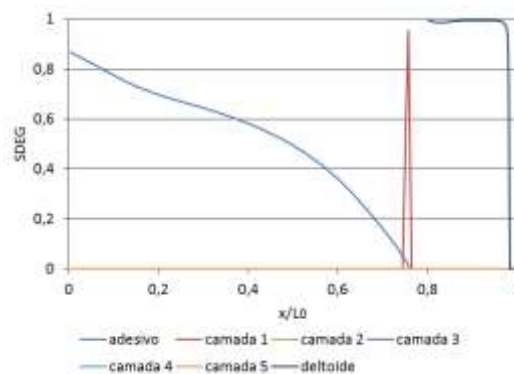


Figura 159 - SDEG para $t_0=2,5$ mm com o Sikaforce® 7752.

3.2.5.2.5 Resistência da junta

Os resultados de P_{max} para o estudo de t_0 estão representados na Figura 160. Observa-se que, quanto maior for a flexibilidade do substrato T, menor é o pico de tensão na extremidade da junta. Contudo, a baixa rigidez do substrato T leva a um aumento no pico de tensão na zona do início da curva do deltoide, que tem valores próximos ou superiores aos valores dos picos de tensão na extremidade da junta adesiva. Para o caso de $t_0=0,5$ mm, os resultados de P_{max} e os modos de rotura foram idênticos nos três adesivos estudados. Para este valor de t_0 , e tomando-se como referência o valor de P_{max} da junta adesiva com Araldite®AV138, houve um aumento percentual de 5,5% e 15,0% dos resultados da junta adesiva com Araldite®2015 e com Sikaforce®7752, respetivamente.

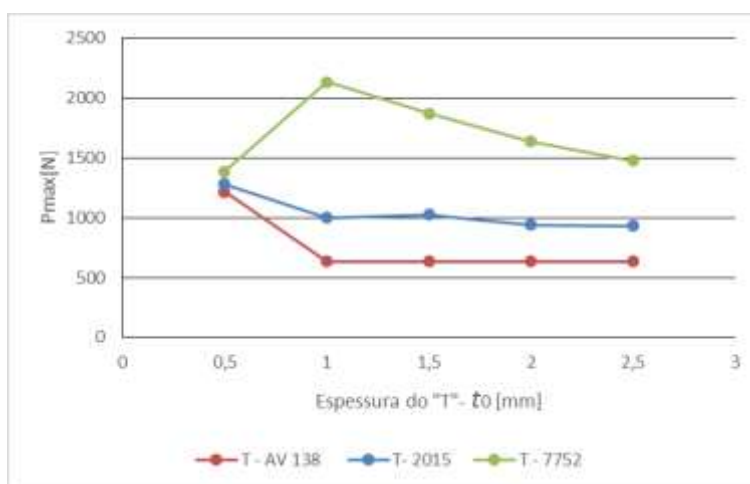


Figura 160 - Resultados de P_{max} no estudo de t_0 .

Para o caso do adesivo Araldite®AV138 nos restantes valores de t_0 regista-se uma diminuição na resistência, contudo os valores de P_{max} para $t_0=1$; 1,5; 2 e de 2,5 mm mantiveram-se muito próximos. Na junta adesiva com Araldite®AV138, relativamente à junta com $t_0=0,5$ mm, houve uma diminuição percentual dos valores de P_{max} em 47,9%, 47,7%, 47,7% e de 47,9% para as juntas com t_0 de 1; 1,5; 2 e 2,5 mm, respetivamente. Este facto pode ser justificado pela fragilidade do adesivo. Apesar de na zona do início da curva do deltoide haver uma diminuição do pico de tensão e uma diminuição do dano coesivo, na extremidade do adesivo os picos de tensão são muito próximos, originando o início da rotura frágil do adesivo.

Para o caso do adesivo Araldite®2015 nos restantes valores de t_0 regista-se uma diminuição na resistência, contudo os valores de P_{max} para os t_0 de 1; 1,5; 2 e de 2,5 mm mantiveram-se próximos. Para a junta adesiva com Araldite®2015, relativamente à junta com $t_0=0,5$ mm, houve uma diminuição percentual dos valores de P_{max} em 22,1%, 20,1%, 26,6% e de 27,3% para as juntas com t_0 de 1; 1,5; 2 e 2,5 mm, respetivamente. Para juntas com $t_0=2$ mm ou maiores o modo de rotura passou de uma rotura pelo substrato

para uma rotura pelo adesivo, o que se deve à diminuição do dano interlaminar na zona do início da curva do deltoide.

Para o caso do adesivo Sikaforce® 7752, para os restantes valores de t_0 , regista-se um aumento na resistência. Contudo, o valor máximo de P_{max} é obtido para $t_0=1$ mm, sendo que, para valores superiores de t_0 , P_{max} tem uma tendência decrescente. Para o adesivo Sikaforce® 7752 o aumento percentual dos valores de P_{max} , relativamente à junta com $t_0=0,5$ mm, é de 53,8%, 35,0% e de 6,3% para as juntas com $t_0=1$; 1,5 e 2 mm, respetivamente. No caso de $t_0=2,5$ mm há uma diminuição percentual de P_{max} em 1,2% relativamente à junta com $t_0=0,5$ mm. Com o aumento do t_0 a junta adesiva está mais suscetível ao pico de tensão de arrancamento na camada 1, que na zona do início da curva do deltoide é superior ao pico de tensão de arrancamento na extremidade (Figura 111).

Tomando como ponto de referência o valor de P_{max} da junta com o adesivo Araldite® AV138, a maior diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 93,1% e de 229,7%, respetivamente. Tomando o mesmo ponto de referência o valor de P_{max} , da junta com o adesivo Araldite® AV138, a menor diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 59,5% e de 85,7%, respetivamente.

Em todo o estudo da geometria de t_0 as juntas adesivas com Sikaforce® 7752 registaram os valores de P_{max} mais elevados, enquanto as juntas com adesivo Araldite® AV138 registaram os valores de P_{max} mais baixos. Tomando como ponto de referência o valor de P_{max} da junta com o adesivo Araldite® AV138, a maior diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 61,2% e de 237,0%, respetivamente. Com a referência da junta com o adesivo Araldite® AV138 para o valor de P_{max} , a menor diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 5,5% e de 14,1%, respetivamente.

3.2.5.3 Comprimento de sobreposição

Neste estudo foram considerados os valores de L_0 de 10, 20, 30 e 40 mm. Pretende-se estudar o efeito que L_0 tem no P_{max} bem como no comportamento dos adesivos para estas condições.

3.2.5.3.1 Modos de rotura

A simulação numérica prevê que a junta adesiva possa romper pela camada do adesivo ou por uma das camadas dos substratos. Ao analisar os resultados deste estudo é possível observar três modos de rotura: a rotura pelo substrato e pelo adesivo denominada de rotura mista (Figura 161); a rotura pela camada do adesivo (Figura 162) e rotura e pelo substrato (Figura 163).

Na Figura 161 está representada uma rotura mista, onde se observa que a camada 1 e a camada da curva do deltoide têm degradação acentuada e em grande parte já atingiram

a rotura. Também se conclui que a camada do adesivo iniciou a rotura pela parte interna da sobreposição, e que se alastrou para a extremidade.

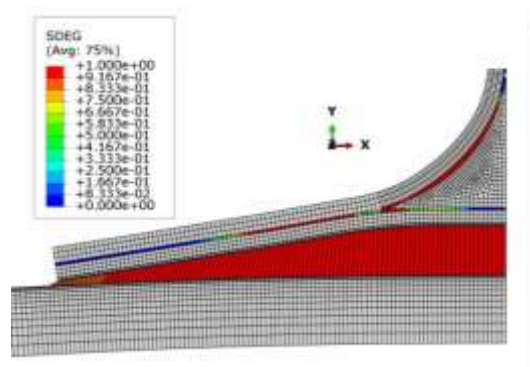


Figura 161 - Modo de rotura misto (pelo adesivo e pelo substrato) no teste para $L_0=20$ mm com o Sikaforce® 7752.

Na Figura 162 está representada uma rotura pela camada do adesivo, onde é demonstrado que o dano na camada do adesivo iniciou na extremidade e se alastrou por toda a junta sem que as outras camadas coesivas tenham dano.

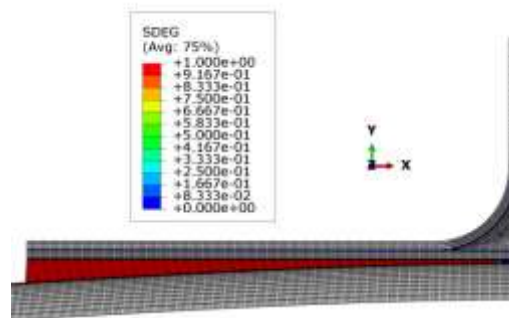


Figura 162 - Modo de rotura pelo adesivo no teste para $L_0=40$ mm com o Araldite® AV138.

Na Figura 163 está representada uma rotura pelo substrato, onde é revelado que a fenda se propaga pela camada 1 e pela camada da curva do deltoide a partir do início da curva do substrato. Também é possível concluir que a camada do adesivo tem uma leve degradação na extremidade da junta.

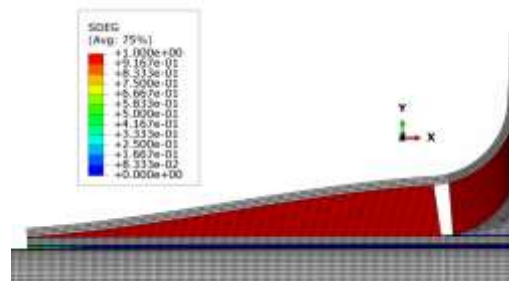


Figura 163 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $L_0=40$ mm com o Araldite® AV138.

Na Tabela 16 estão expostos os modos de rotura e os P_{max} para todos os L_0 , em cada adesivo estudado.

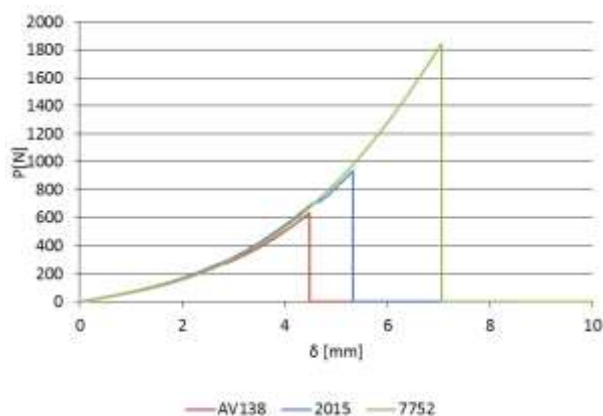
Tabela 16 - Modos de rotura para diferentes comprimentos de sobreposição.

