



Estudo de alterações geométricas para melhoria de resistência de juntas adesivas tubulares

MARCELO FERNANDES MACEDO OLIVEIRA ROSAS

novembro de 2020

ESTUDO DE ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS PARA MELHORIA DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES

Marcelo Fernandes Macedo Oliveira Rosas

1110841

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DE ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS PARA MELHORIA DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES

Marcelo Fernandes Macedo Oliveira Rosas

1110841

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.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Investigador, INEGI

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Professor Doutor Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela sua disponibilidade, apoio prestado e pelo conhecimento partilhado.

Quero agradecer à minha família, em especial aos meus pais e à minha irmã por todo o apoio demonstrado e incentivo que me deram.

Um especial agradecimento à minha namorada, pela ajuda, por todo o apoio e motivação que me deu durante este período de tempo.

PALAVRAS CHAVE

Ligações adesivas, Junta adesiva tubular, Adesivo estrutural, Método de elementos finitos, Modelo de dano coesivo, Previsão de resistência, Otimização da junta.

RESUMO

As ligações adesivas são um método de união cada vez mais utilizado na concepção de estruturas mecânicas, porque esta técnica apresenta vantagens significativas em comparação com as ligações tradicionais. Entre as vantagens, destacam-se a redução de peso e possibilidade de unir diferentes materiais, incluindo compósitos, sem danificar as estruturas a ligar. Os adesivos comerciais variam desde resistentes e frágeis a menos resistentes e dúcteis. Existem adesivos, como os poliuretanos, que combinam elevada resistência e ductilidade. Entre as diferentes configurações de junta disponíveis para o projetista encontram-se as juntas tubulares que apresentam atualmente algumas aplicações industriais mas que ainda carecem de estudo aprofundado, como existe por exemplo para as juntas de sobreposição simples.

O objetivo desta dissertação é comparar o desempenho à tração de juntas adesivas tubulares de alumínio (AW6082-T651) ligadas com três adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752), considerando a variação dos parâmetros geométricos principais e alterações geométricas que potencialmente promovam o aumento de resistência, através de um estudo numérico pelo Método de Elementos Finitos realizado no ABAQUS®. O parâmetro principal a estudar é o comprimento de sobreposição (L_0). As alterações geométricas consistem na criação de chanfro interior, de chanfro exterior, na adição de um filete de adesivo e na combinação de alterações geométricas, nomeadamente entre um chanfro interior e um filete de adesivo. A análise numérica consistiu na utilização de modelos de dano coesivo (MDC) modelação da camada de adesivo. Para o efeito, foi realizada uma validação inicial da técnica numérica com dados experimentais obtidos de trabalhos anteriores. No presente trabalho foram estudadas as tensões de arrancamento e de corte em regime elástico e testada a capacidade do método MDC na previsão de resistência das juntas.

No estudo paramétrico numérico em juntas adesivas tubulares verificou-se que existe um aumento significativo de força máxima ($P_{m\acute{a}x}$) com o aumento de L_0 . Na análise dos parâmetros geométricos observou-se que, genericamente, as juntas adesivas com o adesivo Araldite® 2015 obtiveram os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados. O estudo de alterações geométricas mostrou que a combinação de alterações geométricas, nomeadamente entre um chanfro interior e um filete de adesivo, permitiu uma redução significativa das concentrações de tensões e conseqüentemente o aumento do $P_{m\acute{a}x}$.

KEYWORDS

Adhesive joints, Tubular adhesive joint, Structural adhesive, Finite element method, Cohesive zone models, Strength prediction, Joint optimization.

ABSTRACT

Adhesive joints are an increasingly used joining method in the design of mechanical structures, because this technique has significant advantages compared to traditional joints. Among the advantages, the reduction in weight and the possibility of joining different materials, including composites, without damaging the structures to be bonded can be highlighted. Commercial adhesives range from strong and brittle to less strong and ductile. There are adhesives, such as polyurethanes, that combine high strength and ductility. Among the different joint configurations available to the designer are tubular joints, which currently have some industrial applications but still need a deep study, as it exists for example for single-lap joints.

The objective of this thesis is to compare the tensile performance of aluminium tubular adhesive joints (AW6082-T651) joined with three adhesives (Araldite® AV138, Araldite® 2015 and SikaForce® 7752), considering the variation of the main geometric parameters and geometric changes that potentially promote a strength improvement, through a numerical study by the Finite Element Method carried out in ABAQUS®. The main parameter to be studied is the overlap length (L_0). The geometric changes consist of creating an inner chamfer, an outer chamfer, adding an adhesive fillet and combining geometric changes, namely between an internal chamfer and an adhesive fillet. The numerical analysis consisted of using cohesive zone models (CZM) to model the adhesive layer. For this purpose, an initial validation of the numerical technique was carried out with experimental data obtained from previous works. In the present work, peel and shear stresses in the elastic regime were studied and the ability of CZM to predict the joint strength was tested.

In the numerical parametric study on tubular adhesive joints, it was verified that there is a significant increase in the maximum load ($P_{m\acute{a}x}$) with the increase of L_0 . In the analysis of the geometric parameters, it was observed that, generally, the adhesive joints with the adhesive Araldite® 2015 obtained the highest $P_{m\acute{a}x}$ results. The study of geometric changes showed that the combination of geometric changes, namely between an inner chamfer and an adhesive fillet, enabled a significant reduction in stress concentrations and, consequently, an increase in $P_{m\acute{a}x}$.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos Finitos
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica

Lista de Símbolos

α	Ângulo do chanfro exterior na extremidade do substrato
β	Ângulo do chanfro interior na extremidade do substrato
d_{SE}	Diâmetro externo do substrato exterior
d_{SI}	Diâmetro externo do substrato interior
E	Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal

G_C	Tenacidade
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
G_t	Taxa de libertação de energia
k	Fator de momento fletor
K	Rigidez coesiva do adesivo
L	Comprimento da junta
l_{ASI}	Comprimento do chanfro no aderente interior
l_{ASO}	Comprimento do chanfro no aderente exterior
L_O	Comprimento de sobreposição
L_S	Comprimento dos substratos
L_T	Comprimento total da junta adesiva tubular
N	Força aplicada na direção normal
P	Força aplicada
$P_{máx}$	Força máxima aplicada
$P_{máx} Méd$	Força máxima média
t	Espessura do substrato
t_A	Espessura do adesivo
t_m^0	Resistência em modo misto
t_n	Componente de tensão normal
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
t_{SE}	Espessura do substrato exterior
t_{SI}	Espessura do substrato interior

γ_f	Deformação de rotura ao corte
$\delta_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Aumento percentual
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
θ	Ângulo entre os aderentes
θ	Ângulo do filete de adesivo na extremidade do substrato
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão principal
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de cedência à tração
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo do uso de ligações adesivas na aeronave SAAB 340 [1]	8
Figura 2 - Aplicação de adesivos em carros modernos [6]	9
Figura 3 - Aplicação de adesivos em barcos [1].....	9
Figura 4 - Representação dos vários esforços de uma ligação adesiva [7].....	10
Figura 5 - Diferença na distribuição de tensões causada pela não axialidade da carga aplicada [3]	10
Figura 6 - Juntas sujeitas a esforços de arrancamento [3]	11
Figura 7 - Tipos de rotura de uma junta adesiva [8].....	12
Figura 8 - Tipos de configuração de juntas adesivas [9].....	13
Figura 9 - Juntas topo a topo com geometrias alternativas [3].....	13
Figura 10 – Várias juntas de sobreposição [1].....	14
Figura 11 - Juntas com tira com geometrias alternativas [1]	14
Figura 12 - Métodos usados para diminuir esforços de arrancamento em juntas adesivas com um reforço fino e uma base rígida [1]	15
Figura 13 - Distribuição das tensões de corte do adesivo ao longo da junta de sobreposição [1].....	16
Figura 14 - Zonas de máxima concentração de tensões e de deformação plástica dos aderentes [1]	17
Figura 15 – Distribuição de tensões de uma junta adesiva espessa (em cima) e fina (em baixo) [1]	18
Figura 16 - Variação da força de rotura com LO em adesivos dúcteis e frágeis [4]	18
Figura 17 - Filete de adesivo numa junta adesiva de sobreposição simples [3].....	19
Figura 18 - Distribuição das tensões τ_{xy} em juntas com e sem chanfro exterior [3]	19
Figura 19 - Proposta de melhoria da eficiência de uma JSS segundo Hart-Smith [3].....	20
Figura 20 – 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 [37]).....	23
Figura 21 – Modelo coesivo triangular [49, 50].....	25
Figura 22 – Geometria do provete DCB [63]	27
Figura 23 – Geometria do provete ENF [63].....	27
Figura 24 – Representação das direções principais usando o MEFX em JSS: iniciação do dano no adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano no aderente de alumínio (b) [79]	29
Figura 25 – Diferentes geometrias para juntas tubulares adesivas [4]	30

Figura 26 – Configuração da geometria do provete	41
Figura 27 – Curvas tensão-deformação (σ - ε) da liga de alumínio Al 6082-T651 [95]	43
Figura 28 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® AV138 [96]	43
Figura 29 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [98]	44
Figura 30 – Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [99]	45
Figura 31 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm	46
Figura 32 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm .	47
Figura 33 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm	47
Figura 34 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos	48
Figura 35 – Curvas P - d obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	50
Figura 36 – Curvas P - d obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm	50
Figura 37 – Curvas P - d obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	50
Figura 38 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares	52
Figura 39 – MDC triangular [97]	54
Figura 40 – Atribuição dos respectivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®	56
Figura 41 – a) Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS® b) Desenho 2D de uma junta adesiva tubular com $L_0=40$ mm no ABAQUS®	57
Figura 42 – Definição de incrementos para análise no ABAQUS®	58
Figura 43 – Representação das condições fronteira na simulação	58
Figura 44 – Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=40$ mm.....	59
Figura 45 – Aspetto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS®	60
Figura 46 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação de L_0 : (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752	61
Figura 47 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação de L_0 : (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752	62

Figura 48 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função de L_0 , para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.	64
Figura 49 - Evolução de $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos.....	65
Figura 50 – Detalhe da malha usada no filete de adesivo	66
Figura 51 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} em função do ângulo do filete de adesivo para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.....	67
Figura 52 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do ângulo do filete de adesivo para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.....	68
Figura 53 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.....	69
Figura 54 - Evolução de $P_{máx}$ em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos.	71
Figura 55 - Detalhe da malha usada no chanfro exterior do aderente.	71
Figura 56 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação do ângulo do chanfro exterior: (a) Araldite® AV138 , (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.....	72
Figura 57 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do ângulo do chanfro exterior para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.....	73
Figura 58 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro exterior, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138 , (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.....	75
Figura 59 - Evolução de $P_{máx}$ em função do ângulo do chanfro exterior da junta adesiva tubular, para os três adesivos	76
Figura 60 - Detalhe da malha usada no chanfro interior do aderente	77
Figura 61 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação do ângulo do chanfro interior: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752	77
Figura 62 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação do ângulo do chanfro interior: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752	79
Figura 63 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro interior, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.....	80
Figura 64 - Evolução de $P_{máx}$ em função do ângulo do chanfro interior da junta adesiva tubular, para os três adesivos	81
Figura 65 - Detalhe da malha usada na combinação de chanfro interior e filete de adesivo do aderente	82
Figura 66 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função do ângulo do chanfro interior e filete de adesivo: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752	83
Figura 67 - Distribuição das tensões τ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função do ângulo do chanfro interior e filete de adesivo: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752	84

-
- Figura 68 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro interior e filete de adesivo, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138 ; (b) Araldite® 2015 ; (c) SikaForce® 7752.....85
- Figura 69 - Evolução de $P_{máx}$ em função do ângulo do chanfro interior (a), chanfro exterior (b) e filete de adesivo (c), para os três adesivos.86

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Estudos experimentais em juntas adesivas tubulares	31
Tabela 2 – Estudos sobre a análise numérica de juntas tubulares adesivas	33
Tabela 3 - Estudos de juntas adesivas tubulares com alterações geométricas	35
Tabela 4 – Designação das cotas dos provetes e respectivos valores [em mm].....	42
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [97]	44
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [98].....	45
Tabela 7 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [99]	46
Tabela 8 – $P_{m\acute{a}xM\acute{e}d}$ (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares	48
Tabela 9 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0	52
Tabela 10 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respectiva diferença relativa	53
Tabela 11 – Parâmetros coesivos em tração e corte para os adesivos Araldite® AV138 [95], Araldite® 2015 [111], SikaForce® 7752 [99]	56
Tabela 12 – Valores máximos σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0	62
Tabela 13 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0	63
Tabela 14 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os três adesivos em função de L_0 e o respectivo aumento percentual	65
Tabela 15 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do filete de adesivo	67
Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do filete de adesivo	69
Tabela 17 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os três adesivos em função de θ e o respectivo aumento percentual	70
Tabela 18 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro exterior.	73
Tabela 19 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro exterior	74
Tabela 20 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os três adesivos em função de α e o respectivo aumento percentual	76

Tabela 21 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro interior.	78
Tabela 22 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro interior	79
Tabela 23 - Valores de $P_{máx}$ [N] para os três adesivos em função de β e o respectivo aumento percentual	81
Tabela 24 – Ângulos do chanfro interior e filete de adesivo para os três adesivos	82
Tabela 25 - Valores de $P_{máx}$ [N] para os três adesivos em função dos β e θ da combinação e o respectivo $\Delta P_{máx}$	85

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do relatório	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	7
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	8
2.1.3	Esforços e modos de rotura	10
2.1.4	Configurações possíveis de junta	12
2.1.5	Parâmetros que afetam o comportamento das juntas adesivas	15
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	21
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	21
2.2.2	Mecânica da fratura	22
2.2.3	Modelos de dano coesivo	23
2.2.3.1	Tipos de leis coesivas	24
2.2.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos	25
2.2.4	Mecânica do dano	27
2.2.5	Método dos Elementos Finitos Extendido	28
2.3	Juntas adesivas tubulares	30
2.3.1	Análise experimental de juntas tubulares	30
2.3.2	Análise numérica de juntas tubulares	33
2.3.3	Alterações geométricas em juntas tubulares	35
3	DESENVOLVIMENTO	41

3.1	Validação dos modelos coesivos para previsão de resistência.....	41
3.1.1	Descrição da geometria e materiais.....	41
3.1.1.1	<i>Substratos</i>	42
3.1.1.2	Adesivos.....	43
3.1.1.2.1	Araldite® AV138.....	43
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	44
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	45
3.1.2	Resultados experimentais e respetiva discussão.....	46
3.1.2.1	<i>Araldite® AV138</i>	46
3.1.2.2	<i>Araldite® 2015</i>	47
3.1.2.3	<i>SikaForce® 7752</i>	47
3.1.3	Comparação de resultados.....	48
3.1.4	Condições de análise numérica.....	49
3.1.5	Previsão de resistência e respetiva discussão.....	50
3.1.6	Discussão dos resultados obtidos.....	51
3.1.7	Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais.....	52
3.2	Estudo numérico.....	54
3.2.1	Modelação numérica.....	54
3.2.1.1	Modelo de dano triangular.....	54
3.2.1.2	Determinação das propriedades coesivas.....	55
3.2.2	Condições de análise numérica.....	56
3.2.3	Estudo dos parâmetros geométricos.....	60
3.2.3.1	Comprimento de sobreposição.....	60
3.2.3.1.1	Distribuições de tensões.....	60
3.2.3.1.1.1	Tensões de arrancamento.....	60
3.2.3.1.1.2	Tensões de corte.....	62
3.2.3.1.2	Resistência das juntas.....	63
3.2.4	Estudo de alterações geométricas.....	65
3.2.4.1	Filete de adesivo.....	66
3.2.4.1.1	Distribuições de tensões.....	66

3.2.4.1.1.1	Tensões de arrancamento	66
3.2.4.1.1.2	Tensões de Corte	67
3.2.4.1.2	Resistência das juntas	69
3.2.4.2	Chanfro exterior	71
3.2.4.2.1	Distribuições de tensões	71
3.2.4.2.1.1	Tensões de Arrancamento	71
3.2.4.2.1.2	Tensões de Corte	73
3.2.4.2.2	Resistência das juntas	74
3.2.4.3	Chanfro interior	76
3.2.4.3.1	Distribuições de tensões	77
3.2.4.3.1.1	Tensões de arrancamento	77
3.2.4.3.1.2	Tensões de corte	78
3.2.4.3.2	Resistência das juntas	79
3.2.4.4	Combinação de chanfro interior e filete de adesivo	81
3.2.4.4.1	Distribuição de tensões	82
3.2.4.4.1.1	Tensões de arrancamento	82
3.2.4.4.1.2	Tensões de corte	83
3.2.4.4.2	Resistência das juntas	84
3.2.4.5	Análise dos resultados obtidos	86
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	89
5	REFERÊNCIAS	95

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As ligações adesivas têm vindo a serem usadas desde há milhares de anos. No início os adesivos provinham de produtos naturais como ossos e pele de animais, peixe, leite e plantas. Com o passar dos anos e com o avanço tecnológico, os adesivos começaram a ser fabricados a partir de polímeros. As juntas adesivas apresentam muitas vantagens em relação aos métodos de ligação mais tradicionais, tais como a redução de peso, a possibilidade de unir diferentes tipos de materiais, boa resistência à fadiga e permitem uma distribuição de tensões mais uniforme, o que fez com o que estas tenham vindo a ser cada vez mais usadas em diversas indústrias, tais como aeronáutica, aeroespacial, automóvel construção civil, entre outras. Existem diferentes configurações de junta disponíveis. As juntas tubulares permitem obter uma redução do peso da mesma, distribuir de forma mais uniforme as tensões, não danificar o material dos aderentes e ligar materiais dissimilares. Contudo, as juntas adesivas também apresentam desvantagens, tais como a típica impossibilidade de desmontagem e a necessidade de cura a elevadas temperaturas. O comportamento das ligações adesivas varia consoante o tipo de adesivo, de substrato e a geometria da área de colagem.

O aumento da utilização das ligações adesivas e os comportamentos diferentes que as juntas adesivas apresentam levam à necessidade de existência de ferramentas que permitam o estudo das mesmas. Desta forma, para a análise de juntas adesivas, o método de elementos finitos (EF) tem vindo a ser cada vez mais utilizado. Este revela-se uma ferramenta fundamental para o estudo de ligações adesivas, pois pode ser combinado com critérios ou modelos de dano cada vez mais complexos. Tendo em conta as técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo (MDC) são uma ferramenta que permite combinar os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para a previsão do desempenho das juntas adesivas. Deste modo, é possível criar modelos de juntas adesivas com diferentes tipos de adesivos e substratos, sendo necessário efetuar a aferição desta técnica numérica para a previsão de juntas adesivas.

1.2 Objetivos

Esta dissertação tem como objetivo comparar numericamente o desempenho de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração. Foram considerados diferentes comprimentos de sobreposição (L_0) e alterações geométricas para os diferentes adesivos utilizados.

Neste estudo foram utilizados tubos em alumínio e três adesivos diferentes (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) nas juntas adesivas tubulares de sobreposição simples. As propriedades dos materiais usados foram obtidas com base em trabalhos anteriores, nos quais estas foram validadas experimentalmente.

Os parâmetros estudados foram o comprimento de sobreposição, com diferentes valores de comprimento (10, 20, 30 e 40 mm) e as alterações geométricas, que consistem na criação de chanfro interior, de chanfro exterior, na adição de um filete de adesivo e na combinação de alterações geométricas, nomeadamente entre um chanfro interior e um filete de adesivo.

O estudo numérico consistiu na análise de distribuições das tensões de arrancamento e de corte na camada adesiva em regime elástico e a capacidade do método modelo de dano coesivo (MDC) na previsão de resistência das juntas.

Deste modo, pretende-se verificar qual o efeito do tipo de adesivo na resistência da ligação e qual dos parâmetros geométricos analisados numericamente promove o maior aumento de resistência.

1.3 Organização do relatório

A dissertação foi dividida em 4 capítulos, para que seja possível uma melhor interpretação e análise do trabalho realizado.

No capítulo 1 é feita uma introdução do trabalho desenvolvido, com os respetivos objetivos e a organização da dissertação.

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, em que são apresentados temas referentes às ligações adesivas como aplicações comuns, configurações possíveis, parâmetros geométricos que afetam o seu comportamento, métodos de previsão de resistência de juntas adesivas e a análise experimental, numérica e de alterações geométricas em juntas adesivas tubulares.

O capítulo 3 aborda a validação dos resultados numéricos relativamente aos experimentais. Ainda neste capítulo é feita a análise das distribuições de tensões e a previsão de resistência através de um estudo paramétrico numérico realizado no ABAQUS® para cada alteração geométrica efetuada nas juntas adesivas tubulares.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas e os possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas
- 2.3 Juntas adesivas tubulares

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Os adesivos já são utilizados há muitos séculos. No entanto até ao séc. XX, estes eram adesivos naturais e provinham dos ossos, das peles, dos peixes, do leite, e das plantas [1]. Os adesivos naturais funcionavam bem exceto quando submetidos a ambientes húmidos, tornavam-se fracos e exalavam odores desagradáveis devido à absorção de água [2].

No princípio do séc. XX iniciou-se a introdução de adesivos sintéticos poliméricos nas ligações. No entanto, no início dos anos 40, com o avanço tecnológico houve um aumento significativo de utilização de adesivos sintéticos poliméricos na junção de componentes. Estes têm propriedades que permitem a adesão na maioria dos materiais com facilidade e com uma capacidade de aguentar esforços consideráveis [1].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas apresentam diversas vantagens relativamente aos métodos tradicionais de ligação tais como soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas e outras ligações mecânicas [3]. As principais vantagens de uma ligação adesiva comparativamente às ligações tradicionais são [4]:

- Aumento da resistência à fadiga;
- Boa capacidade de amortecimento de vibrações;
- Permitem a ligação de materiais diferentes;
- Conseguem unir diferentes geometrias e espessuras;
- Previnem a corrosão galvânica entre materiais;
- Permitem contornos regulares e suaves;
- Por vezes mais baratas e mais rápidas do que as ligações mecânicas;
- Redução do peso e de custo.

Tal como todas as outras ligações, as ligações adesivas apresentam as seguintes desvantagens [4]:

- Preparação de superfícies que requer tratamentos superficiais;
- Os adesivos muitas da vezes são curados a elevadas temperaturas;

- Necessidade de utilização de gabaris, que se traduz num aumento de custo;
- Difícil inspeção no controlo de qualidade;
- O tempo de vida do adesivo depende do ambiente a que possa estar exposto;
- Alguns adesivos são tóxicos;
- Fraca resistência ao arrancamento.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Existem muitas indústrias que utilizam juntas adesivas. No entanto, a indústria aeronáutica é a principal responsável pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais [3]. A indústria aeronáutica desde cedo começou a utilizar ligações adesivas, já que estas têm características adequadas para as aplicações aeronáuticas, tais como: redução do peso da estrutura, resistência à fadiga, amortecimento das vibrações e a possibilidade de criar superfícies aerodinamicamente suaves [5]. O uso de adesivos tem vindo a ser utilizado por muitos fabricantes de aeronaves. As empresas pioneiras foram a Havilland e Fokker. Na Figura 1 é mostrado o uso de ligações adesivas ao longo da estrutura da aeronave SAAB 340, nomeadamente na fuselagem, asas, cauda, e muitos outros componentes [6].

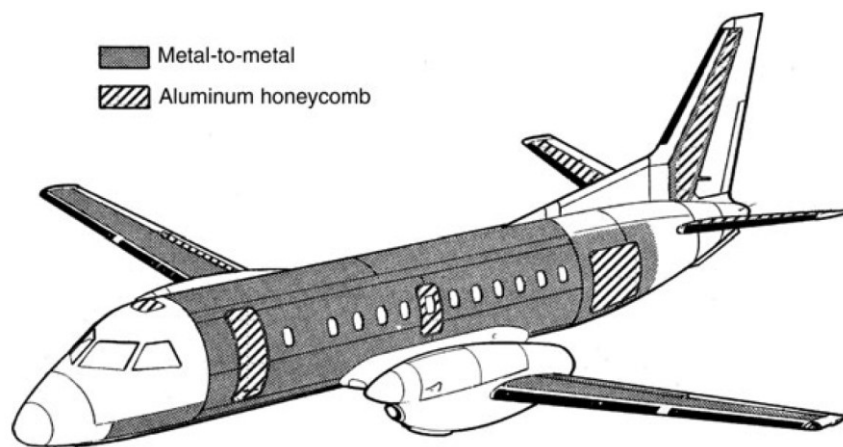


Figura 1 - Exemplo do uso de ligações adesivas na aeronave SAAB 340 [1]

Com o avanço tecnológico das ligações adesivas, estas começaram a ser utilizadas na produção em série na indústria automóvel. As ligações adesivas podem ser encontradas em muitas partes do automóvel pois a indústria automóvel, com vista à redução de peso dos automóveis, começa a usar materiais mais leves, que são difíceis de ligar pelos métodos tradicionais de ligação [3]. Na Figura 2 são mostradas as aplicações de juntas adesivas nos componentes de um automóvel.



Figura 2 - Aplicação de adesivos em carros modernos [6]

A indústria marítima utiliza adesivos numa grande variedade de estruturas, desde pequenos barcos a embarcações de petróleo. As condições a que um barco fica submetido durante o seu uso podem ser muito agressivas, o que leva à utilização de materiais compósitos reforçados com fibra. As juntas adesivas são a escolha para unir estes materiais visto que os adesivos são leves e resistentes à corrosão [1]. Na Figura 3 apresenta-se um exemplo de aplicação de adesivo nos barcos.



Figura 3 - Aplicação de adesivos em barcos [1]

As juntas adesivas já são usadas na indústria do calçado desde 1950, pois trazem mais vantagens relativamente aos processos de costura e grampo, entre outros, nomeadamente: mais flexibilidade e juntas mais homogêneas, melhor distribuição de tensões na junta durante o uso, conseguem um melhor design e variado, e a possibilidade de implementar processos automatizados [6]. No entanto, é necessário garantir um controlo rigoroso dos processos de colagem da sola de forma a evitar problemas de separação da sola com o sapato.

2.1.3 Esforços e modos de rotura

Nas juntas adesivas é usual encontrar uma distribuição não uniforme invés de uma distribuição uniforme das tensões ao longo da camada do adesivo. As forças aplicadas numa junta produzem tensões locais que podem ser superiores à tensão média, o que limita a resistência da junta [4]. Existem quatro modos fundamentais de carregamento: corte, tração/compressão, arrancamento e clivagem, como é mostrado na Figura 4.

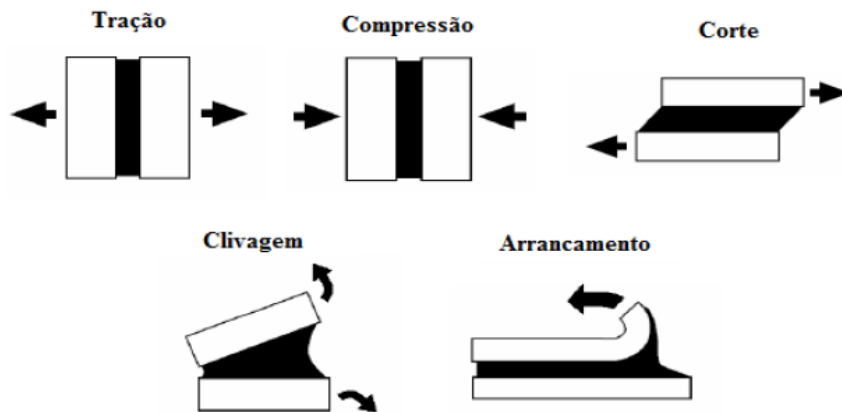


Figura 4 - Representação dos vários esforços de uma ligação adesiva [7]

Os esforços de tração resultam de forças a atuar na perpendicular ao plano da junta criando tensões distribuídas uniformemente ao longo da área colada. Contudo, como está representado na Figura 5, na prática a espessura do adesivo é difícil de controlar e as forças não são exatamente axiais, o que origina forças indesejáveis, tais como de clivagem e arrancamento [3].

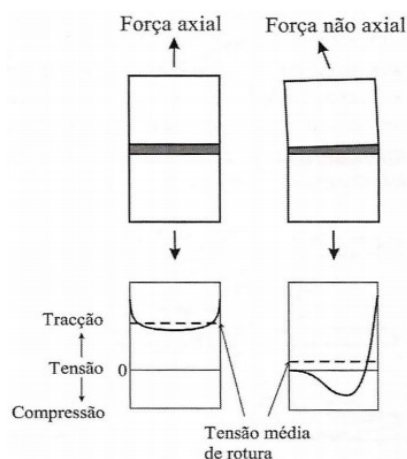


Figura 5 - Diferença na distribuição de tensões causada pela não axialidade da carga aplicada [3]

Os esforços de compressão, tal como os esforços de tração, devem manter-se perpendicularmente ao longo da área colada de forma a garantir uma compressão pura. Uma junta adesiva em compressão só rompe se a distribuição de tensões não for uniforme. Na prática, uma junta em “pura” compressão não precisa de adesivo [3, 4].

