



Estudo analítico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração

ANDRÉ EDUARDO DA SILVA PINHEIRO

dezembro de 2021

ESTUDO ANALÍTICO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

André Eduardo da Silva Pinheiro

1161001

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia mecânica



ESTUDO ANALÍTICO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

André Eduardo da Silva Pinheiro

1161001

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

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Jorge Américo de Oliveira Pinto Belinha

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Investigador, FEUP

AGRADECIMENTOS

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

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

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

Um agradecimento à equipa da Brukinag Engenharia - Unipessoal Lda., com quem trabalho diariamente e me proporcionam um excelente ambiente laboral e aprendizagem contínua.

PALAVRAS-CHAVE

Juntas adesivas tubulares, Adesivos estruturais, Métodos analíticos, Métodos numéricos, Distribuição de tensões, Mecânica dos meios contínuos.

RESUMO

As ligações adesivas têm cada vez mais preponderância na concepção de estruturas mecânicas, devido às vantagens significativas desta técnica em comparação com as ligações tradicionais. O facto de as ligações adesivas terem uma boa relação desempenho-peso, bem como a boa capacidade de unir diferentes materiais sem danificar as estruturas a ligar, são vantagens destacadas deste tipo de ligações. Os adesivos comerciais variam desde resistentes e frágeis (por exemplo o Araldite® AV138) a menos resistentes e dúcteis (por exemplo o Araldite® 2015). Uma nova família de adesivos de poliuretano combina elevada resistência e ductilidade (por exemplo o Sikaforce® 7752).

A presente dissertação compara o desempenho à tração dos três adesivos supracitados, em juntas tubulares de alumínio (AW6082-T651), em função de diferentes comprimentos de sobreposição (L_0). Nesta comparação, é efetuada uma análise analítica cujos resultados são, numa fase posterior, comparados com uma análise numérica por meio de modelos de dano coesivo (MDC) e com a resistência da junta obtida experimentalmente. A análise analítica foi realizada por intermédio de três modelos analíticos, a partir de uma formulação mais simples e direta, na qual são analisadas as tensões de arrancamento (σ_y) e as de corte (τ_{xy}), e posteriormente utilizados critérios da mecânica dos meios contínuos para inferir a resistência das juntas.

Este estudo permitiu verificar que os métodos analíticos preveem um comportamento ligeiramente diferente, em termos de distribuições de tensões de corte, relativamente aos obtidos numericamente. No entanto, as previsões da resistência obtidas analiticamente, aplicando os critérios da mecânica dos meios contínuos, são semelhantes aos resultados obtidos pelo MEF, mas distintas dos resultados obtidos experimentalmente.

KEYWORDS

Tubular adhesive joints, Structural adhesives, Analytical methods, Numerical methods, Stress distribution, Continuum mechanics.

ABSTRACT

Adhesive joints are increasingly prevalent in the design of mechanical structures, due to the significant advantages of this technique compared to traditional joints. The fact that adhesive joints have a good performance-to-weight ratio, as well as the good ability to join different materials without damaging the structures to be bonded, are outstanding advantages of this type of joints. Commercial adhesives range from strong and brittle (e.g., the Araldite® AV138) to less strong and ductile (e.g., the Araldite® 2015). A new family of polyurethane adhesives combines high strength and ductility (e.g., the Sikaforce® 7752).

This dissertation compares the tensile performance of the three above mentioned adhesives, in aluminum tubular joints (AW6082-T651), as a function of different overlap lengths (L_0). In this comparison, an analytical analysis is carried out, the results of which are, at a later stage, compared with a numerical analysis using cohesive zone models (CZM) and with the experimentally obtained joint strength. The analytical analysis was carried out using three analytical methods, from a simpler and more direct formulation, in which peel (σ_y) and shear stresses (τ_{xy}) are analyzed, and subsequently continuum mechanics criteria are used to infer the joint strength.

This study allowed to verify that the analytical methods predict a slightly different behavior, in terms of shear stress distributions, compared to those obtained numerically. However, the strength predictions obtained analytically, applying the continuum mechanics criteria, are similar to the results obtained by FEM, but distinct from the results obtained experimentally.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CTAM	Crítério da tensão de arrancamento máxima
CTCM	Crítério da tensão de corte máxima
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
MMA	Metacrilato de metila
N-H	Modelo de Nayeb-Hashemi et al.
pH	Potencial hidrogeniónico
PRFV	Plástico com reforço de fibra de vidro
PVC	Policloreto de vinila
P&C	Modelo de Pugno e Carpinteri
TCG	Tensão de cedência generalizada

Lista de Unidades

°	Grau
°C	Graus Celsius
g	Gramas
GPa	Gigapascal
min	Minuto

mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
psi	Libras por polegada quadrada

Lista de Símbolos

θ	Ângulo entre aderentes
ν	Coefficiente de Poisson
δ	Deslocamento
ε	Deformação
ε_x	Deformação axial
ε_θ	Deformação cilíndrica
ε_f	Deformação de rotura à tração
γ_f	Deformação de rotura ao corte
ε_r	Deformação radial
\varnothing	Diâmetro
σ_y	Tensão de arrancamento
σ_y	Tensão de cedência à tração
τ_y	Tensão de cedência ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_{avg}	Tensão de corte média
σ_f	Tensão de rotura à tração
τ_f	Tensão de rotura ao corte

σ_x	Tensão normal
\bar{P}	Força aplicada por unidade de largura
A	Secção transversal dos aderentes
a	Raio médio da camada adesiva
b	Largura da junta
c	Metade do comprimento de sobreposição
C_i	Constantes obtidas a partir das condições de carga impostas nas extremidades dos aderentes
d_{SE}	Diâmetro externo do aderente exterior
d_{SI}	Diâmetro externo do aderente interior
E	Módulo de Young
F	Força axial exercida
G	Módulo de elasticidade transversal
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
k	Fator de momento de flexão
k'	Fator de força transversal
l, L_o	Comprimento de sobreposição
L_s	Comprimento dos aderentes
L_T	Comprimento total da junta tubular
M	Momento de flexão
N	Força aplicada na direção normal
P	Força aplicada

$P_{\text{máx}}$	Força máxima exercida
$P - \delta$	Força - Deslocamento
R, R_2	Raio exterior do aderente interno
R_1	Raio interior do aderente interno
R_3	Raio interior do aderente externo
R_4	Raio exterior do aderente externo
t	Espessura dos aderentes
t_a, h	Espessura da camada adesiva
t_{SE}	Espessura do aderente exterior
t_{SI}	Espessura do aderente interior
u	Equações diferenciais
V	Força transversal
x	Coordenada longitudinal

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Disposição de uma junta adesiva [10]	11
Figura 2 - Tipos de esforços aplicados em juntas adesivas [16]	13
Figura 3 - Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial e não axial [6].....	14
Figura 4 - Distribuição de tensões em esforços de compressão/tração numa junta adesiva [17]	14
Figura 5 - Distribuição de tensões numa junta adesiva sujeita ao corte [17].....	15
Figura 6 - Distribuição das tensões numa junta adesiva sujeita a esforços de clivagem e arrancamento [17]	16
Figura 7 - Modos de rotura possíveis em juntas adesivas [17].....	17
Figura 8 - Configurações mais comuns de juntas adesivas [6]	19
Figura 9 - Ação do desalinhamento de planos numa junta de sobreposição simples [14]	19
Figura 10 - Configurações das juntas de sobreposição [14]	20
Figura 11 - Configurações das juntas com tira [14]	20
Figura 12 - Configurações de juntas topo-a-topo [14]	21
Figura 13 - Configurações de juntas angulares [7]	21
Figura 14 - Configurações de juntas de canto [7].....	22
Figura 15 - Aplicação das ligações adesivas num avião [24].....	22
Figura 16 - Aplicação das ligações adesivas num automóvel [25].....	23
Figura 17 - Aplicação de ligações adesivas numa ponte [21]	24
Figura 18 - Aplicação de ligações adesivas num barco [21]	25
Figura 19 - Aplicação de ligações adesivas num componente eletrónico [28].....	25
Figura 20 - Tensão de corte numa junta de sobreposição simples: análise mais simples [36]	27
Figura 21 - Deformações em juntas de sobreposição simples carregadas com aderentes elásticos [36]..	28
Figura 22 - Junta de sobreposição simples analisada por Volkersen: (a) geometria e (b) diagrama elementar [30].....	28
Figura 23 - Distribuição da tensão de corte do adesivo de Volkersen para aderentes de liga de alumínio e um adesivo epóxico [30].....	28
Figura 24 - Modelo de Goland e Reissner [30]	29

Figura 25 - Esquema representativo da deformação plástica por corte do adesivo de acordo com a análise de Hart-Smith [30]	31
Figura 26 - Método de previsão da resistência de juntas adesivas baseado na cedência do adesivo e do aderente [6]	32
Figura 27 - 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 [48])	35
Figura 28 - Junta tubular: a) sem a presença de chanfro b) com presença de chanfro [21]	39
Figura 29 - Junta tubular topo-a-topo [7]	40
Figura 30 - Junta tubular de sobreposição [66]	41
Figura 31 - Junta tubular de chanfro [7]	42
Figura 32 - Aplicação do pré-impregnado em tubos compósitos [70]	42
Figura 33 - Junta tubular de ressalto [71]	43
Figura 34 - Junta tubular de tira externa [14]	44
Figura 35 – Juntas adesivas tubulares aplicadas no (a) transporte de combustíveis [71] e na (b) engenharia civil [75]	45
Figura 36 - Junta adesiva tubular aplicada na estrutura de um autocarro [77]	45
Figura 37 - Esquema da junta tubular segundo o modelo de Nayeb-Hashemi [78]	46
Figura 38 - Esquema da junta tubular segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [78]	48
Figura 39 – Configuração da geometria do provete	53
Figura 40 – Curvas tensão-deformação (σ - ε) da liga de alumínio AW6082-T651 [84]	55
Figura 41 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® AV138 [84]	55
Figura 42 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [86]	57
Figura 43 - Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [88]	58
Figura 44 - Rotura registada numa amostra de provetes dos adesivos Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7752 (c) com $L_0=40$ mm	61
Figura 45 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm	62
Figura 46 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm	63
Figura 47 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm	64
Figura 48 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos	65
Figura 49 - Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS®	68

Figura 50 - Propriedades do aderente AW 6082-T651 e do adesivo Araldite® 2015	68
Figura 51 - Representação das condições de fronteira na simulação	69
Figura 52 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=20$ mm	70
Figura 53 - Distribuição das tensões σ_y absolutas e normalizadas nas juntas adesivas tubulares para o adesivo Araldite® AV138 segundo o modelo de Pugno e Carpinteri (a) e o MEF (b).....	71
Figura 54 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas e normalizadas nas juntas adesivas tubulares para o adesivo Araldite® AV138 segundo o modelo de Nayeb-Hashemi (a) e o MEF (b)	72
Figura 55 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al.: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752	74
Figura 56 - Distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al.: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752	75
Figura 57 - Distribuição das tensões σ_y absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752	76
Figura 58 - Distribuição das tensões σ_y normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752	77
Figura 59 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752	79
Figura 60 - Distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752	80
Figura 61 - Distribuição das tensões σ_y absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752.....	81
Figura 62 - Distribuição das tensões σ_y normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752.....	83
Figura 63 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752.....	84
Figura 64 – Distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752.....	85
Figura 65 – Comparação da distribuição das tensões σ_y absolutas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® AV138 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm	86
Figura 66 - Comparação da distribuição das tensões σ_y absolutas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	86
Figura 67 - Comparação da distribuição das tensões σ_y absolutas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo SikaForce® 7752 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm	87
Figura 68 - Comparação da distribuição das tensões σ_y normalizadas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® AV138 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm	88

Figura 69 - Comparação da distribuição das tensões σ_y normalizadas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	89
Figura 70 - Comparação da distribuição das tensões σ_y normalizadas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo SikaForce® 7752 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	89
Figura 71 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} absolutas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo Araldite® AV138 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	90
Figura 72 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} absolutas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	91
Figura 73 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} absolutas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo SikaForce® 7752 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	91
Figura 74 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo Araldite® AV138 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	92
Figura 75 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	93
Figura 76 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo SikaForce® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	93
Figura 77 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Nayeb-Hashemi et al.....	95
Figura 78 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f	97
Figura 79 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f	99
Figura 80 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Pugno e Carpinteri para o primeiro valor atingido entre σ_f e τ_f	101
Figura 81 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo da tensão de cedência generalizada.....	101
Figura 82 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MEF para σ_f	103
Figura 83 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MEF para τ_f	105
Figura 84 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MEF para o primeiro valor atingido entre σ_f e τ_f	107
Figura 85 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	108

Figura 86 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm	108
Figura 87 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	108
Figura 88 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MDC, referente ao MEF	109
Figura 89 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® AV138.....	111
Figura 90 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® 2015	114
Figura 91 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo SikaForce® 7752.....	115

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [1, 14]	12
Tabela 2 - Trabalhos referentes a métodos numéricos/experimentais	37
Tabela 3 – Designação das cotas dos provetes e respetivos valores (em mm).....	54
Tabela 4 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [87]	56
Tabela 5 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [86]	57
Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [86]	59
Tabela 7 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138	62
Tabela 8 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015	63
Tabela 9 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752	65
Tabela 10 – $P_{m\acute{a}x}$ Méd (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	66
Tabela 11 - Valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al., para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	74
Tabela 12 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al., para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	75
Tabela 13 - Valores máximos de σ_y (MPa) para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	77
Tabela 14 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	78
Tabela 15 - Valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	79
Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	80
Tabela 17 - Valores máximos de σ_y (MPa) para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	82
Tabela 18 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	83
Tabela 19 - Valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	84

Tabela 20 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	85
Tabela 21 – Comparação dos valores máximos de σ_y (MPa) para os três adesivos através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	88
Tabela 22 - Comparação dos valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	90
Tabela 23 - Comparação dos valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos através de dois métodos analíticos e do MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	92
Tabela 24 - Comparação dos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos através de dois métodos analíticos e do MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm	94
Tabela 25 - $P_{máx}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al.	95
Tabela 26 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ (N) experimentais e do modelo de Nayeb-Hashemi et al. em função do adesivo e L_0	96
Tabela 27 - $P_{máx}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f	97
Tabela 28 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ (N) experimentais e do modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f em função do adesivo e L_0	98
Tabela 29 - $P_{máx}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f	99
Tabela 30 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ (N) experimentais e do modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f em função do adesivo e L_0	100
Tabela 31 - $P_{máx}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo da tensão de cedência generalizada	102
Tabela 32 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ (N) experimentais e do modelo da tensão de cedência generalizada em função do adesivo e L_0	103
Tabela 33 - $P_{máx}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f	104
Tabela 34 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ (N) experimentais e do MEF para σ_f em função do adesivo e L_0	105
Tabela 35 - $P_{máx}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f	106
Tabela 36 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ (N) experimentais e do MEF para τ_f em função do adesivo e L_0	106