L_0 [mm]	AV138		2015		7752	
	P_{max} [N]	zona de rotura	P_{max} [N]	zona de rotura	P_{max} [N]	zona de rotura
10	634,7	adesivo	932,4	adesivo	1843,9	adesivo
20	634,7	adesivo	1216,4	adesivo	2371,5	misto/adesivo
30	634,7	adesivo	1023,0	substrato	1869,6	substrato
40	634,8	adesivo	745,2	substrato	958,1	substrato

3.2.5.3.2 Curvas $P-\delta$

Para cada valor de L_0 foi gerada uma curva $P-\delta$. As curvas representadas na Figura 164, na Figura 165, na Figura 166 e na Figura 167 correspondem a $L_0=10, 20, 30$ e 40 mm, respetivamente. Nestas curvas é revelado que, para todos os L_0 estudados, o adesivo Sikaforce® 7752 obteve o P_{max} maior e o adesivo Araldite® AV138 teve o P_{max} menor.

Na Figura 164 observa-se que todas as curvas têm um comportamento similar e com o mesmo declive inicial.

Figura 164 - Curvas $P-\delta$ comprimento de sobreposição de $L_0=10$ mm.

Na Figura 165 é revelado que o adesivo Araldite® AV138 tem uma pequena quebra de resistência, devido ao início da rotura na extremidade da junta. Contudo, a junta torna a resistir quando a fenda chega ao início da curva do deltoide e resiste até atingir o P_{max} . Para os restantes adesivos o comportamento das curvas manteve o formato registado para $L_0=10$ mm mas com um P_{max} superior.

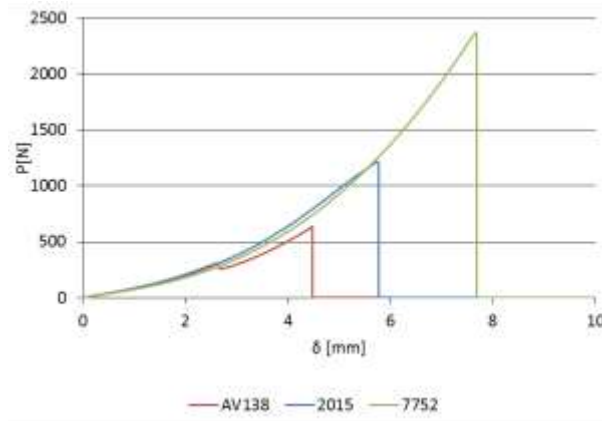


Figura 165 - Curvas P - δ comprimento de sobreposição de $L_0=20$ mm.

A Figura 166 mostra que a junta com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=30$ mm tem o mesmo tipo de rotura verificado no caso de $L_0=20$ mm, mas com uma quebra mais acentuada. Para o adesivo Araldite® 2015 e para o adesivo Sikaforce® 7752 a curva manteve o comportamento, contudo obteve um P_{\max} inferior ao registado para $L_0=20$ mm.

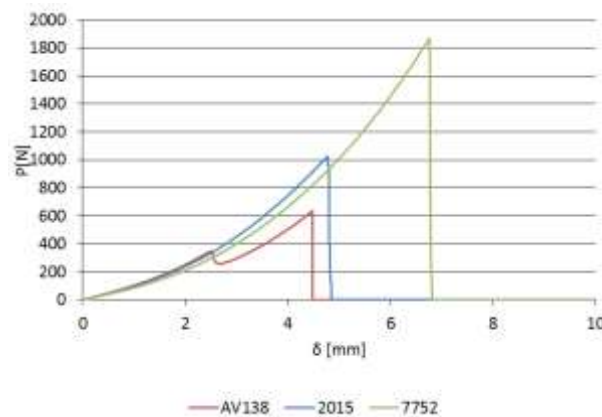


Figura 166 - Curvas P - δ comprimento de sobreposição de $L_0=30$ mm.

Na Figura 167, o adesivo Araldite® AV138 teve uma quebra de resistência intermédia maior do que a registada $L_0=30$ mm, mas sem alterar o resultado de P_{\max} . Para o adesivo Sikaforce® 7752, a curva manteve o comportamento registado anteriormente, mas com um P_{\max} menor do que o valor registado para os L_0 menores. O adesivo Araldite® 2015, até atingir o valor de P_{\max} , manteve um comportamento idêntico ao do Araldite® AV138 antes da quebra, mas após atingir o P_{\max} e quebrar a resistência, a junta volta a resistir e torna a quebrar, mas sem atingir o P_{\max} novamente.

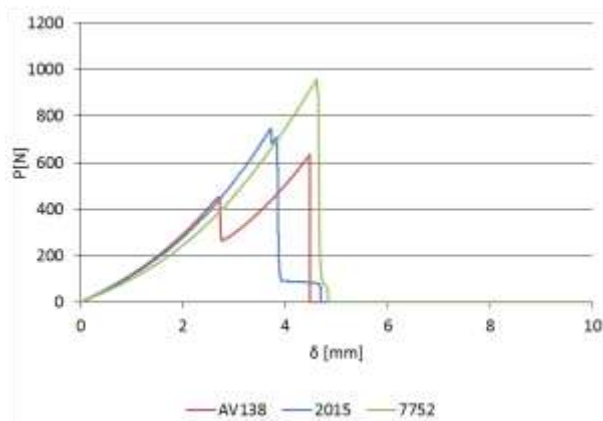


Figura 167 - Curvas $P-\delta$ comprimento de sobreposição de $L_0=40$ mm.

3.2.5.3.3 Análise de tensões

No estudo de L_0 para a junta com o adesivo Araldite® AV138 são retiradas as tensões de corte e de arrancamento ao longo da sobreposição da junta (Figura 168 e Figura 169, respetivamente). Analisando as tensões obtém-se a informação que, quanto maior é o L_0 , maior é o pico de tensão na extremidade da junta. Contudo, o aumento do pico de tensão não é linear, pois torna-se menos expressivo ao longo do aumento de L_0 . Também se observa que, quanto menor o L_0 , mais atenuado é o pico de tensão que ocorre junto ao início da curvatura do substrato “T”.

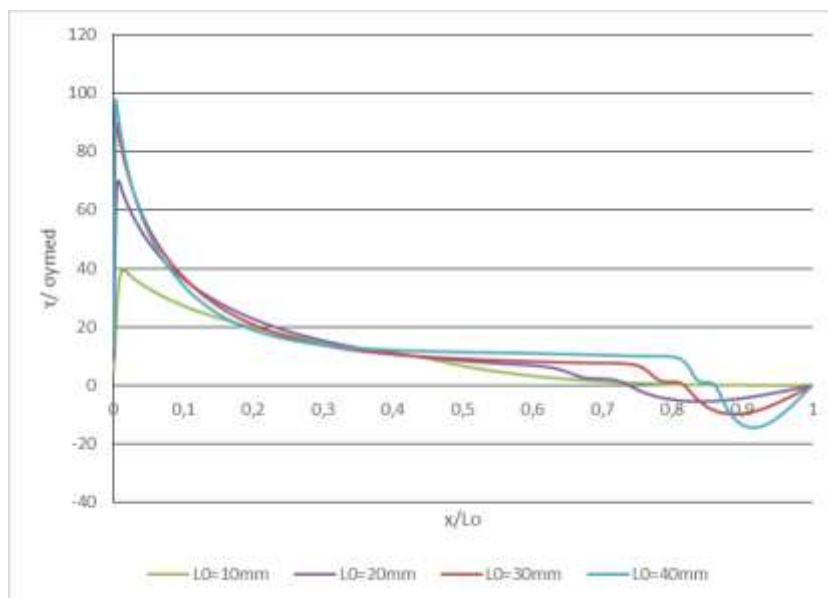


Figura 168 - Distribuição das tensões de corte para os vários L_0 estudados com o Araldite® AV138.

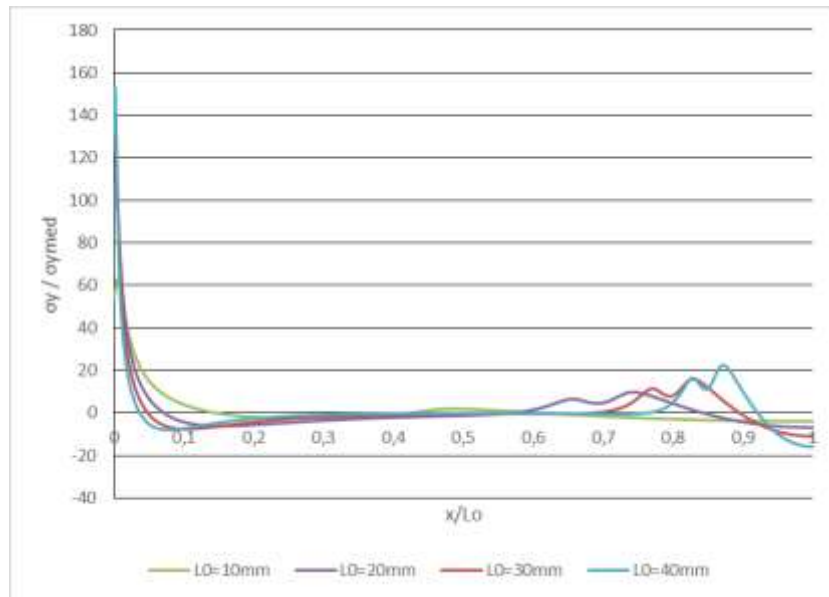


Figura 169- Distribuição das tensões de arrancamento para os vários L_0 estudados com o Araldite® AV138.

No estudo de L_0 com o adesivo Araldite® 2015 são retiradas as tensões de corte e de arrancamento ao longo da sobreposição da junta (Figura 170 e Figura 171, respetivamente). Analisando estas figuras conclui-se que, quanto maior é o L_0 , maior é o pico de tensão na extremidade da junta. Contudo, o aumento do pico de tensão não é linear, pois torna-se menos expressivo ao longo do aumento de L_0 . Também se observa que, quanto menor o L_0 , mais atenuado é o pico de tensão que ocorre junto do início da curvatura do substrato “T”.

Observa-se que os valores dos picos de tensão do adesivo Araldite® 2015 são inferiores aos registados para o adesivo Araldite® AV138.

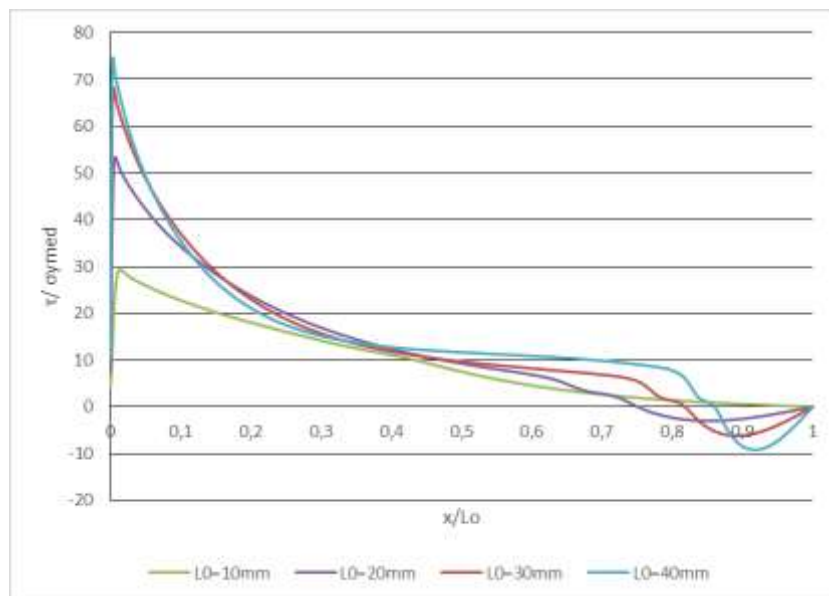


Figura 170 - Distribuição das tensões de corte para os vários L_0 estudados com o Araldite® 2015.