Os esforços de corte resultam de esforços paralelos à junta adesiva, que provocam a separação dos dois substratos. De salientar que a maior parte da tensão está localizada nos extremos da sobreposição, o que faz com que a região do centro não contribua para a sustentação da ligação [3]. As juntas adesivas, quando submetidas a este carregamento, são muito resistentes porque toda a área de sobreposição contribui para a resistência da junta [4].

Os esforços de clivagem são caracterizados como forças que ocorrem na extremidade de uma junta rígida. Este esforço é um esforço que deve ser evitado, porque a tensão está concentrada numa área muito pequena, como está representado na Figura 4.

Os esforços de arrancamento, tal como os esforços de clivagem, são esforços que devem ser evitados. Os esforços de arrancamento são muito idênticos às de clivagem e também ocorrem na extremidade de uma junta. No entanto aplicam-se ao caso de um ou ambos os substratos serem flexíveis, o que conduz a um maior ângulo de separação dos substratos do que os esforços de clivagem. Os adesivos dúcteis e flexíveis são mais resistentes, pois permitem uma distribuição de tensões menos concentrada, conforme exemplificado na Figura 6. Contudo, os adesivos frágeis e rígidos são sensíveis às forças de arrancamento [3, 4].

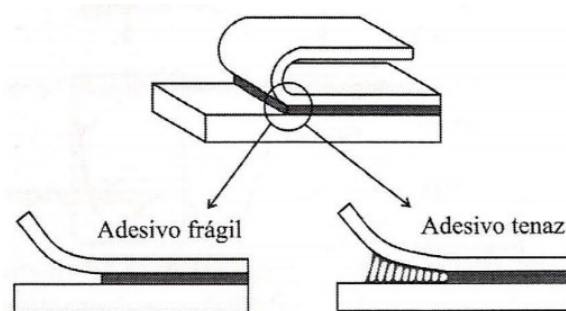


Figura 6 - Juntas sujeitas a esforços de arrancamento [3]

É fundamental a correta avaliação da distribuição de tensões e modos de rotura nas juntas adesivas. Uma ligação adesiva é uma ligação eficiente quando existe transmissão de cargas entre os dois componentes ligados, assegurando a sua integridade estrutural sobre solicitações estáticas e ou dinâmicas e condições ambientais adversas. Existem quatro modos de rotura, como está representado na Figura 6: Rotura adesiva, rotura coesiva, rotura pelo substrato e rotura mista [3].

A rotura coesiva acontece quando a resistência interna do adesivo não é inferior à resistência dos substratos e da própria ligação entre o adesivo e substratos. A rotura adesiva ocorre na interface entre os substratos e o adesivo, na qual um dos substratos fica com o adesivo. Isto geralmente deve-se a uma má preparação das superfícies. A rotura mista consiste na, a combinação da rotura coesiva e adesiva. A rotura pelo substrato ocorre quando a resistência do adesivo é superior à resistência do substrato. Desta forma, constata-se que uma junta corretamente projetada será aquela onde ocorra rotura do substrato [3].

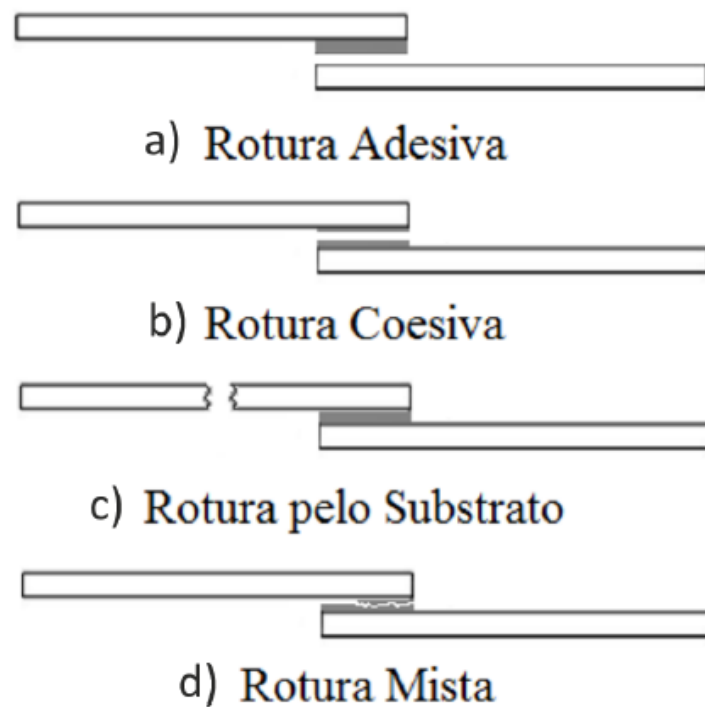


Figura 7 - Tipos de rotura de uma junta adesiva [8]

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Existem muitas configurações possíveis de junta, como está representado na Figura 8. No entanto na concepção de uma junta adesiva é necessário ter em conta qual a direção dos esforços a que o adesivo irá estar a ser solicitado. Idealmente o adesivo deve ser solicitado a esforços de corte e a área de sobreposição da junta deve a maior possível de forma a obter uma maior resistência [1].

As juntas de topo a topo são as juntas mais fáceis de fabricar. Contudo, não são resistentes quando solicitadas a esforços de flexão porque originam esforços de clivagem no adesivo. Para substratos espessos é possível melhorar a junta de forma a reduzir a clivagem no adesivo efetuando modificações como chanfro interior, junta macho-fêmea e junta em degrau (Figura 9). As juntas macho-fêmea são muito eficientes pois atuam como um reservatório para o adesivo e são auto-alinhantes [1, 3].

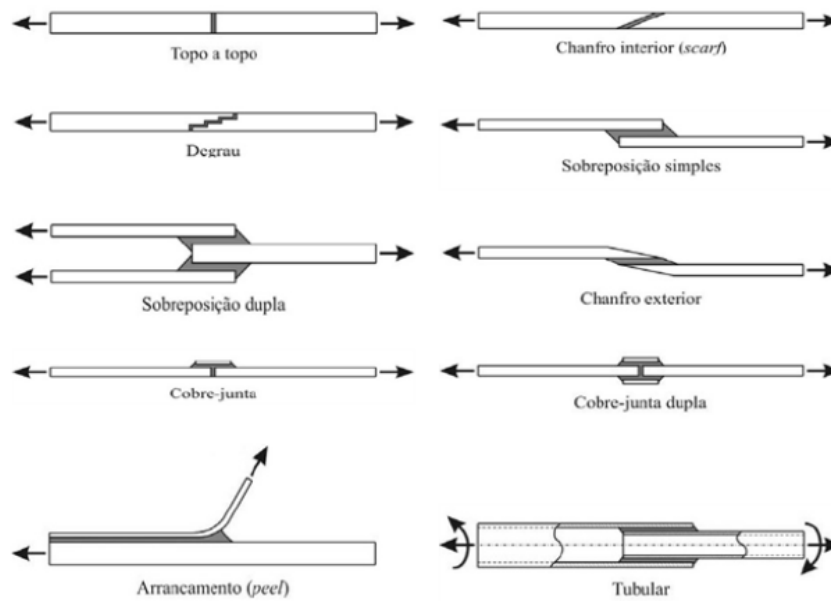


Figura 8 - Tipos de configuração de juntas adesivas [9]

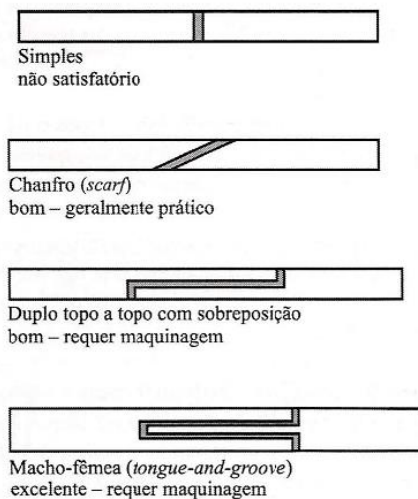


Figura 9 - Juntas topo a topo com geometrias alternativas [3]

As juntas de sobreposição são muito comuns pois são juntas de fácil fabrico e são juntas que na qual o adesivo está a ser solicitado maioritariamente ao corte. Porém, nas juntas de sobreposição simples os esforços não são colineares, o que promove tensões de arrancamento significativas nas extremidades da sobreposição. A Figura 10 mostra várias formas possíveis para reduzir as tensões de arrancamento. Uma das soluções é a junta de ressalto, que garante o alinhamento das forças de forma simples. Outra das soluções é a junta de sobreposição dupla (JSD), que consegue diminuir significativamente o momento fletor, devido à sua construção ser balanceada [1]. A junta de sobreposição simples é a mais usada para os estudos de testes de durabilidade, e permite uma fácil interpretação de resultados [10].

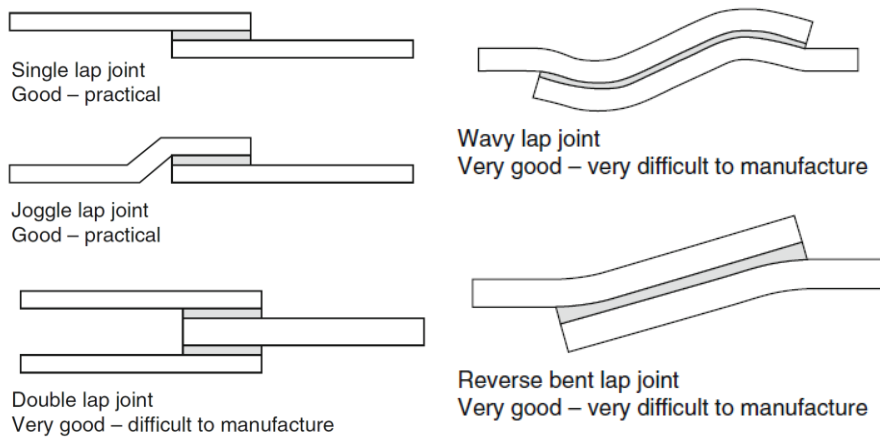


Figura 10 – Várias juntas de sobreposição [1]

As Juntas com tira (*strap joint*) são juntas que mantêm as forças alinhadas e que usualmente são usadas quando as juntas de sobreposição são impraticáveis devido à espessura do substrato [4]. Nas juntas de tira simples, da mesma forma que as juntas de sobreposição simples, os esforços não são colineares, criando tensões de arrancamento. A junta de tira dupla, é uma junta preferível porque diminui o momento-fletor. As juntas macho-fêmea e as juntas com tira são juntas muito eficientes, embora a construção das mesmas necessite de muita maquinagem [1, 3]. Estas configurações são muito usadas no ramo aeronáutico, nomeadamente remendos de alumínio ou compósito nas reparações da fuselagem de aeronaves [1]. Na Figura 11 são apresentadas várias configurações com tira com geometrias alternativas [3].

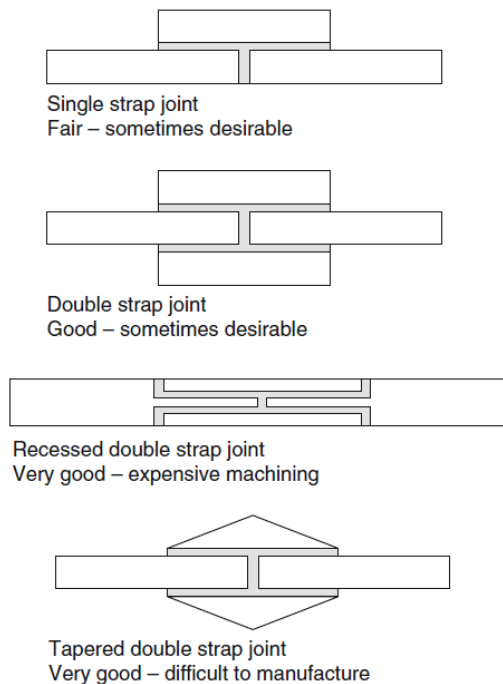


Figura 11 - Juntas com tira com geometrias alternativas [1]

Os reforços são juntas obtidas por colagem de substratos finos em componentes espessos de forma a aumentar a resistência da junta [1]. Na utilização de juntas em canto, é aconselhável a utilização de reforços como suporte de forma a restringir a flexibilidade das mesmas [4]. No entanto quando estas juntas são solicitadas a esforços de arrancamento, a colocação de um rebite ou de um reforço adicional, são algumas soluções para reduzir as forças de arrancamento, como é mostrado na Figura 12 [3].

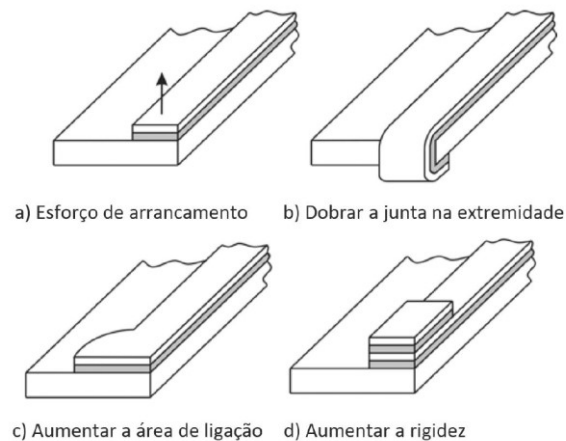


Figura 12 - Métodos usados para diminuir esforços de arrancamento em juntas adesivas com um reforço fino e uma base rígida [1]

2.1.5 Parâmetros que afetam o comportamento das juntas adesivas

Existem vários parâmetros que afetam a resistência de uma junta adesiva. No entanto, os principais parâmetros são as propriedades mecânicas dos materiais envolvidos (adesivo e substrato); as características geométricas da junta tais, como espessura da cola adesivo, comprimento de sobreposição, filete de adesivo e geometria dos substratos; o efeito térmico devido à contração do adesivo, da diferença dos coeficientes de expansão térmica dos materiais a ligar e variação das propriedades dos materiais em função da temperatura [3].

A distribuição de tensões numa junta adesiva não é uniforme, o que faz com que a tensão média de corte seja muito inferior à tensão máxima local. Como a rotura acontece nos locais de tensão máxima, é necessário diminuir os picos de tensões.

De forma a diminuir a concentração de tensões e aumentar a resistência da junta é necessário ter em conta as seguintes medidas [3]:

- O adesivo deve ser dúctil e com um módulo de elasticidade baixo;
- Usar substratos similares, isto é, com propriedades mecânicas e características geométricas muito semelhantes ou, caso não seja possível, igualar a rigidez;
- Utilizar uma camada fina de adesivo;
- Usar uma grande área de sobreposição na junta adesiva.

Todavia, a utilização de um filete de adesivo, um chanfro nos aderentes ou utilização de mais do que um adesivo melhoram a resistência da junta e diminuem as tensões de arrancamento [1, 3].

Propriedades do adesivo

A resistência do adesivo e a resistência de uma junta têm significados diferentes. A resistência de uma junta pode não aumentar com um adesivo resistente. No entanto, esta aumenta com a resistência mecânica do adesivo, com a ductilidade do adesivo e a flexibilidade do adesivo. Os adesivos dúcteis e flexíveis geralmente têm uma resistência baixa. Contudo, quando usados numa junta, devido à sua flexibilidade e à sua capacidade de permitirem uma distribuição uniforme de tensões, estes podem originar juntas mais resistentes do que os adesivos rígidos. De acordo com a Figura 13, os adesivos com baixo módulo de elasticidade (adesivos flexíveis) permitem uma distribuição de tensões mais uniforme quando comparados com adesivos rígidos, onde existe uma elevada concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva [1, 3].

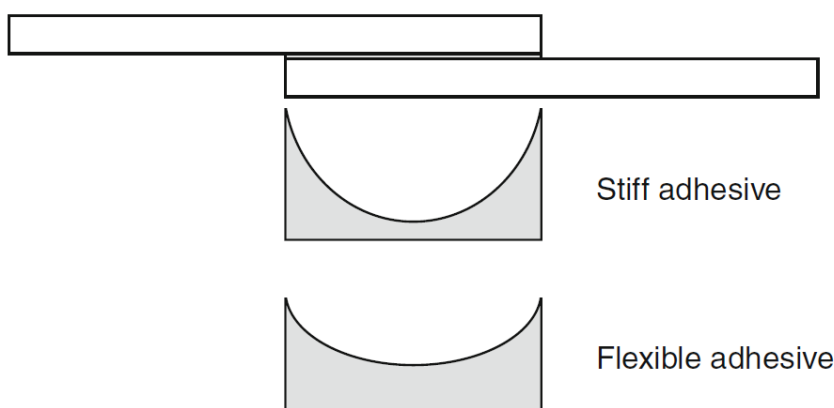


Figura 13 - Distribuição das tensões de corte do adesivo ao longo da junta de sobreposição [1]

Os adesivos frágeis, comparativamente aos adesivos dúcteis e flexíveis, são mais sensíveis à propagação de fendas. Estes adesivos devido a terem uma distribuição de tensão menos uniforme e uma menor energia interna de amortecimento, apresentam uma menor resistência à fadiga. No entanto, se uma junta for sujeita a tensões não uniformes, com carregamentos exteriores como o arrancamento ou a clivagem, ou a tensões internas, o tipo de adesivo mais acertado a usar é o adesivo dúctil. Idealmente um adesivo deveria ser resistente, dúctil e flexível, mas é muito difícil obter um adesivo com estas três propriedades. Desta forma, é recomendado utilizar um adesivo dúctil.

Propriedades do substrato

As propriedades do substrato têm um elevado impacto na resistência da junta. As tensões não uniformes no adesivo podem ser causadas pela deformação do aderente devido às tensões às quais está a ser sujeito [4]. No caso de uma junta ter dois substratos

diferentes, é necessário garantir que a rigidez axial é a mesma entre os dois substratos, isto é, $E_i.t_i = E_s.t_s$, em que E é o módulo de elasticidade longitudinal, t a espessura, e os índices (i,s) dizem respeito ao substrato inferior e superior, respetivamente. A rotura prematura nos adesivos metálicos pode ser devido à deformação plástica que é causada pela concentração de tensões que ocorre na vizinhança das extremidades da junta adesiva (Figura 14). Assim sendo, a rotura da junta é controlada pela cedência do substrato [3].

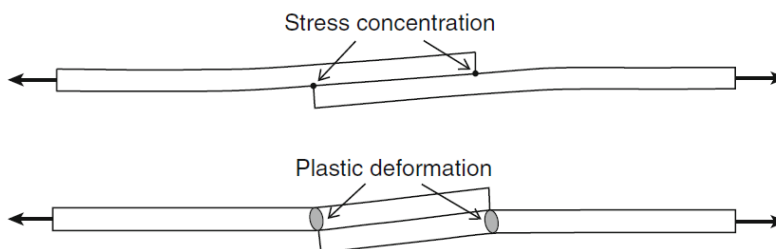


Figura 14 - Zonas de máxima concentração de tensões e de deformação plástica dos aderentes [1]

A delaminação, que inclui a rotura interlaminar e a intralaminar, é uma rotura que acontece nos laminados compósitos. De forma a evitar a rotura é recomendável utilizar camadas superficiais com fibras orientadas paralelamente à direção da solicitação. A rotura intralaminar também é provocada pelas tensões de arrancamento nas extremidades da junta. Uma das possíveis soluções para diminuir as tensões de arrancamento é a alteração da geometria do substrato [1].

Espessura do adesivo

O tamanho e a uniformidade ou homogeneidade são os aspetos mais importantes para a espessura de um adesivo [4]. Normalmente com o aumento da espessura do adesivo existe um decréscimo da resistência da junta (da Silva et al. [11]; Adams e Peppiatt [12]). Adams e Peppiatt [12] explicaram que, com o aumento de espessura do adesivo, aumenta a possibilidade de defeitos internos tais como porosidades, vazios e microfissuras, o que pode levar a uma rotura prematura da junta adesiva [1]. Tendo em conta os resultados experimentais obtidos com adesivos estruturais, é recomendado utilizar uma espessura fina de adesivo compreendido entre 0,1-0,2 mm, de forma a assegurar uma boa resistência da junta. Goland e Reissner [13] e Volkersen [14] afirmam o contrário. De acordo com os seus modelos analíticos, existe um aumento de resistência da junta com o aumento da espessura do adesivo. No entanto, para espessuras muito finas do adesivo existe a possibilidade de aumentar o risco de falhas de colagem da junta o que leva a criação de defeitos [1, 2]. Crocombe [15] diz que as juntas espessas, considerando a plasticidade do adesivo, são menos resistentes. Uma análise elástica indica que uma junta adesiva espessa tem uma distribuição de tensão mais uniforme nas extremidades da junta do que as juntas mais finas, de acordo com a Figura 15 [1].

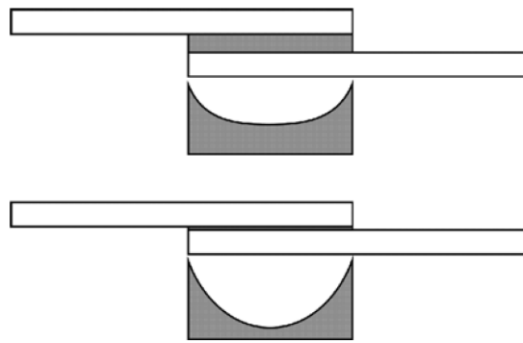


Figura 15 – Distribuição de tensões de uma junta adesiva espessa (em cima) e fina (em baixo) [1]

Gleich et al. [16] constataram que existe um aumento das tensões normais e de corte nas interfaces e na extremidade da zona de sobreposição da junta com o aumento da espessura do adesivo [3]. Grant et al. [17], através de um estudo realizado numa junta adesiva de sobreposição simples, chegaram a conclusão que o aumento da espessura do adesivo reduz a resistência da junta, o que se deve à possibilidade de existir momentos de flexão mais altos [1]. Petrie [4] diz que juntas espessas aumentam as tensões localizadas na extremidade da junta devido às forças não axiais. Desta forma é necessário ter em consideração o paralelismo nos substratos, para garantir a uniformização da espessura do adesivo na junta.

Comprimento de sobreposição

O comprimento de sobreposição de uma junta é uma variável importante. Considera-se que l é o comprimento de sobreposição e b é a espessura do substrato. A resistência da junta aumenta com a redução do valor do rácio l/b . No entanto, a partir de determinados valores de l/b , o aumento da resistência já não é significativo e o peso da junta aumenta [3].

De acordo com a Figura 16 existem comprimentos de sobreposição em que a força de rotura é maior nos adesivos frágeis do que nos adesivos dúcteis. Todavia, com o aumento do comprimento de sobreposição a força de rotura é maior nas juntas com adesivos dúcteis do que nos adesivos frágeis [4].

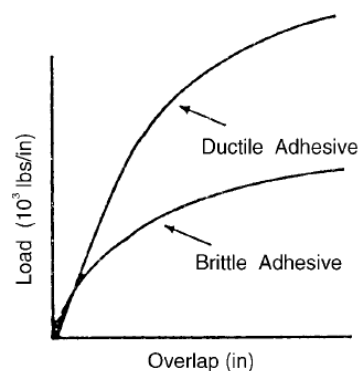


Figura 16 - Variação da força de rotura com L_0 em adesivos dúcteis e frágeis [4]

Filete de adesivo

O filete de adesivo, de acordo com vários autores, reduz os picos de tensão nas extremidades do substrato e do adesivo. Esta alteração geométrica ou o excesso de adesivo na extremidade da junta adesiva, como está representado na Figura 17, permite uma melhor transferência de tensões e uma uniformização de tensões [3].

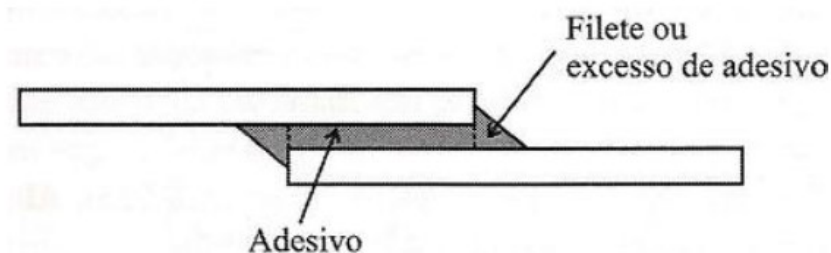


Figura 17 - Filete de adesivo numa junta adesiva de sobreposição simples [3]

Geometria dos substratos

De acordo com a Figura 18, as alterações de geometria dos substratos permitem uma redução de concentração de tensões nas extremidades da junta colada. As juntas com chanfro interno são uma configuração de alteração geométrica que permite a diminuição de concentração de tensões [3].

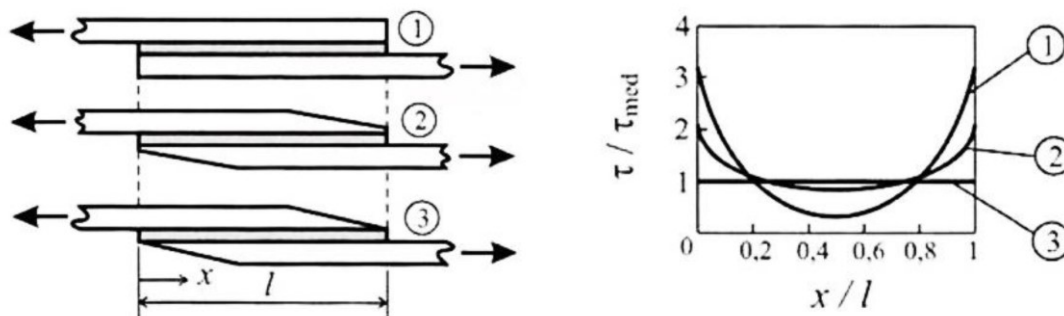


Figura 18 - Distribuição das tensões τ_{xy} em juntas com e sem chanfro exterior [3]

É difícil estudar por via analítica o impacto da alteração de geometria no substrato. Contudo, vários autores como Cherry e Harrison [18] e Adams e Peppiatt [19], Groth e Nordlund [20] desenvolveram equações e métodos numéricos de otimização na qual chegaram a geometrias que permitem a diminuição dos esforços de arrancamento e da concentração de tensões. Hart-Smith [21] estudou técnicas de redução das tensões de arrancamento (*peel*) de forma a nem considerar esta como variável em termos de cálculo da resistência de uma junta. Este autor propôs a geometria representada na Figura 19, de forma a aumentar a eficiência de uma junta de sobreposição simples [3].

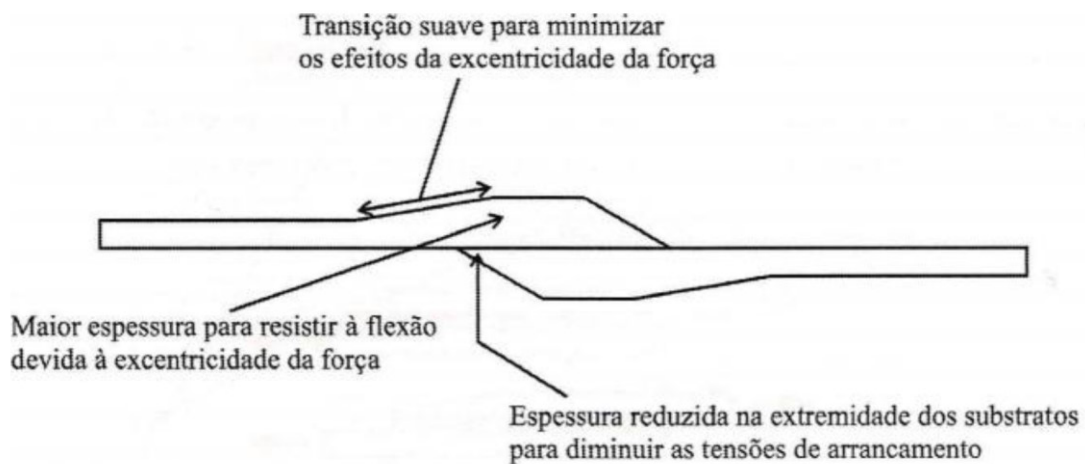


Figura 19 - Proposta de melhoria da eficiência de uma JSS segundo Hart-Smith [3]

Efeitos térmicos

Os efeitos térmicos podem influenciar o estado de tensão de uma junta adesiva. Um dos efeitos é o eventual aquecimento do adesivo que acontece na execução da junta, originando o seu espalhamento e molhagem das superfícies devido a uma redução da viscosidade do adesivo. No entanto, com o aumento de temperatura, existe a reticulação e solidificação do adesivo, permitindo a cura do adesivo. Durante o processo de solidificação existe a contração do adesivo, por interação com os substratos, que induz tensões na junta. No caso dos adesivos que curam a altas temperaturas, existe uma diminuição de tensões devidas à contração, porque ocorre o fenômeno de fluência. Coppendale [22], Mallick [23] e Yu [24] estudaram o problema de contração recorrendo ao método de elementos finitos, e concluíram que as tensões causadas pela contração na cura não são importantes [3]. Outros dos efeitos é a diferença de coeficientes de dilatação térmica dos materiais envolvidos. Durante o processo de arrefecimento abrupto, a diferença de coeficientes de dilatação térmica entre o adesivo e os substratos, de materiais iguais ou de materiais diferentes, provoca o aparecimento de tensões de origem térmica. Desta forma, sempre que possível, uma junta adesiva deve ter materiais com coeficientes de dilatação térmica semelhantes, de forma a diminuir a diferença de deformações induzidas pelas variações de temperatura [3]. Por fim, outro dos efeitos provém do diferente comportamento ao nível das curvas tensão-deformação dos materiais para temperaturas diferentes. Tendo em conta a gama de temperaturas a que uma junta adesiva está sujeita, este efeito não afeta as propriedades dos substratos (metal ou compósito). No entanto, os adesivos são afetados por esta variação, pois quando uma junta é sujeita a temperaturas baixas, o material do adesivo torna-se mais frágil [3].