Tabela 37 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do MDC, referente ao MEF, em função do adesivo e L_0	110
Tabela 38 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do MDC, referente ao MEF, em função do adesivo e L_0	110
Tabela 39 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® AV138.....	112
Tabela 40 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® 2015	114
Tabela 41 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo SikaForce® 7752.....	116

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	4
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas	9
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	11
2.1.2	Tipos de esforços aplicados em juntas adesivas	13
2.1.2.1	Esforços de tração.....	13
2.1.2.2	Esforços de compressão	14
2.1.2.3	Esforços de corte	15
2.1.2.4	Esforços de clivagem.....	15
2.1.2.5	Esforços de arrancamento	16
2.1.3	Modos de rotura possíveis em juntas adesivas.....	16
2.1.3.1	Rotura adesiva	17
2.1.3.2	Rotura coesiva	17
2.1.3.3	Rotura pelo aderente.....	18
2.1.3.4	Rotura mista	18
2.1.4	Configurações possíveis de juntas.....	18
2.1.4.1	Juntas de sobreposição.....	19
2.1.4.2	Juntas com tiras	20
2.1.4.3	Juntas topo-a-topo.....	21
2.1.4.4	Juntas angulares e de canto.....	21
2.1.5	Aplicações.....	22
2.1.5.1	Indústria aeronáutica.....	22

2.1.5.2	Indústria automóvel.....	23
2.1.5.3	Indústria civil.....	23
2.1.5.4	Indústria naval	24
2.1.5.5	Indústria eletrónica.....	25
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	26
2.2.1	Métodos analíticos	26
2.2.1.1	Análises elásticas lineares bidimensionais.....	27
2.2.1.1.1	Análise Elástica Linear Simples.....	27
2.2.1.1.2	Análise de Volkersen	27
2.2.1.1.3	Análise de Goland e Reissner	29
2.2.1.2	Análise elastoplástica bidimensional	30
2.2.1.2.1	Análise de Hart-Smith	30
2.2.1.2.2	Tensão de cedência generalizada	31
2.2.2	Métodos numéricos	32
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	33
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	33
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	34
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	35
2.2.3	Método dos Elementos Finitos Extendido	36
2.2.4	Estado da arte	36
2.3	Juntas adesivas tubulares	39
2.3.1	Caracterização das juntas adesivas tubulares.....	39
2.3.2	Configurações possíveis de juntas.....	39
2.3.2.1	Juntas topo-a-topo.....	40
2.3.2.2	Juntas de sobreposição.....	40
2.3.2.3	Juntas de chanfro.....	41
2.3.2.4	Juntas de reforço com pré-impregnação.....	42
2.3.2.5	Juntas de ressalto	43
2.3.2.6	Juntas de tira.....	43
2.3.3	Aplicações.....	44

2.3.4	Modelos analíticos disponíveis.....	45
2.3.4.1	Modelo de Nayeb-Hashemi et al.	46
2.3.4.2	Modelo de Pugno e Carpinteri.....	47
3	DESENVOLVIMENTO.....	53
3.1	Descrição do trabalho experimental para validação	53
3.1.1	Geometria das juntas tubulares.....	53
3.1.2	Materiais utilizados.....	54
3.1.2.1	Aderentes.....	54
3.1.2.2	Adesivos.....	55
3.1.2.2.1	Araldite® AV138.....	55
3.1.2.2.2	Araldite® 2015.....	56
3.1.2.2.3	SikaForce® 7752.....	58
3.1.3	Fabrico e ensaio das juntas.....	59
3.1.4	Resultados experimentais.....	60
3.1.4.1	Modos de rotura.....	60
3.1.4.2	Curvas P- δ	61
3.1.4.2.1	Araldite® AV138.....	61
3.1.4.2.2	Araldite® 2015.....	63
3.1.4.2.3	SikaForce® 7752.....	64
3.1.4.3	Resistência das juntas.....	65
3.2	Previsão da resistência.....	67
3.2.1	Pré-processamento do MEF.....	67
3.2.2	Tensões.....	70
3.2.2.1	Forma geral das tensões de arrancamento e de corte.....	70
3.2.2.1.1	Tensões de arrancamento.....	71
3.2.2.1.2	Tensões de corte.....	72
3.2.2.2	Modelo de Nayeb-Hashemi et al.	73
3.2.2.2.1	Tensões de corte.....	73
3.2.2.3	Modelo de Pugno e Carpinteri.....	75

3.2.2.3.1	Tensões de arrancamento.....	76
3.2.2.3.2	Tensões de corte	78
3.2.2.4	MEF	81
3.2.2.4.1	Tensões de arrancamento.....	81
3.2.2.4.2	Tensões de corte	83
3.2.2.5	Comparação de tensões	86
3.2.2.5.1	Tensões de arrancamento.....	86
3.2.2.5.2	Tensões de corte	90
3.2.3	Resistência da junta.....	94
3.2.3.1	Modelo de Nayeb-Hashemi et al.	94
3.2.3.2	Modelo de Pugno e Carpinteri.....	96
3.2.3.3	Tensão de cedência generalizada	101
3.2.3.4	MEF	103
3.2.3.5	Comparação da resistência da junta.....	111
3.2.3.5.1	Araldite® AV138	111
3.2.3.5.2	Araldite® 2015.....	113
3.2.3.5.3	SikaForce® 7752	115
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	119
4.1	Conclusões	119
4.2	Propostas de trabalhos futuros.....	120
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	123

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Atualmente, boa parte do estudo de materiais é realizado no sentido de melhorar as suas propriedades mecânicas de acordo com a sua função e, simultaneamente, diminuir o peso de componentes, desde uma peça de pequenas dimensões como uma placa eletrónica até estruturas de grandes dimensões como uma ponte.

No entanto, independentemente da dimensão da peça/estrutura, esta normalmente necessita de ligações entre os seus componentes, através da utilização de métodos mais tradicionais como por soldadura, brasagem, ligações mecânicas e rebitadas ou, mais recentemente, também por ligações adesivas.

Cada vez mais, as ligações adesivas têm sido aplicadas em diversas indústrias, destacando-se a indústria dos transportes, uma vez que este tipo de ligações oferece inúmeras vantagens, permitindo manter ou melhorar a resistência estrutural e, simultaneamente, reduzir o consumo de combustíveis. Algumas das principais vantagens consideradas para esta aplicação são a leveza da ligação, a distribuição mais uniforme das tensões e a possibilidade de ligar materiais diferentes [1].

Para uma utilização adequada das ligações adesivas é fundamental ser executada uma análise prévia, de forma a verificar o seu desempenho quando estas se encontram sob variadas condições de esforços aplicados e mesmo condições afetas ao meio ambiente, que podem colocar em risco a segurança e o tempo de vida útil, quer das ligações como da estrutura envolvente. A análise experimental é a análise mais exata para avaliar as ligações adesivas, visto que é um processo direto e real onde se verifica o comportamento das mesmas. Porém, é igualmente possível prever o comportamento das ligações por intermédio de métodos analíticos e numéricos. Os métodos analíticos são a forma mais antiga de prever a resistência das ligações, adotando uma formulação de resultados simples, rápida e, na maioria das vezes, fácil de programar num *software* para análise de dados como o Microsoft Excel® e o Matlab®. Em contrapartida, os métodos numéricos são aplicados em ligações com formatos mais complexos, para além de que permitem a obtenção de uma análise mais detalhada, embora tenham um procedimento mais trabalhoso. Estes métodos podem ser processados num *software* como o ABAQUS® [2, 3].

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como finalidade o estudo analítico de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples, com diferentes comprimentos de sobreposição e sujeitas a esforços de tração, por intermédio de três adesivos com propriedades e comportamentos à rotura distintos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) e aderentes de alumínio (AW6082-T651).

Inicialmente são apresentados os resultados experimentais da resistência das juntas tubulares, bem como o seu fabrico, para diferentes adesivos e para diferentes comprimentos de sobreposição.

No estudo analítico objetiva-se a aplicação de três modelos analíticos, de forma a serem obtidos resultados das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) e posteriormente analisados, bem como a resistência da junta através da aplicação de critérios da mecânica dos meios contínuos.

Numa fase posterior, após a descrição e análise detalhada do trabalho experimental e analítico, estes são comparados com resultados numéricos por meio de modelos de dano coesivo (MDC), permitindo verificar o comportamento das juntas adesivas tubulares por uma via experimental e pelos métodos de previsão.

1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, este foi dividido em quatro capítulos. No primeiro capítulo é realizado o enquadramento do trabalho, definidos os objetivos bem como a metodologia da execução do mesmo.

No segundo capítulo é feita a revisão bibliográfica, que engloba na sua generalidade as juntas adesivas. Neste capítulo são abordadas, de uma forma mais pormenorizada, as juntas adesivas e a respetiva caracterização, bem com os métodos analíticos e numéricos fundamentais para a previsão das juntas quando aplicados esforços. São também expostos alguns artigos relevantes e relacionados com a utilização de métodos analíticos, numéricos e experimentais nas juntas adesivas. Uma vez que são o tema central deste trabalho, os métodos analíticos para as juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração são explorados detalhadamente.

O terceiro capítulo está dividido em dois subcapítulos. O primeiro subcapítulo corresponde ao trabalho experimental das juntas adesivas tubulares quando aplicados esforços de tração. Neste subcapítulo, é apresentada a configuração e dimensões das juntas adesivas, assim como as propriedades mecânicas dos aderentes e adesivos em análise. São referidas as diferentes etapas do processo de fabrico e, por último, são apresentados os resultados das curvas $P-\delta$, dos modos de rotura e da resistência das juntas. O segundo subcapítulo é referente à análise da distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} , e

da previsão da resistência da junta, por intermédio de três modelos analíticos e um método numérico baseado no MEF. Posteriormente, são comparados os resultados obtidos pelos métodos analíticos com os resultados obtidos pelos métodos numéricos e, seguidamente, com a resistência da junta obtida experimentalmente, e retiradas conclusões acerca da aplicabilidade dos métodos analíticos estudados.

No quarto capítulo são apresentadas as conclusões retiradas após o desenvolvimento do trabalho, assim como é realizada referência a possíveis trabalhos futuros, de forma a complementar o estudo realizado das juntas adesivas tubulares.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo é inicialmente dedicado à exposição da temática relativa às juntas adesivas. É realizada a caracterização das juntas adesivas, tanto como as suas vantagens e desvantagens e aplicações.

De forma a verificar o desempenho e fiabilidade das juntas adesivas, é fundamental a utilização de métodos analíticos assim como métodos numéricos, para a sua análise quando é aplicada um carregamento, simulando uma aplicação real ou a verificação de um trabalho experimental. Posto isto, neste capítulo são explorados os dois tipos de métodos mencionados, com maior relevância os métodos analíticos.

Numa fase final do capítulo, são abordadas exclusivamente as juntas adesivas tubulares, atendendo que é a geometria no qual são analisados os estudos analíticos. Neste ponto, é aprofundado com mais rigor este tipo de juntas adesivas, bem como os métodos analíticos existentes e possíveis de ser usados.

2.1 Ligações adesivas

Desde os mais longínquos tempos, as ligações adesivas têm sofrido uma enorme evolução e aumentado a sua eficiência. Há pelo menos 70 000 anos, foram criados os primeiros adesivos compostos no sul da África, usados para prender segmentos de pedra de formato semelhante a cabos, utilizados para criar armas e ferramentas. Estes adesivos eram compostos essencialmente por barro vermelho misturado com resina. Para além dos nativos terem sido pioneiros na colagem destes materiais, também deliberadamente efetuaram transformações físicas envolvendo mudanças químicas de pH ácido para menos ácido, desidratação do adesivo perto de fogueiras e mudanças na capacidade de trabalho mecânico e forças eletrostáticas [4, 5].

Após esta descoberta, as ligações adesivas foram desenvolvidas até aos tempos mais atuais, tendo sido, desde o início do século XX, a indústria aeronáutica a principal responsável por este progresso. Primeiramente, as aeronaves projetadas usavam adesivos baseados em caseína, um material polimérico natural derivado do leite. Os adesivos apresentavam bom desempenho. Porém quando se encontravam em ambientes húmidos tinham a particularidade de se tornar bastante fracos, para além de que exalavam odores bastante desagradáveis [6].

As desvantagens evidenciadas pelos adesivos à base de caseína potenciaram a introdução de adesivos sintéticos poliméricos nos anos 40. Embora alguns adesivos

tenham sido concebidos inicialmente (nitrilo-fenólico, vinilo-fenólico, acrílico e poliuretano), o adesivo à base de epóxido foi estabelecido como ponto de referência mais importante. As resinas de epóxido foram descobertas no final da década de 1930. As primeiras resinas sintetizadas foram produzidas por Pierre Castan na Suíça em 1936, quando se encontrava a trabalhar para um fabricante de produtos dentários, fazendo variadas tentativas, embora infrutíferas, de comercializar produtos como resinas de fundição para uso dentário. No entanto, a resina de epóxido continuou a ser desenvolvida, até ao seu lançamento em 1946. Os adesivos epóxidos obtiveram rápido sucesso em aplicações aeroespaciais, automóveis, de construção e eletrónicas, devido à sua facilidade de utilização, versatilidade e propriedades mecânicas, destacando-se a excelente resistência à tração e ao corte, apesar de uma fraca resistência ao arrancamento [1].

No início dos anos 40 foram comercializados os adesivos à base de resol fenólico, nitrilo-fenólico e vinilo-fenólico, os adesivos acrílicos modificados e os de poliuretano. Estes adesivos foram colocados no mercado anteriormente aos adesivos epóxidos, sendo os adesivos pioneiros dentro da categoria dos poliméricos.