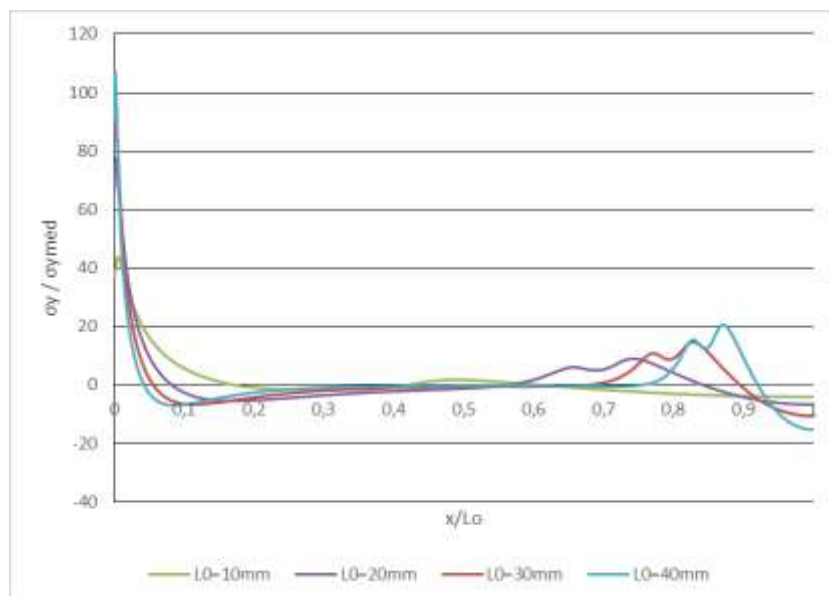


Figura 171 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários L_0 estudados com o Araldite® 2015.

O estudo de L_0 com o adesivo Sikaforce® 7752 obtém-se as tensões de corte (Figura 172) e de arrancamento (Figura 173) ao longo da sobreposição da junta. Analisando as tensões obtém-se a informação que, quanto maior é o L_0 , maior é o pico de tensão na extremidade da junta. Também se observa que quanto menor o L_0 , mais atenuado é o pico de tensão que ocorre junto do início da curvatura do substrato “T”.

Observa-se que os valores dos picos de tensão do adesivo Sikaforce® 7752 são inferiores aos registados para o adesivo Araldite® AV138 e para o adesivo Araldite® 2015.

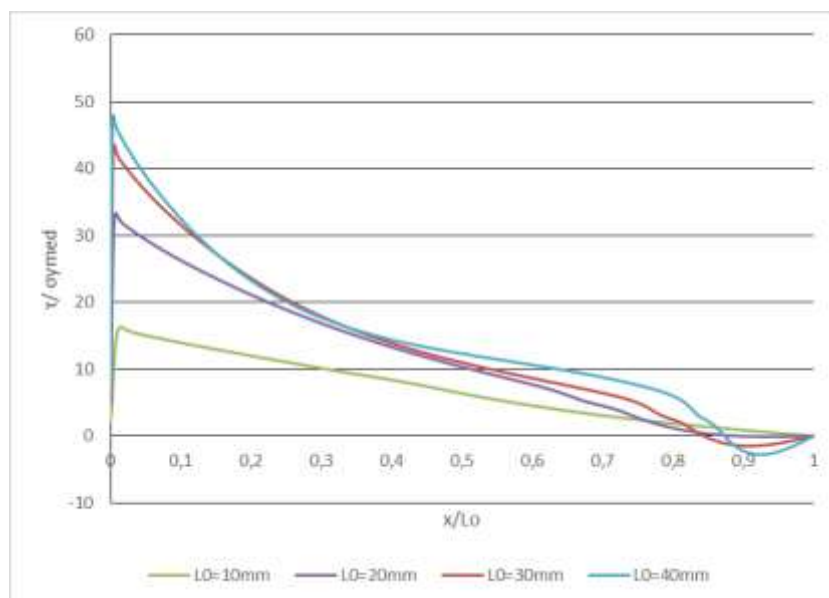


Figura 172 - Distribuição das tensões de corte para os vários L_0 estudados com o Sikaforce® 7752.

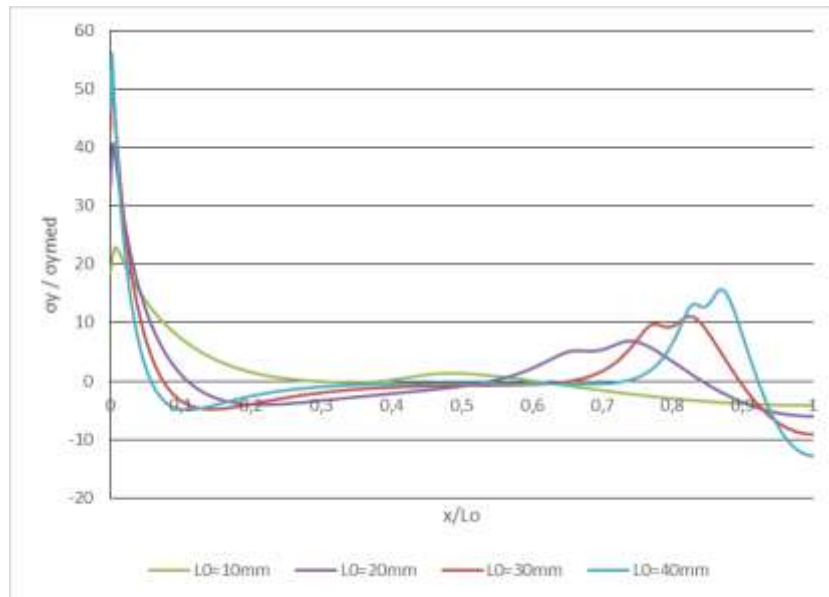


Figura 173 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários L_0 estudados com o Sikaforce® 7752.

3.2.5.3.4 Estudo da variável de dano

O estudo da variável de dano em função de L_0 é realizado através da análise da degradação das camadas coesiva quando a junta atinge P_{max} .

Os resultados do estudo da variabilidade de dano para o adesivo Araldite® AV138 com o comprimento de sobreposição de 10, 20, 30 e 40 mm estão representados na Figura 174 (a), Figura 174 (b), na Figura 175 (a) e na Figura 175 (b), respetivamente. Para o caso deste adesivo pode-se observar que, quanto maior o L_0 , maior é o dano na camada da curva do deltoide. Neste adesivo, o comportamento da degradação é semelhante ao longo dos vários comprimentos de sobreposição, tendo degradação total na camada do adesivo em grande parte do L_0 e um pico de degradação na camada 1 no início da curva do substrato "T".

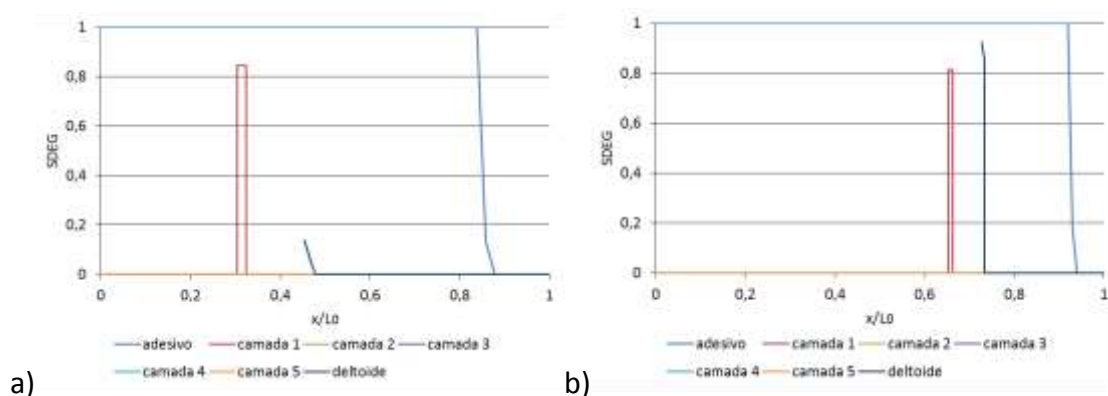


Figura 174 - SDEG para $L_0=10$ mm (a) e $L_0=20$ mm (b) com o Araldite® AV138.

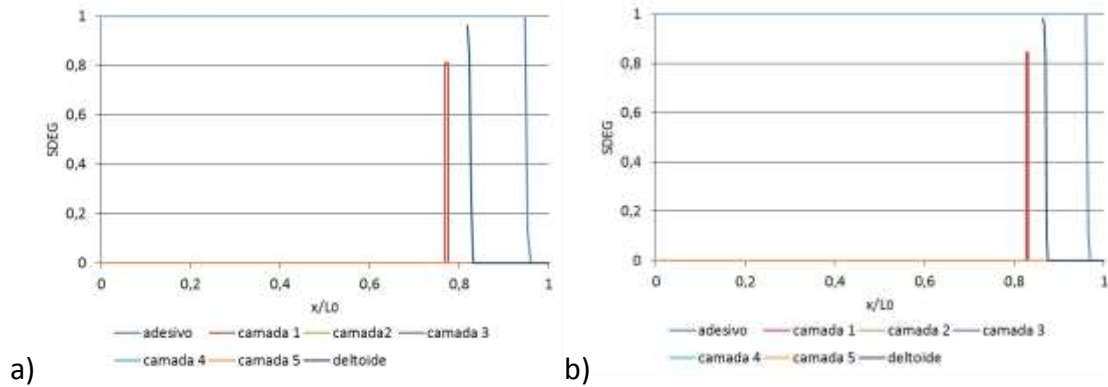


Figura 175 - SDEG para $L_0=30$ mm (a) e $L_0=40$ mm (b) com o Araldite® AV138.

Os estudos da variabilidade de dano para o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=10$, 20, 30 e 40 mm estão representados na Figura 176 (a), Figura 176 (b) Figura 177 (a) e Figura 177 (b), respetivamente. Para o caso deste adesivo pode-se observar que, quanto maior o L_0 , menor é a degradação na camada do adesivo. Para os casos em que $L_0=10$ e 20 mm, a camada do adesivo atinge a rotura a partir da extremidade da junta, enquanto a camada 1 e a camada da curva do deltoide não atingem a degradação total. Para os casos em que $L_0=30$ e 40 mm, a camada do adesivo não atinge a rotura e a camada da curva do deltoide rompe a partir do início da curva do deltoide.