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

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [14], 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 de o adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [12] é a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [25], 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 [26]. 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 [14], 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. [27] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [28]. 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 [25], 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, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [3]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [29] 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 [30]. 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 [31] e por Rice [32] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utiliza a taxa de libertação de energia à tração e corte, G_I ou G_{II} , respetivamente, e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [33], 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 [34] e Dugdale [35], 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 [36].

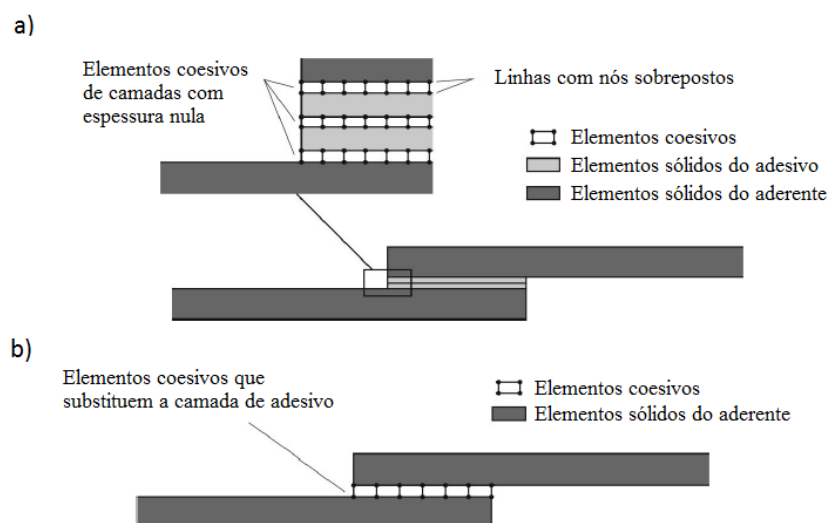


Figura 20 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [37])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [38]. 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 20), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [39], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [40].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenômenos 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 [41]. Este modelo está implementado em *software*, 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 [42].

2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [43], triangular [44], exponencial [45], polinomial [46] e trapezoidal [40]. 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 [47].

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 [48]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em elementos finitos de interface [49] 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 21).

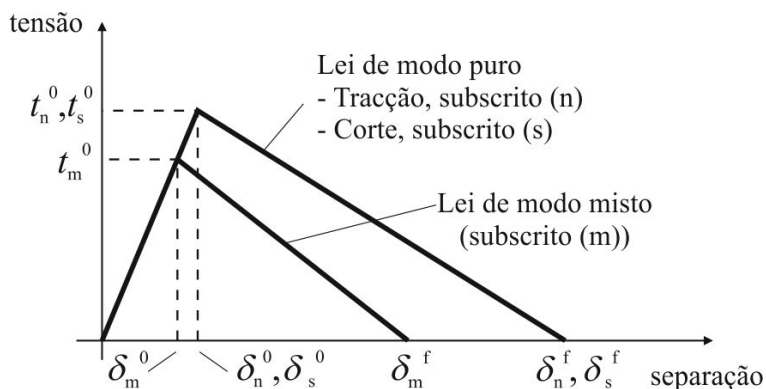


Figura 21 – Modelo coesivo triangular [49, 50]

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 [51].

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 [52] e modo II [53].

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 [54]. 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. [55], 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 foram realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados [40, 56].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto, este método é particularmente crítico devido a desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [57]. 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 [58]. 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 [59]. Por outro lado, o método direto define a forma exata das leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [57], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_h$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_h é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- J [60]. Rice [32] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do método de integral- J , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [61]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes, a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [53]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [62], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 22. Na mesma norma é indicado a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de modo a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (1), em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

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

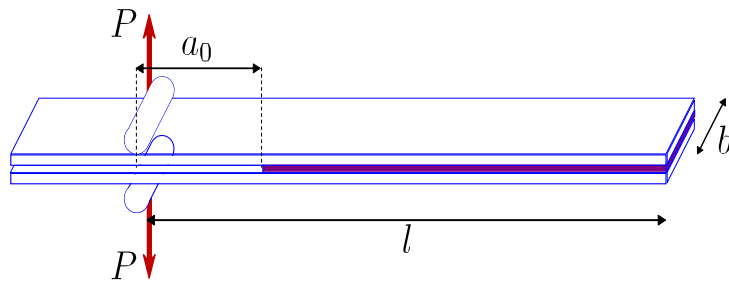


Figura 22 – Geometria do provete DCB [63]

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 23). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2L$) [64]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{Ic} por esta medição [65].

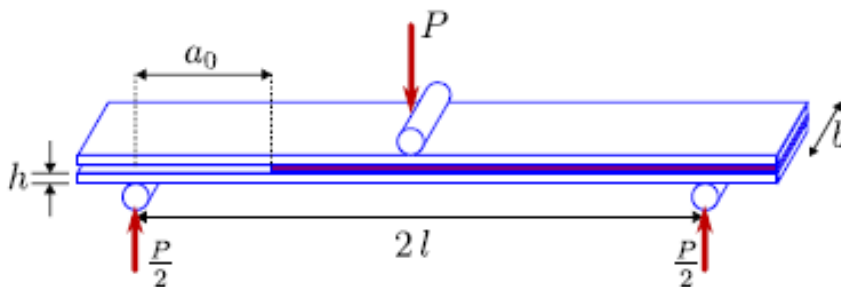


Figura 23 – Geometria do provete ENF [63]

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 [66] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramshad et al. [67] 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 [36].

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 [68]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [69] ou do número de ciclos para análises de fadiga [70, 71]. 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 [72].

Hua et al. [73] 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. [74] 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 dos Elementos Finitos Extendido

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

na proximidade da fenda [75]. Belytschko e Black [76], 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 [77]. 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 as 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 [78].

Campilho et al. [79] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se compararam resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 24). 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.

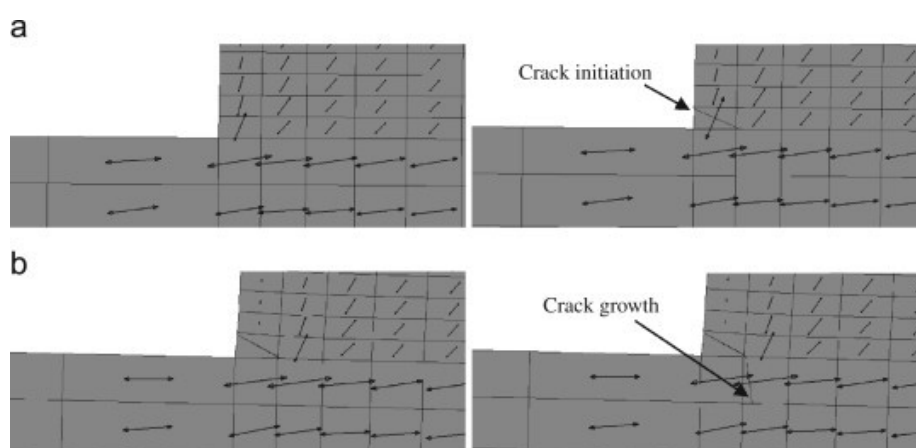


Figura 24 – Representação das direções principais usando o MEFX em JSS: iniciação do dano no adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano no aderente de alumínio (b) [79]

2.3 Juntas adesivas tubulares

O uso de adesivos em ligações tubulares é um dos métodos mais usados ao dia de hoje e tem vindo a aumentar a aplicação desta técnica nas indústrias de tubos. As juntas adesivas tubulares são muito utilizadas em estruturas de veículos (aviões, carros, autocarros), porque estas apresentam um peso reduzido, permitem a ligação de materiais diferentes sem danificar os tubos, suportam cargas elevadas e permitem gerar uma boa distribuição tensões. As juntas adesivas com tubos em polímero e compósito são uma melhor alternativa aos tubos em metal, devido ao elevado rácio de peso/resistência e de ter boa resistência à corrosão [80]. Na Figura 25 são mostradas algumas juntas cilíndricas habitualmente utilizadas. São juntas que conseguem uma maior área de colagem, o que faz com que sejam mais resistentes e diminuem os esforços de arrancamento [3].

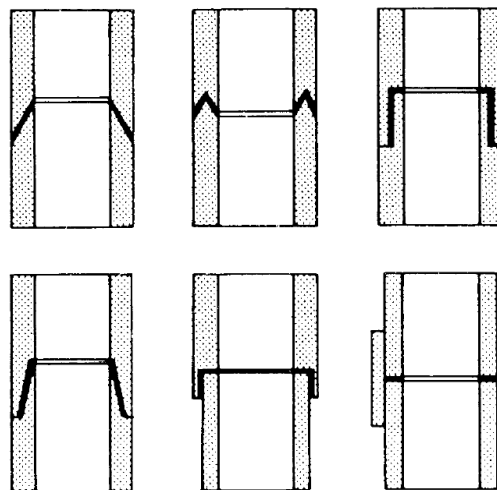


Figura 25 – Diferentes geometrias para juntas tubulares adesivas [4]

Nos seguintes subcapítulos são apresentados estudos recentes sobre a análise experimental de juntas tubulares, análise numérica de juntas tubulares e alterações geométricas em juntas tubulares.

2.3.1 Análise experimental de juntas tubulares

Na validação de modelos numéricos e critérios de falha é muito comum usar testes experimentais no dimensionamento de uma junta adesiva, de forma a medir forças máximas e globais nos substratos e adesivos [81]. Desta forma, na Tabela 1 são mostrados alguns estudos experimentais recentes realizados em juntas tubulares adesivas.

Tabela 1 – Estudos experimentais em juntas adesivas tubulares

Autores	Descrição
Lavalette et al. [82]	<p>O trabalho consiste no estudo de variação de dimensões (comprimento de sobreposição, espessura, diâmetros internos e externos dos tubos) de uma junta adesiva tubular, constituída por um substrato em alumínio e por um substrato em polímero reforçado com fibra de carbono (CFRP), sujeita a esforços de tração. Foram realizados testes numéricos (MDC) e experimentais. Os resultados numéricos estão coerentes com os resultados experimentais. O estudo indica que a resistência da junta aumenta com L_0 e o diâmetro interior do substrato CFRP (d_{in}), mas com um L_0 limitado, porque a partir de um determinado valor de L_0, a camada de adesivo começa a entrar em rotura antes de percorrer a junta. A espessura dos aderentes e o comprimento dos chanfros têm influência na uniformidade das tensões de corte ao longo da junta colada. Em suma, a variação de dimensões tem influência na resistência da junta mas também têm impacto no peso total da junta.</p>
Albiez et al. [83]	<p>O trabalho consiste no estudo experimental de juntas adesivas tubulares em aço com diferentes adesivos, PUR (<i>Polyurethane</i>) e EP (<i>Epoxy</i>), e com diferentes alterações geométricas, sujeitas a um carregamento de tração, de forma a obter a resistência máxima das juntas adesivas. De acordo com os resultados experimentais obtidos, os valores de tensão com substratos espessos para os adesivos PUR e EP foram de 30 a 50 MPa, e 21 a 26 MPa, respetivamente. Este estudo permite concluir que existe uma diferença de valores entre adesivos e também se conclui que a resistência de uma junta aumenta com o aumento de L_0. No entanto, este aumento não é linear, e o aumento da espessura do adesivo afeta negativamente a resistência da junta.</p>
Eusébio e Campilho [84]	<p>O trabalho consiste no estudo numérico e experimental de uma junta adesiva tubular com diferentes adesivos (SikaForce® 7752, Araldite® 2015, Araldite® AV138) e diferentes comprimentos de sobreposição de forma a</p>

avaliar a capacidade de previsão de resistência pelo método dos Elementos Finitos Extendido (MEFX). De acordo com os resultados experimentais obtidos para os diferentes comprimentos de sobreposição, o adesivo Araldite® AV138 tem o valor de resistência mais alto para o menor comprimento de sobreposição. No entanto, para o maior comprimento de sobreposição, a junta não teve um aumento de resistência máxima considerável (15,4%), quando comparado com os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 com valores de 43,4% e 50,6%, respectivamente. Em suma, a resistência da junta depende do tipo de adesivo e da geometria da junta. Os adesivos frágeis são indicados para baixos comprimentos de sobreposição, enquanto os adesivos dúcteis são indicados para altos comprimentos de sobreposição.

Qiu et al. [85]

O trabalho consiste no desenvolvimento de uma formulação teórica de forma a estimar a resistência de uma junta tubular adesiva em aço ligada por uma manga em compósito, com diferentes geometrias e comprimento de junta. A formulação teórica foi validada por resultados experimentais. Adicionalmente, também foi realizado um estudo de elementos finitos (EF) em 3D de forma a estimar a força máxima e a descrever a distribuição de tensões da junta adesiva. De acordo com os resultados obtidos, os modelos numéricos com comportamento linear elástico dos aderentes, a relação entre o teste experimental – previsão numérica é de 0,935. Para os modelos numéricos com comportamento de cedência a relação entre o teste experimental – previsão numérica é de 0,981. Este estudo permite concluir que existe uma concordância entre os resultados numéricos teóricos, EF e os resultados experimentais.

Yousefi et al. [86]

O trabalho consiste na avaliação do comportamento mecânico de uma junta tubular com diferentes ligações e materiais quando sujeita a esforços torsores, através de uma análise experimental. Foram utilizadas juntas com substratos de alumínio, e juntas com um substrato de alumínio e o outro substrato em compósito, ligadas com rebites, com adesivo ou híbrida (rebite e adesivo). De acordo com os resultados, as juntas de alumínio ligadas

com adesivo ou híbridas obtiveram um momento torsor maior do que uma junta ligada por rebites. No entanto, a energia da junta (E) não teve uma grande variação com o aumento do momento torsor nas juntas ligadas mecanicamente nem nas juntas ligadas com adesivo. Por outro lado, na ligação híbrida, com o aumento do momento torsor existe o aumento de valor de energia da junta. Nas juntas com substratos alumínio-compósito, o momento torsor é maior na junta ligada híbrida quando comparadas com juntas ligadas com rebites e com adesivo. Consequentemente o valor de energia também é maior nas ligações híbridas. O estudo realizado também permite concluir que a ligação híbrida é preferível à ligação com rebite ou com adesivo, mesmo sabendo que existe um aumento de peso na estrutura.

2.3.2 Análise numérica de juntas tubulares

A análise numérica, utilizada desde os anos 70, tornou-se o método mais utilizado para estudar o comportamento de uma junta adesiva [80]. Nos dias de hoje, a previsão de resistência de uma junta adesiva já é realizada com suporte computacional, o que permite um rápido dimensionamento de uma junta adesiva [37]. Na Tabela 2 são mostrados alguns estudos numéricos recentes realizados em juntas tubulares adesivas.

Tabela 2 – Estudos sobre a análise numérica de juntas tubulares adesivas

Eusébio e Campilho [84]

De acordo com o que já foi referido no capítulo 2.3.1, o trabalho consiste no estudo paramétrico e experimental de uma junta adesiva tubular com diferentes adesivos e diferentes comprimentos de sobreposição de forma a avaliar a previsão da força utilizando o método dos Elementos Finitos eXtendido (MEFX). De acordo com os resultados obtidos, o método MEFX com os critérios de iniciação de dano MAXPS, MAXPE, MAXE e QUADE, não permitem ver a variação da resistência da junta com o comprimento de sobreposição, o que impossibilita o uso destes critérios na previsão da resistência da junta. No entanto, com os critérios QUADS e MAXS os resultados foram muito próximos aos dos resultados experimentais. Este estudo permite concluir que o método MEFX, com as condições corretas de modelação, é uma excelente

ferramenta para a previsão de resistência de juntas adesivas.

Shishesaz e Tehrani [87]

O trabalho consiste no estudo numérico da distribuição de tensões de uma junta adesiva tubular, com vazio, com defeito e sem vazio na junta adesiva, quando submetida à torção. Foram utilizados cálculos analíticos e uma análise de EF, para avaliar o comportamento da distribuição de tensões da junta tubular. Na análise de EF e nos cálculos analíticos considera-se que os tubos têm um comportamento linear elástico. Para os testes realizados, considerou-se que as tensões de corte variam ao longo da espessura do adesivo e das dimensões geométricas dos tubos, assim como as suas propriedades mecânicas variam entre si. Concluiu-se dos resultados obtidos, considerando o mesmo torque, que os tubos mais rígidos diminuem as tensões superficiais de corte nas extremidades da junta adesiva. Por outro lado, os adesivos mais rígidos aumentam as tensões superficiais de corte na junta adesiva. Os resultados analíticos e os resultados de análise de EF tiveram resultados muito coerentes entre si.

Nimje e Panigrahi [88]

O trabalho consiste no estudo da tenacidade à fratura baseado na análise de dano de juntas tubulares compósitas com adesivo funcionalmente graduado. Foi considerada modelação por EF a 3D, utilizando não-linearidades geométrica. Quando submetidos a esforços axiais e a pressões. De acordo com os resultados, a localização de início do dano é diferente entre as juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços axiais e a pressões. A comparação dos resultados dos adesivos de módulo constante e adesivo graduado indicam que a variação de rigidez promove uma redução significativa no crescimento da fenda quando submetidas a esforços axiais. No entanto, não foi observado o mesmo comportamento quando submetida a uma pressão interna.

Qiu et al. [85]

De acordo com o trabalho já mencionado no ponto 2.3.1, o trabalho consiste no desenvolvimento de uma formulação teórica de forma a estimar a força axial máxima de uma junta tubular adesiva em aço ligada por uma manga em compósito. Adicionalmente, também foi realizado um

estudo de elementos finitos em 3D, de forma a estimar a força máxima e a descrever a distribuição de tensões da junta adesiva. Considerando que o adesivo tem um comportamento linear elástico, a formulação teórica conseguiu prever a força máxima quando submetida a esforços de clivagem, para vários comprimentos de sobreposição. Foi concluído, através da formulação teórica e do estudo de EF, que o comprimento de sobreposição tem um elevado impacto no valor da resistência das juntas tubulares.

Baishya et al. [89]

Este trabalho consiste num estudo de EF de uma junta adesiva tubular em compósito quando é sujeita a pressões internas e a diferentes momentos de torção, de forma a avaliar as tensões e o modo de falha. A análise de elementos finitos em 3D foi realizada no ANSYS, tendo como base os critérios de tensões acopladas de Tsai-Wu e critério de cedência parabólico de forma a prever as diferentes roturas da junta adesiva tubular. De acordo com os resultados de comparação da magnitude do índice de falha, a torção afeta substancialmente a rotura da junta quando comparado com a pressão interna, pois esta ajuda a compactar a junta adesiva tubular, o que resulta num melhoramento da resistência da junta evitando a iniciação de roturas na mesma.

2.3.3 Alterações geométricas em juntas tubulares

A geometria de uma junta adesiva pode ser alterada, de forma a aliviar a concentração de tensões e deformações. Na Tabela 3 são mostrados alguns estudos recentes de juntas tubulares adesivas com alterações geométricas.

Tabela 3 - Estudos de juntas adesivas tubulares com alterações geométricas

Ferreira et al. [90]

O artigo consiste no estudo numérico da resistência de uma junta tubular de alumínio com chanfro exterior nas extremidades dos aderentes, utilizando vários adesivos (Araldite® 2015, SikaForce® 7752, Araldite® AV138). Na análise numérica foi utilizado o método FE para a análise de tensões. Para o estudo da resistência da junta foi utilizado um modelo de dano coesivo (MDC) triangular. De acordo com os resultados obtidos para os 3 diferentes adesivos, as

tensões de arrancamento para o Araldite® 2015, Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 diminuem 56,2%, 67,7% e 38,9%, respectivamente, para um ângulo de 7,5° de chanfro, quando se compara a uma geometria sem chanfro. As tensões de corte para o Araldite® 2015, Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 diminuem 43,6%, 53,4% e 26%, respectivamente, para um ângulo de 7,5° de chanfro, quando se compara a uma geometria sem chanfro. A resistência da junta aumenta, para o Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, 3,6% e 8,6%, respectivamente, para um ângulo de 7,5° de chanfro, quando se compara a uma geometria sem chanfro. No entanto, a resistência da junta para o Araldite® 2015 não varia consoante o ângulo do chanfro.

Shishesaz e Tehrani [87]

De acordo com o que já foi referido no cap 2.3.2, este estudo consiste no trabalho analítico e numérico para investigar e comparar o comportamento da distribuição de tensões de um vazio ou de uma falha nas juntas adesivas tubulares quando submetidas à torção. Os resultados obtidos mostram que para uma junta adesiva tubular com um vazio ou com uma falha, as tensões de corte nas extremidades da junta aumentam relativamente a uma junta tubular sem alteração geométrica. No entanto existem algumas combinações de juntas com falha com tensões de corte superior às juntas com vazio. Desta forma, o aumento das tensões de corte depende do comprimento e da localização do vazio ou da falha.

Kishore e Prasad [91]

O artigo consiste no estudo experimental de uma junta adesiva tubular ondulada em compósito sujeita a um esforço de tração. Esta alteração geométrica permite eliminar a excentricidade dos substratos, de forma a garantir que os esforços se mantenham no mesmo plano, resultando num aumento da resistência da junta. De acordo com os resultados obtidos, as juntas onduladas têm um aumento de resistência da junta de 90% quando comparadas com a junta de sobreposição simples.

Cho e Lee [92]

Neste artigo foi realizado um estudo de otimização do design de uma junta tubular adesiva, constituída por um tubo de aço e um tubo em compósito, quando sujeita a um

esforço de tração. Foram realizados testes experimentais e numéricos, considerando que os aderentes têm um comportamento mecânico geométrico não linear. Os parâmetros de design considerados foram a sequência de empilhamento do substrato em compósito, espessura do substrato em aço e em compósito e a existência de um chanfro (*scarf*) exterior no substrato em aço. De acordo com os resultados obtidos, a sequência de empilhamento com um ângulo de 0° do substrato em compósito, obteve o maior valor de resistência da junta. Também se verifica que a junta adesiva tubular com um chanfro exterior no substrato em aço, teve um aumento de resistência da junta de 20% a mais do que a junta com substrato em aço sem chanfro.

Nguyen e Kedward [93]

O trabalho consiste no desenvolvimento de um modelo analítico para determinar a distribuição de tensões de corte numa junta adesiva tubular, com um chanfro de 10° nos substratos, quando sujeita a esforços de tração. Também foi realizado um estudo de EF para validar os resultados analíticos. De acordo com os resultados, a junta com um chanfro obteve uma distribuição de tensões mais uniforme e com um valor máximo de tensão mais baixo do que uma junta sem chanfro. No entanto, uma junta com chanfro não é a melhor escolha quando se pretende que esta resista à possível fluência, porque o valor mínimo das tensões de corte de uma junta sem chanfro irá ser sempre inferior ao valor mínimo de tensões de corte de uma junta com chanfro. Conclui-se que uma junta tubular adesiva sem chanfro é a melhor escolha para carregamentos constantes.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Validação dos modelos coesivos para previsão de resistência
- 3.2 Estudo numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação dos modelos coesivos para previsão de resistência

Neste capítulo são apresentados os testes experimentais e previsão numérica de juntas tubulares, realizados por Ferreira [94]. Os resultados experimentais vão ser usados para validar os resultados numéricos obtidos na simulação de modelos das juntas tubulares, através do programa ABAQUS®. Este capítulo tem como finalidade fazer uma avaliação das propriedades mecânicas de forma a validar a análise por MDC, no sentido de as tornar adequadas para o posterior estudo paramétrico nas juntas adesivas tubulares.

3.1.1 Descrição da geometria e materiais

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais e a geometria dos substratos e dos adesivos, usados no trabalho experimental. Na Figura 26 está representada a configuração da junta, e na Tabela 4 os valores das cotas utilizadas dos provetes.

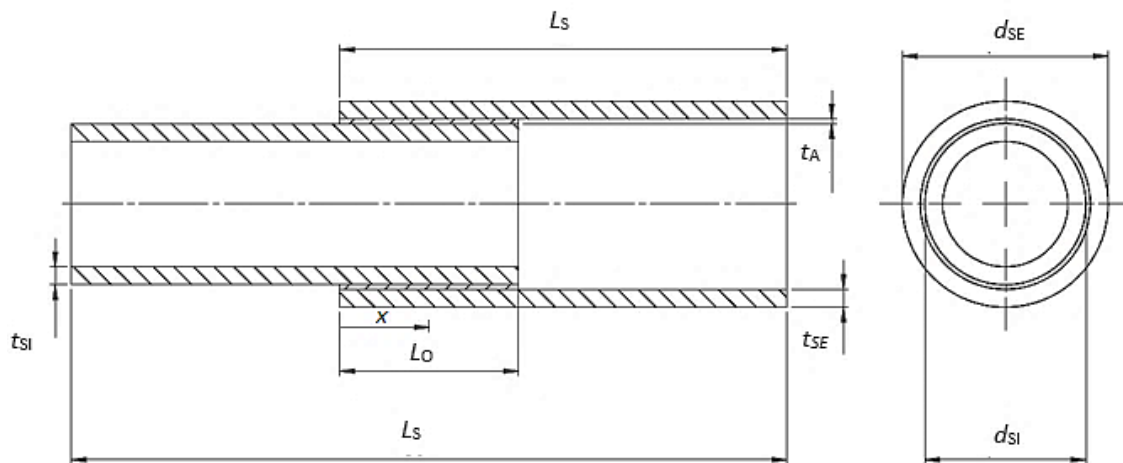


Figura 26 – Configuração da geometria do provete

Tabela 4 – Designação das cotas dos provetes e respectivos valores [em mm]

Designação	Cota [mm]	
Comprimento de sobreposição, L_O	20	40
Comprimento dos substratos, L_S	50	60
Comprimento total da junta tubular, L_T	80	80
Diâmetro externo do substrato interior, d_{SI}	20,0	20,0
Diâmetro externo do substrato exterior, d_{SE}	22,4	22,4
Espessura do substrato interior, t_{SI}	2	2
Espessura do substrato exterior, t_{SE}	2	2
Espessura do adesivo, t_A	0,2	0,2

Os valores das cotas da espessura do adesivo (t_A), dos substratos interiores (t_{SI}) e exterior (t_{SE}), do diâmetro externo dos tubos interior (d_{SI}) e exterior (d_{SE}), são as mesmas para todas as amostras. Os comprimentos dos substratos (L_S) tem o valor de 50 mm e 60 mm até aos pontos de amarração. Foram concebidas dez amostras para cada um dos três adesivos em estudo, cinco delas com um comprimento de sobreposição (L_O) de 20 mm e as restantes cinco com 40 mm. O valor do comprimento total (L_T) da amostra é sempre 80 mm.

3.1.1.1 Substratos

Os substratos de todas as juntas adesivas concebidas e estudadas são em alumínio, nomeadamente a liga AW6082-T651. A sua seleção deve-se pelas boas propriedades mecânicas e ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [95], onde foram obtidas as seguintes propriedades:

- Resistência à tração - 324,00±0,16 MPa.
- Módulo de Young - 70,07±0,83 GPa.
- Tensão de cedência à tração - 261,67±7,65 MPa.
- Deformação de rotura à tração - 21,70±4,24%.

Na Figura 27 é possível observar as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio, que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [95]. Está representada também a aproximação numérica usada nos modelos MDC [8].

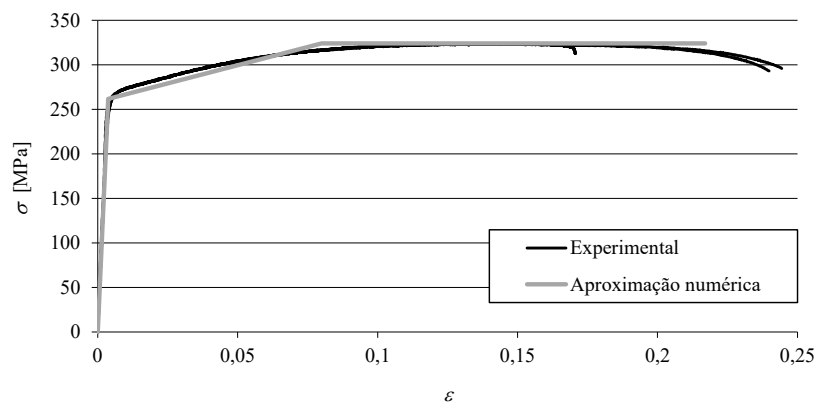


Figura 27 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio Al 6082-T651 [95]

3.1.1.2 Adesivos

De forma a promover a união entre os substratos, foram selecionados três tipos de adesivos para as juntas adesivas tubulares: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo frágil que, quando combinado com o endurecedor HV 998, é um epóxico bi-componente que apresenta uma excelente resistência química e mecânica. Este adesivo é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [80]. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração, obtidas experimentalmente, são dadas na Figura 28. As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 5.