As resinas fenólicas destacam-se pela sua boa resistência ao colar e boa estabilidade dimensional. Os adesivos nitrilo-fenólicos possuem a melhor resistência a temperaturas elevadas (até 150°C) dentro do grupo dos fenólicos, bem como uma boa resistência ao impacto, o que permite a sua utilização essencialmente na indústria aeronáutica, automóvel tanto como na sapataria e mobiliário. Relativamente aos adesivos vinilo-fenólicos, estes proporcionam um excelente desempenho, nomeadamente na resistência ao corte e arrancamento, tornando assim estes adesivos os melhores para o uso com metais [6, 7].

Os adesivos acrílicos são baseados em monómeros de acrilato e metacrilato. Estes produtos são fornecidos como dois componentes separados. Tradicionalmente, os metacrilatos são preferidos aos acrilatos devido principalmente ao odor dos acrilatos. Os adesivos acrílicos estruturais mais populares e bem-sucedidos em uso atualmente, são as misturas polimerizáveis de polímeros dispersos ou dissolvidos em metacrilato de metila (MMA) [8].

No que diz respeito aos adesivos de poliuretano, estes oferecem características únicas devido à grande variação nas propriedades físicas por intermédio da modificação da sua estrutura química. Estes adesivos podem apresentar-se totalmente sólidos ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes. Quando são dissolvidos num solvente de uma parte, eliminam a necessidade de equipamentos de mistura, sendo recomendados para aplicações de uso geral. No entanto, quando os adesivos são dissolvidos num solvente de duas partes, estes são mais amplamente usados em aplicações estruturais devido às melhores propriedades mecânicas [9].

O avanço mais importante nos adesivos ocorreu no início dos anos 70 com a introdução de modificadores de borracha à base de butadieno de Goodrich. Estes modificadores

transformaram o desempenho dos adesivos epóxicos e acrílicos, adicionando resistência ao impacto e à fadiga e aumentado a durabilidade dos adesivos, um problema que já era reconhecido há décadas, sem comprometer as características de desempenho existentes [1].

É reconhecido que a evolução das ligações adesivas é evidente, permitindo o seu uso mais comum em inúmeras áreas da indústria e, mais recentemente, na medicina. As boas propriedades mecânicas aliadas ao seu baixo peso são fatores preponderantes que permitiram a sua utilização a uma escala mundial.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Considera-se um adesivo, um material polimérico que, quando aplicado em várias superfícies (aderente) permite a sua aderência e resiste à sua separação quando é submetido a esforços externos. A região entre o adesivo e o aderente é denominada interfase. Esta região é considerada como um revestimento com características químicas e físicas diferentes do adesivo e do aderente. Dentro desta região, o plano de contacto entre o adesivo e o aderente é designado por interface. Na Figura 1 está ilustrada uma junta adesiva.

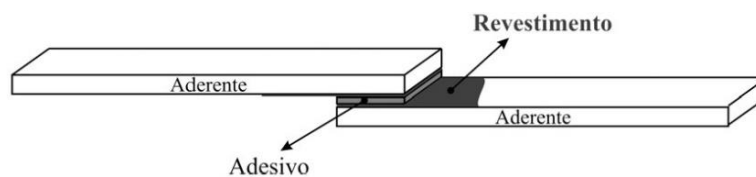


Figura 1 - Disposição de uma junta adesiva [10]

Tal como o nome adesivo indica, este deriva da adesão. A adesão é a atração entre duas moléculas/átomos de diferentes substâncias (adesivo/aderente), resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas. A adesão oferece a capacidade de ter estruturas maiores do que poderia ser feito ou transportado como uma única unidade. Ao combinar várias estruturas mais pequenas, a estrutura resultante adquire características úteis de cada constituinte, frequentemente tornando o todo maior do que a soma das partes. A união permite o fabrico de estruturas eficientes, leves, abertas, com propriedades e desempenho adequados à utilização pretendida [6, 11].

Das principais características atribuídas à técnica de ligações adesivas destacam-se uma maior superfície de contacto entre os aderentes e, conseqüentemente uma distribuição de tensões mais uniforme, o que resulta numa maior resistência à fadiga em comparação com os métodos tradicionais de união mecânica, como soldadura, rebiteagem e outros métodos de fixação [6, 12].

Além disso, são realçadas outras vantagens da utilização de juntas adesivas em relação às tecnologias de união tradicional, como a redução de distorções, sobretudo na união

de peças muito finas e de precisão, a viabilidade de fabricação de juntas de diferentes materiais, a não necessidade de furos, parafusos e marcas de soldagem e a redução de peso. Contudo, as juntas adesivas apresentam algumas desvantagens, nomeadamente a baixa resistência a baixas e altas temperaturas, trabalho e vida útil curtos, baixa resistência ao arrancamento e a necessidade de preparações de superfícies. Deste modo, são elucidadas na Tabela 1 as vantagens e desvantagens dos adesivos, de forma sintetizada [13].

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [1, 14]

Vantagens	Desvantagens
Distribuição mais uniforme de tensões sobre a área de superfície	Cuidada preparação das superfícies
Melhoria da resistência à fadiga	Podem ser necessários longos períodos de cura
Elevada capacidade de amortecimento de vibrações	Pode ser necessárias temperatura e pressão para o processo de cura
Boa resistência à corrosão	Temperatura de trabalho geralmente limitada a 177°C
Permitem ligar e vedar simultaneamente	Utilização de ferramentas de fixação
Permitem ligar diferentes formas e superfícies irregulares, bem como materiais similares ou diferentes	Fraca resistência aos esforços de arrancamento e de clivagem em comparação com outros tipos de ligações
Capacidade de ligar aderentes sensíveis ao choque	Fraca resistência à propagação de fissuras de alguns adesivos
Apresentam contornos/acabamentos suaves	Tempo de vida útil limitado quando sujeitas a condições extremas (temperatura e humidade)
Promovem o isolamento acústico	Considerações ambientais, de segurança e saúde importantes a ter em conta
Apresentam um ótimo rácio resistência-peso	Controlo de qualidade de difícil execução
Rapidez de aplicação	Desmontagem difícil ou mesmo impossível
Ligações mais económicas	

O desempenho de uma junta adesiva depende de muitos fatores, envolvendo fatores externos, como temperatura, humidade e carga, bem como o próprio adesivo e o aderente. Geralmente, o tipo de adesivo inclui resinas que devem ser aplicadas de acordo com as características do material do aderente, e a sua formulação deve ser elaborada de acordo com sua aplicação. Após ser definido o adesivo apropriado ao uso, a realização de um pré-tratamento adequado para a superfície do aderente e a otimização dos parâmetros da estrutura adesiva podem melhorar ainda mais a resistência de união [15].

2.1.2 Tipos de esforços aplicados em juntas adesivas

Quando é concebida uma junta adesiva, é fundamental garantir a distribuição da carga por toda a área da junta, de forma que sejam minimizadas as concentrações de tensões. Tais tensões podem-se diferenciar em cinco tipos, nomeadamente tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento, ilustradas na Figura 2. É de salientar que as juntas adesivas são mais resistentes quando sujeitas maioritariamente a esforços de tração, compressão ou de corte, e menos resistentes quando sujeitas a esforços significativos de clivagem e arrancamento [16].



Figura 2 - Tipos de esforços aplicados em juntas adesivas [16]

2.1.2.1 Esforços de tração

É aplicado um esforço de tração quando as forças exercidas atuam perpendicularmente ao plano da junta adesiva e são distribuídas uniformemente por toda a área da junta. No entanto, podem ocorrer elevadas tensões nos extremos do adesivo, fazendo com que a carga se torne desproporcional. Num primeiro momento, surge uma pequena fenda numa área mais fraca dos extremos da junta e, posteriormente, esta propaga-se até à rotura total da junta adesiva. Este efeito está representado na Figura 3 [14].

Contudo, a possibilidade de rotura do adesivo é minimizada quando a junta adesiva é concebida corretamente, garantindo dois fatores relevantes: a utilização de guias no fabrico da junta de forma a garantir um carregamento perfeitamente axial e a aplicação

de aderentes rígidos permitindo que a tensão fique uniformemente distribuída por toda a área do adesivo [6].

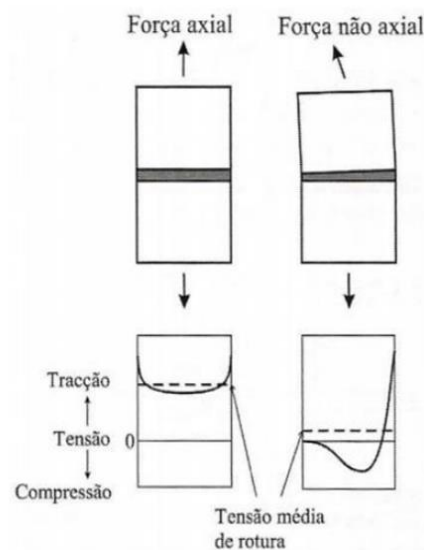


Figura 3 - Distribuição da tensão numa junta topo a topo sob carregamento axial e não axial [6]

2.1.2.2 Esforços de compressão

As forças de compressão apresentam características semelhantes às forças de tração (Figura 4), embora atuem em sentido oposto, ou seja, a compressão de um aderente contra o outro. Deste modo, é importante manter estas forças alinhadas com o propósito de o adesivo permanecer em compressão pura, apresentando a junta uma probabilidade inferior de falhar do que quando carregada sob outro tipo de esforço. No entanto, as juntas adesivas sujeitas à compressão tem aplicações bastante limitadas [6, 14].

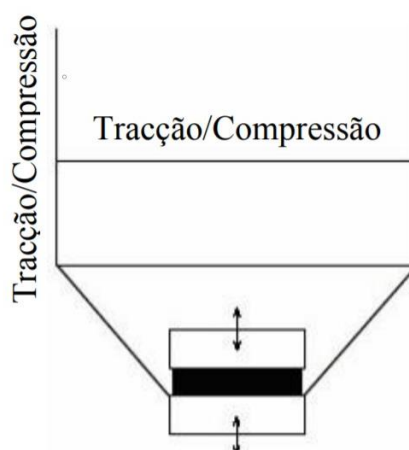


Figura 4 - Distribuição de tensões em esforços de compressão/tração numa junta adesiva [17]

2.1.2.3 Esforços de corte

As tensões de corte ocorrem quando são aplicadas forças no plano de adesão dos aderentes, provocando o escorregamento dos mesmos. Este tipo de esforço permite uma transmissão de esforços mais uniforme em toda a área colada da junta, tornando-a mais resistente a possíveis falhas. Este é um dos principais motivos que conduz à preferência de esforços de corte nas juntas adesivas, em detrimento os outros tipos de esforços. Outro motivo para tal preferência é a facilidade com que é possível alinhar os aderentes [7, 14].

Na Figura 5 é possível verificar que, nas juntas sujeitas a esforços de corte, há uma prevalência de concentração de tensões nas extremidades da sobreposição, enquanto a zona central da junta tem uma baixa contribuição na sustentação da força exercida devido ao efeito da deformação diferencial dos aderentes ao longo da ligação [6].

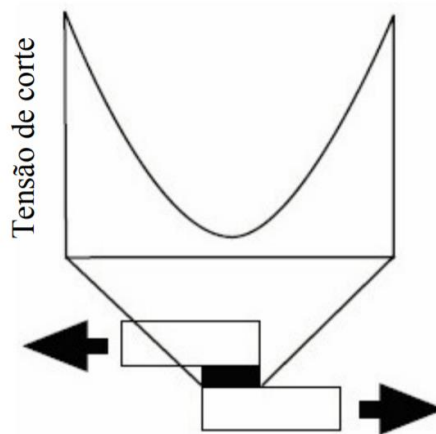


Figura 5 - Distribuição de tensões numa junta adesiva sujeita ao corte [17]

2.1.2.4 Esforços de clivagem

A clivagem ocorre quando são aplicadas forças de tração na extremidade de uma junta rígida, de forma a separar os aderentes. Este tipo de esforço deve ser evitado sempre que possível, uma vez que a tensão fica reduzida a uma área muito pequena, tornando a junta adesiva mais propícia à rotura.

A Figura 6 representada a distribuição de tensão de uma junta adesiva sujeita a esforços de clivagem. Tal como é possível verificar, a tensão não é distribuída uniformemente, sendo concentrada na extremidade da junta na qual é aplicada a força. Para contrariar este efeito, é necessário que a junta tenha uma área suficientemente grande de forma a suportar os esforços exercidos, o que aumenta os custos da junta adesiva [7].

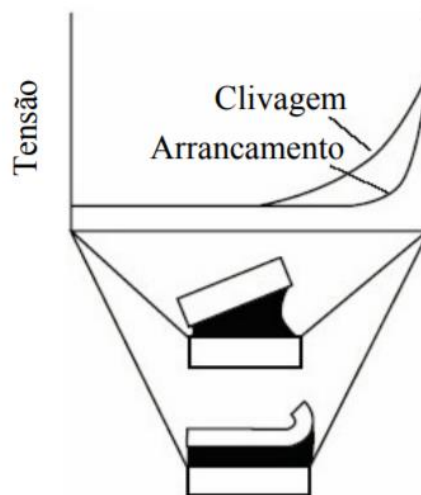


Figura 6 - Distribuição das tensões numa junta adesiva sujeita a esforços de clivagem e arrancamento [17]

2.1.2.5 Esforços de arrancamento

As tensões de arrancamento são semelhantes às tensões de clivagem, tendo a particularidade de que pelo menos um dos aderentes é flexível. Assim, o ângulo de separação entre os dois aderentes é superior para arrancamento do que para clivagem.

Tendo em conta que pelo menos um dos aderentes é flexível, a tensão é exercida sobre uma área de ligação maior que quando a junta é sujeita a clivagem, permitindo que a resistência da junta seja também maior. A tensão exercida quando são aplicados esforços de arrancamento é superior à tensão exercida sob esforços de clivagem, tal como é verificado a partir da Figura 6.

2.1.3 Modos de rotura possíveis em juntas adesivas

As juntas adesivas podem estar sujeitas a várias solicitações (estáticas e/ou dinâmicas), bem como a diferentes condições ambientais como a humidade e temperatura. Desse modo, é crucial que sejam analisadas variadas características das juntas de forma a que estas tenham o melhor desempenho [6].

Uma característica importante é o modo de rotura do adesivo, que é fundamental para uma melhor compreensão das causas da falha nas juntas adesivas. Na Figura 7 são representados os quatro modos principais de rotura numa junta adesiva: adesiva, coesiva, pelo aderente e mista.