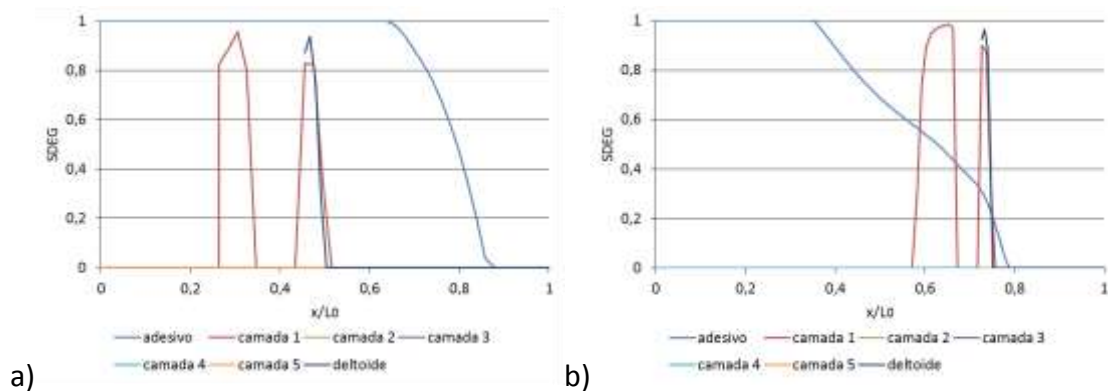


Figura 176 - SDEG para $L_0=10$ mm (a) e $L_0=20$ mm (b) com o Araldite® 2015.

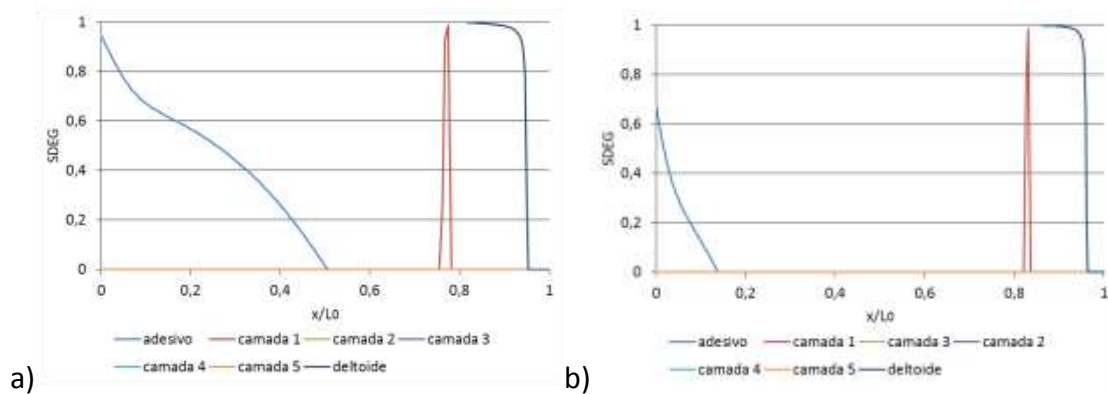


Figura 177 - SDEG para $L_0=30$ mm (a) e $L_0=40$ mm (b) com o Araldite® 2015.

Os resultados obtidos para a junta adesiva com Sikaforce® 7752, para o L_0 de 10, 20, 30 e 40 mm, estão representados na Figura 178 (a), Figura 178 (b), Figura 179 (a) e Figura 179 (b), respetivamente. Para os casos em que $L_0=10$ e 20 mm, as camadas 1 e a da curva do deltoide apresentam maior dano enquanto a camada do adesivo não degradou totalmente. Para os casos em que o $L_0=30$ e 40 mm, o aumento do L_0 fez com que a camada do adesivo tenha menor dano coesivo, enquanto a camada da curva do deltoide e a camada 1 aumentam o dano, iniciando a rotura a partir do início da curva do deltoide.

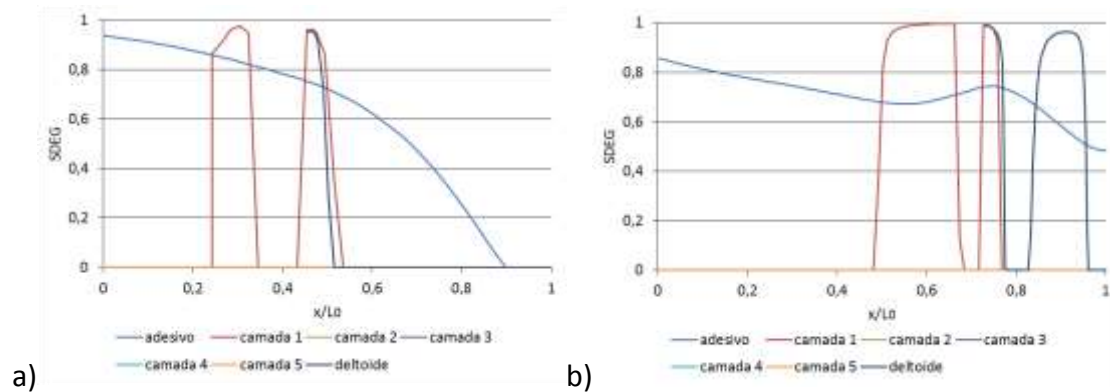


Figura 178 - SDEG para $L_0=10$ mm (a) e $L_0=20$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

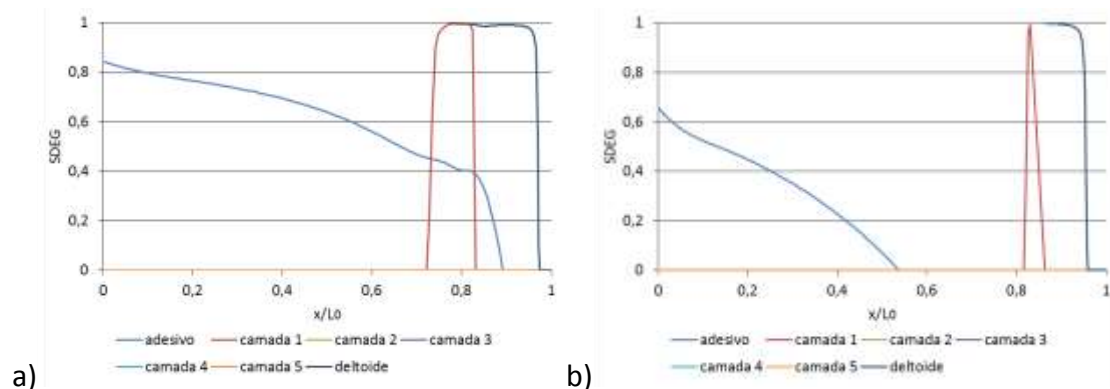


Figura 179 - SDEG para $L_0=30$ mm (a) e $L_0=40$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

3.2.5.3.5 Resistência da junta

Os resultados de P_{\max} para o estudo de L_0 estão expostos na Figura 180. No caso do adesivo Araldite® AV138, a influência do L_0 é praticamente nula, devido à fragilidade do adesivo. As curvas $P-\delta$, para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, revelam que as juntas têm uma quebra de resistência intermédia, que ocorre devido à fratura do adesivo na extremidade. A junta volta a resistir quando a fenda chega na zona do início da curva do deltoide.

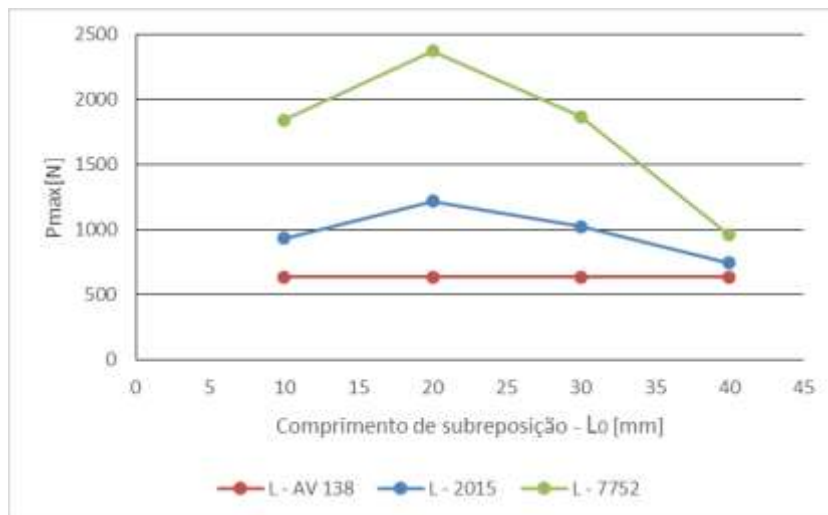


Figura 180 -Resultados da carga máxima no estudo do comprimento de sobreposição da junta.

As juntas com o adesivo Araldite®2015 e com Sikaforce® 7752, de $L_0=10$ e 20 mm, rompem pelo adesivo (ou maioritariamente pelo adesivo) e o P_{max} aumenta com o aumento de L_0 . Nos casos de $L_0=30$ e 40 mm as juntas rompem pelo substrato. A resistência da junta com o adesivo Araldite®2015, quando rompe pelo substrato, têm a tendência a diminuir o P_{max} quanto maior for o L_0 . Este facto poderá estar ligado ao aumento das tensões de corte e de arrancamento junto ao início da curva do deltoide quanto maior for o L_0 . Para o adesivo Araldite®2015 o aumento percentual dos valores de P_{max} , relativamente à junta com $L_0=10$ mm é de 30,5% e de 9,7% para as juntas com $L_0=20$ e de 30 mm, respetivamente, enquanto no caso de $L_0=40$ mm há uma diminuição percentual de P_{max} em 20,1% relativamente à junta com $L_0=10$ mm. Para o adesivo Sikaforce® 7752 o aumento percentual dos valores de P_{max} , relativamente à junta com $L_0=10$ mm, é de 28,6% e de 1,4% para as juntas com $L_0=20$ e de 30 mm, respetivamente, enquanto no caso de $L_0=40$ mm há uma diminuição percentual de P_{max} em 48,04% relativamente à junta com $L_0=10$ mm.

Em todo o estudo da geometria de L_0 , as juntas adesivas com Sikaforce® 7752 registaram os valores de P_{max} mais elevados, enquanto as juntas com adesivo Araldite® AV138 registaram os valores de P_{max} mais baixos. Tomando como ponto de referência o valor de P_{max} da junta com o adesivo Araldite® AV138, a maior diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 91,6% e de 273,6%, respetivamente. Com a referência da junta com o adesivo Araldite® AV138 para o valor de P_{max} , a menor diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 17,4% e de 50,9%, respetivamente.

3.2.5.4 Raio de curvatura do T

O raio de curvatura do “T” é estudado para um $R=3, 6, 9$ e 12 mm. Pretende-se estudar o efeito que R tem na resistência e rigidez da junta bem como o comportamento dos adesivos para estas condições.

3.2.5.4.1 Modos de rotura

Os resultados da simulação a junta revelam que a ligação pode romper por uma das camadas coesivas dos substratos ou pela camada do adesivo. Ao longo das simulações obtiveram-se três modos de rotura: rotura pelo substrato e pelo adesivo, denominada de rotura mista (Figura 181); rotura e pelo substrato (Figura 182) e rotura pela camada do adesivo (Figura 183).

Na Figura 181 está representada uma rotura mista, onde se observa que a camada 1 e a camada da curva do deltoide têm elevada degradação e em grande parte já atingiram a rotura. Também é possível constatar que a camada do adesivo iniciou a rotura pela parte interna da sobreposição, e que se alastrou para a extremidade.