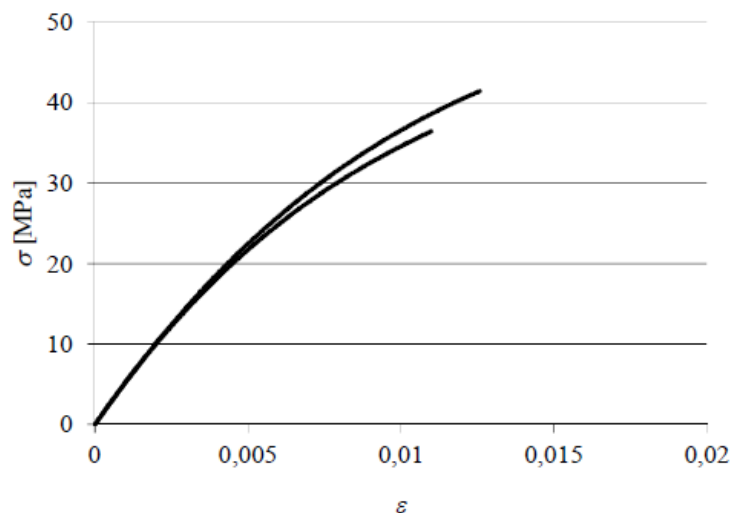


Figura 28 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [96]

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [97]

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

^a valores estimados na referência [97]

^b valor do fabricante

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural bi-componente, de ductilidade moderada e que, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e ao corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensões [98]. As curvas σ - ε de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 29. As propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 6.

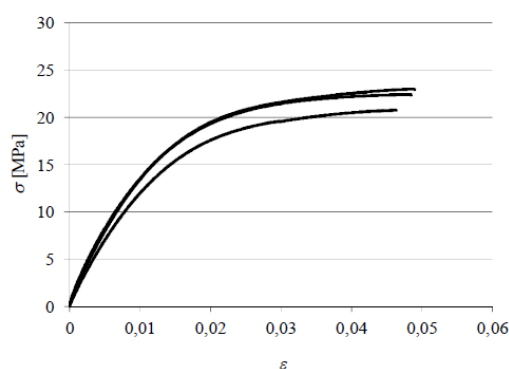


Figura 29 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [98]

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [98]

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

^a valor do fabricante

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor (FRW L60). Trata-se de um adesivo dúctil que, comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, é o que apresenta a menor resistência ao corte e à tração.

Na Figura 30 estão representadas as curvas σ - ε do adesivo e na Tabela 7 as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo.

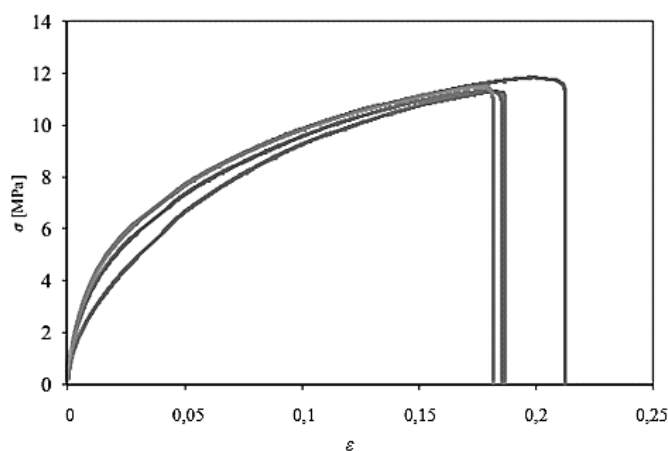
Figura 30 – Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [99]

Tabela 7 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [99]

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

^a valor do fabricante

3.1.2 Resultados experimentais e respetiva discussão

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas força-deslocamento (P - δ) para os diferentes adesivos e valores de L_0 , obtidas através dos cinco ensaios para cada caso.

3.1.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 31 são apresentadas as curvas P - δ do adesivo Araldite® AV138. De referir que alguns provetes foram considerados inválidos e como tal, as respetivas curvas não são apresentadas, pois apresentavam discrepâncias demasiado elevadas entre $P_{m\acute{a}x}$ e $P_{m\acute{a}x}$ Méd.

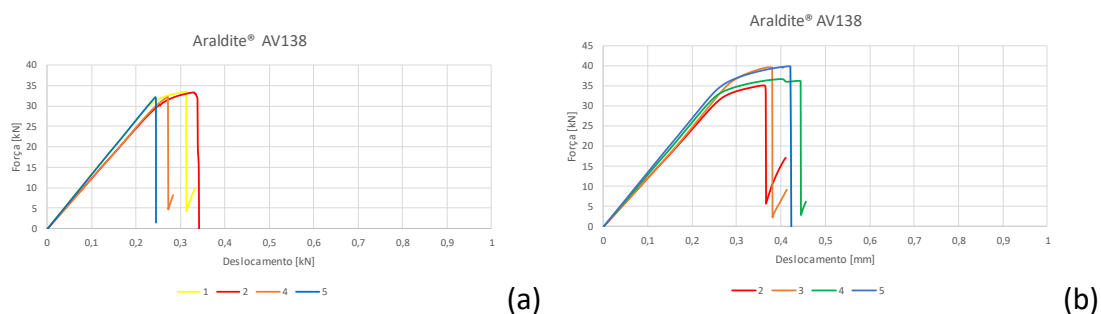


Figura 31 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 31 (a)) verifica-se a ocorrência de plastificação dos substratos nas amostras 1 e 2 (curva vermelha e amarela, respetivamente), devido a um provável excesso de adesivo na junta, gerando uma área de contacto superior à desejada. As restantes amostras apresentam um comportamento linear até à rotura.

Para as juntas adesivas com $L_0=40$ mm (Figura 31 (b)) ocorre a plastificação dos substratos em todas. No geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento para ambos os casos de estudo. Apenas se regista a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e questões de amarração dos provetes.

3.1.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 32 são apresentadas as curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Aqui verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=20$ mm (Figura 32 (a)). Para o caso dos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 32 (b)) já se verifica plastificação dos substratos. No geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento. As pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios, especialmente para $L_0=20$ mm.

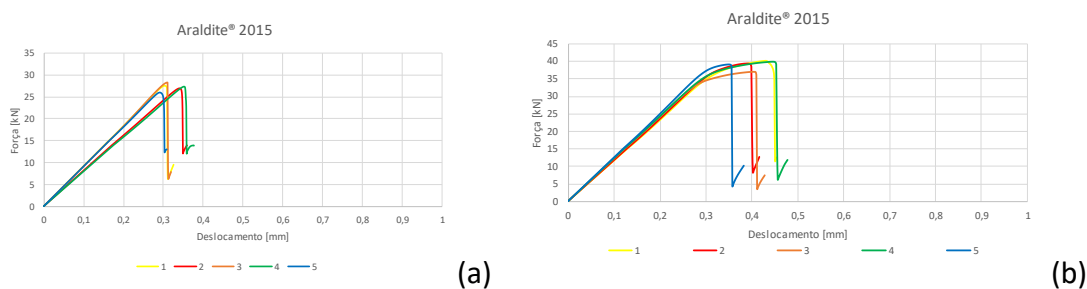


Figura 32 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

3.1.2.3 SikaForce® 7752

Tal como para o adesivo anterior, são apresentadas as curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752 (Figura 33).

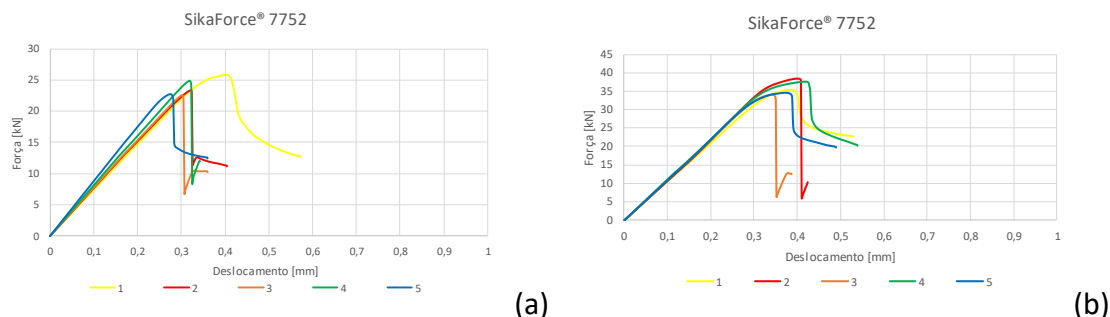


Figura 33 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 33 (a)) verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura. Nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 33 (b)) observou-se plastificação dos substratos. Apesar das diferenças registadas, em geral assiste-se a uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez. Como foi apontado para os adesivos anteriores, é notória a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes.

3.1.3 Comparação de resultados

Na Figura 34 está representada a comparação geral dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ e o desvio padrão para as juntas com os três adesivos. Na Tabela 8 estão presentes os valores médios da carga máxima em função de L_0 e o aumento percentual entre $L_0=20$ mm e 40 mm, para cada adesivo.

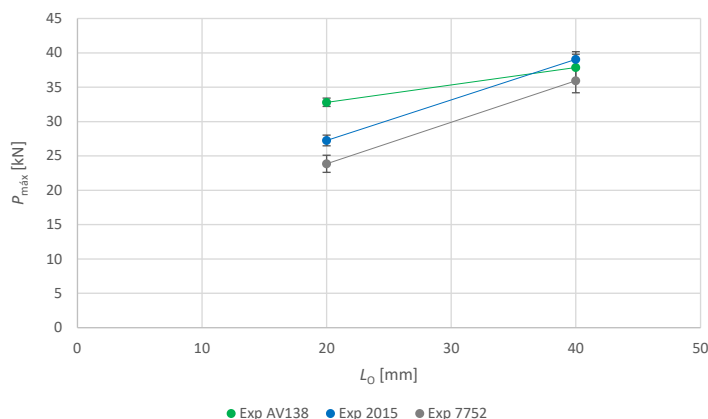


Figura 34 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos

Tabela 8 – $P_{m\acute{a}x}$ Méd (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares

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

Para $L_0=20$ mm, o Araldite® AV138, é o que suporta o maior carregamento (32797,5 N). No entanto para $L_0=40$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ aumenta apenas em cerca de 15,4% até 37857,2 N. Este aumento reduzido do Araldite® AV138 evidencia a sua fragilidade. O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{m\acute{a}x}=27238,4$ N para $L_0=20$ mm. Contudo, para $L_0=40$ mm, este apresenta um aumento percentual de 43,4%, muito superior ao Araldite® AV138 devido ao facto de ser um adesivo mais dúctil, o que promove a sua plastificação. A junta

tubular com o Araldite® 2015, para um $L_0=40\text{mm}$, é a que suporta o maior carregamento (39066,8 N). O adesivo SikaForce® 7752 é aquele que apresenta o maior aumento de resistência percentual (50,6%) entre $L_0=20\text{ mm}$ e 40 mm . Este acontecimento deve-se ao facto de este adesivo ser o mais dúctil dos três em estudo. Desta forma, para $L_0 = 20\text{ mm}$, $P_{\text{máx}}$ é de 23856,4 N, e para $L_0=40\text{ mm}$ é de 35929,9 N. Contudo, a carga máxima suportada pelos provetes manteve-se sempre abaixo dos adesivos anteriormente descritos. Através da realização dos ensaios experimentais verifica-se que o aumento de $P_{\text{máx}}$ com L_0 varia consoante o adesivo, o que evidencia um comportamento bastante distinto entre os três adesivos. Deste modo, o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares para ambos os L_0 , seguidos do Sikaforce® 7752, que apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos dois referidos adesivos. Por outro lado, o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, por se apresentarem como os adesivos mais dúcteis, são os que revelam um maior aumento percentual com o aumento de L_0 .

3.1.4 Condições de análise numérica

A análise numérica é baseada no MEF e, para tal, foi utilizado o *software* ABAQUS®. Este é um *software* que permite a execução do modelo MDC para prever a resistência das juntas adesivas tubulares. Na modelação dos tubos de alumínio foram utilizados elementos elasto-plásticos sólidos. Para os adesivos, o MDC usado é o modelo de dano coesivo triangular, com um elemento ao longo da espessura entre os dois tubos para reproduzir o comportamento da camada adesiva por uma abordagem contínua. Foi realizado um estudo bidimensional com elementos axissimétricos, devido às características da geometria axissimétrica das juntas tubulares, das cargas e das condições de fronteira. Foram utilizados diferentes modelos numéricos para os resultados de tensões e de previsão de resistência da junta. O tamanho de elementos utilizados na camada do adesivo foi de $0,02 \times 0,02\text{ mm}$ para os modelos de tensões, e $0,2 \times 0,2\text{ mm}$ para os modelos de previsão da resistência (elementos MDC). Para ambas as análises foi utilizado o efeito *bias*, de forma a reduzir os custos computacionais associados. Os modelos utilizados para o estudo de tensões foram completamente preenchidos com elementos FE axissimétricos sólidos, tanto nos tubos de alumínio como na linha de união (CAX4). Por outro lado, para o estudo de previsão de resistência da junta, a linha de união foi modelada por uma linha com elementos MDC axissimétricos para unir os dois tubos (COHAX4). Na análise de tensões, os elementos sólidos foram considerados como elásticos, enquanto na análise da previsão da resistência da junta, os sólidos foram considerados elementos elasto-plásticos. Relativamente às condições fronteira aplicadas, os tubos foram encastrados numa das extremidades da junta, e tracionados longitudinalmente e restringidos transversalmente na extremidade oposta da junta [80].

3.1.5 Previsão de resistência e respetiva discussão

Neste capítulo faz-se a comparação dos resultados dos ensaios experimentais com as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelos MDC, de forma a efetuar a respetiva validação das propriedades obtidas nas análises numéricas. Com isto, será possível a posterior realização do estudo paramétrico, uma vez que os valores das constantes de engenharia utilizadas estarão de acordo com a realidade. Na Figura 35, Figura 36 e Figura 37 estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

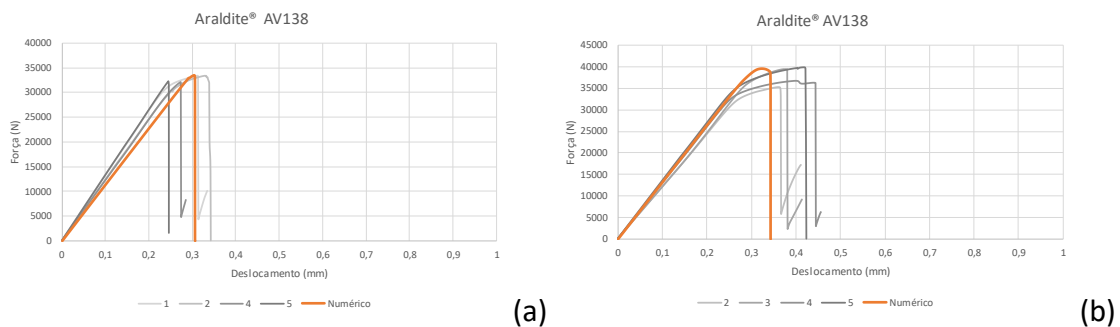


Figura 35 – Curvas P - d obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

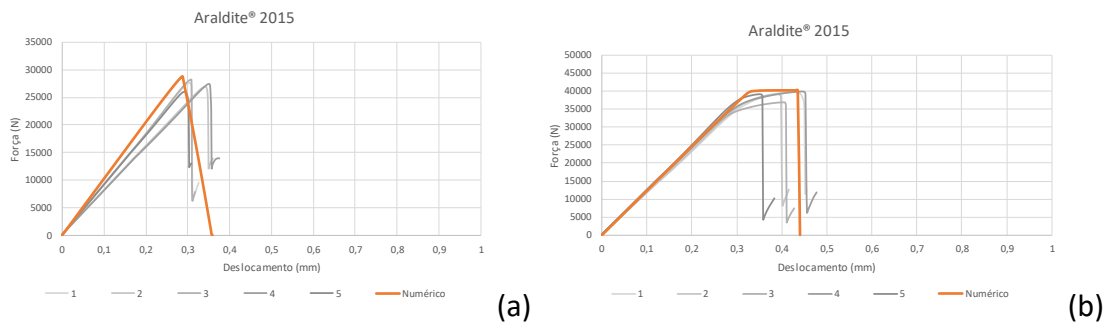


Figura 36 – Curvas P - d obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

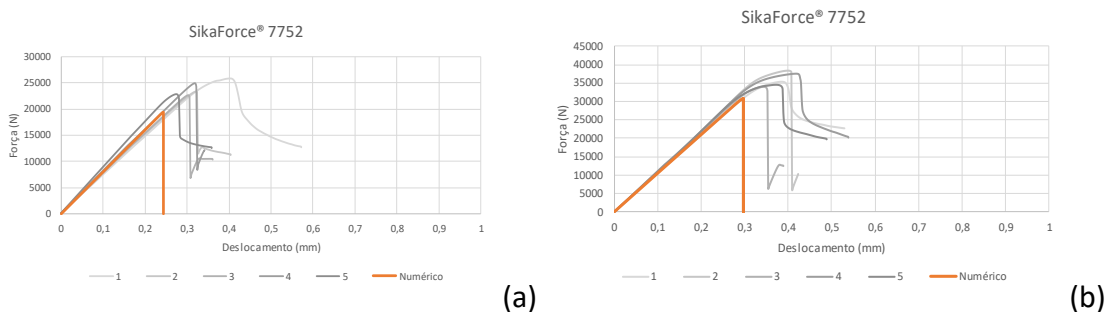


Figura 37 – Curvas P - d obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se empregaram os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 35 e Figura 36, respetivamente), em relação à $P_{máx}$, rigidez e deslocamento de rotura [8]. No caso do SikaForce® 7752 (Figura 37), uma vez que se trata de um adesivo muito dúctil, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais [100], razão pela qual os resultados experimentais ($P_{máx}$ e deslocamento do $P_{máx}$) são um pouco superiores aos numéricos.

3.1.6 Discussão dos resultados obtidos

Observou-se que, para L_0 reduzidos, o adesivo Araldite® AV138 consegue uma resistência superior relativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752 (Tabela 9). Esta diferença é bem evidente para um $L_0=20$ mm, cujo $P_{máx} \approx 33$ kN. Com o aumento de L_0 (até 40 mm), o Araldite® 2015 passa a apresentar um comportamento superior ao do Araldite® AV138 devido à plastificação que ocorre antes da rotura. Desta forma é possível que um adesivo dúctil apresente uma resistência similar à de um adesivo frágil, devido à capacidade limitada de plastificação deste último mencionado [2]. Assim, o resistente mas frágil Araldite® AV138 permite um valor mais elevado de $P_{máx}$ do que os restantes adesivos para $L_0=20$ mm, mas a ductilidade característica do Araldite® 2015, como foi mencionado na secção 3.1.3, permitiu um aumento percentual, entre os $L_0=20$ mm e 40 mm, de 43,4% e, como tal, um aumento significativo de $P_{máx}$, superando o $P_{máx}$ do Araldite® AV138. O Sikaforce® 7752 combina uma alta resistência e ductilidade, e a rotura ocorre em condições que se assemelham à plastificação generalizada até grandes valores de L_0 [101]. As juntas com este adesivo apresentaram-se como sendo as menos resistentes uma vez que, tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ mm, $P_{máx}$ foi sempre inferior aos outros adesivos. Por outro lado, uma vez que se trata de um adesivo extremamente dúctil, o elevado aumento percentual (50,6%) permitiu uma grande subida de $P_{máx}$, aproximando-o dos restantes adesivos para $L_0=40$ mm.

Posto isto, verifica-se que o Araldite® 2015 e o SikaForce®, que são os adesivos mais dúcteis, apresentam aumentos percentuais elevados entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Este comportamento provoca um aumento de $P_{máx}$, o que origina uma melhoria substancial do seu comportamento mecânico. Pelo facto de o Araldite® AV138 ser um adesivo frágil, a sua capacidade de plastificação é bastante limitada. Por esta razão, o seu aumento percentual foi de apenas 15,4%. Tal facto induziu uma rotura das juntas praticamente no momento em que as tensões nas extremidades atingem o valor limite.

Os resultados das juntas adesivas tubulares apresentam diferentes tendências, dependendo das características dos adesivos (rigidez, resistência e ductilidade). O módulo de elasticidade (E) dos adesivos está intimamente relacionado com a sua rigidez e influencia a distribuição das tensões e conseqüentemente a resistência.

Tabela 9 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0

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

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

Neste subcapítulo pretende-se aferir a validade dos resultados numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pela lei coesiva triangular, a partir da sua comparação com resultados experimentais. A Figura 38 representa os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e as respetivas previsões numéricas, considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

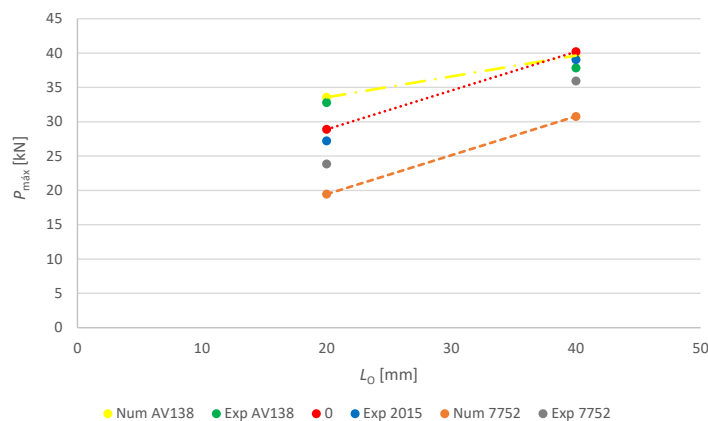


Figura 38 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares

Na Tabela 10 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para os três adesivos, em função de L_0 . Na mesma estão igualmente presentes as diferenças relativas para cada um, de forma a permitir uma maior facilidade na comparação dos mesmos.

Tabela 10 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
L_0 [mm]	20	40	20	40	20	40
Experimental	32797	37857	27238	39067	23856	35930
Numérico	33568	39631	28897	40210	19455	30779
Diferença relativa [%]	2,4	4,7	6,1	2,9	-18,4	-14,3

As previsões da Figura 38 demonstraram, de um modo geral, que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a $P_{m\acute{a}x}$ são muito próximos para as juntas adesivas tubulares com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Por outro lado, observa-se uma discrepância não desprezável para o adesivo SikaForce® 7752. O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta as menores diferenças relativas entre os resultados experimentais e numéricos. Para $L_0=20$ mm, a diferença relativa foi de 2,4% e, para $L_0=40$ mm, de 4,7%. Os valores numéricos são ligeiramente superiores aos experimentais, contudo é uma diferença muito reduzida e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diferença percentual entre os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos de 6,1% para $L_0=20$ mm (com os valores obtidos pelo MDC superiores aos experimentais). Esta discrepância é aceitável pois é, de facto, muito reduzida, uma vez que $P_{m\acute{a}x}$ experimental ≈ 27 kN e $P_{m\acute{a}x}$ numérico ≈ 29 kN. Esta percentagem torna-se ainda mais reduzida para $L_0=40$ mm (2,9%). Posto isto, tal como sucedeu com o Araldite® AV138, apesar das pequenas diferenças observadas, aceitam-se os valores obtidos pelo MDC e, como tal, consideram-se estes resultados adequados. No caso das juntas com o adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo método numérico são bastante inferiores. Isto acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [98]. No entanto, alguns trabalhos sobre delaminação em compósitos mostraram que leis coesivas pouco adequadas para modelar um determinado material ainda permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento, desde que os valores de resistência coesiva (t_n^0 e t_s^0) e de tenacidade à fratura (G_{IC} e G_{IIC}) tenham sido estimados corretamente [102]. Posto isto, a diferença entre os valores experimentais e do MDC para o SikaForce® 7752 é bastante evidente: 18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3 para $L_0=40$ mm, com os valores experimentais superiores aos numéricos. Portanto, tendo em conta os fatores envolvidos, aceitam-se os valores obtidos numericamente, apesar da respetiva dispersão de valores. Após esta análise, consideraram-se os resultados numéricos obtidos válidos e, como tal, adequados para serem utilizados como fonte de comparação para o estudo paramétrico.

3.2 Estudo numérico

Este capítulo consiste no estudo da resistência das diferentes alterações geométricas das juntas adesivas tubulares, através de modelos numéricos criados no programa ABAQUS®. As alterações geométricas nas juntas adesivas tubulares que foram estudadas numericamente são a variação de comprimento de sobreposição; aplicação de filete de adesivo; aplicação de um chanfro externo e interno nos aderentes; aplicação da combinação do chanfro interior com o filete de adesivo. Para este estudo de análise de tensões e previsão de resistência da junta adesiva tubular foram utilizados três adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015, e SikaForce® 7752.

3.2.1 Modelação numérica

3.2.1.1 Modelo de dano triangular

O modelo de dano triangular pode ser do tipo 2D ou 3D. Independentemente do tipo de análise, existem dois modos: o puro e o misto (Figura 39). O modo puro divide-se em modo I, em que a fenda abre por esforços de tração, e em modo II, em que a fenda desliza por esforços de corte [103]. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei coesiva respetiva. No modo misto os modos puros I e II atuam simultaneamente, e são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar tração e corte [104].

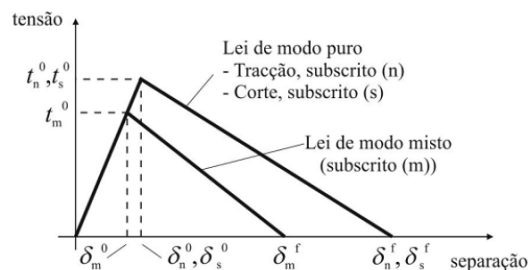


Figura 39 – MDC triangular [97]

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

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

No caso de a formulação ser local, os elementos coesivos são usados para simular fraturas de espessura nula. Nestas condições, os parâmetros de \mathbf{K}_{COH} possuem valores extremamente elevados, tendo por finalidade não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [105]. Na formulação contínua de

camadas finas, mais especificamente para as ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (2), onde G é o módulo de elasticidade transversal:

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

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [104]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério da tensão nominal quadrática, expresso pela expressão (3):

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

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. A evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 39), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_m^f , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} [106]:

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

3.2.1.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivo maciço [105, 107]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [108-110]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados. As propriedades coesivas obtidas para os 3 adesivos foram definidas tendo em consideração os dados apresentados anteriormente na Tabela 5, Tabela 6 e Tabela 7, e encontram-se resumidas na Tabela 11.

Tabela 11 – Parâmetros coesivos em tração e corte para os adesivos Araldite® AV138 [95], Araldite® 2015 [111], SikaForce® 7752 [99]

Adesivos	E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
Araldite® AV138	4890	1560	39,45	30,20	0,20	0,38
Araldite® 2015	1850	650	21,63	17,90	0,43	4,70
SikaForce® 7752	493,81	37,49	12,25	10,50	2,36	5,56
	MPa				N/mm	

3.2.2 Condições de análise numérica

Neste capítulo são apresentados os procedimentos de pré-processamento da modelação em MEF, fazendo referência aos módulos de *software* em que a informação foi introduzida: *Parts, Property, Assembly, Step, Load* e *Mesh*.

A análise de MEF tem por base a utilização de elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) para a modelação dos substratos, e elementos coesivos axissimétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para a camada do adesivo como aproximação da geometria em análise, que fornece resultados precisos para este tipo de geometrias (Figura 40). Nos casos do filete de adesivo e no chanfro interior foram utilizados elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) para as porções adicionais de adesivo para a serem modeladas. O MDC usado é o modelo de dano triangular que existe no ABAQUS® e que se encontra descrito na secção 2.2.3.

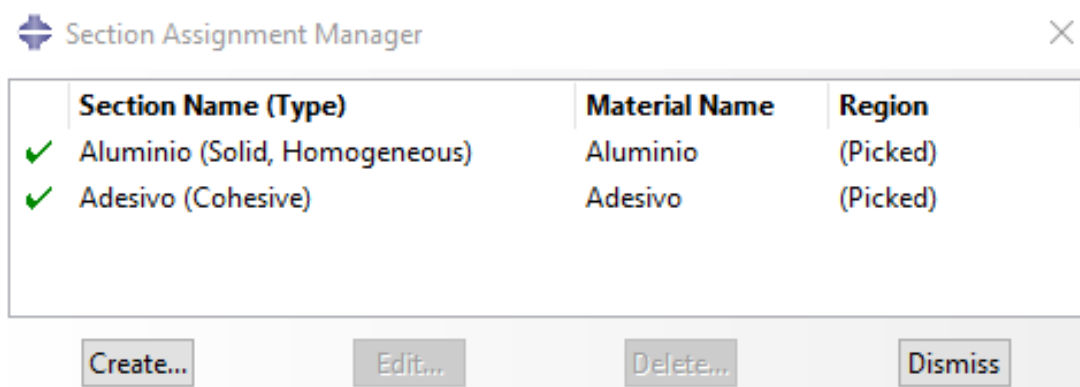


Figura 40 – Atribuição dos respetivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®

1º Passo – Part

Neste passo foi efetuado o desenho da junta adesiva, tal como mostra a Figura 41. Para modelar os substratos e o adesivo desenhou-se apenas um corpo, que foi posteriormente dividido em partições para a atribuição dos respetivos materiais.