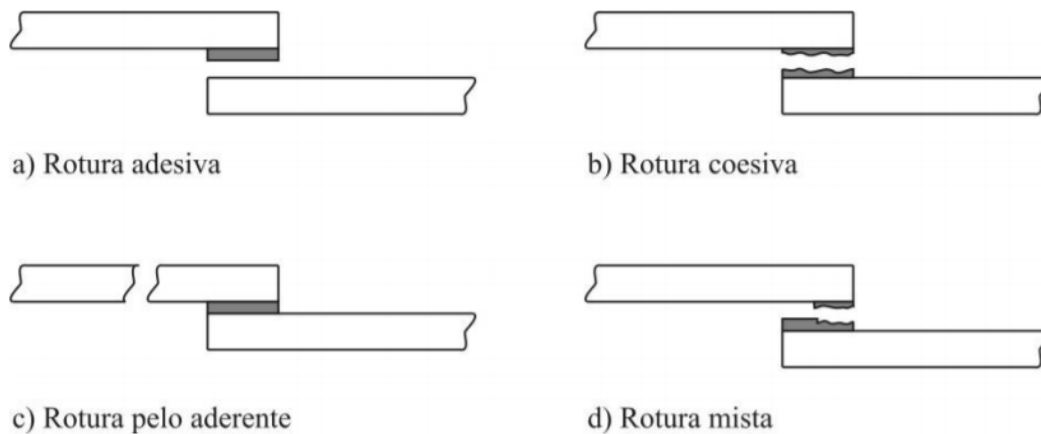


Figura 7 - Modos de rotura possíveis em juntas adesivas [17]

2.1.3.1 Rotura adesiva

As falhas por adesão ocorrem quando há a separação entre o adesivo e os aderentes na interface. A rotura adesiva é caracterizada pela ausência de adesivo numa das superfícies de colagem. As falhas de adesão devem-se essencialmente à hidratação das ligações químicas que formam a ligação entre o adesivo e o aderente na superfície, existindo três causas para esta situação: a falha na remoção dos contaminantes dos adesivos, a utilização de uma técnica inadequada de preparação de superfícies e um ciclo de cura ineficaz [18]. Tendo em consideração as causas enunciadas que provocam a rotura adesiva, por norma qualquer falha ocorrida é consequência do processo de fabrico aplicado incorretamente. No entanto, outras causas (tensões de arrancamento devido a cargas operacionais, fadiga, fluência adesiva) podem ser atribuídas a esta falha, embora que não sejam a causa principal [18, 19].

2.1.3.2 Rotura coesiva

A rotura coesiva ocorre por fratura interna do adesivo, pelo facto de que a resistência interna do adesivo é inferior à resistência estabelecida entre os aderentes e entre aderentes e adesivo. A rotura coesiva é caracterizada pela presença nítida de material adesivo nas faces correspondentes de ambos os aderentes. A rotura acontece geralmente quando são aplicadas tensões de corte, porém um esforço de arrancamento ou mesmo a combinação destes dois efeitos também causa uma falha de coesão na junta. As falhas de coesão são causadas por tensões excessivas de arrancamento e por uma possível porosidade excessiva do adesivo [18, 19].

2.1.3.3 *Rotura pelo aderente*

A rotura pelo aderente verifica-se nas ligações adesivas bem concebidas em aderentes finos. Este é o modo de rotura ideal, uma vez que permite o total desempenho estrutural dos aderentes a serem utilizados. Atendendo que o adesivo tem uma maior resistência aos esforços aplicados do que os aderentes, então apenas é necessário testar a resistência dos aderentes de forma a garantir a integridade estrutural, permitindo assim a simplificação do dimensionamento da ligação adesiva [18].

2.1.3.4 *Rotura mista*

Quando ocorre a combinação entre a rotura adesiva e coesiva, esta é chamada de rotura mista. A rotura mista deve-se essencialmente à limpeza incorreta numa região das superfícies a ligar, ou por defeito do próprio adesivo [17].

2.1.4 *Configurações possíveis de juntas*

A conceção de uma junta adesiva resulta da configuração da mesma, que depende da natureza dos aderentes, principalmente da sua geometria. A geometria das juntas depende igualmente tipo de carga a que serão sujeitas. Para isso, a junta adesiva ideal é aquela em que sempre que um esforço é solicitado num adesivo, é aplicado na direção em que o mesmo tenha maior resistência à rutura [20].

Algumas configurações de juntas podem ser inviáveis, dispendiosas ou até mesmo de difícil execução para se obter um bom alinhamento. Estes fatores são fundamentais para que seja concebida uma junta adesiva de forma a alcançar o melhor desempenho. As configurações mais comuns de juntas são divididas em cinco ramos: juntas de sobreposição, juntas com tira, juntas topo-a-topo, juntas angulares e de canto e juntas tubulares. As configurações de juntas mais comuns são as juntas de sobreposição simples e dupla, e as juntas tubulares de sobreposição simples [14].

As configurações mais comuns de juntas adesivas estão apresentadas na Figura 8. De salientar que as juntas tubulares são descritas no subcapítulo 2.3.

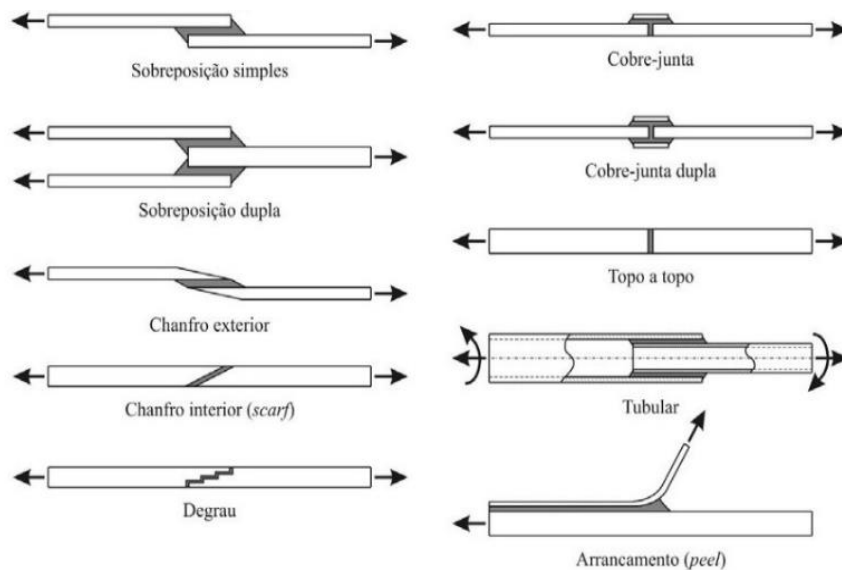


Figura 8 - Configurações mais comuns de juntas adesivas [6]

2.1.4.1 Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição são as mais habitualmente utilizadas, uma vez que são de simples execução, aplicáveis em aderentes finos e a sua junta está sujeita predominantemente a esforços de corte. No entanto, estas juntas tem uma limitação quando é solicitada à tração. Como existe um desalinhamento entre os aderentes, é provocado um momento fletor na junta, originando esforços de clivagem nas extremidades da junta [14]. Estas mesmas forças afetam a estabilidade da junta, tal como é exibido na Figura 9.

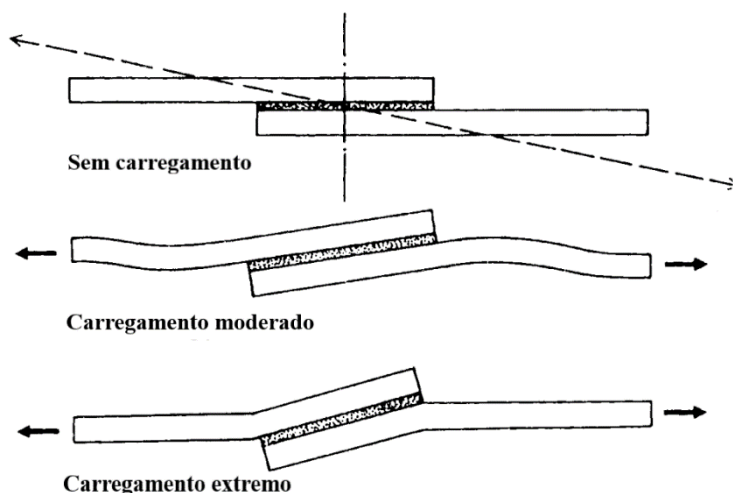


Figura 9 - Ação do desalinhamento de planos numa junta de sobreposição simples [14]

De forma a atenuar este efeito, podem ser utilizadas outras geometrias como as juntas de sobreposição dupla, com chanfros, entre outros, em detrimento das juntas de

sobreposição simples. Nestas configurações de juntas, exibidas na Figura 10, os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores, porém a fabricação é mais morosa [14].

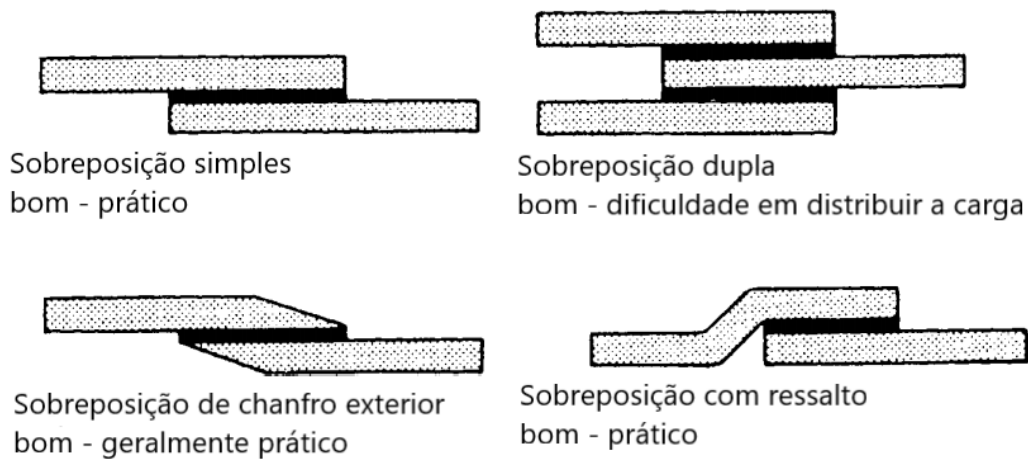


Figura 10 - Configurações das juntas de sobreposição [14]

2.1.4.2 Juntas com tiras

As juntas com tira mantêm as tensões de corte alinhadas. Estas juntas são também geralmente utilizadas em locais onde as juntas de sobreposição são difíceis de aplicar devido à espessura do aderente. Numa junta com tira simples, quando são aplicados esforços de flexão, esta tem tendência a sofrer clivagem. Já as juntas com tira dupla resistem, com maior facilidade, a esforços de flexão, e têm uma melhor distribuição de tensões em toda a superfície colada [14]. As variadas configurações de junta com tira são representadas na Figura 11.

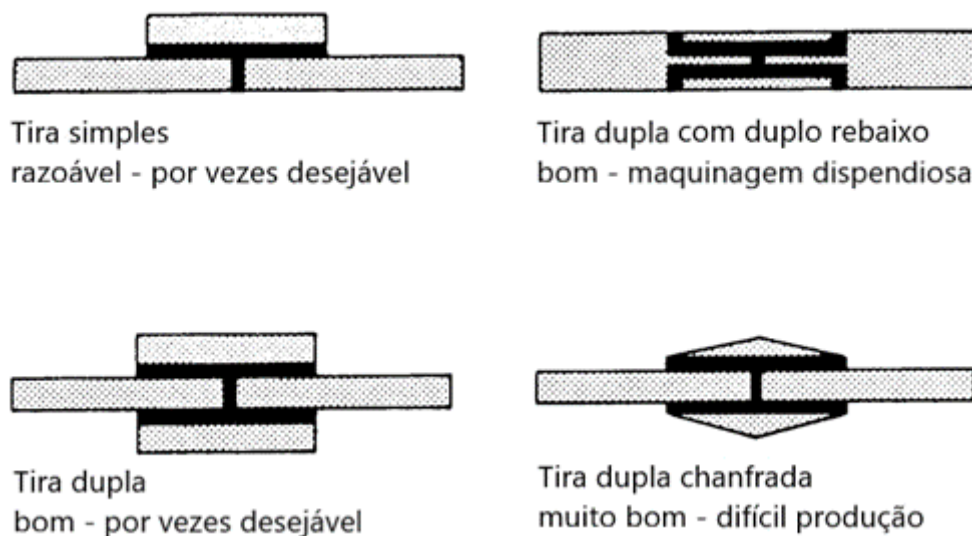


Figura 11 - Configurações das juntas com tira [14]

2.1.4.3 Juntas topo-a-topo

As juntas topo-a-topo são as juntas mais simples de serem fabricadas, pois simplesmente representam a união de duas partes pelos seus topos. Todavia, são bastante sensíveis a esforços de flexão, visto que o adesivo é sujeito a esforços de clivagem. Geralmente, as juntas topo a topo não são recomendadas para aplicações onde a área de superfície disponível é inferior a 12-25 mm. Este tipo de configuração é evitado em aplicações reais, porém, como procedimento de teste, é útil na avaliação do desempenho da junta sujeita a clivagem [7, 10]. Posto isto, são representadas algumas formas de disposição de juntas topo-a-topo na Figura 12.

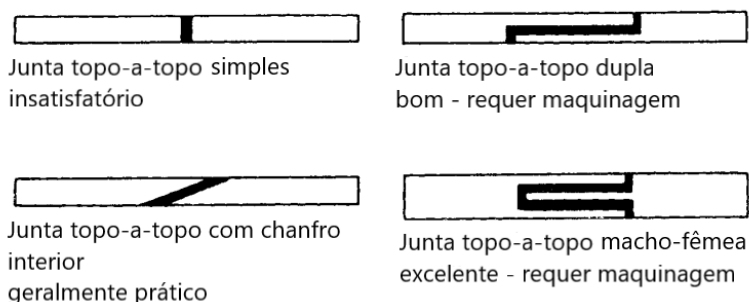


Figura 12 - Configurações de juntas topo-a-topo [14]

2.1.4.4 Juntas angulares e de canto

Nas juntas de canto, apresentadas na Figura 13, os aderentes normalmente estão orientados perpendicularmente entre si ($\theta=90^\circ$). No entanto, também é possível verificar algumas disposições em que o ângulo é diferente do referido. Nesta disposição, podem ser aplicadas esforços de tração ou transverso. Quando sujeita a esforços de tração, a junta apresenta uma menor resistência. Porventura, quando aplicado um esforço contrário, à compressão, a junta dificilmente se deforma, exceto quando há encurvadura no aderente. Quando as juntas fazem duplo ângulo reto, esta é chamada de junta em T, tal como é exemplificado na Figura 14 [14, 21].