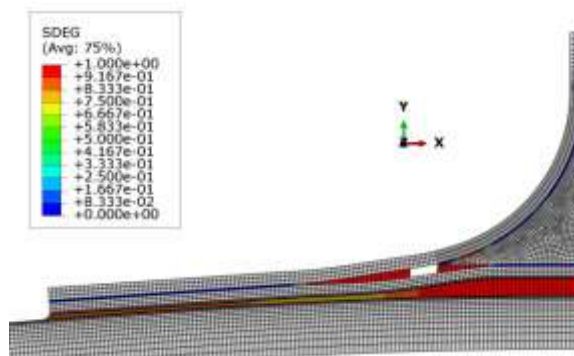


Figura 181 - Modo de rotura misto (pelo adesivo e pelo substrato) no teste para $R=9$ mm com o Sikaforce® 7752.

Na Figura 182 está representada uma rotura pelo substrato, onde se observa que a rotura se propaga pela camada 1 e pela camada da curva do deltoide a partir do início da curva do substrato. Também se observa que a camada do adesivo tem uma ligeira degradação na extremidade da junta.

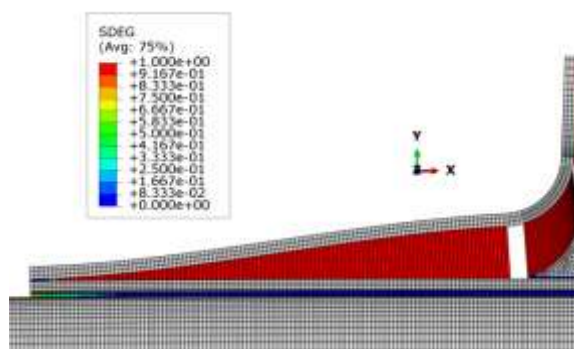


Figura 182 - Modo de rotura pelo substrato no teste para $R=3$ mm com o Araldite® 2015.

Na Figura 183 está representada uma rotura na camada do adesivo. Neste modo de rotura, o dano na camada do adesivo iniciou-se na extremidade da sobreposição e alastrou-se até à rotura total sem que as outras camadas coesivas tenham dano significativo.

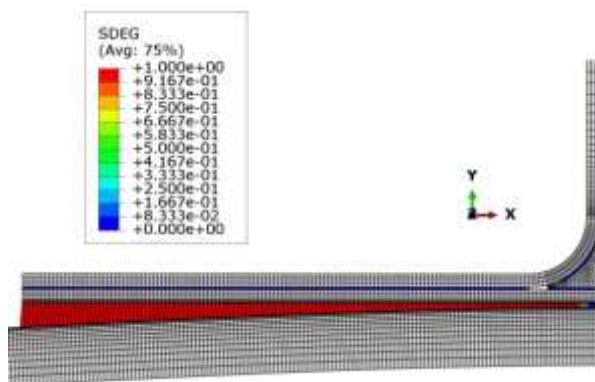


Figura 183 - Modo de rotura pelo adesivo no teste para $R=3$ mm com o Araldite® AV138.

Na Tabela 17 apresentam-se os modos de rotura e as cargas máximas para todos os valores de R , em cada adesivo estudado.

Tabela 17 - Modos de rotura para diferentes raios de curvatura do “T”.

R [mm]	AV138		2015		7752	
	P_{\max} [N]	zona de rotura	P_{\max} [N]	zona de rotura	P_{\max} [N]	zona de rotura
3	638,0	adesivo	602,1	substrato	785,9	substrato
6	634,7	adesivo	1023,0	substrato	1869,6	substrato
9	632,5	adesivo	1417,1	adesivo	2674,9	misto
12	631,8	adesivo	1303,0	adesivo	2535,4	misto

3.2.5.4.2 Curvas $P-\delta$

Para cada raio da curva do substrato “T” (R) foi gerada uma curva $P-\delta$. As curvas representadas na Figura 184 (a), Figura 184 (b), Figura 185 (a) e Figura 185 (b) correspondem a um R de 3, 6, 9 e 12 mm, respetivamente.

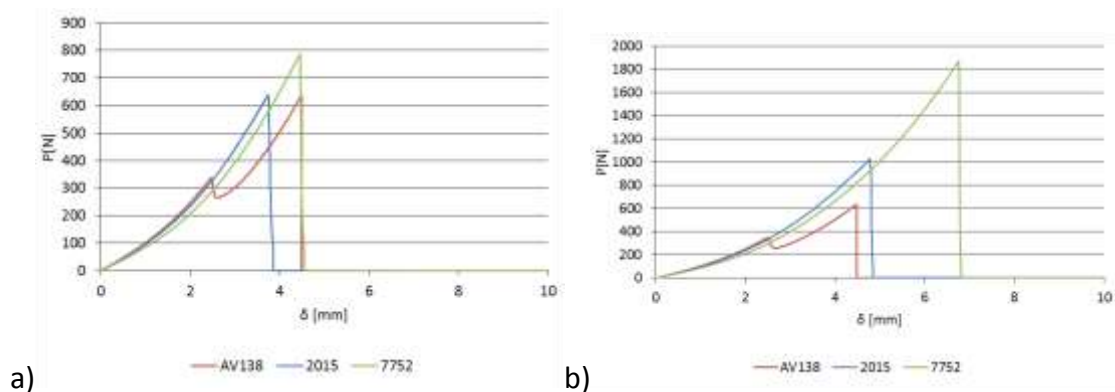


Figura 184 - Curvas $P-\delta$ para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b).

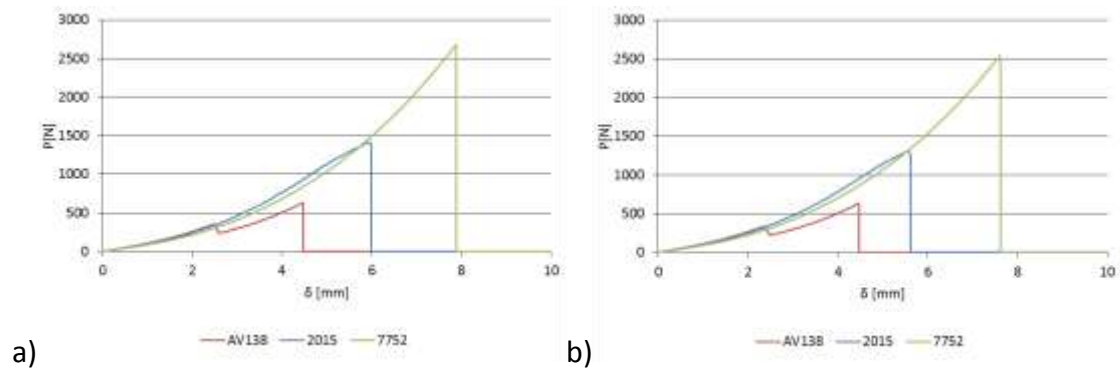


Figura 185 - Curvas $P-\delta$ para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b).

Nestas curvas é revelado que, para todos os raios estudados, o adesivo Sikaforce® 7752 obteve o P_{\max} maior e o adesivo Araldite® AV138, para os raios de 6, 9 e 12 mm, teve o P_{\max} menor. Para o caso de o raio ser de 3 mm o adesivo Araldite® 2015 obteve o menor P_{\max} entre os três adesivos.

3.2.5.4.3 Análise de tensões

No estudo do R são retiradas as tensões de corte e de arrancamento ao longo da sobreposição da junta. Para o adesivo Araldite® AV138, as tensões de corte estão expostas na Figura 186 e as tensões de arrancamento na Figura 187. Para o adesivo Araldite® 2015, as tensões de corte e de arrancamento estão representadas na Figura 188 e na Figura 189, respetivamente. Para o adesivo Sikaforce® 7752, as tensões de corte e de arrancamento estão exibidas na Figura 190 e na Figura 191, respetivamente.

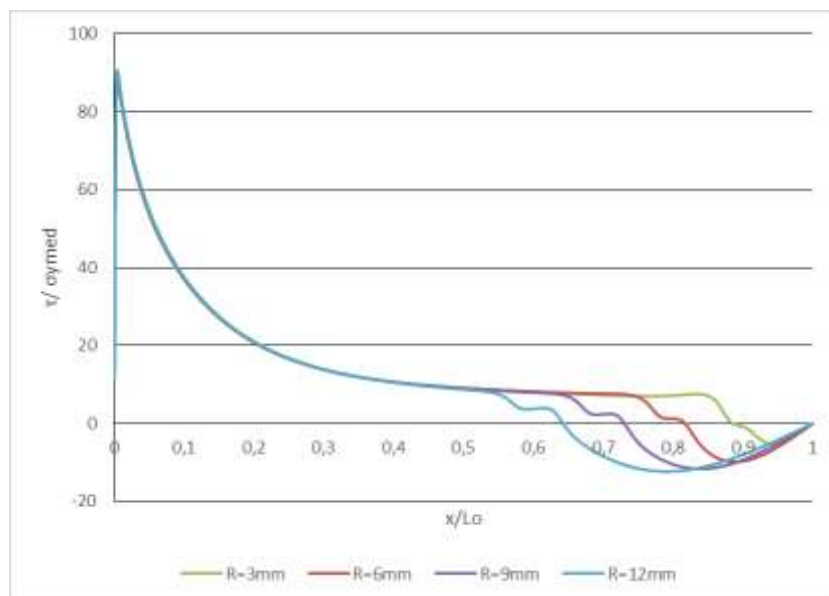


Figura 186 - Distribuição das tensões de corte para os vários R estudados com o Araldite® AV138.

O traçado das tensões ao longo da junta é idêntico para os diferentes adesivos. Observa-se que as tensões de arrancamento e de corte são semelhantes no início da

sobreposição para os diferentes valores de R . A diferença das tensões, entre os raios estudados, está na posição do pico de tensão característico no início da curvatura do “T”. A amplitude destes picos de tensão, que ocorrem no início da curvatura do “T”, são a mesma para cada raio estudado dentro de cada adesivo. No caso das tensões de arrancamento na zona de início da curva do substrato em “T”, a perturbação é tanto mais abrupta, quanto maior for a rigidez do adesivo.

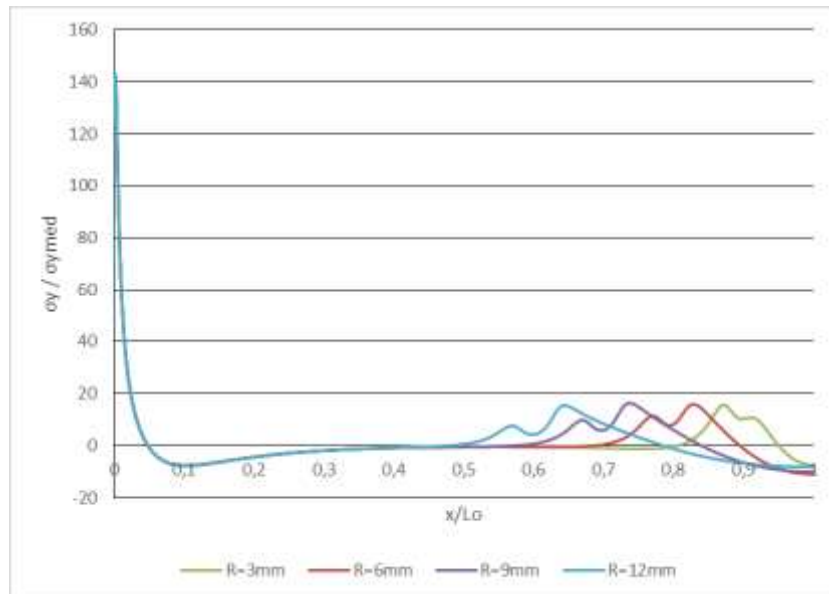


Figura 187 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários R estudados com o Araldite® AV138.