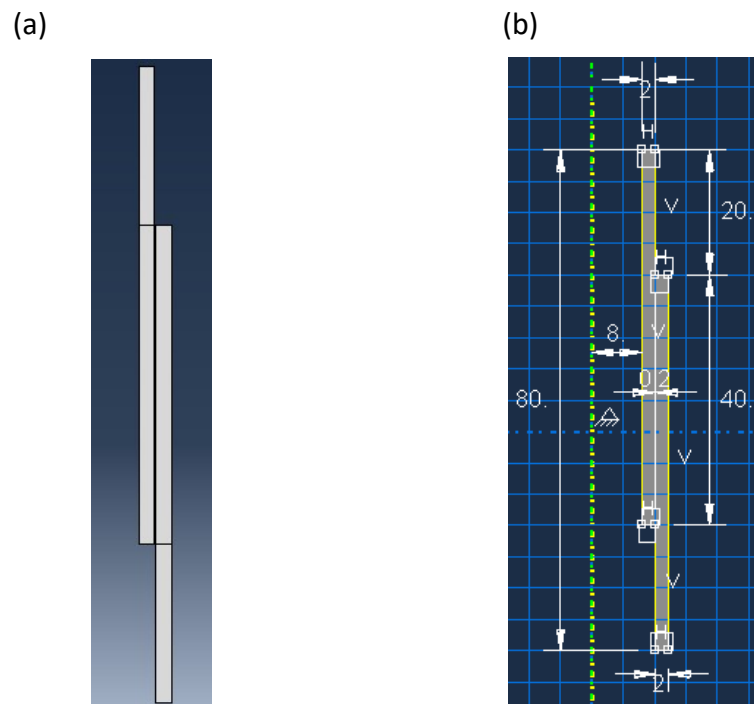


Figura 41 – a) Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS® b) Desenho 2D de uma junta adesiva tubular com $L_0=40$ mm no ABAQUS®

Na simulação numérica foram construídos modelos com as dimensões de cada configuração de junta testada. A Figura 41 mostra a construção de uma junta com $L_0=40$ mm. Como está em causa a análise de elementos axissimétricos, o eixo de revolução é de extrema importância porque, além de posicionar o modelo no centro do sistema de eixos, vai ditar o diâmetro da junta adesiva tubular. Após o desenho do conjunto substratos-adesivo foi necessário efetuar partições por forma a atribuir diferentes propriedades dos materiais.

2º Passo – *Property*

As propriedades mecânicas das partições anteriormente criadas são atribuídas nesta secção (adesivo e substratos). Também neste módulo são criados os materiais e são atribuídas secções às respetivas partições.

3º Passo – *Assembly*

Não é necessário executar nenhuma operação neste passo, porque os modelos são constituídos por um componente.

4º Passo – *Step*

Nesta secção são introduzidos os parâmetros de computação da simulação. Na Figura 42 estão descritos os incrementos utilizados e o tamanho dos incrementos. Foi considerado um valor de 10000 para o número máximo de incrementos a realizar na análise. O tamanho inicial de incremento foi de 1% do deslocamento aplicado nos modelos. O tamanho máximo do incremento foi também fixo em 1% do deslocamento

aplicado. O tamanho mínimo do incremento foi um valor extremamente reduzido para permitir a redução automática do tamanho do incremento durante o processo iterativo, o que é normalmente necessário durante a propagação de dano por MDC.

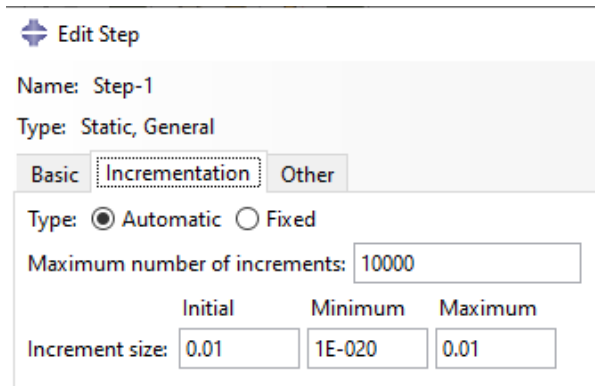


Figura 42 – Definição de incrementos para análise no ABAQUS®

5º Passo – *Interaction*

Não é necessário executar nenhuma operação neste passo, porque os modelos são constituídos por um componente.

6º Passo – *Load*

Na Figura 43 é possível visualizar as condições fronteira, que consistem num encastramento numa das extremidades do substrato é simulado um encastramento, enquanto na outra extremidade é aplicado um deslocamento vertical e uma restrição horizontal à secção.

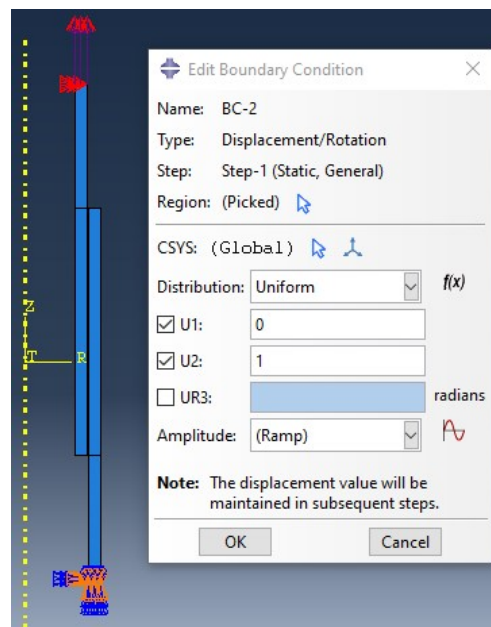


Figura 43 – Representação das condições fronteira na simulação

7º Passo – Mesh

Neste passo de construção do modelo é efetuada a discretização da geometria em elementos finitos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. Na junta adesiva existe uma variação das dimensões da malha, mais refinada na zona da camada adesiva e nas suas proximidades, como mostra a Figura 44. Devido à necessidade de obter valores com elevada precisão foram atribuídos valores ao número de elementos e ao *bias ratio*, em função de L_0 . O *bias ratio* é definido como o rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo. Os diferentes valores atribuídos têm como finalidade a redução do esforço computacional, garantindo simultaneamente que a precisão dos resultados em zonas com grandes variações de tensões não é comprometida [112]. Seguidamente foi introduzida viscosidade aos elementos coesivos de forma a evitar problemas de convergência, pois torna o processo mais suave. Além disso, foram aplicados os *mesh controls* em função do tipo de elemento.

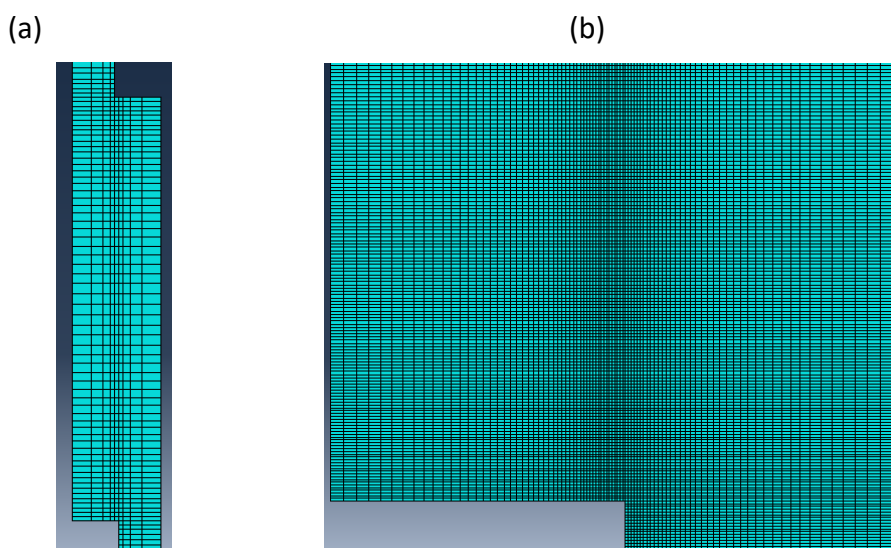


Figura 44 – Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=40$ mm

8º Passo – Job

Nesta secção dá-se o início da simulação da junta. Submetendo a simulação e, caso seja desejado, segue-se a evolução da análise. O comando “Results” avança para o passo seguinte.

9º Passo – Visualization

Nesta secção analisam-se e retiram-se os resultados obtidos da junta adesiva. Na Figura 45 é possível observar uma junta adesiva tubular com $L_0=40$ mm após rotura completa da camada de adesivo.

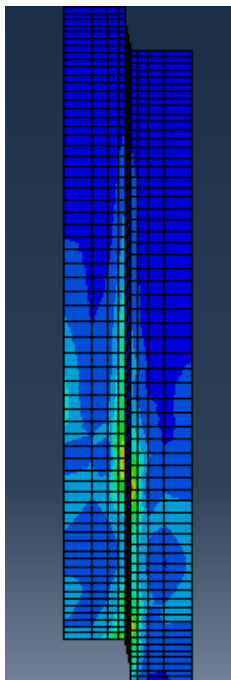


Figura 45 – Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS®

3.2.3 Estudo dos parâmetros geométricos

Neste capítulo é analisado o comportamento das juntas adesivas tubulares em função das tensões instaladas para os diferentes L_0 .

3.2.3.1 Comprimento de sobreposição

A variação de L_0 de uma junta adesiva tubular é estudada com o uso do MDC no programa ABAQUS®. Os valores de L_0 , estudados numericamente para os três adesivos, estão compreendidos entre 10 a 40 mm. De acordo com o subcapítulo 3.1.2, este parâmetro geométrico foi estudado experimentalmente para os comprimentos de $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

3.2.3.1.1 Distribuições de tensões

3.2.3.1.1.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 46 estão representadas as curvas de distribuição de tensões σ_y em função da variação de L_0 , para os três adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Na Tabela 12 estão os valores máximos σ_y/τ_{avg} das respectivas curvas.

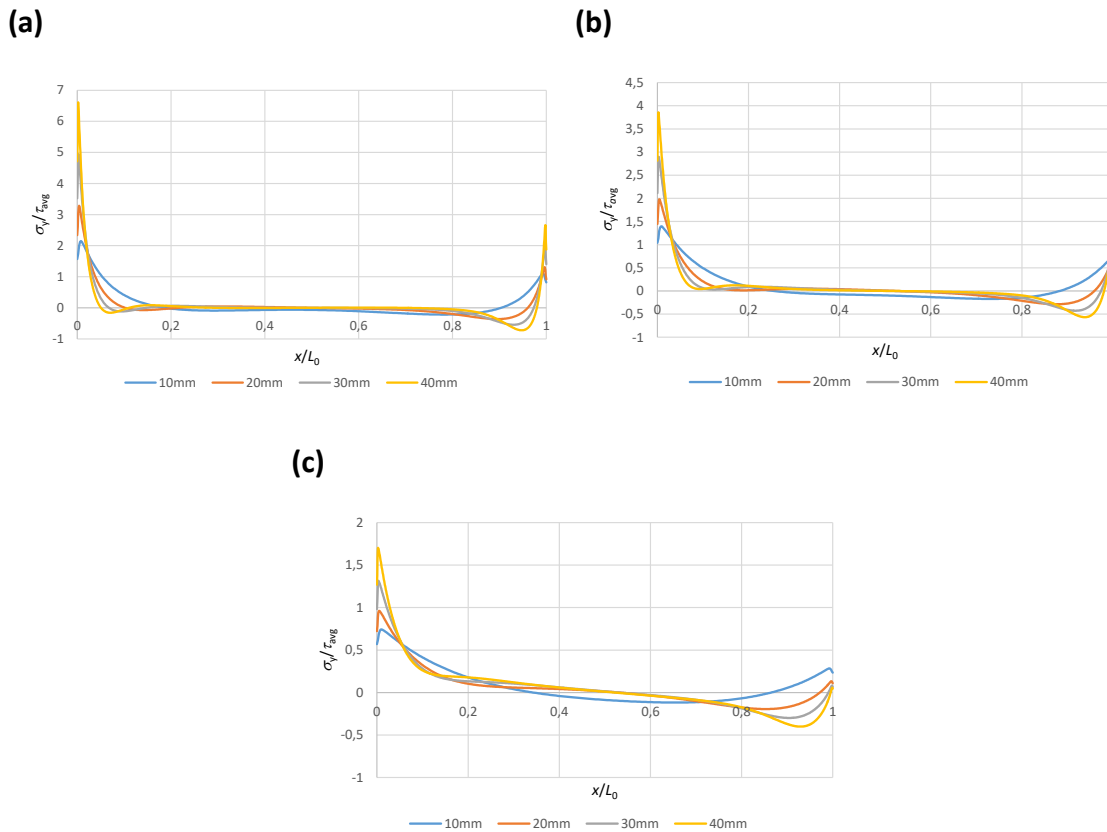


Figura 46 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação de L_0 : (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

De acordo com os resultados obtidos das distribuições de tensões σ_y (Figura 46) verifica-se que, com o aumento de L_0 , as tensões nas extremidades da junta adesiva tubular aumentam. Isto acontece porque a rigidez da junta adesiva aumenta com o aumento de L_0 , o que resulta numa maior excentricidade da carga e rotação da junta e, como resultado, observa-se um aumento das tensões instaladas. Os picos de concentração de tensões σ_y acontecem nas extremidades da junta adesiva tubular. Isto deve-se às tensões de tração que são geradas nas extremidades, causadas pela curvatura ou deformação transversal da junta. No entanto, as tensões σ_y na zona central da junta adesiva tubular são nulas. Na Tabela 12, verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 sendo um adesivo epóxico rígido/frágil, é o que apresenta o maior valor de tensão máxima de arrancamento, para $L_0=40$ mm. O adesivo Araldite® 2015 é o segundo com o valor mais alto de tensão máxima de arrancamento, para $L_0=40$ mm. O adesivo com o valor mais baixo de tensão máxima, é o adesivo SikaForce® 7752, pois trata-se de um adesivo extremamente flexível. De um modo geral, existe uma boa coerência dos valores de tensão σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função do aumento de L_0 .

Tabela 12 – Valores máximos σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0

Adesivo	L_0 [mm]			
	10	20	30	40
Araldite® AV138	2,15	3,28	4,94	6,61
Araldite® 2015	1,40	1,98	2,90	3,86
SikaForce® 7752	0,74	0,96	1,31	1,70

3.2.3.1.1.2 Tensões de corte

Na Figura 47 estão representadas as curvas de distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função da variação de L_0 , para os três adesivos. Na Tabela 13 apresentam-se os valores máximos τ_y/τ_{avg} das respectivas curvas.

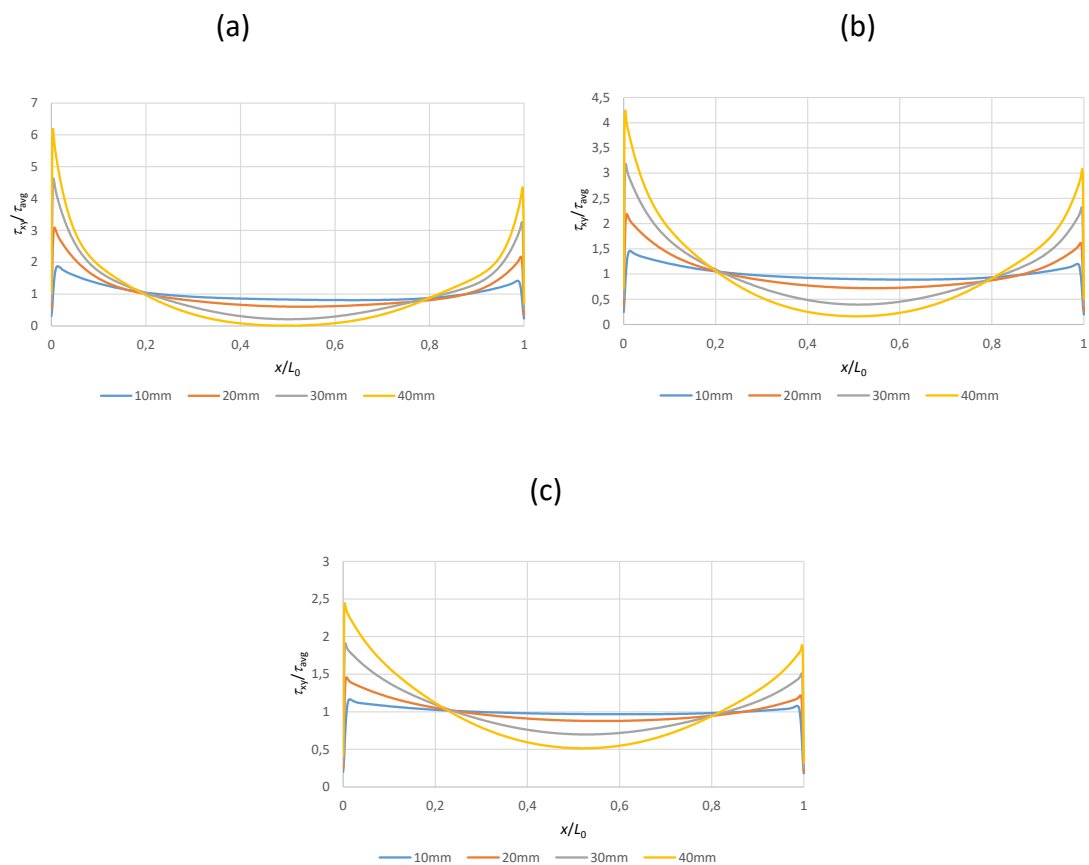


Figura 47 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação de L_0 : (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

A partir da análise das distribuições de tensões τ_{xy} (Figura 47), é possível observar que não há simetria nas curvas de tensões e verifica-se que, tal como as tensões σ_y , as tensões nas extremidades da sobreposição da junta adesiva tubular aumentam com o aumento do L_0 . A distribuição de tensões é mais uniforme para valores baixos de L_0 , visto que existe uma taxa de deformação diferencial inferior entre os tubos interior e exterior. Isto está aliado ao facto de a diminuição de L_0 provocar uma diminuição da rigidez global da junta, fazendo com que a distribuição de tensões τ_{xy} seja mais uniforme. De acordo com a Tabela 13, o adesivo Araldite® AV138, por ser um adesivo rígido, é o que apresenta maior de tensão de corte. O adesivo Araldite® 2015 é o segundo com o valor mais alto de tensão máxima de corte. O adesivo com o valor mais baixo de tensão máxima, à semelhança dos resultados obtidos nas tensões de arrancamento σ_y , é o adesivo SikaForce® 7752. Este adesivo, quando comparado com os restantes adesivos, é o mais flexível. Como tal, é o que apresenta uma distribuição mais uniforme de tensões τ_{xy} .

Tabela 13 - Valores máximos de τ_{xy} / τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0

Adesivo	L_0 [mm]			
	10	20	30	40
Araldite® AV138	1,87	3,09	4,63	6,19
Araldite® 2015	1,46	2,19	3,19	4,24
SikaForce® 7752	1,17	1,46	1,91	2,44

3.2.3.1.2 Resistência das juntas

Na Figura 48 são apresentadas as curvas P - δ em função da variação de L_0 , obtidas a partir da análise numérica por MDC, para os três adesivos. Na Tabela 14 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 , para os três adesivos e o aumento percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=10\text{mm}$ ($\Delta P_{m\acute{a}x}$). Na Figura 49 estão representadas as curvas com os valores $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para cada adesivo.

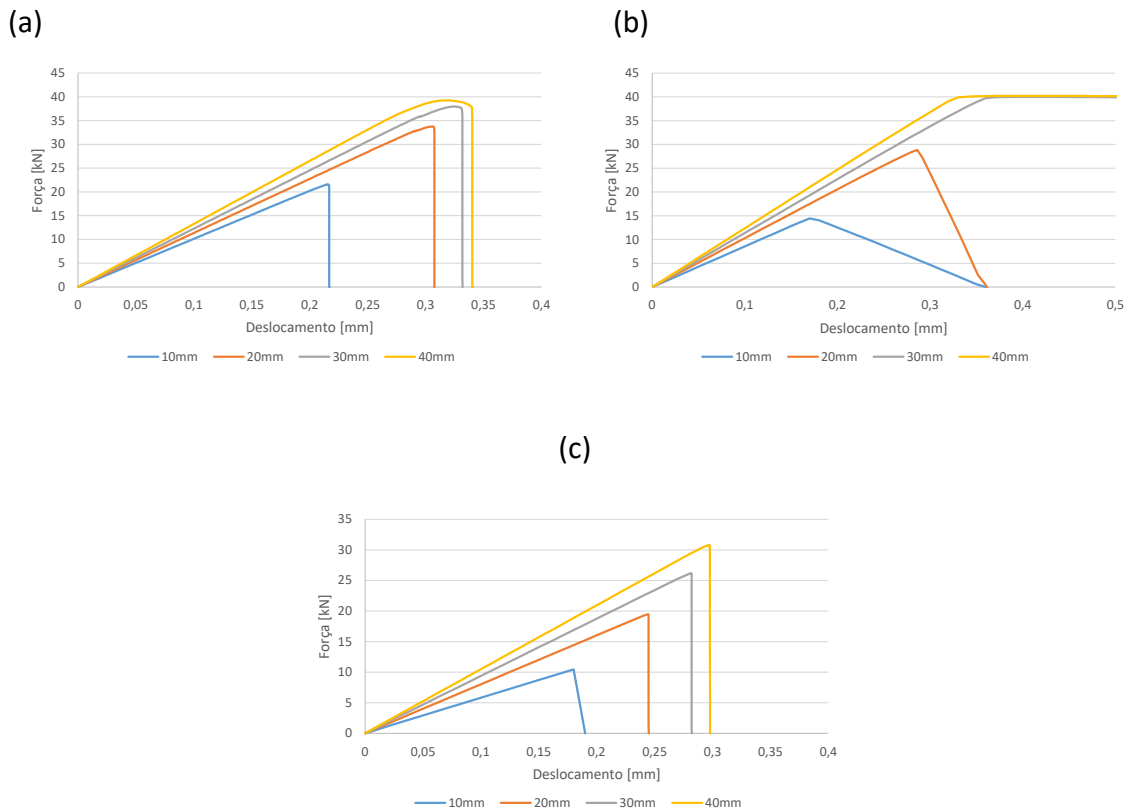


Figura 48 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função de L_0 , para os três adesivos: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.

A partir da análise das curvas $P-\delta$ é possível afirmar que o adesivo Araldite® 2015 é o que apresenta o valor mais alto de resistência da junta. De acordo com Figura 48 (b) este adesivo apresenta um comportamento linear até $L_0=20$ mm, porque a partir de $L_0=30$ mm os tubos de alumínio começam a deformar-se plasticamente. Para os comprimentos $L_0=30$ mm e $L_0=40$ mm é possível verificar a existência de estricção no substrato de alumínio, enquanto o adesivo demonstra capacidade de suportar a carga aplicada. O Araldite® AV138 apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ próximo do adesivo Araldite® 2015. Conforme a Figura 48 (a), este adesivo tem um comportamento linear até à rotura para $L_0=10$ mm e 20 mm. A partir de $L_0=30$ mm, apesar de ser reduzida, dá-se o início da plastificação dos substratos, devido ao aumento do L_0 , o que conduz ao aumento das cargas transmitidas. O adesivo SikaForce® 7752 é o que tem menor $P_{m\acute{a}x}$. No entanto, é o adesivo que apresenta para todos os L_0 um comportamento linear até à sua rotura, de acordo com Figura 48 (c). Na Figura 49 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função L_0 para os três adesivos. O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o maior $P_{m\acute{a}x}$, para $L_0=10$ mm e $L_0=20$ mm, com $P_{m\acute{a}x}=21,6$ kN e $P_{m\acute{a}x}=33,7$ kN, respetivamente. No entanto, por ser um adesivo frágil, a partir de $L_0=30$ mm o valor de resistência mecânica tende a estabilizar. O adesivo Araldite® 2015, para $L_0=30$ mm e $L_0=40$ mm, é o que tem o maior $P_{m\acute{a}x}$, com $P_{m\acute{a}x}=39,9$ kN e $P_{m\acute{a}x}=40,2$ kN, respetivamente. Este adesivo apresenta um elevado aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$, relativamente a um $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=10$ mm. Isto deve-

se ao facto de ser um adesivo dúctil, que permite uma indução de cargas mais elevadas e absorção dos picos de tensão gerados. No entanto, para elevados valores de L_0 o aumento percentual $P_{m\acute{a}x}$ não é significativo. O adesivo SikaForce® 7752, apesar de ser o menos resistente, é o que apresenta o maior aumento $\Delta P_{m\acute{a}x}$ para um $L_0=40$ mm, devido a ter a maior ductilidade dos três adesivos testados.

Tabela 14 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os três adesivos em função de L_0 e o respectivo aumento percentual

L_0 [mm]	Araldite® AV138	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)	Araldite® 2015	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)	SikaForce® 7752	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
10	21583	-	14419	-	10451	-
20	33772	56,47	28845	100,05	19454	86,14
30	37951	75,84	39999	177,40	26149	150,19
40	39243	81,83	40208	178,85	30776	194,46

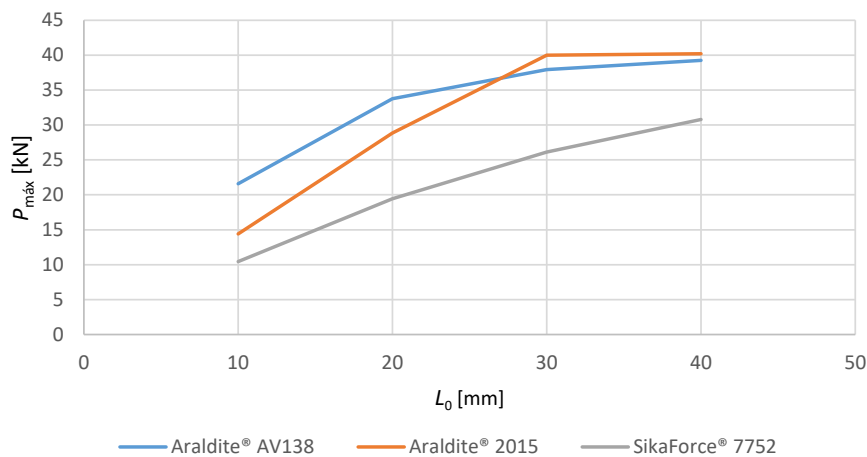


Figura 49 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos

3.2.4 Estudo de alterações geométricas

Neste capítulo procede-se à análise de tensões e previsão da resistência das juntas adesivas tubulares com alterações geométricas. Estas modificações consistem na criação e variação do ângulo dos chanfros interiores, chanfros exteriores e filetes de adesivo nas extremidades dos tubos de alumínio. Nesta análise foram consideradas juntas adesivas tubulares com $L_0=40$ mm e $t_{si}=t_{se}=2$ mm.

3.2.4.1 Filete de adesivo

O filete de adesivo tem como principal objetivo reduzir as tensões da junta adesiva tubular. Esta alteração geométrica cria um aumento de L_0 , de tal forma que a camada de adesivo se estende para além de $x/L_0=0$ e 1 . A Figura 50 mostra um detalhe da malha numa das extremidades da zona de ligação, com especial relevo para a zona triangular de adesivo modelado com elementos axissimétricos. Os valores de ângulo de chanfro exterior (θ), estudados numericamente para os três adesivos, são de $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° e 90° .

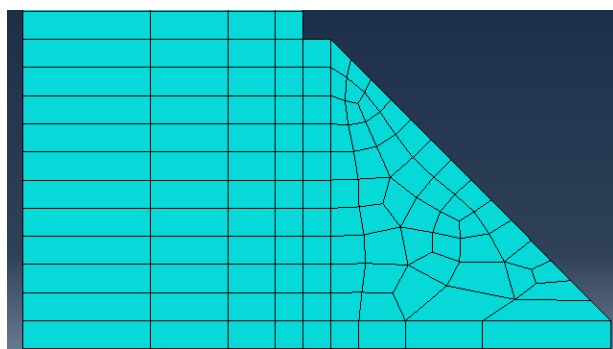


Figura 50 – Detalhe da malha usada no filete de adesivo

3.2.4.1.1 Distribuições de tensões

3.2.4.1.1.1 Tensões de arrancamento

As curvas de distribuição de tensões σ_y em função da variação de ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, são apresentadas na Figura 51. Os valores máximos de σ_y/τ_{avg} das respectivas curvas estão representadas na Tabela 15.