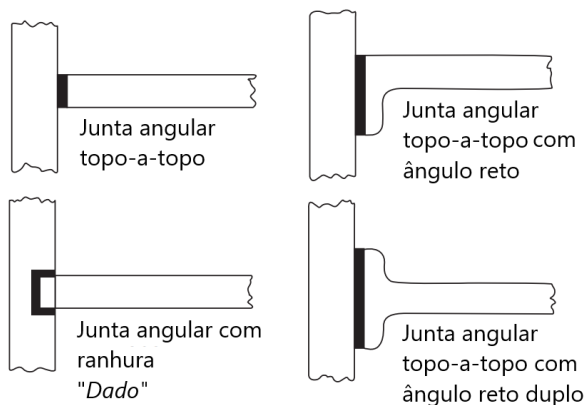


Figura 13 - Configurações de juntas angulares [7]

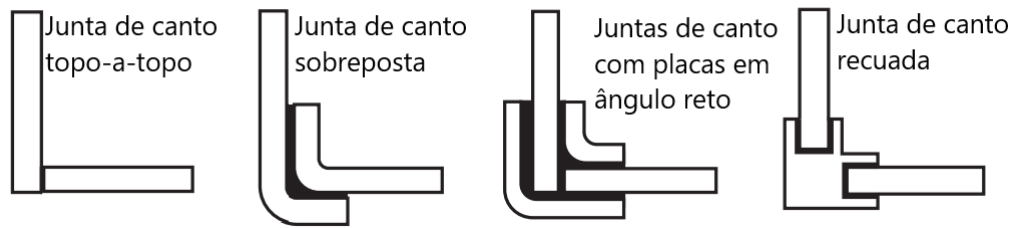


Figura 14 - Configurações de juntas de canto [7]

2.1.5 Aplicações

As ligações adesivas têm extrema importância em diversos setores da indústria, principalmente na indústria aeronáutica, automóvel, civil, naval, eletrônica, têxtil, mobiliária e do calçado. Atualmente, as ligações adesivas têm uma grande parte da sua utilização na indústria aeronáutica e automóvel, visto que possuem as características ideais para a sua aplicação. Inicialmente, estas até foram desenvolvidas substancialmente pela indústria aeronáutica [6].

2.1.5.1 Indústria aeronáutica

Como já foi mencionado anteriormente, a indústria aeronáutica foi pioneira na aplicação de ligações adesivas ao metal, em detrimento dos rebites que são pontos de fraqueza onde se podem formar fissuras por fadiga no metal. A aplicação deste tipo de ligações permite manter a integridade da estrutura, mesmo diminuindo o seu peso, e uma melhor resistência à fadiga. Estes atributos são críticos para a indústria aeroespacial e são responsáveis pela sua utilização extensiva em ligações estruturais. Atualmente, os adesivos são utilizados para unir as partes mais críticas em aviões e helicópteros, tanto de uso comercial como de uso militar, naves espaciais, mísseis, satélites, entre outros [22, 23]. A Figura 15 ilustra as aplicações de ligações adesivas num avião.



Figura 15 - Aplicação das ligações adesivas num avião [24]

2.1.5.2 Indústria automóvel

Os adesivos são aplicados na indústria automóvel desde os seus primórdios, com a utilização de resinas naturais para colar a madeira e outros componentes. Mais recentemente, devido à preocupação em reduzir o peso dos automóveis, de forma a diminuir o seu consumo e aumentar a velocidade, foram introduzidos materiais leves. Contudo, surgiram dificuldades em unir estes materiais através dos métodos tradicionais de ligação. Deste modo, foram introduzidos os adesivos poliméricos que, mesmo mantendo o equilíbrio entre os materiais, possibilitam a diminuição do peso tanto da ligação como da estrutura em si [6].

Para que as juntas adesivas apresentem o melhor desempenho na indústria automóvel, é fundamenta cumprir vários requisitos, tais como a eficiência na aplicação dos adesivos, o acabamento do próprio adesivo na superfície, os tempos de curas segundo as condições de pressão e temperatura, a capacidade de resistir a esforços aplicados e o risco mínimo na segurança para a saúde pública [23]. Na Figura 16, é exemplificado um automóvel no qual são aplicadas de ligações adesivas.



Figura 16 - Aplicação das ligações adesivas num automóvel [25]

2.1.5.3 Indústria civil

Uma grande percentagem dos adesivos utilizado na indústria civil e na construção é aplicada na fixação de materiais de acabamento decorativo ao interior de edifícios. Referem-se como exemplos, a fixação de ladrilhos cerâmicos e mosaicos para pavimentos e paredes, revestimentos de madeira e pavimentos flexíveis, materiais de isolamento térmico, folheados de parede, *covings*, *nosings*, entre bastantes outras aplicações. Apenas uma pequena parte dos adesivos é utilizada em situações externas,

como na Figura 17, onde os esforços e as condições aplicadas nas estruturas são mais severas, aumentando assim as exigências no adesivo a utilizar.

Em geral, na indústria civil, é necessário ter em conta a vida útil da estrutura e o seu envelhecimento de acordo com as condições atmosféricas, para que seja realizada uma conceção segura [21, 22].



Figura 17 - Aplicação de ligações adesivas numa ponte [21]

2.1.5.4 *Indústria naval*

A indústria naval engloba uma vasta gama de estruturas, desde pequenas embarcações, ilustradas na Figura 18 a plataformas petrolíferas. Abrange também pequenos estaleiros navais, grandes instalações de montagem de barcos em linha de produção e plataformas navais. Muitas destas estruturas utilizam grandes quantidades de adesivos, sendo maioritariamente usados em compósitos reforçados. A utilização de adesivos, em substituição de ligações metálicas, oferece as propriedades desejadas de leveza e distribuição de tensão reduzindo, de certa forma, os problemas de corrosão galvânica e os custos de fabrico [21, 26].

Para a escolha do adesivo correto para esta aplicação é fundamental ter em conta múltiplos fatores, tais como, condições de armazenamento e processamento, espessura da ligação, geometria, presença de defeitos difíceis de detetar, e finalmente o comportamento ao longo da vida útil no ambiente marinho (temperatura, humidade, água salgada) [27].



Figura 18 - Aplicação de ligações adesivas num barco [21]

2.1.5.5 Indústria eletrónica

Na indústria elétrica existem mais de 50 000 adesivos diferentes, podendo ser classificados em duas categorias: condutores ou isolantes. Os adesivos condutores são geralmente utilizados para unir outros adesivos condutores num circuito elétrico. Já os adesivos isolantes são utilizados para a proteção de circuitos abertos. Os adesivos isolantes destacam-se pela baixa condutividade térmica e elétrica, para além de uma boa flexibilidade [1, 21].

As ligações adesivas apresentam inúmeras vantagens, o que satisfaz a maioria dos requisitos necessários na indústria eletrónica: processos automáticos de aplicação ultrarrápida com a máxima precisão, tendência crescente para a diminuição de tamanho das peças, posicionamento e fixação dos componentes durante os processos de solda, utilização substituta da soldadura quando esta não é viável, bem como a resistência mecânica e resistência à fadiga num alargado intervalo térmico. A Figura 19 exemplifica a aplicação de ligações adesivas num componente eletrónico [1].

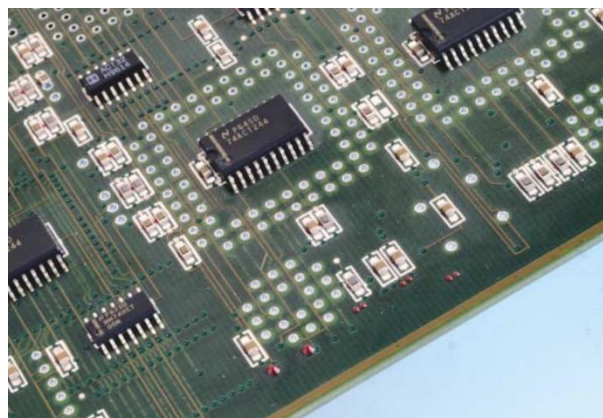


Figura 19 - Aplicação de ligações adesivas num componente eletrónico [28]

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

A tecnologia adesiva é amplamente utilizada e estudada em diferentes campos. As juntas adesivas têm boas propriedades para a união de materiais, no entanto, são geralmente a parte mais vulnerável de um sistema estrutural. O facto de ser a zona mais frágil numa estrutura dificulta a sua aplicação em situações críticas de segurança devido a uma falta geral de confiança na previsibilidade da resistência dessas juntas. Os vários modos de falha podem resultar de pré-tratamentos de superfície inadequados, níveis variáveis de cobertura adesiva, espessura variável da linha de ligação, bem como tensões máximas não uniformes, que levam à falha catastrófica [11, 29].

Devido às condicionantes na utilização de juntas adesivas, é fundamental realizar um estudo prévio das mesmas para que estas não sejam sobredimensionadas, resultando em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, mas que também não se encontrem subdimensionadas, colocando em risco a segurança e o tempo de vida das juntas. Para isso, foram desenvolvidos vários tipos de análise que podem ser utilizados de forma a prever a resistência de uma junta adesiva.

Para esta mesma previsão, é fundamental ter em conta a distribuição de tensões e o critério de falha adequado, assim como a complexidade da estrutura e, conseqüentemente, da junta adesiva. Quando a junta tem uma geometria simples e é necessário obter uma resposta rápida e fácil, é aplicada uma análise através de métodos analíticos. Contudo, quando a complexidade da junta aumenta, é fundamental o uso de métodos numéricos [30].

2.2.1 Métodos analíticos

Os métodos analíticos têm como principal requisito descrever o estado de tensão e deformação numa junta através de um conjunto de equações diferenciais, podendo ser divididos em três tipos de análises: elásticas lineares bidimensionais, elastoplásticas bidimensionais e tridimensionais. Referente às análises elásticas lineares bidimensionais foram desenvolvidos diversos trabalhos, sendo pioneiros os de Volkersen [31] em 1938 e Goland e Reissner [32] em 1944. Estes trabalhos são relativos à análise clássica. Na análise elastoplástica bidimensional refere-se o trabalho de Hart-Smith [33] realizado em 1973 e o trabalho de Adams e al. [34] em 1997, que utilizaram o conceito de tensão de cedência generalizada [35].

Para além das análises mencionadas anteriormente, existem outras que, embora complexas, não são descritas, tais como as análises que estudam a tensão de corte nula na extremidade da junta, a tensão de corte e transversal (no sentido da espessura) nos aderentes.

Tendo em conta os três tipos de análises, é fundamental realçar que há uma maior predominância das análises lineares elásticas bidimensionais. Uma vez que as tensões exercidas ao longo de toda a largura da junta adesiva são consideravelmente mais baixas que as tensões exercidas na direção dos esforços aplicados, as análises bidimensionais são suficientes para o estudo das juntas adesivas. As análises lineares elásticas são aplicadas em detrimento das análises elastoplásticas, pelo facto de que a não linearidade do material torna a solução mais complexa.

2.2.1.1 Análises elásticas lineares bidimensionais

2.2.1.1.1 Análise Elástica Linear Simples

É a análise mais simples, porém, a mais limitada para a obtenção das tensões numa junta de sobreposição simples (Figura 20). Nesta análise, é considerado que o adesivo apenas se deforma em corte e que os aderentes são rígidos. A tensão de corte no adesivo (τ) é dada por:

$$\tau = \frac{P}{bl}, \quad (2.1)$$

em que P corresponde à força aplicada, b à largura da junta e l ao comprimento de sobreposição.

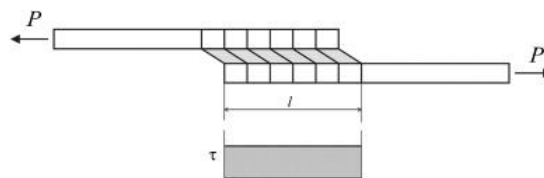


Figura 20 - Tensão de corte numa junta de sobreposição simples: análise mais simples [36]

O valor para τ pode ser interpretado como a tensão de corte média a atuar sobre a camada adesiva. Esta análise é pouco objetiva, visto que é demasiado simplificada. No entanto, é utilizada habitualmente no cálculo das tensões de corte em situações de teste, como nas normas ASTM e ISO [36].

2.2.1.1.2 Análise de Volkersen

A análise de Volkersen, ilustrada na Figura 21, introduziu o conceito de corte diferencial. Nesta análise é assumido que o adesivo apenas se deforma em corte, mas que os aderentes podem-se deformar longitudinalmente com a tensão gerada pela carga P , conforme representado na Figura 22, por serem considerados elásticos e não rígidos [36].

A força aplicada no aderente superior é máxima em A e reduz progressivamente até um valor nulo em B. A redução da deformação nos aderentes ao longo da sobreposição e a

continuidade da interface adesivo/aderente causa uma distribuição não uniforme da tensão de corte e axial na camada adesiva: a tensão de corte é máxima nas extremidades da sobreposição e é muito menor no meio, conforme exposto na Figura 23.

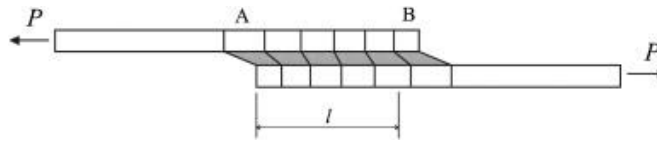


Figura 21 - Deformações em juntas de sobreposição simples carregadas com aderentes elásticos [36]

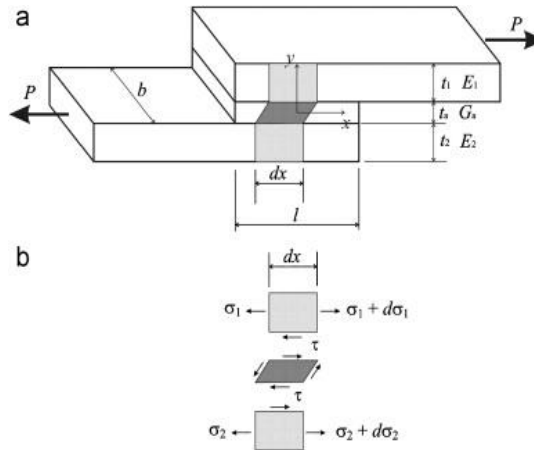


Figura 22 - Junta de sobreposição simples analisada por Volkersen: (a) geometria e (b) diagrama elementar [30]

Porém esta análise não leva em conta o efeito de flexão causado pela aplicação excêntrica da força numa junta de sobreposição simples, devido à geometria não simétrica deste tipo de junta. Como tal, este método é mais adequado para ser utilizada uma junta de sobreposição dupla contrariamente à junta de sobreposição simples, pois a curvatura dos aderentes não é tão significativa [30].