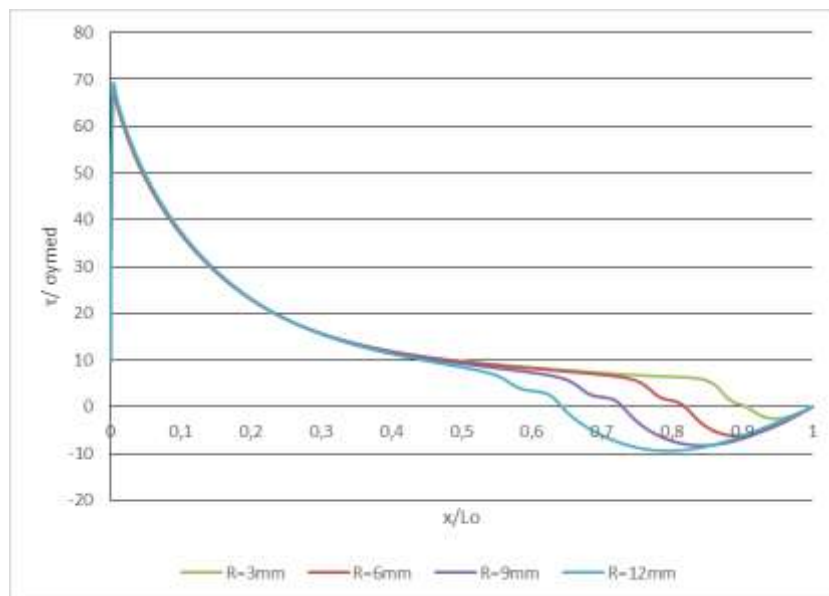


Figura 188 - Distribuição das tensões de corte para os vários R estudados com o Araldite® 2015.

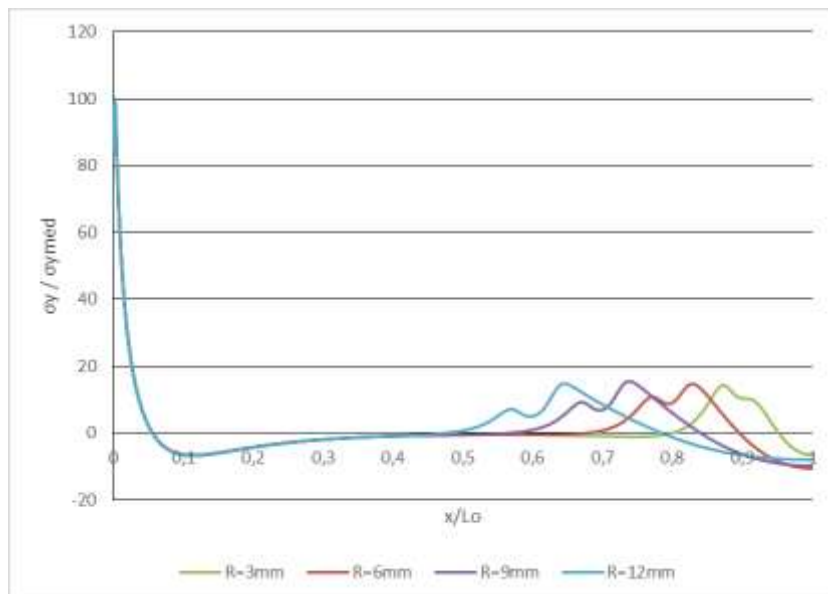


Figura 189 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários R estudados com o Araldite® 2015.

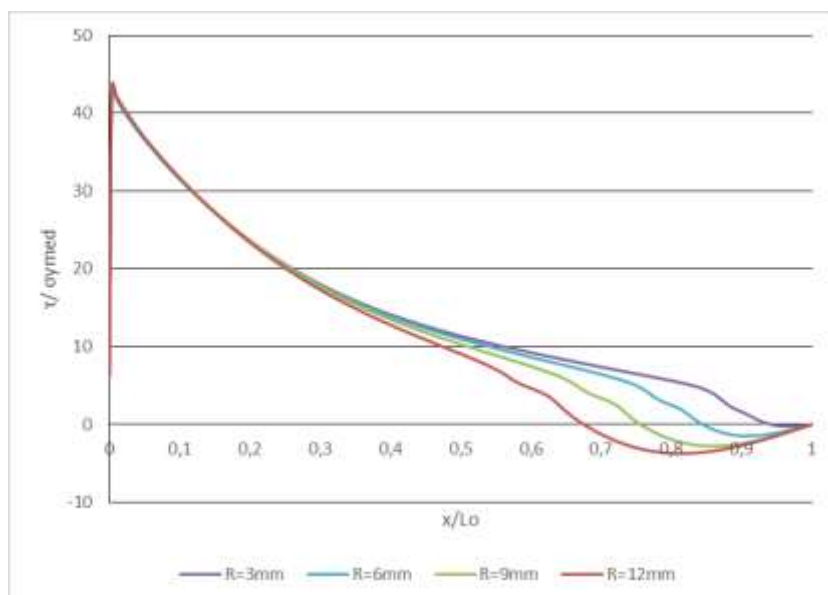


Figura 190 - Distribuição das tensões de corte para os vários R estudados com o Sikaforce® 7752.

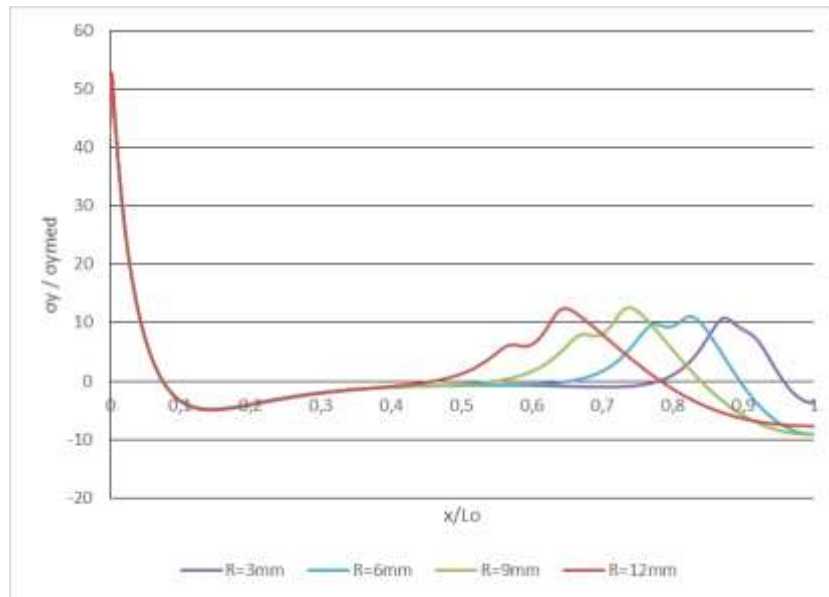


Figura 191 - Distribuição das tensões de arrancamento para os vários R estudados com o Sikaforce® 7752.

3.2.5.4.4 Estudo da variável de dano

O estudo da variável de dano para a variável R é realizado através da análise da degradação das camadas coesivas quando a junta atinge o P_{max} .

Os estudos da variabilidade de dano para o adesivo Araldite® AV138 com o raio da curva do substrato “T” de 3, 6, 9 e 12 mm estão representados na Figura 192 (a), Figura 192 (b), Figura 193 (a) e Figura 193 (b), respetivamente. No caso deste adesivo, a camada do adesivo atinge a rotura e alastra-se a partir da extremidade da junta. Não se registam grandes diferenças na degradação da junta com o aumento de R .

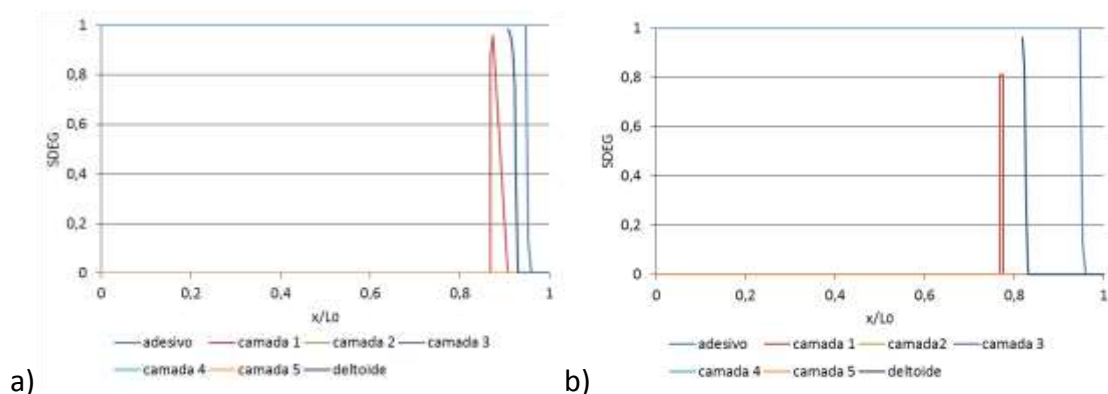


Figura 192 - SDEG para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b) com o Araldite® AV138.

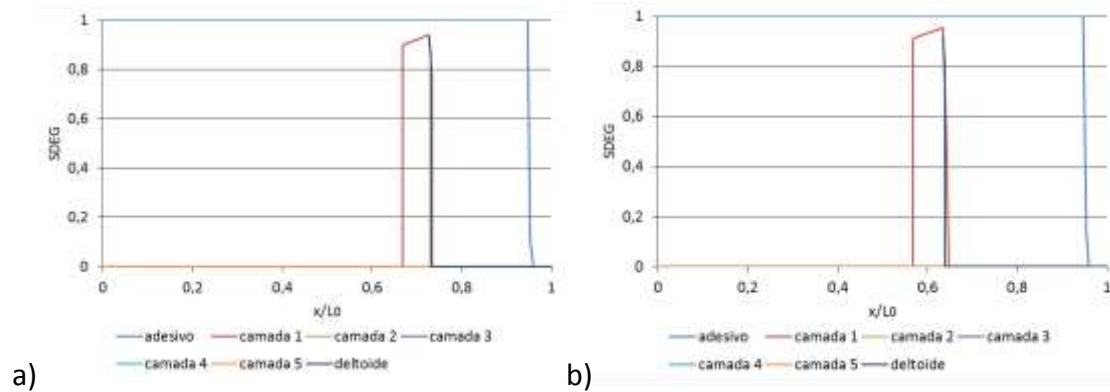


Figura 193 - SDEG para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b) com o Araldite® AV138.