De acordo com os resultados obtidos das distribuições de tensões σ_y , a junta adesiva tubular com filete de adesivo tem mais do que um pico de tensão σ_y/τ_{avg} , para a mesma curva. Um dos picos de tensão corresponde à extremidade da junta adesiva tubular, $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, e os outros correspondem à extremidade dos diferentes ângulos de filetes de adesivo, localizados em $x/L_0<0$ e $x/L_0>1$. Existe uma diminuição de tensões σ_y entre a extremidade do ângulo de adesivo e a extremidade da junta adesiva tubular. Isto acontece porque a rigidez do adesivo é inferior ao do aderente, o que propicia um nível de tensões mais reduzido. Na Tabela 15 os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 apresentam uma diminuição de tensões máximas σ_y/τ_{avg} relativamente às tensões obtidas pela junta adesiva tubular sem filete de adesivo ($\theta=90^\circ$). No entanto, o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta a maior diferença de redução de tensões, pois este é o adesivo que apresenta o maior valor de E . O mesmo não acontece para o adesivo dúctil SikaForce® 7752 (Figura 51 (c)). Este adesivo apresenta um ligeiro aumento de tensões para juntas tubulares com filete de adesivo face a juntas adesivas sem filete ($\theta=90^\circ$).

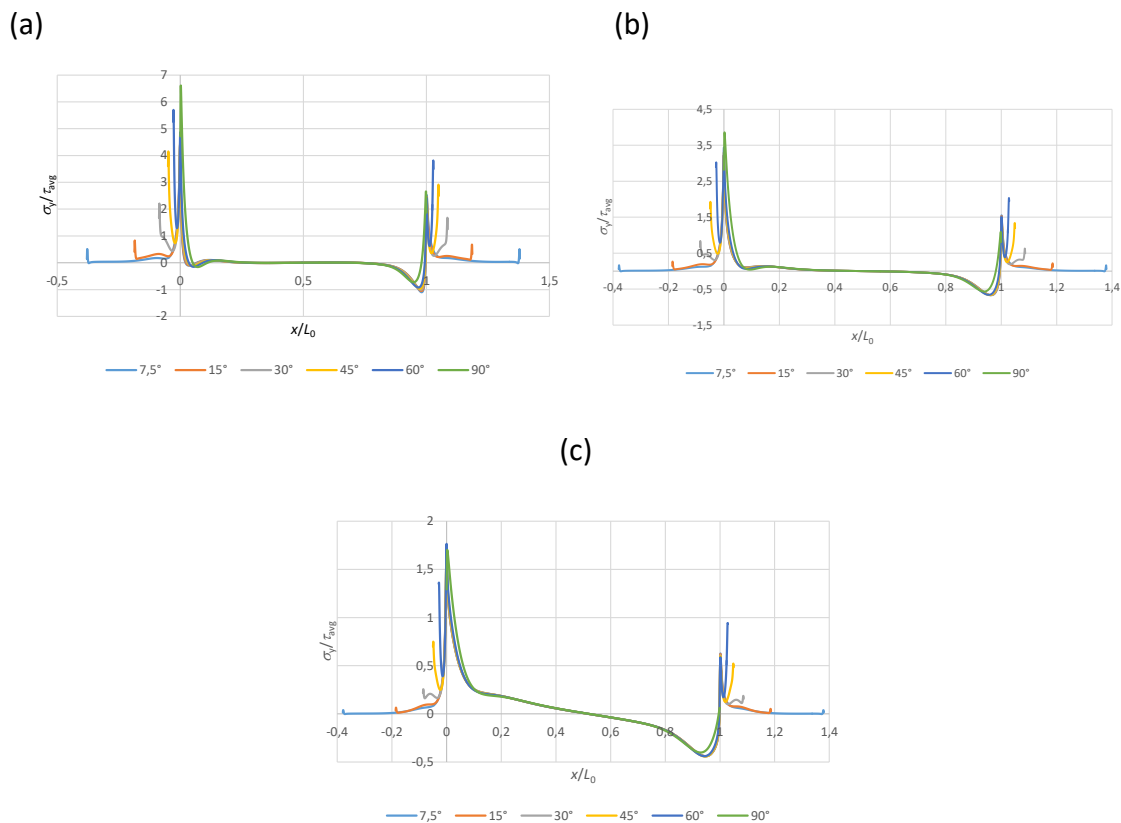


Figura 51 - Distribuição das tensões σ_y / τ_{avg} em função do ângulo do filete de adesivo para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

Tabela 15 - Valores máximos de σ_y / τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do filete de adesivo

Adesivo	$\theta [^\circ]$					
	7,5	15	30	45	60	90
Araldite® AV138	4,41	4,39	4,35	4,52	5,7	6,61
Araldite® 2015	3,22	3,22	3,23	3,30	3,44	3,86
SikaForce® 7752	1,72	1,72	1,72	1,74	1,76	1,70

3.2.4.1.1.2 Tensões de Corte

Na Figura 52 estão representadas as curvas de distribuição de tensões τ_{xy} em função da variação de θ , para os três adesivos. Na Tabela 16 estão os valores máximos de τ_y / τ_{avg} das respectivas curvas.

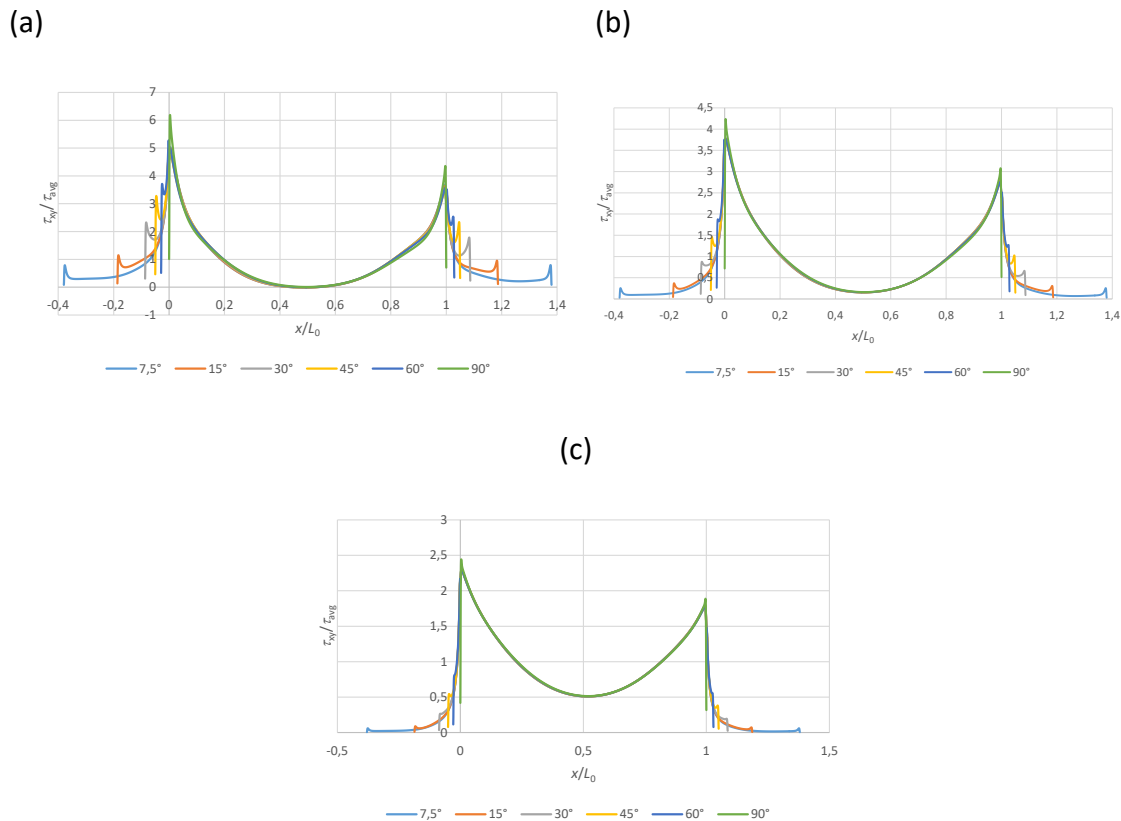


Figura 52 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do ângulo do filete de adesivo para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

A partir da análise das curvas de tensões τ_{xy} (Figura 52), tal como observado para as tensões σ_y (Figura 51), constata-se que existe mais do que um pico de tensão para cada curva. Um dos picos de tensão corresponde às extremidades da junta adesiva tubular ($x/L_0=0$ e $x/L_0=1$) e os outros correspondem à extremidade dos diferentes ângulos de filetes de adesivo ($x/L_0 < 0$ e $x/L_0 > 1$). De acordo com a Tabela 16, os valores mais altos de tensão τ_{xy}/τ_{avg} máxima para os três adesivos são as juntas adesivas sem filete de adesivo ($\theta=90^\circ$). Para ângulos compreendidos entre $\theta=7,5^\circ$ e $\theta=60^\circ$, observa-se uma estabilização de valores de pico das tensões para os três adesivos. O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta a maior redução de tensões τ_{xy}/τ_{avg} relativamente à condição sem filete de adesivo ($\theta=90^\circ$). No entanto, ao contrário da distribuição de tensões σ_y , o adesivo SikaForce® 7752, que é um adesivo dúctil, também apresenta valores de tensão mais reduzidos com a adição de filete de adesivo do que a configuração sem filete de adesivo ($\theta=90^\circ$).

Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy} / τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do filete de adesivo

Adesivo	θ [°]					
	7,5	15	30	45	60	90
Araldite® AV138	5,03	4,99	4,89	5,01	5,28	6,19
Araldite® 2015	3,78	3,77	3,75	3,74	3,76	4,24
SikaForce® 7752	2,31	2,31	2,30	2,3	2,3	2,44

3.2.4.1.2 Resistência das juntas

Na Figura 53 estão representadas as curvas P - δ dos vários ângulos do filete de adesivo, obtidas a partir da análise numérica por MDC, para os três adesivos. Na Tabela 17 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de θ , para os três adesivos e o aumento percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $\theta=90^\circ$ ($\Delta P_{m\acute{a}x}$). Na Figura 54 estão representadas as curvas com os valores $P_{m\acute{a}x}$ das respectivas curvas de $P_{m\acute{a}x}$ em função do ângulo dos três adesivos.

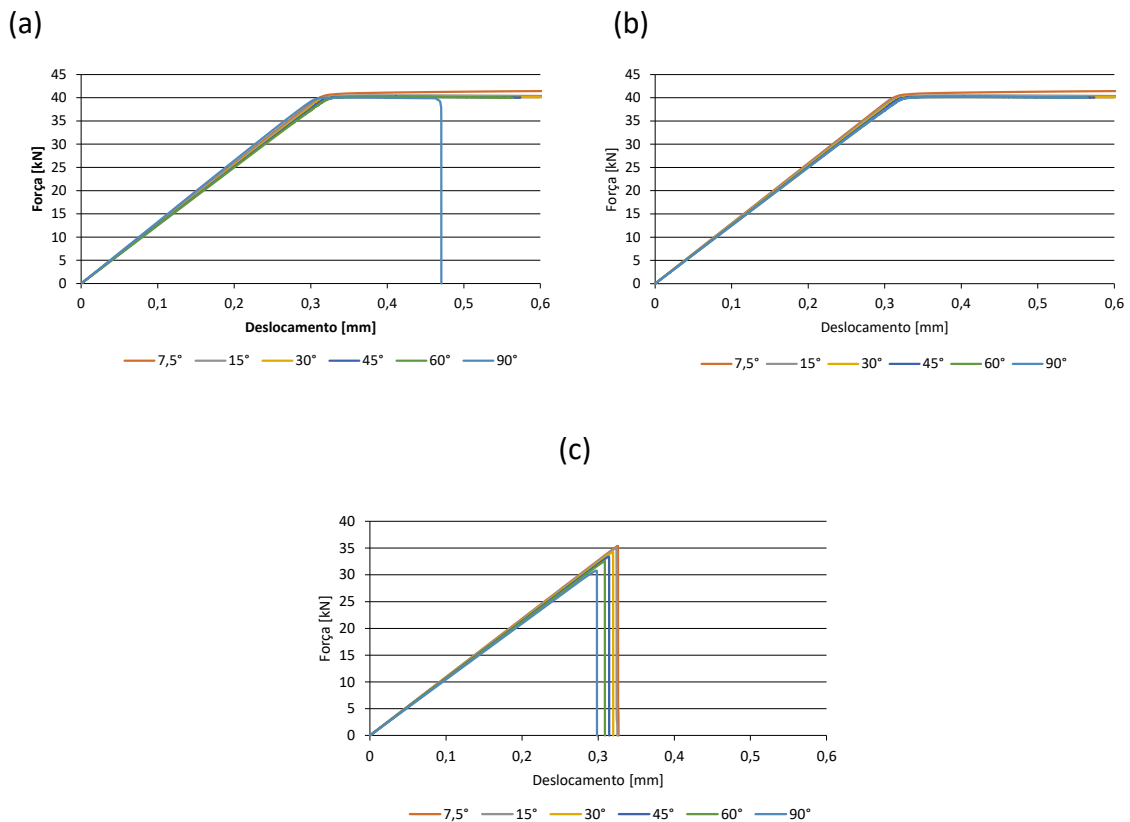


Figura 53 - Curvas P - δ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

A partir das curvas $P-\delta$ verifica-se que a resistência da junta adesiva tubular aumenta com a redução do ângulo do filete de adesivo. No entanto, o aumento da resistência da junta não é significativo para o adesivo Araldite® 2015. Este adesivo tem como características, boa resistência e ductilidade e é capaz de absorver as cargas induzidas na junta com o filete de adesivo sem variações significativas de $P_{m\acute{a}x}$. As juntas tubulares com este adesivo apresentam valores elevados de $P_{m\acute{a}x}$, muito próximos aos valores do adesivo Araldite® AV138, devido à sua ductilidade. De referir que existe estrição no substrato de alumínio em todos os θ , o que se deve à capacidade de o adesivo suportar a carga aplicada. De acordo com a Tabela 17, o Araldite® AV138 permite obter o maior valor de $P_{m\acute{a}x}$ para um $L_0=7,5\text{mm}$ com um $\Delta P_{m\acute{a}x}$ significativo. Para este adesivo verifica-se o aumento de resistência da junta adesiva tubular, $P_{m\acute{a}x}$, com a diminuição do ângulo do filete de adesivo. Tratando-se de um adesivo rígido, o acrescento de adesivo nas extremidades origina a estrição no substrato de alumínio para os θ compreendidos entre $7,5^\circ$ a 60° . Para $\theta=90^\circ$ verifica-se a plastificação dos aderentes, mas regista-se a rotura pelo adesivo. O adesivo SikaForce® 7752, dos três adesivos, é o que apresenta o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$. Como já referido, trata-se de um adesivo poliuretano dúctil. Contudo, o $\Delta P_{m\acute{a}x}$ para todos os ângulos é o mais significativo para este adesivo.

Tabela 17 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os três adesivos em função de θ e o respectivo aumento percentual

θ [°]	Araldite® AV138	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)	Araldite® 2015	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)	SikaForce® 7752	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
7,5	42459	8,19	41525	3,47	35395	14,96
15	40654	3,59	40512	0,95	35044	13,82
30	40359	2,84	40310	0,44	34278	11,34
45	40183	2,39	40225	0,23	33421	8,55
60	39777	1,36	40179	0,12	32497	5,55
90	39243		40131		30788	

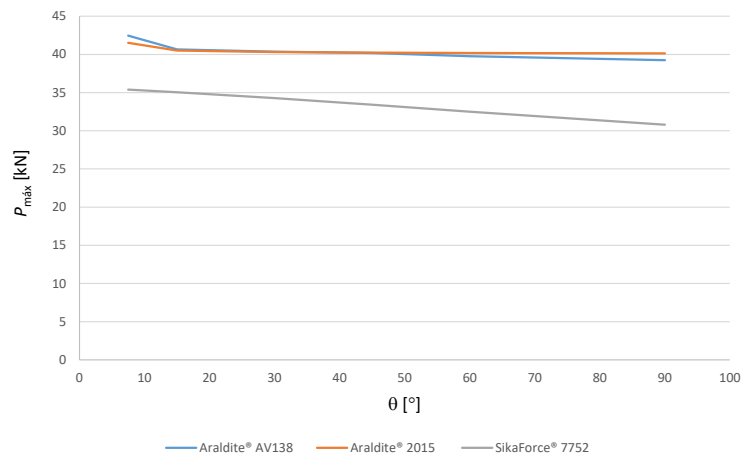


Figura 54 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função do ângulo do filete de adesivo, para os três adesivos.

3.2.4.2 Chanfro exterior

Neste capítulo é feito a análise numérica do comportamento da junta adesiva tubular com chanfro exterior nas extremidades dos tubos, a partir da previsão da resistência da junta e da distribuição das tensões σ_y e τ_{xy} , para os três adesivos. A Figura 55 mostra um detalhe da malha numa das extremidades da zona de ligação, com especial relevo para a zona triangular do substrato de alumínio modelado com elementos sólidos axissimétricos. Os valores de ângulo de chanfro exterior (α), estudados numericamente para os três adesivos, são de $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° e 90° .

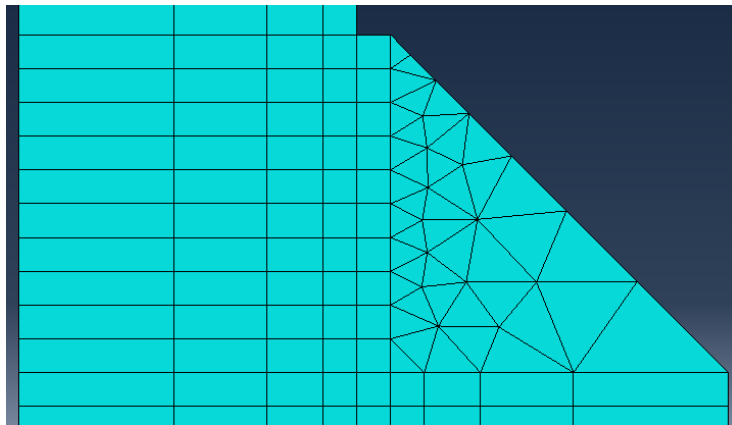


Figura 55 - Detalhe da malha usada no chanfro exterior do aderente.

3.2.4.2.1 Distribuições de tensões

3.2.4.2.1.1 Tensões de Arrancamento

Na Figura 56 estão representadas as curvas de distribuição de tensões σ_y em função da variação de ângulo do chanfro exterior, para os três adesivos. Os valores máximos de σ_y/τ_{avg} das respectivas curvas estão representados na Tabela 18.

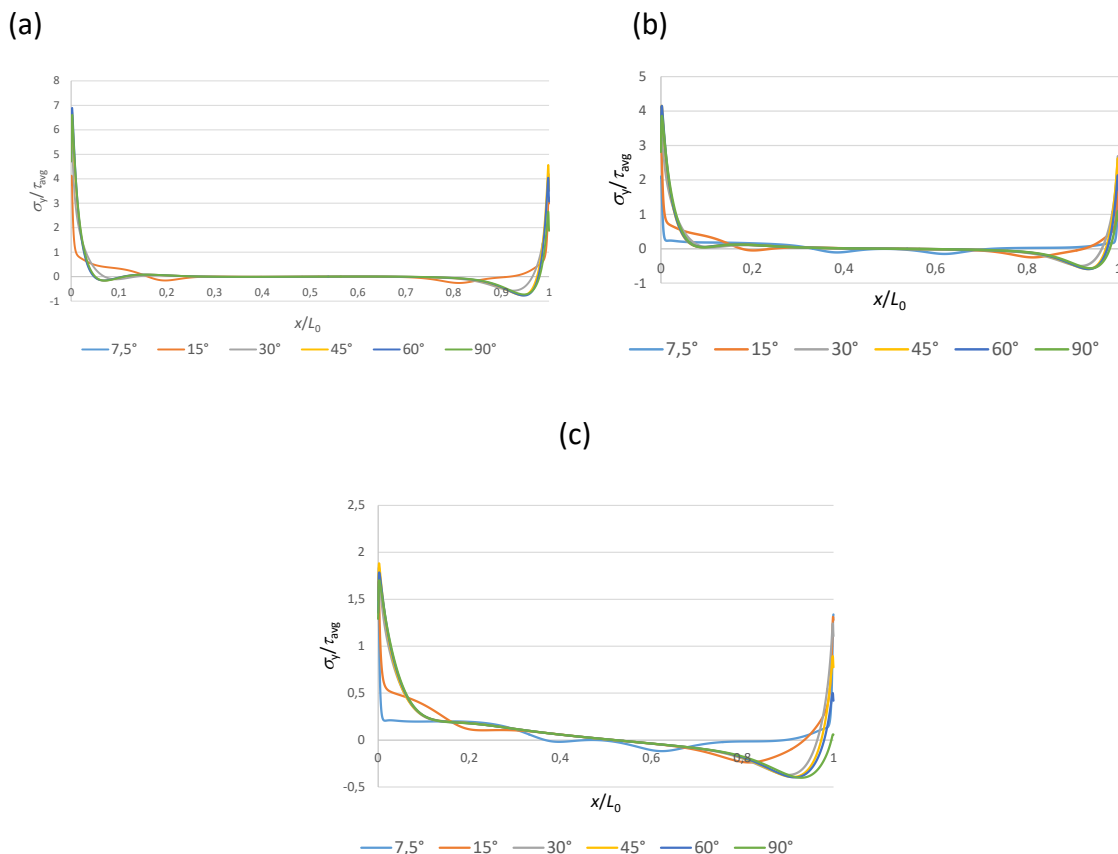


Figura 56 - Distribuição das tensões σ_y / τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação do ângulo do chanfro exterior: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.

De acordo com os resultados da distribuição das tensões σ_y , o pico de tensões dá-se nas extremidades da junta adesiva tubular. O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta os maiores picos de tensão junto às extremidades da junta, pois trata-se de um adesivo rígido, como já foi referido anteriormente. Na Tabela 18 verifica-se que o Araldite® AV138 tem um aumento significativo de tensões entre os ângulos de chanfro exterior, de $\alpha=7,5^\circ$ até $\alpha=60^\circ$, em que atinge o maior pico de tensão do mesmo. Desde $\alpha=60^\circ$ até a junta adesiva tubular sem chanfro ($\alpha=90^\circ$) existe um decréscimo de tensões. O Araldite® 2015 é o segundo adesivo com o maior pico de tensão σ_y . Este apresenta um aumento de tensões entre os ângulos do chanfro exterior, $\alpha=7,5^\circ$ até $\alpha=45^\circ$. Do ângulo $\alpha=45^\circ$ até $\alpha=60^\circ$ o valor de tensões é muito idêntico. Entre o ângulo $\alpha=60^\circ$ até a junta adesiva tubular sem chanfro, $\alpha=90^\circ$, existe um decréscimo de tensões, o que corresponde a um comportamento idêntico ao do adesivo Araldite® AV138. O SikaForce® 7752, é o adesivo que apresenta o valor mais baixo de tensão σ_y , uma vez que é o adesivo mais flexível dos três analisados. Este apresenta um aumento de tensões entre $\alpha=7,5^\circ$ até $\alpha=45^\circ$. Do ângulo $\alpha=45^\circ$ até $\alpha=90^\circ$ existe um decréscimo de tensões.

Tabela 18 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro exterior.

Adesivo	$\alpha [^\circ]$					
	7,5	15	30	45	60	90
Araldite® AV138	2,44	4,13	5,72	6,72	6,90	6,61
Araldite® 2015	2,10	3,03	3,71	4,15	4,15	3,86
SikaForce® 7752	1,66	1,69	1,83	1,88	1,79	1,70

3.2.4.2.1.2 Tensões de Corte

Na Figura 52 estão representadas as curvas de distribuição de tensões τ_{xy} em função da variação de ângulo do chanfro exterior, para os três adesivos. Na Tabela 19 estão presentes os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} , para os diferentes ângulos de chanfro exterior das juntas adesivas tubulares.

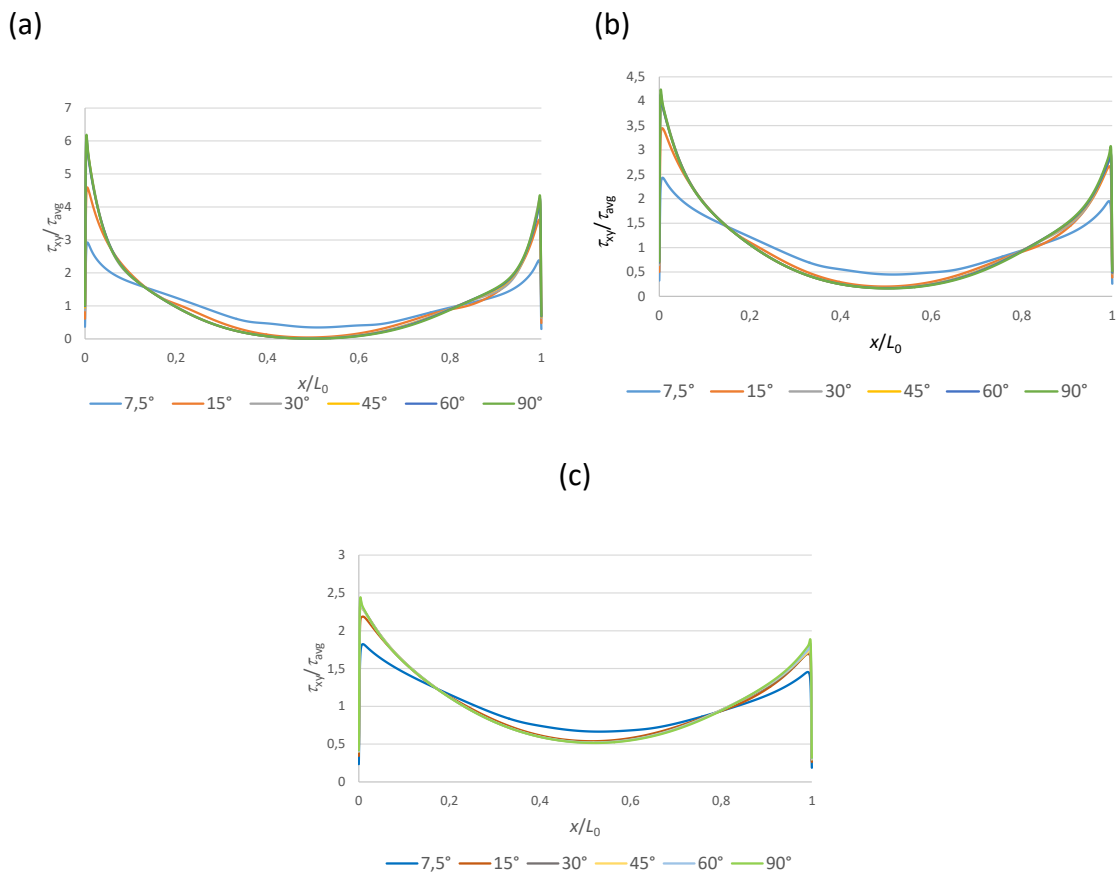


Figura 57 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do ângulo do chanfro exterior para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

Com base nos resultados da distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} , constata-se o mesmo já referido na distribuição das tensões σ_y , uma vez que os picos de tensões ocorrem nas extremidades da junta adesiva. O Araldite® AV138, adesivo rígido, é o que apresenta o maior valor de τ_{xy}/τ_{avg} . O SikaForce® 7752, à semelhança do que se tem verificado, é o adesivo que apresenta os menores valores de τ_{xy}/τ_{avg} . Na Tabela 19 verifica-se, para os três adesivos, um aumento de τ_{xy}/τ_{avg} máximo com o aumento do α . Consequentemente, o valor de tensões τ_{xy}/τ_{avg} mais alto acontece nas juntas adesivas tubulares sem chanfro ($\alpha=90^\circ$).

Tabela 19 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro exterior

Adesivo	α [°]					
	7,5	15	30	45	60	90
Araldite® AV138	2,92	4,59	5,81	6,02	6,12	6,19
Araldite® 2015	2,43	3,45	4,03	4,11	4,14	4,24
SikaForce® 7752	1,82	2,19	2,36	2,39	2,42	2,44

3.2.4.2.2 Resistência das juntas

Na Figura 58 estão representadas as curvas P - δ dos três adesivos analisados por MDC, com a alteração do ângulo do chanfro exterior nas extremidades da junta adesiva tubular. Na Tabela 20 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α , para os três adesivos e o aumento percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $\alpha=90^\circ$ ($\Delta P_{m\acute{a}x}$). Na Figura 59 estão representadas as curvas com os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função do α dos três adesivos.