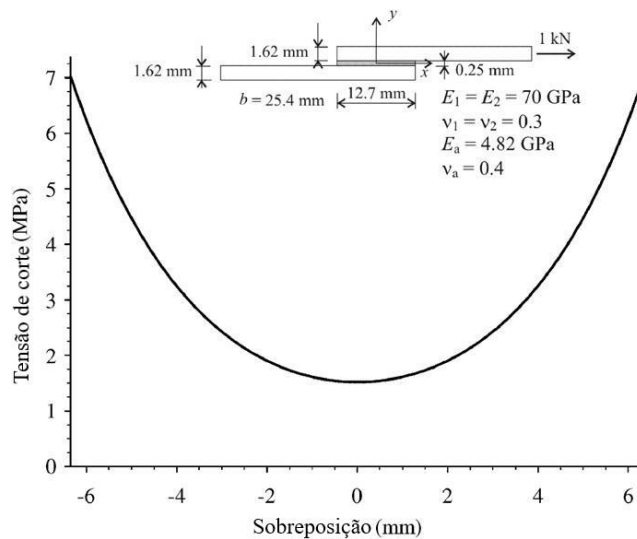


Figura 23 - Distribuição da tensão de corte do adesivo de Volkersen para aderentes de liga de alumínio e um adesivo epóxico [30]

A equação diferencial obtida por Volkersen é

$$\frac{d^2 \sigma_2(x)}{dx^2} - \frac{G_a}{t_a} \cdot \left(\frac{1}{E_1 t_1} + \frac{1}{E_2 t_2} \right) \cdot \sigma_2(x) + \frac{P}{t_a b \cdot E_2 t_2 t_1} G_a = 0. \quad (2.2)$$

A distribuição da tensão de corte no adesivo τ é dada por

$$\tau = \frac{P w \cosh(wX)}{bl \cdot 2 \sinh(w/2)} + \left(\frac{t_1 - t_2}{t_1 + t_2} \right) \frac{w \sinh(wX)}{2 \cosh(wX)}, \quad (2.3)$$

com $X = x/l$ onde $-0.5 \leq X \leq 0.5$ e

$$w = \sqrt{\frac{G_a l^2}{E t_1 t_a} \left(1 + \frac{t_1}{t_2} \right)}, \quad (2.4)$$

em que t_1 é a espessura do adesivo superior, t_2 a espessura do adesivo inferior, E o módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes, G_a o módulo ao corte do adesivo e t_a a espessura do adesivo. A origem da coordenada longitudinal x é no meio da sobreposição.

No entanto, esta análise não tem em conta o efeito de flexão causado pela carga excêntrica numa junta de sobreposição simples, que é minimizado numa junta de sobreposição dupla [36].

2.2.1.1.3 Análise de Goland e Reissner

Como referido na Análise de Volkersen, a carga excêntrica de uma junta de sobreposição simples causa um momento de flexão M e uma força transversal V a ser aplicada às extremidades da junta, para além da força aplicada por unidade de largura \bar{P} , como referenciado na Figura 24. Devido a este momento de flexão, é provocada uma rotação na junta, alterando a direção da linha de carga com a tendência de haver um alinhamento das forças de tração aplicadas [30].

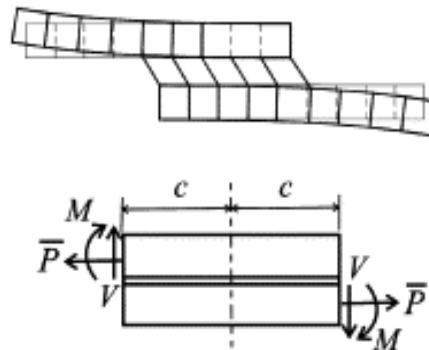


Figura 24 - Modelo de Goland e Reissner [30]

Os primeiros a considerar esses efeitos foram Goland e Reissner [32]. Estes autores usaram um fator de momento de flexão k e um fator de força transversal k' que relacionam \bar{P} , M e V nas extremidades da sobreposição, de acordo com as seguintes equações:

$$M = k \frac{\bar{P}t}{2} e \quad (2.5)$$

$$V = k' \frac{\bar{P}t}{2}, \quad (2.6)$$

em que t é a espessura do aderente e c a metade do comprimento da sobreposição. Quando a força aplicada é bastante pequena, não há rotação da junta e a linha de carregamento passa próximo do limite dos aderentes. No entanto, quando a força aplicada é aumentada, a zona de sobreposição sofre rotação ficando a linha de ação da carga mais próxima da zona central dos aderentes, reduzindo assim o momento fletor [6, 37].

A tensão axial σ e a tensão ao corte τ são obtidas a partir das seguintes equações:

$$\sigma(x) = \frac{\bar{P}t}{\Delta c^2} \left(\left(R_2 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \cosh \lambda \cos \lambda \right) \cosh \left(\frac{\lambda x}{c} \right) \cos \left(\frac{\lambda x}{c} \right) + \left(R_1 \lambda^2 \frac{k}{2} + \lambda k' \sinh \lambda \sin \lambda \right) \sinh \left(\frac{\lambda x}{c} \right) \sin \left(\frac{\lambda x}{c} \right) \right) e \quad (2.7)$$

$$\tau(x) = -\frac{\bar{P}}{8c} \left(\frac{\beta c}{t} (1 + 3k) \frac{\cosh \left(\frac{\beta x}{t} \right)}{\sinh \left(\frac{\beta x}{t} \right)} + 3(1 - k) \right). \quad (2.8)$$

2.2.1.2 *Análise elastoplástica bidimensional*

2.2.1.2.1 *Análise de Hart-Smith*

A análise de Hart-Smith tem em consideração a plasticidade do adesivo e dos aderentes, usando um modelo de tensão de corte elástico-plástico, representado na Figura 25, em juntas de sobreposição simples e dupla. Nesta análise também são considerados como fatores importantes, o desequilíbrio de rigidez do aderente e a incompatibilidade térmica. Quando existe uma diferença de rigidez entre os aderentes, embora que mínima, é verificada a diminuição da resistência da junta [30].

A formulação da análise de Hart-Smith é dividida em duas partes: análise elástica e análise plástica para o esforço de tração aplicado no adesivo. Para a análise elástica são

consideradas as seguintes equações relativas à tensão ao corte τ e à tensão de arrancamento σ :

$$\tau = A_2 \cosh(2\lambda'x) + C_2 e \quad (2.9)$$

$$\sigma = A \cosh(\alpha x) \cos(\alpha x) + B \sinh(\alpha x) \sin(\alpha x). \quad (2.10)$$

No caso da análise plástica, as tensões ao corte τ e a deformação de corte γ são obtidos, de acordo com as equações:

$$\tau = A_2 \cosh(2\lambda'x) + \tau_p(1 - K) e \quad (2.11)$$

$$\gamma = \gamma_e(1 + 2K[(\lambda'x')^2 + \lambda'x' \tanh(\lambda'd)]). \quad (2.12)$$

Por intermédio desta análise, Hart-Smith mostrou que qualquer modelo de adesivo definido por duas linhas retas, com a mesma tensão de rutura e deformação, prevê a mesma resistência máxima da junta desenvolvida entre aderentes uniformes [36].

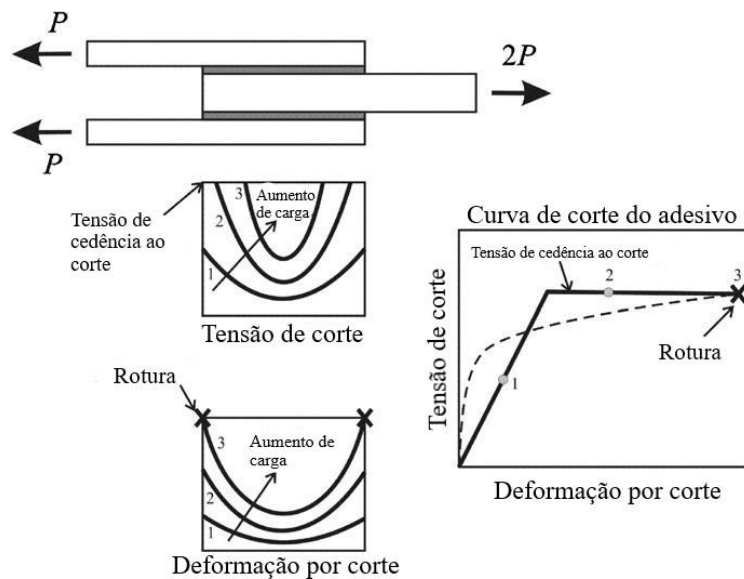


Figura 25 - Esquema representativo da deformação plástica por corte do adesivo de acordo com a análise de Hart-Smith [30]

2.2.1.2.2 Tensão de cedência generalizada

Atendendo a que os adesivos normalmente apresentam um degrau de plasticidade antes da sua rotura, Adams et al. [10] adotaram um método de previsão simplificado considerando que a força máxima exercida numa junta adesiva corresponde à tensão de cedência exercida na camada do adesivo. Dessa forma e, tendo em conta que os aderentes são elásticos e que ocorre uma deformação plástica total no adesivo, a força máxima exercida $P_{m\acute{a}x}$ é dada por

$$P_{m\acute{a}x} = \tau_y b l, \quad (2.13)$$

sendo τ_y a tensão de cedência do adesivo, b a largura da junta e l o comprimento da sobreposição.

De acordo com a ductilidade do adesivo, a resistência da junta altera. Para aderentes com alta resistência e tensão de cedência, a resistência da junta aumenta linearmente em função do comprimento da junta, com a condição de que o adesivo seja suficientemente dúctil. No entanto, a resistência da junta devido à cedência do aderente aumenta linearmente até ao ponto em que se mantém constante. Na Figura 26 é representada a evolução da resistência da junta, devido à cedência do adesivo e aderente, em função do comprimento da sobreposição [35].

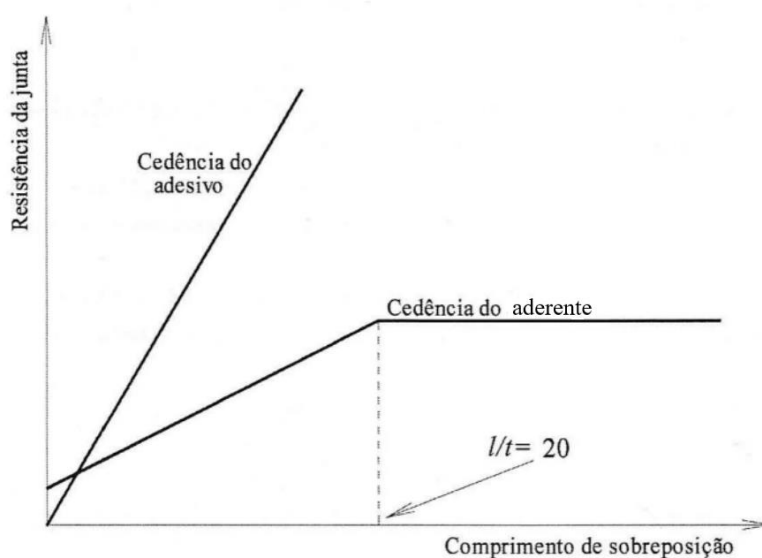


Figura 26 - Método de previsão da resistência de juntas adesivas baseado na cedência do adesivo e do aderente [6]

2.2.2 Métodos numéricos

A utilização de métodos numéricos soluciona uma desvantagem no uso de métodos analíticos: a complexidade da formulação, devido ao facto de o adesivo se deformar plasticamente, da utilização de aderentes de compósito ou de materiais diferentes.

Por este meio, surgiu o método de elementos finitos (MEF), sendo a técnica mais utilizada para a análise de juntas adesivas. Esta técnica foi inicialmente aplicada por Harris e Adams [38], 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. No entanto, 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 [39]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano através de modelos de dano coesivo (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, foi iniciada a aplicação de 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.

2.2.2.1 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. 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 [40]. Porém, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não têm em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, bem como a presença de defeitos no adesivo.

2.2.2.2 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 os defeitos descritos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, 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 [6].

Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [41] 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.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com os estudos de Barenblatt [42] e Dugdale [43], 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 [44].

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [45]. O princípio fundamental dos MDC consiste na introdução artificial de 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 27), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [46], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [47].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais [48].

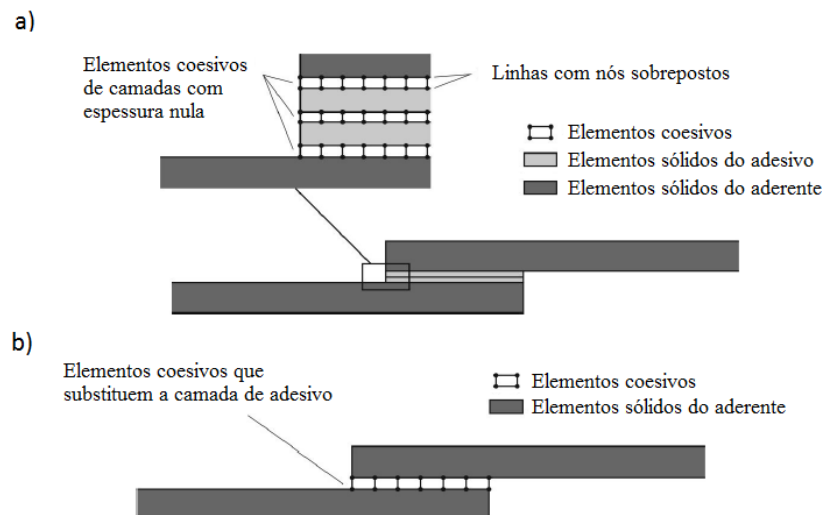


Figura 27 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [48])

2.2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano 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 [49] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [50] 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 [44].