A variabilidade de dano para o adesivo Araldite® 2015 com o raio da curva do substrato “T” de 3, 6, 9 e 12 mm é apresentada na Figura 194 (a), Figura 194 (b), Figura 195 (a) e Figura 195 (b), respetivamente. Para este adesivo observa-se que, quanto maior for o R , maior a degradação na camada do adesivo, e menor é o dano na camada da curva do deltoide. Para os raios de 9 e de 12 mm o início da rotura ocorre na extremidade da camada do adesivo e propaga-se até à rotura.

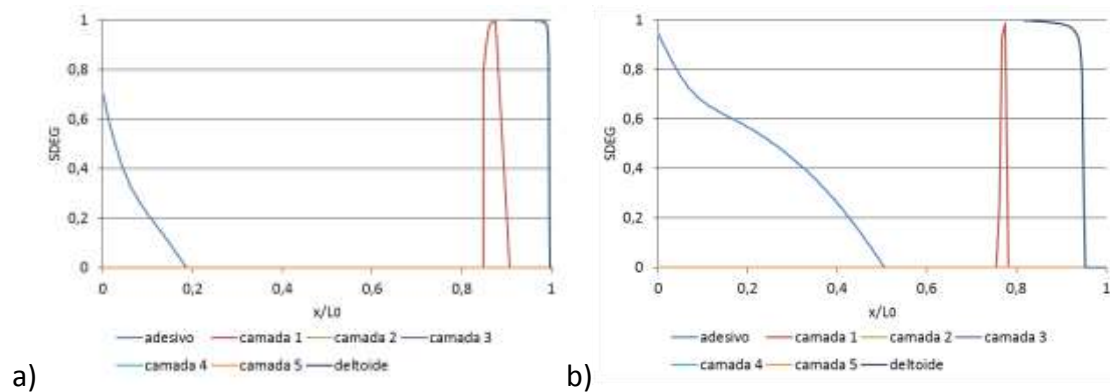


Figura 194 - SDEG para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b) com o Araldite® 2015.

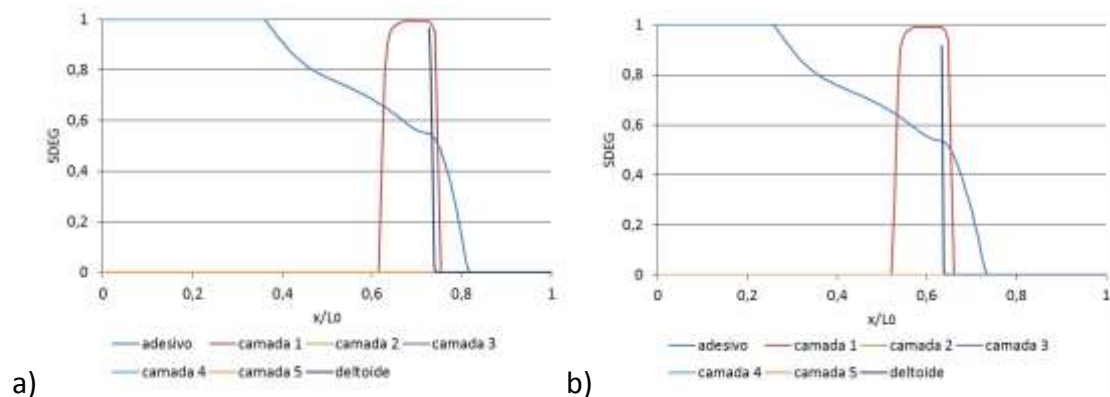


Figura 195 - SDEG para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b) com o Araldite® 2015.

O dano para o adesivo Sikaforce® 7752 com o raio da curva do substrato “T” de 3, 6, 9 e 12 mm é mostrado na Figura 196 (a), Figura 196 (b), Figura 197 (a) e Figura 197 (b), respetivamente. Até $R=9$ mm verificou-se o aumento gradual do dano na camada do adesivo e na camada 1 com o aumento de R . No caso de $R=12$ mm a camada do adesivo é similar ao caso do estudo com $R=9$ mm. Observa-se que, com o aumento de R , o dano na camada da curva do deltoide diminui.

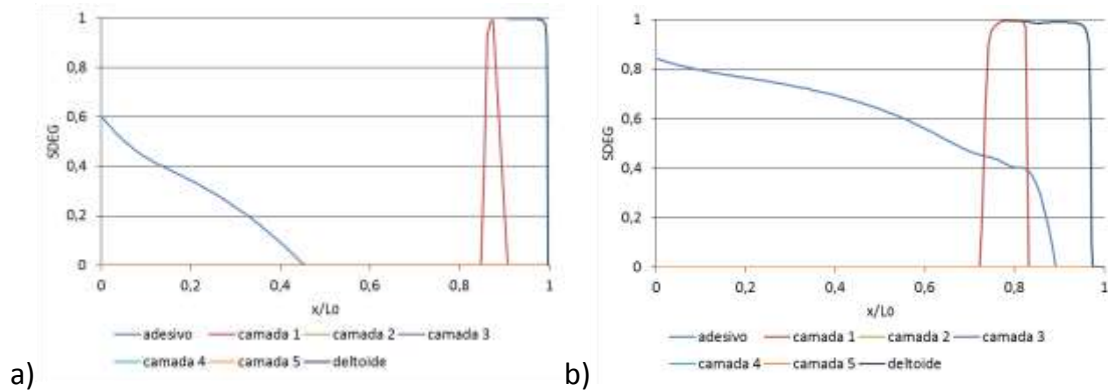


Figura 196 - SDEG para $R=3$ mm (a) e $R=6$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

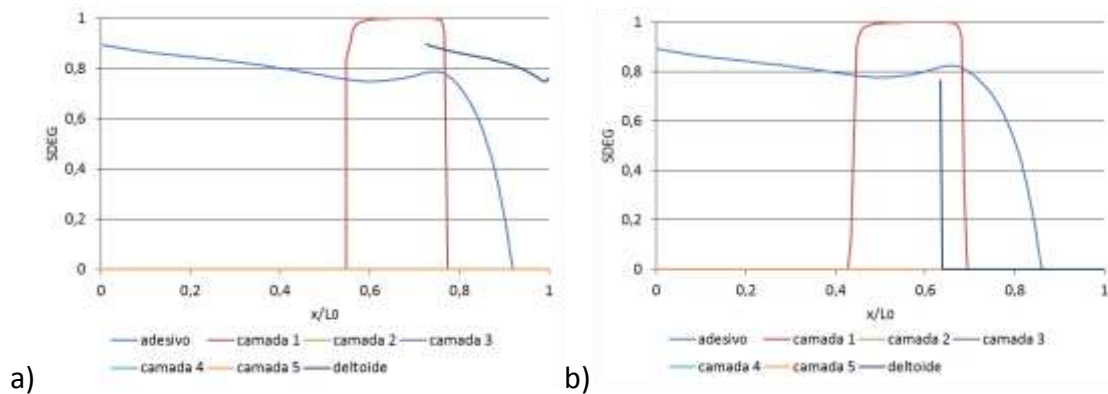


Figura 197 - SDEG para $R=9$ mm (a) e $R=12$ mm (b) com o Sikaforce® 7752.

3.2.5.4.5 Resistência da junta

Os resultados de P_{max} para o estudo de R estão expostos na Figura 198. Neste estudo é demonstrado que o aumento de R provoca uma maior distribuição do dano no adesivo e uma diminuição do dano nas camadas interlaminares.

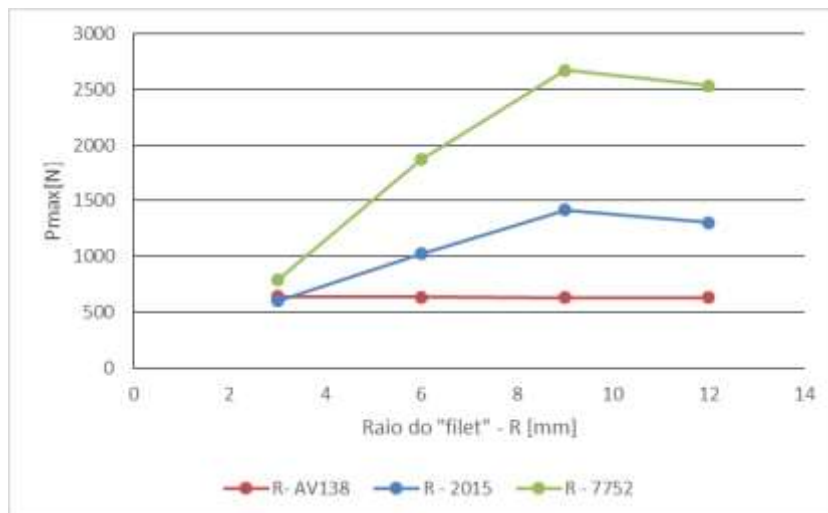


Figura 198 - -Resultados da carga máxima no estudo do raio do substrato em "T".

O efeito do R , para as juntas com adesivo Araldite® AV138, é praticamente nulo. Pode-se explicar este acontecimento com o facto de o adesivo ser frágil e, uma vez iniciada a fenda, esta é a causa da rotura total da junta.

As juntas com o adesivo Araldite® 2015 e com Sikaforce® 7752, de R de 9 e 12 mm rompem pelo adesivo (ou maioritariamente pelo adesivo) e a resistência diminui com o aumento de R . Nos casos de $R=3$ e 6 mm, as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e com Sikaforce® 7752 rompem pelo substrato. Quando as juntas rompem pelo substrato, é devido ao elevado pico de tensão da camada 1 na zona do início da curva do deltoide. Com o aumento do R o efeito do pico de tensão da camada 1 no início da curva do deltoide torna-se ligeiramente menor, e a distribuição dos esforços no adesivo é mais uniforme devido à maior rigidez do substrato "T".

Para o adesivo Araldite® 2015 o aumento percentual dos valores de P_{max} , relativamente à junta com $R=3$ mm é de 69,9%, 135,4% e de 116,4% para as juntas com R de 6, 9 e 12 mm, respetivamente. Para o adesivo Sikaforce® 7752, o aumento percentual dos valores de P_{max} , relativamente à junta com $R=3$ mm é de 137,9%, 240,4% e de 222,6% para as juntas com R de 6, 9 e 12 mm, respetivamente.