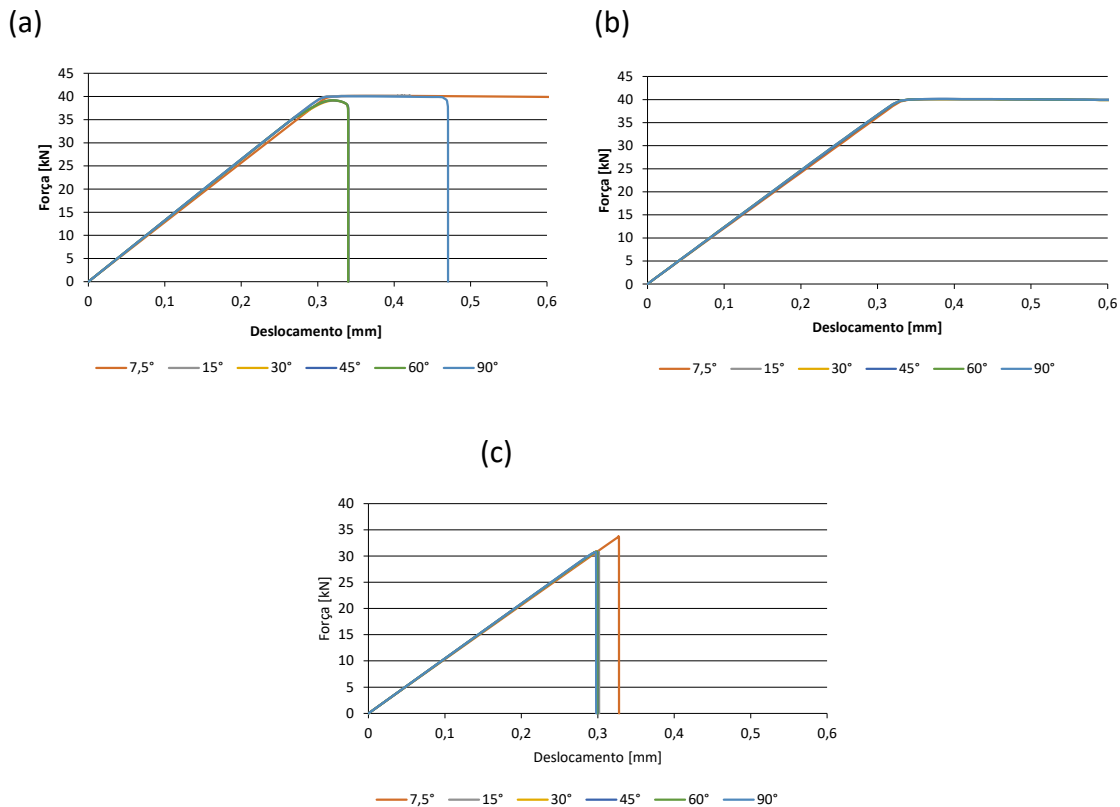
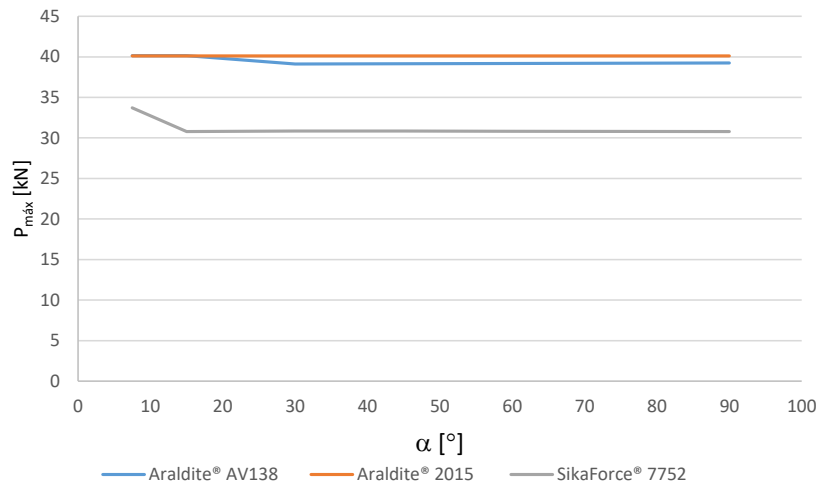


Figura 58 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro exterior, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752.

De acordo com as curvas $P-\delta$, a junta com o adesivo Araldite® AV138 (Figura 58 (a)) apresentou a maior resistência mecânica, $P_{m\acute{a}x}$. Para os $\alpha=7,5^\circ$ e $\alpha=15^\circ$ do mesmo adesivo Araldite® AV138, verifica-se a existência de estricção nos substratos de alumínio, o que se deve à capacidade de o adesivo suportar a carga aplicada. O Araldite® 2015 permite obter valores de resistência mecânica muito próximos dos obtidos com o Araldite® AV138. Por ser um adesivo dúctil, verifica-se que em todos os ângulos de chanfro exterior da junta adesiva ocorre plastificação dos tubos de alumínio. As juntas tubulares com o adesivo SikaForce® 7752 obtiveram os valores mais baixos de $P_{m\acute{a}x}$. Na Figura 59 verifica-se que existe um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com a diminuição do ângulo do chanfro exterior da junta adesiva. O $\Delta P_{m\acute{a}x}$ é mais significativo para o adesivo SikaForce® 7752, para um ângulo de chanfro exterior de $\alpha=7,5^\circ$. Entre os ângulos $\alpha=15^\circ$ até $\alpha=90^\circ$, não se verifica nenhuma variação visível de $P_{m\acute{a}x}$. O adesivo Araldite® 2015 não apresenta variação significativa de valores de resistência mecânica da junta para os diferentes ângulos do chanfro exterior. O equilíbrio entre a resistência mecânica e a ductilidade deste adesivo origina que este tenha o mesmo desempenho de resistência mecânica para todos os ângulos do chanfro exterior. No entanto, para $\alpha=30^\circ$ é o que apresenta maior resistência mecânica, entre os adesivos avaliados. Para as juntas tubulares com o Araldite® AV138, não se observou o aumento de resistência significativo relativamente à condição sem filete até um $\alpha=15^\circ$, ângulo para o qual a resistência aumentou até $\alpha=7,5^\circ$.

Tabela 20 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os tr\^es adesivos em fun\c{c}\~ao de α e o respectivo aumento percentual

α [°]	Araldite® AV138	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)	Araldite® 2015	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)	SikaForce® 7752	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
7,5	40135	2,27	40120	-0,03	33718	9,52
15	40149	2,31	40122	-0,02	30797	0,03
30	39107	-0,35	40123	-0,02	30838	0,16
45	39159	-0,22	40133	0,00	30837	0,16
60	39190	-0,14	40122	-0,02	30818	0,10
90	39243		40131		30788	

Figura 59 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função do ângulo do chanfro exterior da junta adesiva tubular, para os três adesivos

3.2.4.3 Chanfro interior

Neste capítulo é feito a análise numérica do comportamento da junta adesiva tubular com chanfro interior nas extremidades dos tubos, a partir da previsão da resistência da junta e da distribuição das tensões σ_y e τ_{xy} , para os três adesivos. A Figura 60 mostra um detalhe da malha numa das extremidades da zona de ligação, com especial relevo para a zona triangular de adesivo modelado com elementos axissimétricos. Os valores de ângulo de chanfro interior (β), estudados numericamente para os três adesivos, são de 7,5°, 15°, 30°, 45°, 60° e 90°.

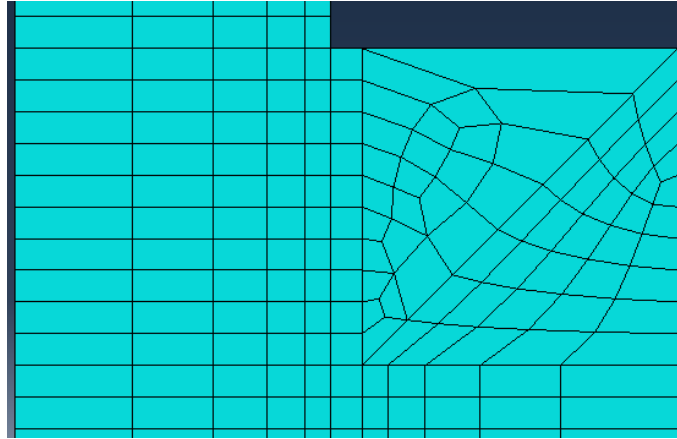


Figura 60 - Detalhe da malha usada no chanfro interior do aderente

3.2.4.3.1 Distribuições de tensões

3.2.4.3.1.1 Tensões de arrancamento

As curvas de distribuição de tensões σ_y em função do ângulo do chanfro interior, para os três adesivos, estão representadas na Figura 61. Na Tabela 21 estão representados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} , para os diferentes β das juntas adesivas tubulares.

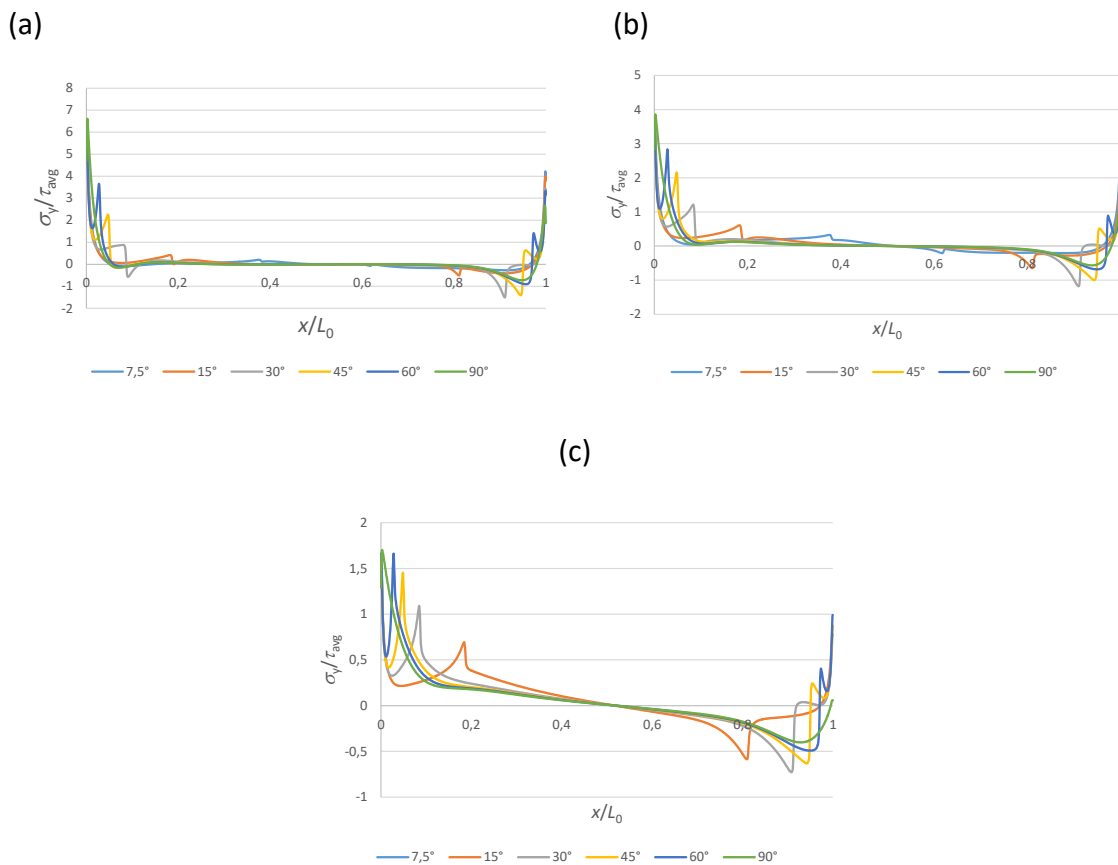


Figura 61 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação do ângulo do chanfro interior: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

A partir da distribuição das tensões σ_y , constata-se que a aplicação de um chanfro interior nas extremidades dos tubos origina dois picos de concentrações de tensões em cada lado da junta de sobreposição para cada um dos diferentes ângulos. A secção transversal nas extremidades do tubo ficou mais reduzida, o que proporciona a que o pico com a tensão σ_y/τ_{avg} mais elevado seja o primeiro. O segundo pico está entre as duas extremidades da junta adesiva tubular, em que existe uma redução de concentração de tensões. De acordo com a Tabela 21 não se verifica uma variação de tensões $\sigma_y/\tau_{avg \text{ máx}}$ significativa com a aplicação do chanfro interior nos tubos, para os três adesivos. Os valores mais altos de $\sigma_y/\tau_{avg \text{ máx}}$ para os três adesivos são as juntas adesivas sem chanfro interior ($\theta=90^\circ$). De referir que se observa para os três adesivos uma diminuição de $\sigma_y/\tau_{avg \text{ máx}}$, entre os $\theta=90^\circ$ e $\theta=30^\circ$, seguido de um aumento de $\sigma_y/\tau_{avg \text{ máx}}$ entre os $\theta=30^\circ$ e $\theta=7,5^\circ$. As juntas adesivas tubulares com o adesivo Araldite® AV138, por este ser um adesivo frágil, apresentam os maiores valores de concentrações de tensões nas extremidades da junta.

Tabela 21 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro interior

Adesivo	$\beta [^\circ]$					
	7,5	15	30	45	60	90
Araldite® AV138	6,21	6,10	5,88	5,90	5,86	6,61
Araldite® 2015	3,73	3,38	3,28	3,36	3,42	3,86
SikaForce® 7752	1,84	1,50	1,48	1,56	1,66	1,70

3.2.4.3.1.2 Tensões de corte

Na Figura 62 estão representadas as curvas de distribuição de tensões τ_{xy} em função da variação de ângulo do chanfro interior, para os três adesivos. Na Tabela 22 resumem-se os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} , para os diferentes ângulos de chanfro interior das juntas adesivas tubulares.

Tal como verificado na distribuição de tensões σ_y , as tensões τ_{xy} também apresentam dois picos de concentração de tensões em cada lado da zona de ligação. No entanto, o pico com o valor mais elevado de tensão τ_{xy}/τ_{avg} é o segundo pico, que ocorre no local onde inicia o chanfro interior da junta adesiva tubular. Isto deve-se ao facto de a deformação diferencial dos aderentes na zona onde inicia o chanfro interior ser bastante acentuada. Conforme os dados da Tabela 22 os picos de tensões de corte τ_{xy}/τ_{avg} aumentam com o aumento do ângulo do chanfro interior. O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o valor mais alto de tensão τ_{xy}/τ_{avg} , para um ângulo de $\beta=90^\circ$. Este tem uma diferença significativa de valor de tensão entre os ângulos $\beta=7,5^\circ$ e $\beta=90^\circ$.

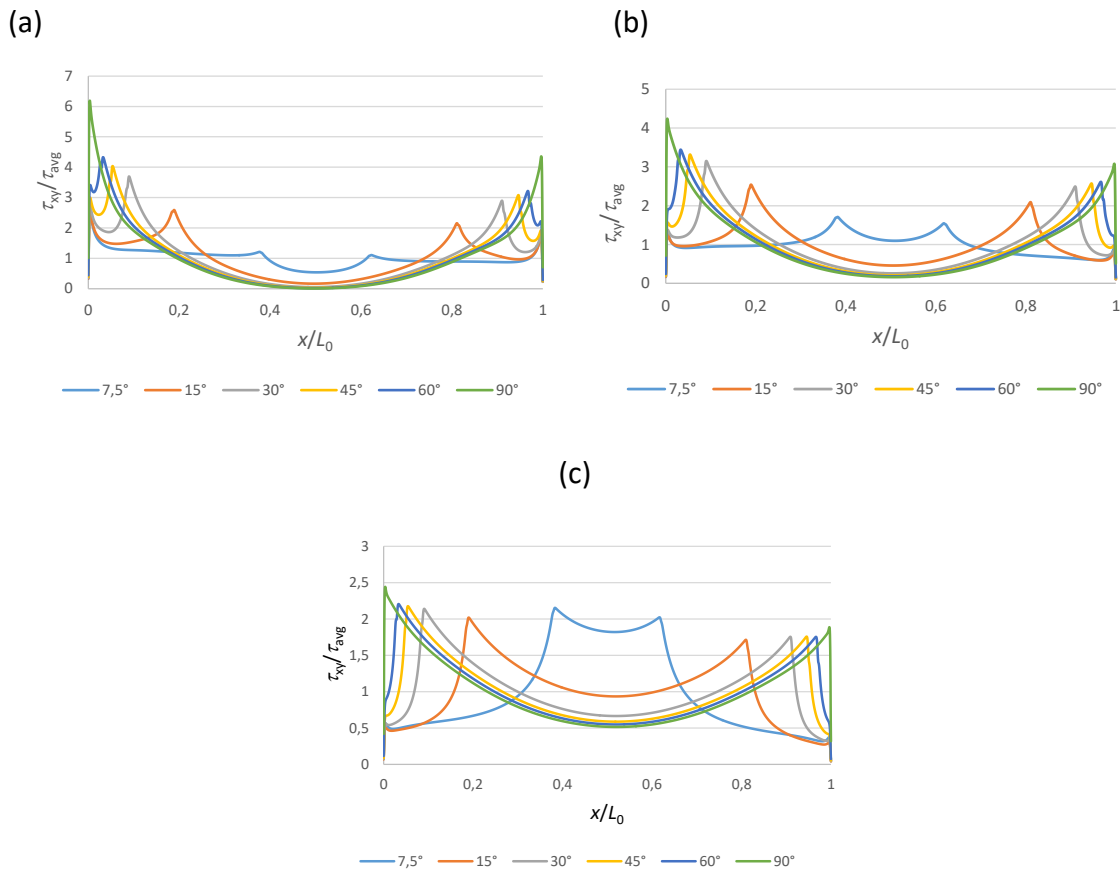


Figura 62 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função da variação do ângulo do chanfro interior: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

Tabela 22 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos em função do ângulo do chanfro interior

Adesivo	β [°]					
	7,5	15	30	45	60	90
Araldite® AV138	2,56	2,59	3,69	4,04	4,33	6,19
Araldite® 2015	1,71	2,54	3,15	3,32	3,44	4,24
SikaForce® 7752	2,15	2,02	2,14	2,18	2,21	2,44

3.2.4.3.2 Resistência das juntas

Na Figura 63 estão representadas as curvas P - δ das juntas tubulares com três adesivos analisados por MDC, com a alteração do ângulo do chanfro interior nas extremidades da junta adesiva tubular. Na Tabela 23 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de β , para os três adesivos e o aumento percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $\alpha=90^\circ$ ($\Delta P_{m\acute{a}x}$). Na Figura 64 estão representadas as curvas com os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função do β dos três adesivos.

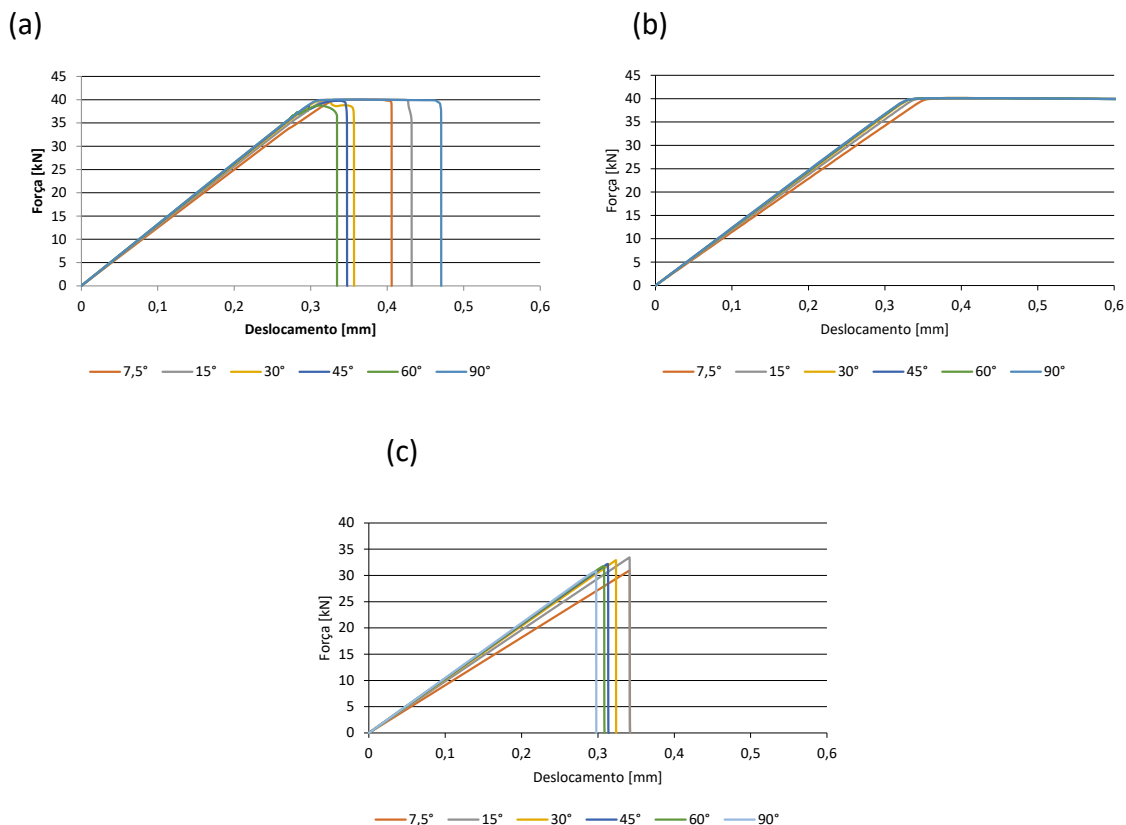
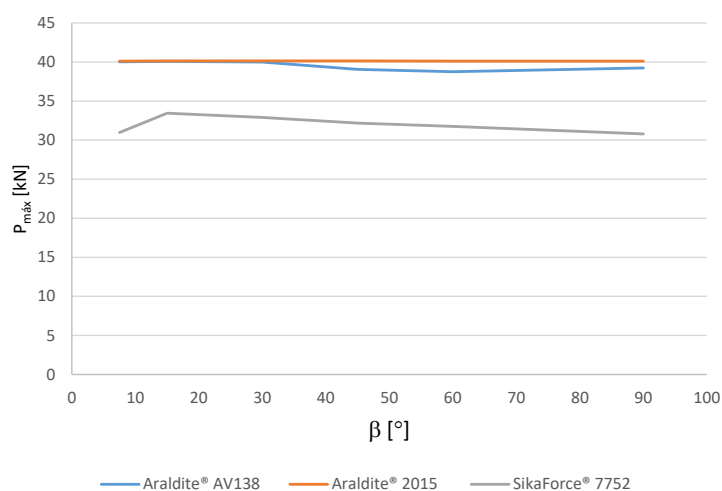


Figura 63 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro interior, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

A partir das curvas $P-\delta$ verifica-se, para as juntas tubulares com o adesivo Araldite® 2015, a ocorrência de estricção dos tubos de alumínio em todos os ângulos de chanfro interior. Este fenómeno verifica-se para a junta com o Araldite® AV138 sem chanfro interior ($\beta=90^\circ$). Para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, observa-se um comportamento linear até à rotura para todos os ângulos de chanfro interior. De acordo com a Figura 64, o adesivo Araldite® 2015 é o que apresenta os valores mais altos de $P_{m\acute{a}x}$. De facto, como já anteriormente referido, não se registam alterações na resistência da junta com a variação do ângulo do chanfro interior, pois este apresenta um bom equilíbrio entre a tensão de rotura e rigidez. O Adesivo Araldite® AV138 apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ altos e bastante próximos do Araldite® 2015, entre os ângulos $\beta=7,5^\circ$ até $\beta=30^\circ$. Contudo, entre os ângulo $\beta=30^\circ$ até $\beta=90^\circ$, existe um decréscimo de resistência da junta, obtendo o valor mais baixo de $P_{m\acute{a}x}$ para um $\beta=60^\circ$. O adesivo SikaForce® 7752 é o que apresenta os valores mais baixos de $P_{m\acute{a}x}$, entre os três adesivos. No entanto, este quando comparado com os restantes adesivos, é o que apresenta o maior aumento de $P_{m\acute{a}x}$ para $\beta=15^\circ$ face à junta adesiva sem chanfro ($\beta=90^\circ$). Em geral, a aplicação de um chanfro interior nas juntas adesivas tubular é benéfica para os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, visto que atingem os seus valores mais altos de $P_{m\acute{a}x}$ para ângulo de $\beta=7,5^\circ$ e $\beta=15^\circ$, respetivamente. Relativamente ao Araldite® 2015 não se verifica um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$ com esta alteração geométrica.

Tabela 23 - Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] para os três adesivos em função de β e o respectivo aumento percentual

β [°]	Araldite® AV138	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	Araldite® 2015	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	SikaForce® 7752	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)
7,5	40022	1,99	40126	-0,01	30962	0,57
15	40077	2,12	40136	0,01	33436	8,60
30	39992	1,91	40140	0,02	32915	6,91
45	39072	-0,44	40133	0,00	32171	4,49
60	38751	-1,26	40123	-0,02	31763	3,17
90	39243		40131		30788	

Figura 64 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em função do ângulo do chanfro interior da junta adesiva tubular, para os três adesivos

3.2.4.4 Combinação de chanfro interior e filete de adesivo

Esta alteração geométrica consiste na combinação de um chanfro interior e de um filete de adesivo na junta adesiva tubular, para cada um dos três adesivos. A combinação do chanfro interior com o filete de adesivo proporciona o aumento da quantidade de adesivo na junta e o aumento do L_0 . Os ângulos utilizados do filete de adesivo e do chanfro interior, são os ângulos correspondentes de cada alteração geométrica, que têm o valor mais alto de $P_{\text{máx}}$ para cada adesivo, de acordo com os resultados obtidos nos capítulos 3.2.4.1 e 3.2.4.3. A Figura 65 mostra um detalhe da malha numa das extremidades da zona de ligação, com especial relevo para as zonas triangulares de adesivo modelado com elementos axissimétricos. Na Tabela 24 estão apresentados os ângulos utilizados de chanfro interior e filete de adesivo para os três adesivos.

Tabela 24 – Ângulos do chanfro interior e filete de adesivo para os três adesivos

Adesivo	Chanfro interior β [°]	Filete de Adesivo θ [°]
Araldite® AV138	15	7,5
Araldite® 2015	30	7,5
SikaForce® 7752	15	7,5

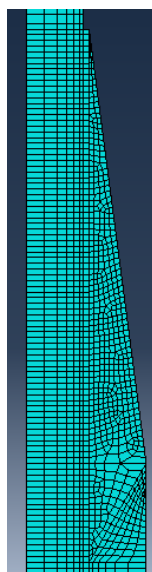


Figura 65 - Detalhe da malha usada na combinação de chanfro interior e filete de adesivo do aderente

3.2.4.4.1 Distribuição de tensões

3.2.4.4.1.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 66 estão representadas as curvas de distribuições de tensões σ_y em função do ângulo do chanfro interior e do filete de adesivo, de acordo com a Tabela 24, para os três adesivos.

A partir da distribuição de tensões σ_y é possível verificar que existe mais do que um pico de tensão. Observam-se dois picos no local correspondente em que se dá a inclinação β do chanfro interior do tubo de alumínio ($x/L_0 > 0$ e $x/L_0 < 1$), onde existe uma maior concentração de tensões. Existem também dois picos nas extremidades dos filetes de adesivo ($x/L_0 < 0$ e $x/L_0 > 1$), mas de magnitude muito reduzida. Registam-se também dois nas extremidades da junta adesiva tubular ($x/L_0 = 0$ e $x/L_0 = 1$). A junta com o Araldite® 2015 é o que apresenta os valores mais altos de concentrações de tensões σ_y/τ_{avg} , localizadas na inclinação do chanfro interior. Segue-se o SikaForce® 7752, que é o segundo adesivo que apresenta os valores mais altos de concentrações de tensões σ_y/τ_{avg} . Por último o adesivo Araldite® AV138, em que se verifica os valores mais baixos de concentração de tensões σ_y/τ_{avg} .