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 [51]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [52] ou do número de ciclos para análises de fadiga [53, 54]. 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 [55].

2.2.3 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 [56]. Belytschko e Black [57], 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 [58]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura.

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 [59].

2.2.4 Estado da arte

O estado da arte é uma das partes mais importantes de todo trabalho científico, uma vez que faz referência a artigos já desenvolvidos e permite enquadrar o trabalho a ser realizado. A partir dos artigos selecionados, de acordo com o tema em estudo, é realizado um resumo descritivo do trabalho tendo em conta principalmente a introdução, os objetivos, os resultados obtidos e as conclusões. Na Tabela 2 são descritos variados artigos relevantes, relacionados com a utilização de métodos numéricos e experimentais nas juntas adesivas [59].

Tabela 2 - Trabalhos referentes a métodos numéricos/experimentais

Referências bibliográficas	Descrição do trabalho
Rosas et al. [60] (2021)	<p>Este trabalho foi analisado numericamente através de MDC e validado experimentalmente, tendo em conta o desempenho de juntas tubulares de alumínio ligadas com o adesivo Araldite® 2015, quando sujeitas a esforços de tração, considerando alterações geométricas que potencialmente promovem uma melhoria da resistência. As alterações geométricas testadas neste trabalho consistiram em chanfro exterior, em chanfro interior (ambos nos aderentes), num filete de adesivo nas extremidades de sobreposição e na junção do filete de adesivo na extremidade com o chanfro interior. As juntas com chanfro exterior apresentaram grandes reduções de tensões, principalmente para um ângulo de 7,5°, porém verificou-se pequenas diferenças na resistência da junta. Nas juntas com chanfro interior foram encontradas reduções de tensão de arrancamento e aumento das tensões de corte, mantendo-se a resistência da junta. Para uma junta com filete de adesivo nas extremidades de sobreposição há uma redução das tensões nos picos de sobreposição, verificando-se uma melhoria de 4% da resistência da junta. Relativamente às juntas com a junção do chanfro do adesivo na extremidade com o chanfro interior não se verificou nenhuma alteração significativa no comportamento da junta, sendo o aumento da sua resistência semelhante ao da junta com filete de adesivo. Concluiu-se assim que as modificações geométricas não permitem grandes melhorias da resistência, apesar de revelaram reduções significativas de tensão.</p>
Eusebio e Campilho [20] (2019)	<p>Este trabalho tem como objetivo o estudo paramétrico de juntas adesivas tubulares com diferentes adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) e diferentes comprimentos de sobreposição ($L_0=20$ mm e 40 mm) pelo MEFX, de forma a avaliar as capacidades de previsão deste método, a partir das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}). Inicialmente, foi verificado experimentalmente que, para $L_0=20$ mm, o Araldite® AV138 é a melhor opção. Já para $L_0=40$ mm, os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, obtiveram melhores comportamentos devido à sua ductilidade. A análise</p>

por MEFX centrou-se no estudo do critério de iniciação de dano, verificando-se que, dentro deste, alguns critérios não permitem verificar variação da força máxima suportada com o L_0 . Por outro lado, dois critérios obtiveram sempre os valores mais próximos dos resultados experimentais, embora com algum desvio para o Sikaforce® 7752. Concluiu-se que, com uma escolha correta dos critérios de iniciação e propagação de danos, o MEFX é um método viável e preciso para a previsão da resistência das juntas tubulares.

**Barbosa et al. [61]
(2018)**

A partir deste artigo é possível estudar de forma experimental e numérica juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços axiais ligando três adesivos diferentes (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) a aderentes em liga de alumínio, abordando o efeito do comprimento de sobreposição da junta. O estudo numérico foi desenvolvido pelo MEF, mais concretamente a Mecânica dos Meios Contínuos, de forma a analisar as tensões de corte e arrancamento na camada adesiva e, posteriormente, pelo MDC. Segundo o estudo experimental, conclui-se que para pequenos comprimentos de sobreposição, adesivos resistentes mas frágeis têm um melhor desempenho. No entanto, para comprimentos de sobreposição superiores, adesivos dúcteis obtêm melhores resultados. Através da análise numérica, verificou-se que os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 obtiveram resultados precisos, embora se tenha observado uma divergência de resultados para o adesivo SikaForce® 7752.

A implementação de métodos numéricos e experimentais em juntas adesivas tubulares sujeitas a variados tipos de esforços possibilita a otimização do desempenho das juntas, bem como a escolha adequada da sua geometria.

Nos trabalhos anteriormente descritos, uma vez que as juntas adesivas foram analisadas por meio de três adesivos de diferente resistência e ductilidade (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) num único aderente (AW6082 T651) e com diferentes comprimentos de sobreposição, é possível verificar o comportamento diferenciado de cada um em diversas condições, e constatando as suas limitações.

2.3 Juntas adesivas tubulares

2.3.1 Caracterização das juntas adesivas tubulares

As juntas tubulares têm elevada resistência a esforços de flexão, possuem uma maior área de sobreposição relativamente aos outros tipos de juntas e permitem a montagem de estruturas leves e rígidas. O facto de serem um tipo de juntas com uma elevada relação resistência/peso, e com capacidade de unir materiais diferentes e com baixa espessura, permite a utilização de juntas tubulares em detrimento de outros tipos de ligações. Contudo, a maior parte das configurações de juntas tubulares requer uma operação de maquinagem [20, 62].

Estas juntas podem ser solicitadas com várias condições de esforços, como o esforço axial ou de torção. Ocasionalmente, as juntas tubulares também podem estar sujeitas a esforços de flexão. Quando aplicado um esforço axial, existe uma maior concentração de tensões nas extremidades da área de sobreposição, falta de colinearidade entre os aderentes e pontos de singularidade. Na presença de um esforço de torção, deixa de existir a limitação causada pela falta de colinearidade, embora se mantenha a deformação diferencial dos aderentes e os efeitos das concentrações de tensões. De forma a reduzir a concentração de tensões quando são aplicados esforços axiais, utilizam-se chanfros nos tubos (Figura 28), permitindo obter uma maior área de ligação, logo uma melhor distribuição de tensões na zona de sobreposição [14, 21, 61].

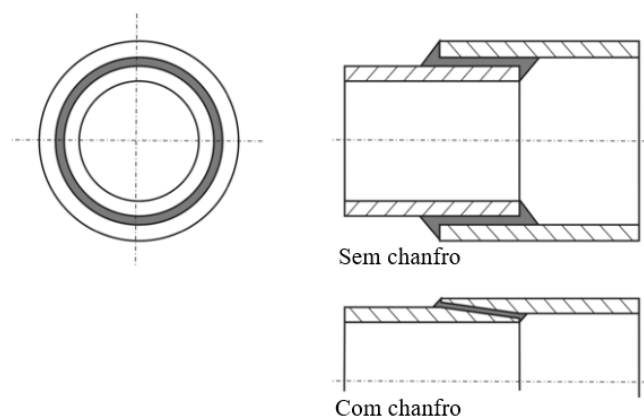


Figura 28 - Junta tubular: a) sem a presença de chanfro b) com presença de chanfro [21]

2.3.2 Configurações possíveis de juntas

As configurações das juntas tubulares mais comuns são as juntas topo-a-topo, juntas de sobreposição, juntas de chanfro, juntas de reforço com pré-impregnado, juntas de retalho e as juntas de tira.

2.3.2.1 Juntas topo-a-topo

As juntas topo-a-topo, ilustradas na Figura 29, são analisadas com o intuito de se verificar as suas condições limite de esforços e, da mesma forma, serem otimizadas. Para tal, são descritos dois estudos deste tipo de juntas tubulares.

Sawa et al. [63] estudaram juntas adesivas tubulares topo-a-topo sujeitas a esforços de torção, com o objetivo de obter dados essenciais para a concepção de juntas adesivas tubulares quando aplicados esforços de torção em estruturas mecânicas tubulares. A partir desta análise foi verificado que a junta tubular tem uma resistência à torção superior se a ligação for realizada na interface externa do tubo relativamente à ligação na interface interna do tubo. A tensão de corte máxima da junta tem um aumento de 50% se a ligação da junta for realizada na interface externa do tubo, em relação à ligação completa entre as interfaces.

A resistência estática e dinâmica das juntas tubulares topo-a-topo é investigada por intermédio de análise experimental por Sato e Ikegami [64], tendo sido aplicados numa primeira fase, esforços de arrancamento e de torção segundo uma sollicitação dinâmica com amplitude e frequência variáveis ao longo do tempo e, posteriormente segundo uma sollicitação estática. Nos ensaios foi possível observar roturas coesivas e interfaciais nas superfícies dos aderentes, denotando que as falhas nas juntas adesivas se tornam mais evidentes quando são aplicadas sollicitações estáticas. Verificou-se também que a resistência da junta adesiva, quando sujeita a sollicitações dinâmicas, é maior do que quando é sujeita a sollicitações estáticas.

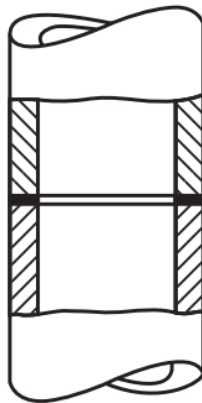


Figura 29 - Junta tubular topo-a-topo [7]

2.3.2.2 Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição, representadas na Figura 30, são o tipo de junta tubular mais usado, nomeadamente na ligação de dois tubos metálicos ou um tubo metálico e um tubo compósito. Uma vez que a junta pode ser sujeita a vários esforços, foram efetuados variados estudos para esta configuração de junta tubular [65].

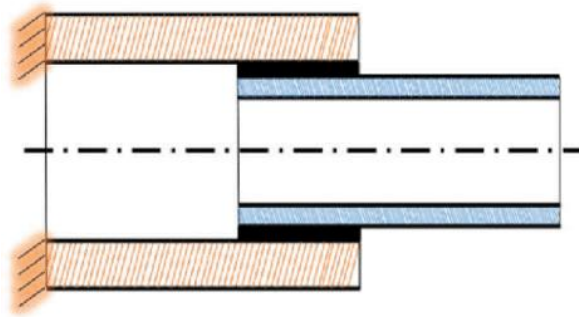


Figura 30 - Junta tubular de sobreposição [66]

Guess et al. [67] investigaram os efeitos das juntas tubulares de sobreposição sujeitas a esforços de tração, compressão e flexão, por meio de análises numéricas e experimentais. Com base no estudo, foi possível concluir que a principal falha na junta adesiva ocorre na extremidade interna da junta adesiva, situando-se na região em que são originadas maiores tensões de arrancamento, consequência dos esforços de tração e compressão exercidos. No entanto, a resistência da junta à compressão é significativamente inferior à resistência à tração.

Os esforços de torção foram estudados a partir de um trabalho experimental desenvolvido por Choi e Lee [68], no qual foi explorado o efeito da espessura do adesivo na capacidade torsional da junta tubular de sobreposição. A partir deste trabalho foi constatado que a rigidez torsional diminui linearmente em função da espessura do adesivo, no qual o comportamento adesivo foi modelado como propriedades elásticas do material plástico. O aumento linear da capacidade torsional com propriedades elásticas resulta da redução de concentração de tensões nos limites da junta adesiva devido ao aumento de espessura.

2.3.2.3 Juntas de chanfro

As juntas de chanfro possuem variadas configurações, sendo estas a junta de extremidades cónicas, a junta com ranhura em V e a junta de topo/cónica. A junta de extremidades cónicas, representada na Figura 31, é a junta de chanfro empregue com maior frequência. Este tipo de junta foi desenvolvido por Hashim et al. [69] no final da década de 1990, com o objetivo de otimizar o formato das juntas de chanfro, bem como a sua resistência. Após variadas experiências terem sido realizadas com a junta de extremidades cónicas, os investigadores concluíram que a junta possui uma camada adesiva fina e uma boa capacidade de acoplamento entre os aderentes, permitindo uma maior facilidade na conceção da junta adesiva. Também foi constatado que a tolerância ao defeito da junta diminui significativamente com o aumento do diâmetro do tubo. No entanto, foi possível verificar que o comportamento da junta é afetado pelas condições ambientais a longo prazo [65].

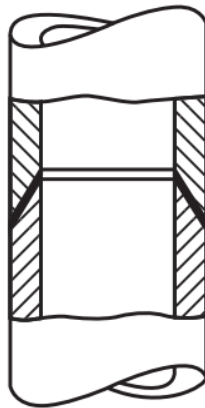


Figura 31 - Junta tubular de chanfro [7]

2.3.2.4 Juntas de reforço com pré-impregnação

As juntas de reforço com pré-impregnado, ilustradas na Figura 32, foram desenvolvidas no final da década de 1990 por Huysmans et al. [70] com o objetivo de minimizar os esforços necessários para o fabrico manual de uma junta adesiva que una duas secções de tubos compósitos. Apesar do processo de fabrico das juntas se tenha tornado predominantemente automático, é indispensável a utilização de um processo manual no enrolamento da fita pré-impregnada em volta das extremidades alinhadas dos tubos, exigindo assim um longo tempo de cura.

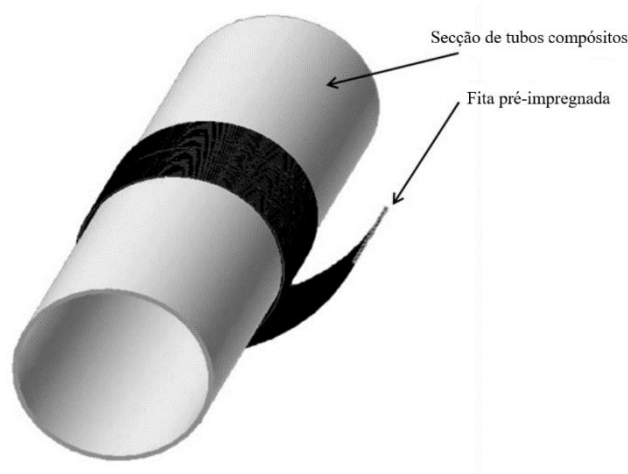


Figura 32 - Aplicação do pré-impregnado em tubos compósitos [70]

De forma a potenciar as propriedades das juntas de reforço com pré-impregnado, Huysmans et al. realizaram ensaios mecânicos e termomecânicos para otimizar a temperatura de cura e o tempo de processo e, mais tarde, otimizar o material de reforço levando em conta a orientação das fibras e a sequência de empilhamento. Posteriormente ainda foi estudada a resistência estrutural da junta a partir da mecânica

da fratura, onde se concluí que a delaminação entre o tubo e o acoplador de pré-impregnado é a principal causa de falha [65].