No caso de $R=3$ mm a junta adesiva com Sikaforce® 7752 registou o valor de P_{max} mais elevado, enquanto a junta com adesivo Araldite® 2015 registou o valor de P_{max} mais baixo. Nas restantes geometrias do estudo de R , as juntas adesivas com Sikaforce® 7752 registaram os valores de P_{max} mais elevados, enquanto as juntas com adesivo Araldite® AV138 registaram os valores de P_{max} mais baixos. Tomando como ponto de referência o valor de P_{max} da junta com o adesivo Araldite® AV138, a maior diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 124,1% e de 322,9%, respetivamente. Com a referência da junta com o adesivo Araldite® AV138 para o valor de P_{max} , a menor diferença percentual para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 é de 5,6% e de 23,6%, respetivamente.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A presente dissertação teve como objetivo estudar, por análise numérica (MDC), o comportamento de ligações adesivas *stiffeners* em T, entre aderentes de CFRP, considerando diferentes condições geométricas (valores de t_p , t_0 , L_0 e R) e adesivos de ductilidades diferentes. A análise numérica foi realizada através do *software* ABAQUS®, na qual se obteve resultados na forma de curvas P - δ , que traduzem a resistência das juntas, curvas de dano, onde se verifica a degradação da camada de adesivo e das camadas interlaminares ao longo de L_0 , e curvas representativas da distribuição das tensões de corte e de arrancamento. Neste estudo foi utilizado o adesivo Araldite® AV138, considerado um adesivo de comportamento rígido e frágil, o adesivo Araldite® 2015, caracterizado pelo seu comportamento moderadamente dúctil, com menor resistência, mas com maior flexibilidade e, por último, o adesivo Sikaforce® 7752, com elevada resistência, flexibilidade e ductilidade.

Através dos estudos experimentais de juntas adesivas em T e em L, à tração, foi possível validar o método numérico utilizado. Assim, é possível concluir que os modelos de dano coesivo conseguem replicar o comportamento real das juntas em T, pelo que se procedeu ao estudo numérico desenvolvido nesta dissertação.

Com os resultados obtidos para as juntas adesivas *stiffeners* em T, conclui-se assim que, quanto maior a ductilidade do adesivo, maior é a resistência da junta. Este facto é justificado com a distribuição de tensões obtidas, pois quanto maior a rigidez do adesivo maiores são os picos de tensão, e quanto menor a rigidez do adesivo mais distribuídas são as tensões ao longo da sobreposição da junta. Na análise das tensões destacam-se dois picos de tensão, sendo localizados na extremidade da junta ($x/L_0=0$) e na proximidade do início da curva do deltoide.

Determinou-se que havia três modos de rotura diferentes, um modo de rotura pela camada do adesivo, outro modo de rotura pela camada 1 e pela camada curva do deltoide (correspondente à rotura pelo aderente) e, por último, um modo de rotura misto, onde a rotura ocorre simultaneamente pela camada do adesivo e pela camada 1. Assim, no estudo, quando a rotura ocorre na camada 1 e pela camada curva do deltoide, observa-se que, para adesivos com rigidez menor (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752), que conseqüentemente conferem maior resistência à junta, a rotura ocorreu pelo substrato em camadas interlaminares. Nestes casos, a resistência na camada do adesivo é superior à da camada 1 e da camada da curva do deltoide, devido a uma degradação gradual e esforços mais distribuídos ao longo de L_0 . É demonstrado que a rotura pela camada do adesivo Araldite® AV138 e pelas camadas interlaminares ocorre de forma

abrupta, e tem progressão rápida após atingir a carga máxima. Assim, conclui-se que as camadas interlaminares têm um comportamento frágil.

Neste estudo é demonstrado que o aumento de t_p provoca uma melhor distribuição do dano no adesivo, bem como um aumento do dano nas camadas interlaminares. Este facto mostra que, para t_p maiores, a junta está mais sujeita a esforço de clivagem, enquanto para t_p menores a junta está mais sujeita a esforços de arrancamento. Com um esforço maior de clivagem, em detrimento do esforço de arrancamento, o esforço nas camadas coesivas da junta é mais distribuído ao longo de L_0 . Quanto maior a rigidez da pele, menor é o pico de tensão nas extremidades. Contudo, a diminuição da tensão de arrancamento no início da curva do deltoide não é tão expressiva, fazendo do início da curva do deltoide o local crítico de tensões para t_p , ou seja, com valores mais elevados.

No estudo de t_0 , observa-se que, quanto maior for flexibilidade do substrato T, menor é o pico de tensão na extremidade da junta. Contudo, a baixa rigidez do substrato T leva a um aumento no pico de tensão na zona do início da curva do deltoide, que tem valores próximos ou superiores aos valores dos picos de tensão na extremidade da junta adesiva.

O estudo de L_0 revela que, quanto maior a rigidez e fragilidade do adesivo, menor é a influencia deste parâmetro. No caso do adesivo Araldite®AV138, a influência do L_0 é praticamente nula, devido à grande fragilidade do adesivo.

No estudo de R é demonstrado que o aumento de R provoca uma maior distribuição do dano no adesivo e uma diminuição do dano nas camadas interlaminares. Contudo, a influência deste parâmetro é limitado a adesivos dúcteis, pois para adesivos muito frágeis, como Araldite®AV138, a influência de L_0 é nula.

De forma geral, a influência dos parâmetros geométricos é maior, quanto menor for a fragilidade dos adesivos.

Como conclusão final, o adesivo Sikaforce®7752 (dúctil) é o mais recomendado para o tipo de solicitação e geometria de junta em causa, uma vez que este distribui a carga sobre uma região maior da camada de adesivo, o que resulta em valores mais elevados de P_{max} . Também se conclui que o parâmetro geométrico com maior influência na resistência da junta é t_p , já que o seu aumento confere à junta adesiva uma melhor distribuição de tensões, o que leva ao melhor desempenho da mesma.

Como sugestões de trabalhos futuros, referem-se os seguintes:

- Estudo experimental da junta *stiffener* em T;
- Estudo para junta *stiffener* em T com aderente CFRP, com orientação das fibras diferentes;
- Estudo do comportamento das juntas em T à fadiga;
- Estudo de uma estrutura real em CFRP.

BIBLIOGRAFIA

5 BIBLIOGRAFIA

1. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000: McGraw-Hill.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
3. ASM, *ASM HANDBOOK VOLUME 6 - WELDING, BRAZING, AND SOLDERING*. 1993: ASM INTERNATIONAL.
4. Felizardo, I., *APOSTILA - TECNOLOGIA DA SOLDAGEM*. 2016 CENTRO FEDERAL DE EDUCAÇÃO TECNOLÓGICA DE MINAS GERAIS - CEFET-MG.
5. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
6. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
7. Lau, J.H., *Flip Chip Technologies McGraw-Hill*. New York USA, 1995.
8. Geiß, P.L., *Klebtechnik übernimmt tragende Rolle im Bauwesen*. *adhäsion KLEBEN & DICHTEN*, 2006. **50**(1-2): p. 14-18.
9. Ebnesajjad, S. and A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2014: William Andrew.
10. Campilho, R.D., *Strength Prediction of Adhesively-bonded Joints*. 2017: CRC Press.
11. Merriam, J., *Adhesive bonding*. *Mater Sci Eng*, 1959. **50**: p. 113-128.
12. Kaye, R. and M. Heller, *Through-thickness shape optimisation of typical double lap-joints including effects of differential thermal contraction during curing*. *International journal of adhesion and adhesives*, 2005. **25**(3): p. 227-238.
13. da Silva, L.F. and R. Adams, *The strength of adhesively bonded T-joints*. *International journal of adhesion and adhesives*, 2002. **22**(4): p. 311-315.
14. Adams, R.D., et al., *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
15. Pocius, A.V., *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. 2012: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
16. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Moraes, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005.
17. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. *Luftfahrtforschung* 15, 1938: p. 41-47.
18. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
19. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1984. **4**(2): p. 65-78.

20. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
21. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
22. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
23. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
24. 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.
25. 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.
26. 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.
27. 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.
28. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
29. 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.
30. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
31. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
32. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
33. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
34. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
35. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
36. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.

37. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
38. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
39. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
40. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
41. 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.
42. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
43. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
44. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
45. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
46. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
47. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10–11): p. 2224-2230.
48. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
49. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
50. Jung Lee, M., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
51. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
52. Pandya, K.C. and J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.

53. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. *Experimental Mechanics*, 1992. **32**(4): p. 296-303.
54. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. *Composites Part B: Engineering*, 2009. **40**(2): p. 149-157.
55. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. *Composite Structures*, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
56. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. *International Journal of Fatigue*, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
57. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
58. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. *Mechanics of Materials*, 2005. **37**(9): p. 955-979.
59. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(7): p. 763-781.
60. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003. **17**(7): p. 981-994.
61. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
62. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. **28**(6): p. 302-313.
63. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
64. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.
65. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **45**(5): p. 601-620.
66. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **46**(1): p. 131-150.
67. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
68. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. *Computational Materials Science*, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
69. Da Silva, L.F., et al., *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: John Wiley & Sons.
70. Wu, H., et al., *Numerical and experimental investigation into failure of T700/bismaleimide composite T-joints under tensile loading*. *Composite Structures*, 2015. **130**: p. 63-74.

71. Trask, R., et al., *Influence of process induced defects on the failure of composite T-joint specimens*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(4): p. 748-757.
72. Hélénon, F., et al., *Numerical investigation into failure of laminated composite T-piece specimens under tensile loading*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(7): p. 1017-1027.
73. Potter, K., et al., *Variability, fibre waviness and misalignment in the determination of the properties of composite materials and structures*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2008. **39**(9): p. 1343-1354.
74. Bianchi, F., et al., *Finite element modelling of z-pinned composite T-joints*. Composites Science and Technology, 2012. **73**: p. 48-56.
75. Koh, T., S. Feih, and A. Mouritz, *Strengthening mechanics of thin and thick composite T-joints reinforced with z-pins*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(8): p. 1308-1317.
76. Rao, V., K. Krishna Veni, and P. Sinha, *Behaviour of composite wing T-joints in hygrothermal environments*. Aircraft Engineering and Aerospace Technology, 2004. **76**(4): p. 404-413.
77. Li, W., L. Blunt, and K. Stout, *Analysis and design of adhesive-bonded tee joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1997. **17**(4): p. 303-311.
78. Molland, A.F., *The maritime engineering reference book: a guide to ship design, construction and operation*. 2011: Elsevier.
79. Ulger, T. and A.M. Okeil, *Analysis of thin-walled steel beams retrofitted by bonding GFRP stiffeners: Numerical model and investigation of design parameters*. Engineering Structures, 2017. **153**: p. 166-179.
80. de Freitas, S.T. and J. Sinke, *Failure analysis of adhesively-bonded skin-to-stiffener joints: Metal-metal vs. composite-metal*. Engineering Failure Analysis, 2015. **56**: p. 2-13.
81. Sheno, R. and F. Violette, *A study of structural composite tee joints in small boats*. Journal of composite materials, 1990. **24**(6): p. 644-666.
82. Carneiro, M. and 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.
83. Domingues, N., et al., *Experimental and numerical failure analysis of aluminium/composite single-L joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. **64**: p. 86-96.
84. Ribeiro, F., et al., *Strength and damage growth in composite bonded joints with defects*. Composites Part B: Engineering, 2016. **100**: p. 91-100.
85. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
86. Campilho, R.D., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
87. Faneco, T., et al., *Strength and fracture characterization of a novel polyurethane adhesive for the automotive industry*. Journal of Testing and Evaluation, 2016. **45**(2): p. 398-407.

88. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
89. Campilho, R.D., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
90. Sika, *SikaForce®-7752 FRW L60* 2013.
91. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
92. Carneiro, M.A.d.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*. 2016.