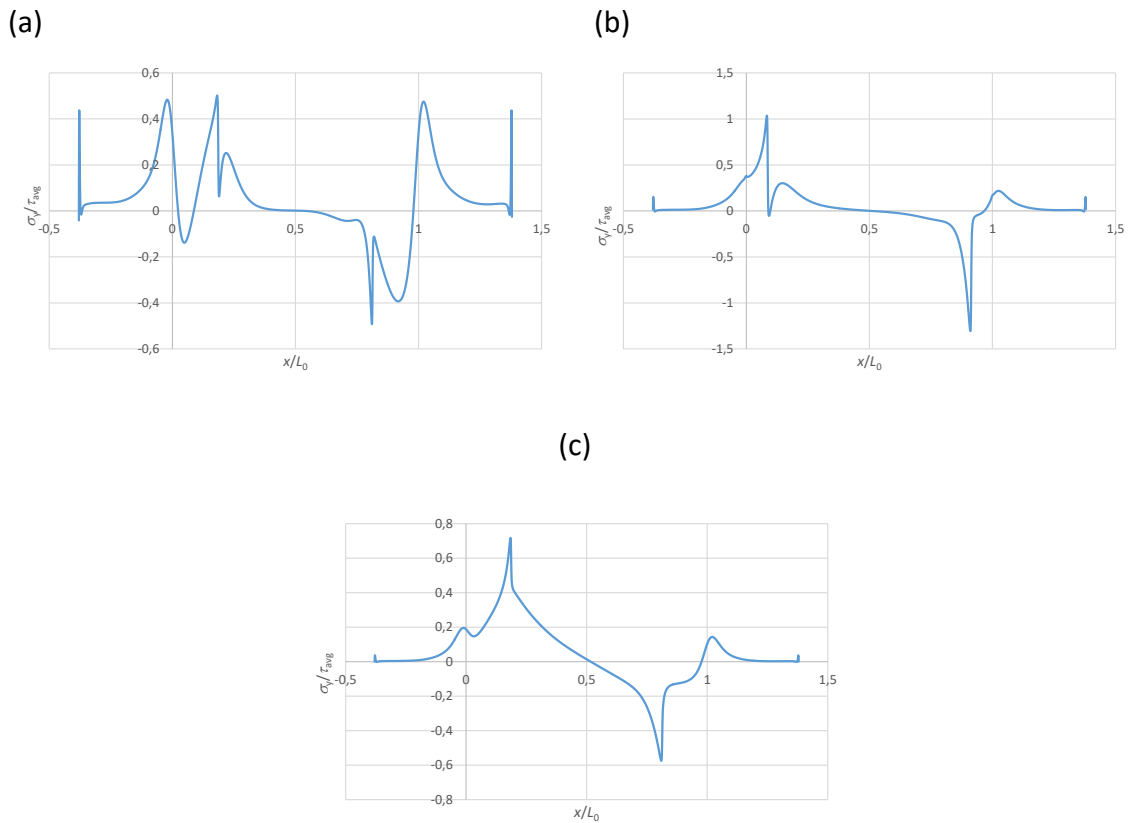


Figura 66 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função do ângulo do chanfro interior e filete de adesivo: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

A partir da distribuição de tensões σ_y é possível verificar que existe mais do que um pico de tensão. Observam-se dois picos no local correspondente em que se dá a inclinação β do chanfro interior do tubo de alumínio ($x/L_0 > 0$ e $x/L_0 < 1$), onde existe uma maior concentração de tensões. Existem também dois picos nas extremidades dos filetes de adesivo ($x/L_0 < 0$ e $x/L_0 > 1$), mas de magnitude muito reduzida. Registam-se também dois nas extremidades da junta adesiva tubular ($x/L_0 = 0$ e $x/L_0 = 1$). A junta com o Araldite® 2015 é o que apresenta os valores mais altos de concentrações de tensões σ_y/τ_{avg} , localizadas na inclinação do chanfro interior. Segue-se o SikaForce® 7752, que é o segundo adesivo que apresenta os valores mais altos de concentrações de tensões σ_y/τ_{avg} . Por último o adesivo Araldite® AV138, em que se verifica os valores mais baixos de concentração de tensões σ_y/τ_{avg} .

3.2.4.4.1.2 Tensões de corte

Na Figura 67 estão representadas as distribuições de tensões τ_y em função do ângulo do chanfro interior e do filete de adesivo, de acordo com a Tabela 24, para os três adesivos.

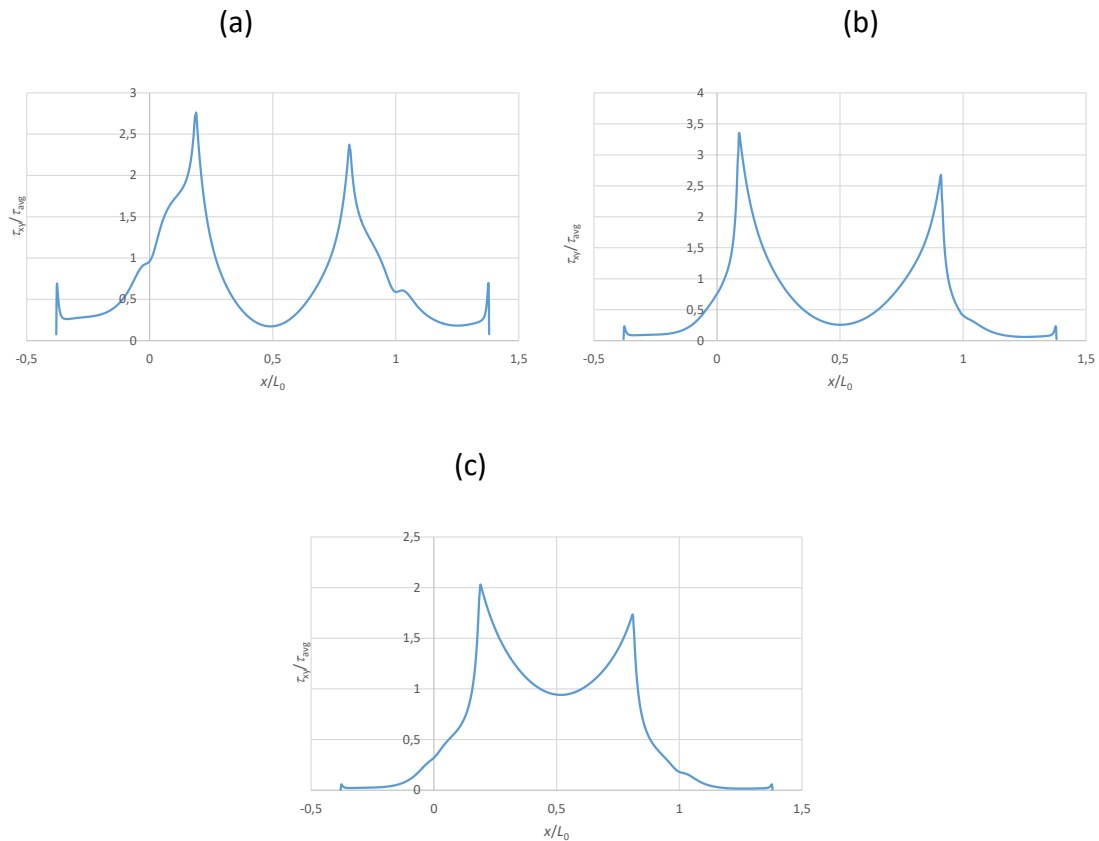


Figura 67 - Distribuição das tensões τ_y/τ_{avg} nas juntas adesivas tubulares em função do ângulo do chanfro interior e filete de adesivo: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752

A partir da Figura 67 verifica-se, tal como nas curvas de distribuição das tensões σ_y , a existência de mais do que um pico de tensão, e que o pico de tensão com maior valor τ_y/τ_{avg} está situado na inclinação do chanfro interior do aderente, para os três adesivos. A junta com o Araldite® 2015 é o que apresenta o valor mais alto de concentrações de tensões τ_y/τ_{avg} . Segue-se o Araldite® AV138, o segundo adesivo que apresenta os valores mais altos de concentrações de tensões τ_y/τ_{avg} . A junta com o SikaForce® 7752, ao contrário do que se verificou nas curvas σ_y , é o que apresenta o valor mais baixo de concentração de tensões τ_y/τ_{avg} .

3.2.4.4.2 Resistência das juntas

Na Figura 68 estão representadas as curvas $P-\delta$ dos três adesivos analisados por MDC, com a alteração do ângulo do chanfro interior e filete de adesivo nas extremidades da junta adesiva tubular. Na Tabela 23 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de β e θ , para os três adesivos e os valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$.

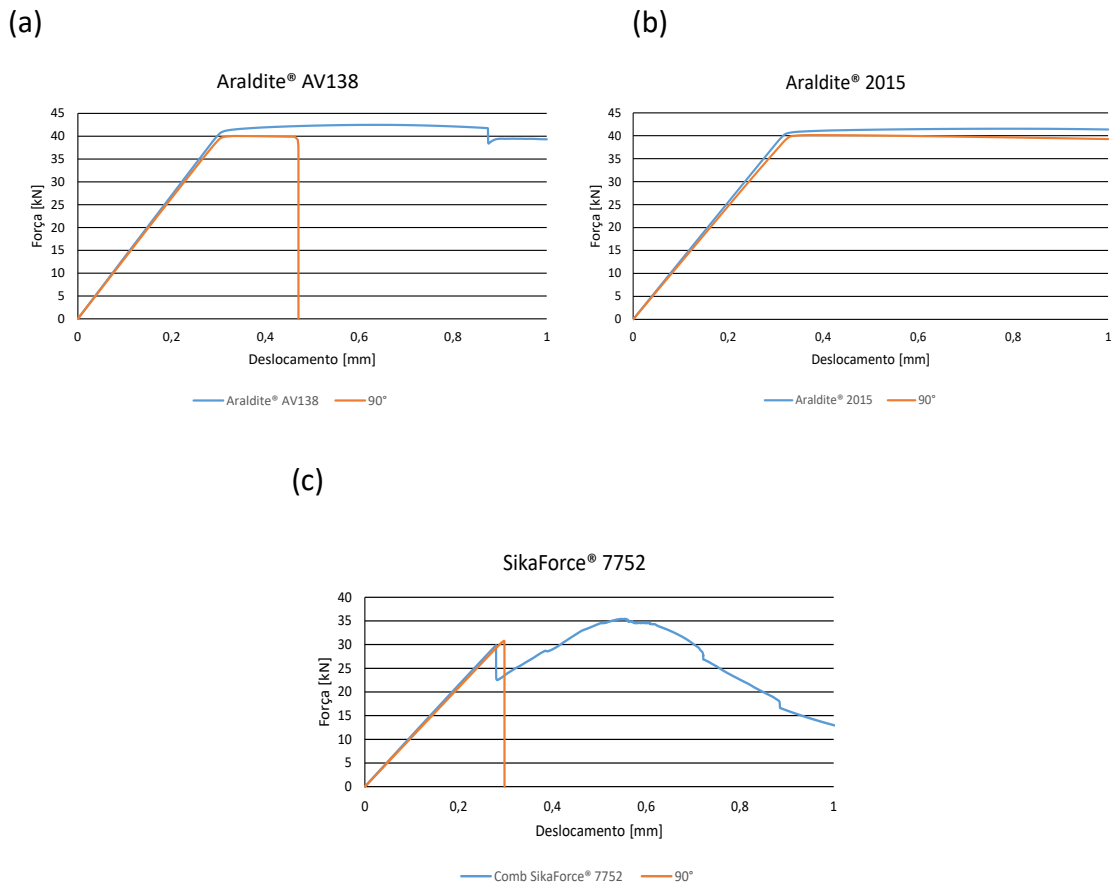


Figura 68 - Curvas P - δ obtidas por MDC no ABAQUS® em função do ângulo do chanfro interior e filete de adesivo, para os três adesivos: (a) Araldite® AV138 ; (b) Araldite® 2015 ; (c) SikaForce® 7752.

A partir das curvas P - δ verifica-se a ocorrência de estricção dos tubos de alumínio para os três adesivos. Ou seja, os adesivos têm a capacidade de suportar a carga aplicada e tornam-se mais resistentes do que os próprios aderentes. A junta tubular com o Araldite® AV138, este por ser um adesivo muito rígido, é a que tem o $P_{\text{máx}}$ mais elevado. O SikaForce® 7752, tal como verificado nas anteriores alterações geométricas é o que apresenta o valor de $P_{\text{máx}}$ mais baixo. No entanto, é o que apresenta o maior aumento de $\Delta P_{\text{máx}}$.

Tabela 25 - Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] para os três adesivos em função dos β e θ da combinação e o respectivo $\Delta P_{\text{máx}}$

	Araldite® AV138	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	Araldite® 2015	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)	SikaForce® 7752	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)
Combinação	42488	8,27	41526	3,47	35442	15,11
90°	40022		40126		30962	

3.2.4.5 Análise dos resultados obtidos

Na Figura 69 estão representadas as curvas da evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função do ângulo das diferentes alterações geométricas, para os três adesivos. Nesta figura também estão representadas as curvas de $P_{m\acute{a}x}$ da combinação de chanfro interior e filete de adesivo.

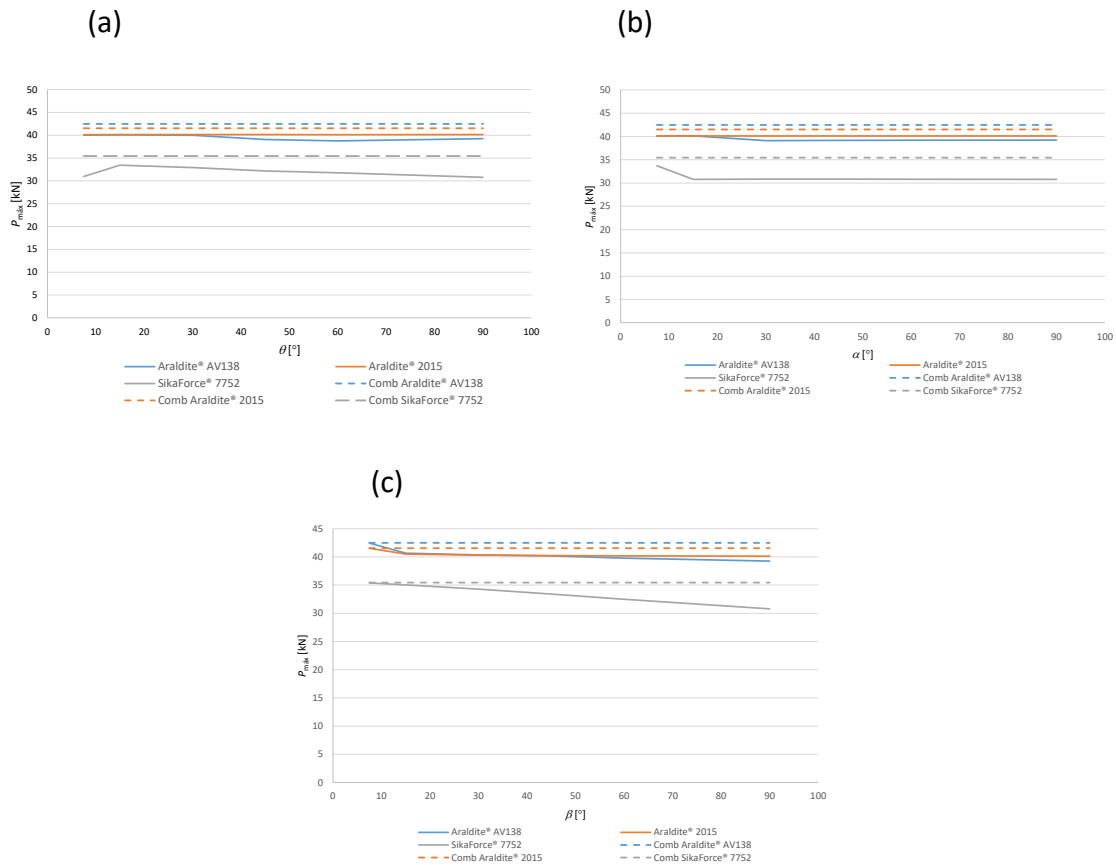


Figura 69 - Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função do ângulo do chanfro interior (a), chanfro exterior (b) e filete de adesivo (c), para os três adesivos.

Como mostra a Figura 69, a combinação de filete de adesivo com chanfro interior no aderente na mesma junta tubular adesiva tem um $P_{m\acute{a}x}$ e um $\Delta P_{m\acute{a}x}$ mais elevado para todos os adesivos quando comparada com as alterações geométricas, filete de adesivo, chanfro interior e exterior. No entanto, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ da combinação, dos três adesivos, são igualados na alteração geométrica filete de adesivo para $\theta=7,5^\circ$, o que permite afirmar que a adição de um chanfro interior na combinação com o filete de adesivo não aumenta a resistência mecânica da junta adesiva tubular. A adição de um filete de adesivo, pelo contrário, como aumenta a área de sobreposição adesiva, aumenta a resistência mecânica da junta, quando comparada com as alterações geométricas chanfro interior e exterior.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho tem como objetivo a comparação do desempenho de juntas adesivas tubulares com a variação dos parâmetros geométricos principais e alterações geométricas, ligadas com três adesivos e sujeitas a esforços de tração, através de uma análise das tensões e de resistência por modelação de MDC analisadas no ABAQUS®.

No estudo da variação dos parâmetros geométricos, nomeadamente a **variação de L_0** , apresentam-se as principais conclusões das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} :

- Os valores das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} apresentam valores mais elevados nas extremidades da junta adesiva para L_0 mais elevados;
- Nas tensões σ_y , o aumento do L_0 provoca um aumento da rigidez da junta com a concentração de tensões mais elevadas nas extremidades;
- Nas tensões τ_{xy} , a distribuição de tensões é mais uniforme para valores baixos de L_0 , visto que existe uma taxa de deformação diferencial inferior entre os tubos interior e exterior;
- A junta com o adesivo Araldite® AV138, por este ser um adesivo rígido, é a que apresenta maiores picos de σ_y/τ_{avg} e de τ_{xy}/τ_{avg} .

No estudo das alterações geométricas, são apresentados de seguida as principais conclusões das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} .

Na adição de um **filete de adesivo** nas extremidades de L_0 :

- Verifica-se a formação de mais do que um pico de tensão nas distribuições de tensões σ_y e de τ_{xy} ;
- Nas tensões σ_y verifica-se uma diminuição dos picos de tensões σ_y/τ_{avg} com a diminuição do θ para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. No entanto, o mesmo não acontece com o SikaForce® 7752, em que existe um ligeiro aumento de tensões σ_y/τ_{avg} face a juntas adesivas sem filete;
- Nas tensões τ_{xy} , verifica-se uma redução picos de tensões τ_{xy}/τ_{avg} com a diminuição do θ para os três adesivos;
- A junta com o adesivo Araldite® AV138, é a que apresenta maiores picos de σ_y/τ_{avg} e de τ_{xy}/τ_{avg} .

No acrescento de um **chanfro exterior** nas extremidades de L_0 :

- Verifica-se um aumento das tensões τ_{xy} com o aumento do α para todos os adesivos;

- Existe aumento das tensões σ_y até $\alpha=60^\circ$, para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015;
- Existe aumento das tensões σ_y até $\alpha=45^\circ$, para o adesivo SikaForce® 7752;
- A junta com o adesivo Araldite® AV138 é a que apresenta maiores picos de σ_y/τ_{avg} e de τ_{xy}/τ_{avg} .

A utilização de um **chanfro interior** nas extremidades de L_0 :

- Origina dois picos de concentrações de tensões em cada lado da junta de sobreposição nas distribuições de tensões σ_y e de τ_{xy} ;
- Os picos mais altos de σ_y/τ_{avg} dão-se nas extremidades da junta;
- Os picos mais altos de τ_{xy}/τ_{avg} dão-se no início da inclinação do chanfro interior da junta adesiva tubular;
- Verifica-se um decréscimo de σ_y/τ_{avg} com a diminuição de β até um $\beta=30^\circ$, seguido de um aumento de σ_y/τ_{avg} , para os três adesivos;
- Nas tensões τ_{xy} verifica-se um decréscimo de τ_{xy}/τ_{avg} com a diminuição de β ;
- A junta com o adesivo Araldite® AV138 é a que apresenta maiores picos de σ_y/τ_{avg} e de τ_{xy}/τ_{avg} .

Na **combinação** de um **chanfro interior** e de um **filete de adesivo** na junta adesiva tubular:

- Constata-se que existe mais do que um pico de tensão nas distribuições de tensões σ_y e de τ_{xy} . Existem dois picos no local correspondente em que se dá a inclinação β do chanfro interior do tubo. Registam-se também mais dois picos nas extremidades dos filetes de adesivo. Verificam-se também dois nas extremidades da junta adesiva tubular.
- Os picos mais altos de σ_y/τ_{avg} e τ_{xy}/τ_{avg} dão-se no início da inclinação do chanfro interior da junta adesiva tubular.
- A junta com o Araldite® 2015 é a que apresenta o pico mais alto σ_y/τ_{avg} e τ_{xy}/τ_{avg} .

No que toca à previsão da resistência através da análise numérica por MDC, apresentam-se as principais conclusões do estudo variação dos parâmetros geométricos, nomeadamente a **variação de L_0** :

- Constata-se um crescimento considerável de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 para todos os adesivos;
- A junta com o Araldite® 2015 é a que apresenta o maior valor de $P_{m\acute{a}x}$;
- A junta com o SikaForce® 7752 é a que apresenta o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$.

Na previsão da resistência através da análise numérica por MDC no estudo das alterações geométricas, são apresentados de seguida as principais conclusões.

Na adição de um **filete de adesivo** nas extremidades de L_0 :

- Verifica-se que resistência da junta adesiva tubular, $P_{m\acute{a}x}$, aumenta com a redução do θ ;

- A junta com o adesivo Araldite® AV138 é a que apresenta o maior valor de $P_{máx}$;
- A junta com adesivo SikaForce® 7752 é a que apresenta o menor valor de $P_{máx}$. No entanto, este é o adesivo que apresenta o maior aumento $\Delta P_{máx}$ ($\approx 14,96\%$);
- A junta com o adesivo Araldite® 2015 é aquela em que se verifica o menor aumento de $\Delta P_{máx}$ ($\approx 3,47\%$).

No acrescento de um **chanfro exterior** nas extremidades de L_0 :

- O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o maior $P_{máx}$, com um $\Delta P_{máx}=2,27\%$. O aumento de $P_{máx}$ acontece para um $\alpha=15^\circ$ até um $\alpha=7,5^\circ$;
- O adesivo SikaForce® 7752 apresenta o menor valor de $P_{máx}$. O $\Delta P_{máx}$ ($\approx 9,52\%$) só é significativo para um $\alpha=7,5^\circ$;
- Para o adesivo Araldite® 2015 não se verifica variação de $\Delta P_{máx}$.

Na existência de um **chanfro interior** nas extremidades de L_0 :

- O adesivo Araldite® 2015 é o que apresenta o maior $P_{máx}$. No entanto sem variação significativa de $\Delta P_{máx}$;
- No adesivo Araldite® AV138 verifica-se que não existe variação significativa de $\Delta P_{máx}$ até um $\beta=30^\circ$. No entanto o $P_{máx}$ deste adesivo dá-se no $\beta=15^\circ$, com $\Delta P_{máx}=1,99\%$.

Na **combinação** de um **chanfro interior** e de um **filete de adesivo** na junta adesiva tubular:

- O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta o maior $P_{máx}$, com um $\Delta P_{máx}=8,27\%$;
- Verifica-se um aumento significativo de $\Delta P_{máx}$ para todos os adesivos, quando comparado com as restantes alterações geométricas.

Por fim, de acordo com os resultados, o filete de adesivo quando comparado com as restantes alterações geométricas estudadas, é a melhor escolha para se obter uma junta adesiva tubular resistente.

Como sugestões para trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes:

- Efetuar análises numéricas para as possíveis combinações de chanfro interior e filete de adesivo.
- Validar os resultados numéricos das alterações geométricas com ensaios experimentais.
- Efetuar o estudo paramétrico nos adesivos mais dúcteis adotando leis coesivas mais adequadas.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
2. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto, Portugal: Publindústria.
4. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill.
5. Dunky, M. e A. Pizzi, *Adhesion Science and Engineering, Volume 2: Surfaces, Chemistry and Applications*. 2003, Elsevier: Amsterdão, Países Baixos.
6. Adams, R.D., *Adhesive bonding: Science, technology and applications*. 2005, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
7. Adams, R. e J. Comyn, *Joining using adhesives*. Assembly Automation, 2000.
8. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
9. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
10. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. 2005, Amsterdão, Países Baixos: Elsevier.
11. da Silva, L.F.M., T.N.S.S. Rodrigues, M.A.V. Figueiredo, M.F.S.F. de Moura, e J.A.G. Chousal, *Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength*. The Journal of Adhesion, 2006. **82**(11): p. 1091-1115.
12. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
13. Goland, M. e E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **11**: p. A17-A27.
14. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschouquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
15. Crocombe, A.D., *Global yielding as a failure criterion for bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1989. **9**(3): p. 145-153.
16. Gleich, D.M., M.J.L. Van Tooren, e A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(9): p. 1091-1101.
17. Grant, L.D.R., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.

18. Cherry, B.W. e N.L. Harrison, *Note: The Optimum Profile for a Lap Joint*. The Journal of Adhesion, 1970. **2**(2): p. 125-128.
19. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Effect of poisson's ratio strains in adherends on stresses of an idealized lap joint*. Journal of Strain Analysis, 1973. **8**(2): p. 134-139.
20. Groth, H.L. e P. Nordlund, *Shape optimization of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 204-212.
21. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973: Citeseer.
22. Coppendale, J., *The stress and failure analysis of structural adhesive joints*[Ph. D. Thesis]. 1977.
23. Mallick, V., *Stress Analysis of Metal/CFRP Adhesive Joints Subjected to the Effects of Thermal Stress*. 1989: University of Bristol.
24. Yu, H., *Experimental determination of shrinkage, modulus, and residual stresses in adhesives during the cure process*. 1999, Tese de Mestrado. Universidade de Bristol: Bristol, Inglaterra.
25. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
26. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
27. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, Londres, Inglaterra: Chapman & Hall.
28. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
29. 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.
30. 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.
31. 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.
32. 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.
33. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
34. 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.
35. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
36. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.

37. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer.
38. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18–19): p. 2445-2458.
39. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
40. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
41. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
42. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
43. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
44. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
45. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
46. 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.
47. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
48. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
49. de Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques, e P. De Castro, *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
50. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
51. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
52. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e 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.

53. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e 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.
54. Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
55. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
56. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
57. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
58. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
59. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
60. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
61. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
62. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
63. Gustafson, P.A. e A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
64. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13–14): p. 2065-2077.
65. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, e J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
66. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
67. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
68. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001, Berlim, Alemanha: Springer Berlin Heidelberg.

69. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. *Mechanics of Materials*, 2005. **37**(9): p. 955-979.
70. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(7): p. 763-781.
71. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003. **17**(7): p. 981-994.
72. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
73. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. **28**(6): p. 302-313.
74. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
75. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Oxford, Inglaterra: Blackwell.
76. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **45**(5): p. 601-620.
77. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **46**(1): p. 131-150.
78. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
79. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. *Computational Materials Science*, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
80. Ferreira, L.R.F., R.D.S.G. Campilho, R.J.B. Rocha, e D.R. Barbosa, *Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling*. *The Journal of Adhesion*, 2019. **95**(5-7): p. 425-449.
81. Li, G. e P. Lee-Sullivan, *Finite element and experimental studies on single-lap balanced joints in tension*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2001. **21**(3): p. 211-220.
82. Lavalette, N.P., O.K. Bergsma, D. Zarouchas, e R. Benedictus, *Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints*. *Composite Structures*, 2020. **240**: p. 112077.
83. Albiez, M., T. Vallée, H. Fricke, e T. Ummenhofer, *Adhesively bonded steel tubes — Part I: Experimental investigations*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2019. **90**: p. 199-210.
84. Eusébio, S.M.L. e R.D.S.G. Campilho, *Modelling of tubular adhesively-bonded joints by the Extended Finite Element Method*. *Procedia Manufacturing*, 2019. **41**: p. 484-491.

85. Qiu, C., P. Feng, Y. Yang, L. Zhu, e Y. Bai, *Joint capacity of bonded sleeve connections for tubular fibre reinforced polymer members*. Composite Structures, 2017. **163**: p. 267-279.
86. Yousefi, M., S. Rahnama, e M. Farhadi Nia, *Experimental investigation on the mechanical behavior of hybrid bonded (rivet/adhesive) tubular lap joint (composite to metal) under pure torsion*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2020: p. 1-12.
87. Shishesaz, M. e S. Tehrani, *The effects of circumferential voids or debonds on stress distribution in tubular adhesive joints under torsion*. The Journal of Adhesion, 2019: p. 1-35.
88. Nimje, S.V. e S.K. Panigrahi, *Strain energy release rate based damage analysis of functionally graded adhesively bonded tubular lap joint of laminated FRP composites*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(5): p. 389-411.
89. Baishya, N., R.R. Das, e S.K. Panigrahi, *Failure analysis of adhesively bonded tubular joints of laminated FRP composites subjected to combined internal pressure and torsional loading*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017. **31**(19-20): p. 2139-2163.
90. Ferreira, L.R.F., R.D.S.G. Campilho, D.R. Barbosa, R.J.B. Rocha, e F.J.G. Silva, *Static strength improvement of tubular aluminium adhesive joints by the outer chamfering technique*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 629-636.
91. Kishore, A.N. e N.S. Prasad, *An experimental study of Flat-Joggle-Flat bonded joints in composite laminates*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **35**: p. 55-58.
92. Cho, D.H. e D.G. Lee, *Optimum design of co-cured steel-composite tubular single lap joints under axial load*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2000. **14**(7): p. 939-963.
93. Nguyen, V. e K.T. Kedward, *Non-linear Modeling of Tubular Adhesive Scarf Joints Loaded in Tension*. The Journal of Adhesion, 2001. **76**(3): p. 265-292.
94. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
95. Campilho, R.D., M.D. Banea, A.M. Pinto, L.F. da Silva, e A. De Jesus, *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.
96. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
97. Neto, J., R.D. Campilho, e L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
98. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, e L.F. da Silva, *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.
99. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.

100. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
101. Davis, M. e D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International journal of adhesion and adhesives, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
102. Yang, Q. e B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. International Journal of Fracture, 2005. **133**(2): p. 107-137.
103. Jousset, P. e M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
104. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
105. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
106. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012: Springer.
107. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction, 2nd Edition*. 2002, Munique: Hanser.
108. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
109. Leffler, K., K.S. Alfredsson, e U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
110. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
111. Campilho, R., A. Pinto, M.D. Banea, R. Silva, e L.F. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
112. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.