2.3.2.5 Juntas de ressalto

As juntas de ressalto consistem na ligação de um aderente com uma extremidade alargada através de uma zona cônica a um aderente com uma extremidade que pode apresentar vários formatos (plana, com chanfro e em formato de espigão). Na Figura 33 está representada uma junta de ressalto com o formato plano.

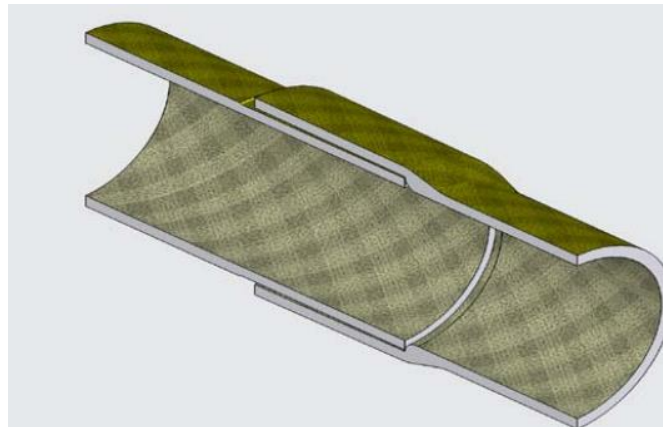


Figura 33 - Junta tubular de ressalto [71]

Bouwkamp et al. [72] analisaram juntas de ressalto sujeitas a esforços axiais com o objetivo de avaliar o efeito de quatro configurações de ressalto na melhoria da transferência de carga e na redução das tensões de flexão no tubo. A análise foi realizada a partir de um método numérico sendo este o MEF e comprovada experimentalmente. Para isso, foram analisadas quatro diferentes configurações para as juntas de ressalto: juntas livres de esforços, juntas com um anel rígido colocado na zona de união, juntas com quatro reforços interiores dispostos num formato cruzado e juntas com um anel rígido e os quatro reforços interiores. A partir deste estudo, verificou-se que a utilização de reforços dispostos num formato cruzado permite a redução das tensões exercidas na área de sobreposição. A utilização de anéis rígidos como reforços é fundamental, uma vez que permite a transferência de esforços de forma mais uniforme e a redução das tensões nas regiões críticas da ligação.

2.3.2.6 Juntas de tira

As juntas tubulares de tira podem apresentar três configurações diferentes: interna, externa (Figura 34) e dupla.

Das e Pradhan [73] investigaram as juntas adesivas tubulares de tira externa a partir de uma análise numérica, aplicando o MEF, com o objetivo de estudar o início e o crescimento de falhas de aderência na junta, a fim de melhorar a sua capacidade de carga e de ter distribuições de tensão favoráveis na região da ligação. Os aderentes e a

tira desta junta adesiva foram feitos em material compósito de plástico com reforço de fibra de vidro (PRFV). Através desta investigação conclui-se que roturas adesivas iniciam-se nas extremidades livres das interfaces adesivas, propagando-se ao mesmo ritmo e de forma auto-similar. O aumento da resistência da estrutura resulta do aumento do grau de anisotropia do material dos aderentes e da tira, impedindo o crescimento de falhas de aderência. Para este caso em estudo, o comprimento de sobreposição ideal da junta de tira, quando está sob esforços de tração, encontra-se entre os 13,5 mm e os 26 mm, uma vez que neste intervalo os indícios de falha são mínimos.

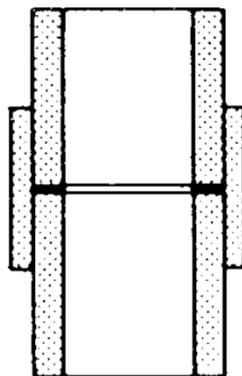


Figura 34 - Junta tubular de tira externa [14]

2.3.3 Aplicações

As juntas tubulares são utilizadas principalmente em aplicações de engenharia civil e no setor de energia, particularmente na montagem de conjuntos complexos tubulares para a produção de petróleo, energia e tratamento de águas residuais, substituindo diretamente a tradicional conexão com flanges.

Na Figura 35 (a) é apresentada uma junta adesiva tubular de ressalto, aplicada em tubos de transporte de combustíveis. Este tipo de juntas são aplicadas nesta situação, visto que permite uma ligação de aplicação fácil, económica, leve, com boa resistência à corrosão e resistente aos esforços e pressões aplicados no tubo, uma vez que este está sujeito a pressões de 150 psi (1,0 MPa) a 3500 psi (24,1 MPa), dependendo do tamanho e da temperatura. O facto de ser uma junta totalmente vedada é também um dos motivos para a sua aplicação [74].

Na Figura 35 (b) está representada uma junta adesiva tubular de sobreposição simples, aplicada em tubos de canalização em PVC, para uso residencial. Estas juntas são utilizadas pelas mesmas vantagens do exemplo de juntas tubulares apresentado anteriormente.



Figura 35 – Juntas adesivas tubulares aplicadas no (a) transporte de combustíveis [71] e na (b) engenharia civil [75]

As juntas tubulares destacam-se também pela sua aplicação no fabrico de sistemas de arrefecimento em aplicações tecnológicas altamente avançadas, como componentes eletrónicos e eletrodomésticos [62].

Dado que este tipo de juntas suportam cargas significativas, são utilizadas em aplicações estruturais tais como montagens de estruturas de veículos, autocarros e aviões. A Figura 36 ilustra uma aplicação das juntas adesivas tubulares na estrutura de um autocarro. Esta aplicação tem com principais vantagens a distribuição de tensão mais uniforme quando a junta é sujeita a esforços, a capacidade de unir materiais diferentes, boa resistência à corrosão e obtenção de maior flexibilidade no nó de ligação, minimizando a fadiga mecânica. A vantagem mais relevante das juntas nos meios de transporte é a diminuição do peso da estrutura, permitindo uma maior eficiência através da redução do consumo de combustível [76, 77].

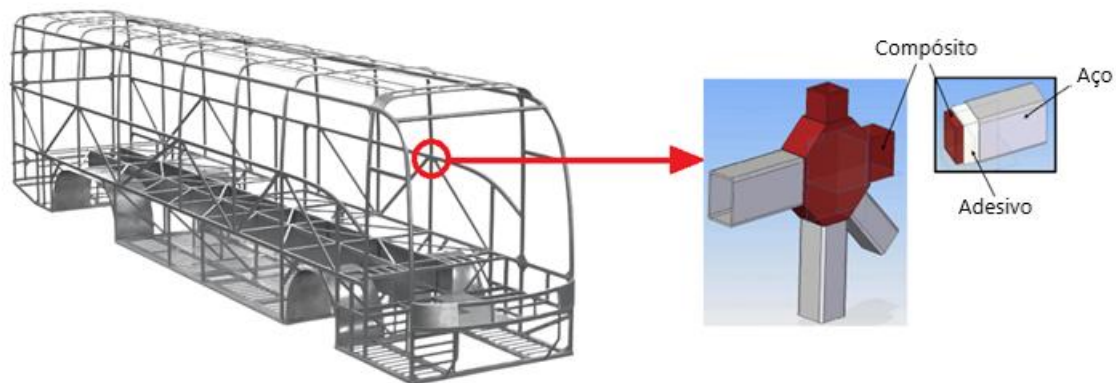


Figura 36 - Junta adesiva tubular aplicada na estrutura de um autocarro [77]

2.3.4 Modelos analíticos disponíveis

De forma a compreender o comportamento das juntas tubulares adesivas de sobreposição simples quando são sujeitas a esforços de tração, foram desenvolvidos variados modelos analíticos, dos quais se destacam dois [78]. Os dois modelos,

elaborados de forma a reduzir a complexidade do problema, foram desenvolvidos por, Nayeb-Hashemi et al. [79] em 1997 e Pugno e Carpinteri [80] em 2003.

2.3.4.1 Modelo de Nayeb-Hashemi et al.

A partir do modelo de Nayeb-Hashemi et al. [78, 79], representado na Figura 37, é estudado o comportamento das juntas tubulares sob o efeito de fadiga derivado da tensão de corte e do momento torsor aplicados. Porém neste trabalho são apenas abordados os efeitos da tensão de corte.

Para isso, é desenvolvida uma solução para a tensão de corte, devido aos esforços axiais exercidos, com base num modelo de deformação diferencial. Quando a junta adesiva é sujeita a esforços axiais é considerado que o adesivo suporta apenas tensões de corte e que o aderente suporta tensões normais, uma vez que o módulo de elasticidade da maioria dos aderentes é muito maior do que nos adesivos.

Os pressupostos iniciais para este modelo são:

- Os aderentes estão sujeitos apenas a tensões de arrancamento, criando uma tensão axial constante ao longo da espessura;
- O adesivo é um meio elástico, transmitindo apenas tensão de corte ao longo da espessura da camada adesiva.

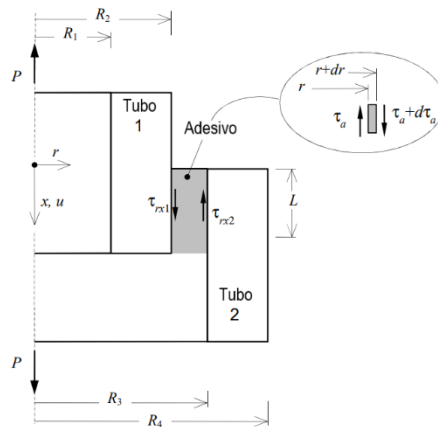


Figura 37 - Esquema da junta tubular segundo o modelo de Nayeb-Hashemi [78]

A tensão de corte τ_{xy} é obtida por meio da seguinte equação:

$$\tau_{xy}(\xi) = \frac{G_a}{\ln R_3 - \ln R_2} \frac{u_2(\xi) - u_1(\xi)}{r}, \quad (2.14)$$

em que G_a é o módulo de elasticidade transversal do adesivo, R_2 o raio exterior do tubo 1, R_3 o raio interior do tubo 2, r o raio variável de acordo com o tubo e camada adesiva a ser analisados e $u_1(\xi)$ e $u_2(\xi)$ as equações diferenciais obtidas pelas equações:

$$u_1(\xi) = \frac{1}{E_1(R_2^2 - R_1^2)} \cdot [C_1 \cdot \xi + C_2 - E_2 \cdot (R_4^2 - R_3^2) \cdot u_2] \text{ e} \quad (2.15)$$

$$u_2(\xi) = C_3 \cdot e^{\theta_a \xi} + C_4 \cdot e^{-\theta_a \xi} - \frac{B}{\theta_a^2} \cdot (C_1 \xi + C_2), \quad (2.16)$$

sendo que R_1 é o raio interior do tubo 1, R_4 o raio exterior do tubo 2, E_1 e E_2 o módulo de Young do tubo 1 e 2 respetivamente, C_1 , C_2 , C_3 e C_4 são constantes obtidas a partir das condições de carga impostas nas extremidades dos tubos, e ξ um valor variável de acordo com a posição ao longo do comprimento de sobreposição, calculado da seguinte forma:

$$\xi = \frac{x}{L_0}, \quad (2.17)$$

no qual x é a coordenada longitudinal e L_0 o comprimento de sobreposição da junta adesiva.

B é uma constante e θ_a é um parâmetro não-dimensional, definidos pelas equações:

$$\theta_a = \sqrt{\frac{2G_a}{\ln R_3 - \ln R_2} \cdot \left[1 + \frac{E_2 \cdot (R_4^2 - R_3^2)}{E_1 \cdot (R_2^2 - R_1^2)} \right] \cdot \frac{L^2}{E_2 \cdot (R_4^2 - R_3^2)}} \text{ e} \quad (2.18)$$

$$B = - \frac{2G_a L^2}{(\ln R_3 - \ln R_2) \cdot E_1 \cdot E_2 \cdot (R_2^2 - R_1^2) \cdot (R_4^2 - R_3^2)}. \quad (2.19)$$

2.3.4.2 Modelo de Pugno e Carpinteri

O modelo de Pugno e Carpinteri [78, 80] propõe uma solução para juntas tubulares, novamente baseado no modelo de deformação diferencial, que seguidamente é aplicado na otimização da geometria da junta (variação da secção do tubo) para a análise da propagação de fissuras e sua deteção por medição da frequência de vibração. Os pressupostos deste modelo são:

- Os aderentes são sujeitos apenas a tensões de arrancamento (Figura 38), causando uma tensão axial constante ao longo da espessura do aderente;
- O adesivo é meio elástico fino, pelo que o estado de tensão é considerado constante sobre a espessura do adesivo, admitindo assim que é predominante a tensão de corte, embora que outros componentes, como a tensão de arrancamento, sejam considerandos.

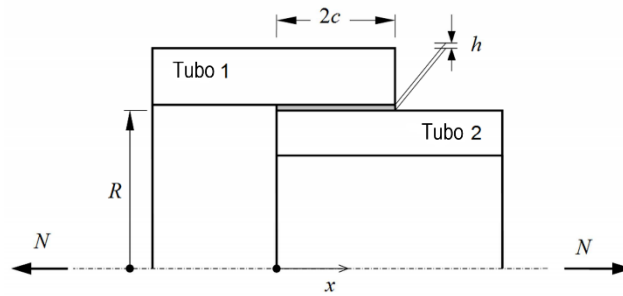


Figura 38 - Esquema da junta tubular segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [78]

Através deste modelo é obtida a tensão de arrancamento σ_y e a tensão de corte τ_{xy} por intermédio de:

$$\sigma_y(x) = \frac{(1-\nu_a)E_a}{(1+\nu_a)(1-2\nu_a)} \varepsilon_r(x) + \frac{\nu_a E_a}{(1+\nu_a)(1-2\nu_a)} (\varepsilon_x(x) + \varepsilon_\theta(x)) \quad (2.20)$$

$$\tau_{xy}(x) = -\frac{N(C_1 \cdot \alpha \cdot e^{\alpha x} - C_2 \cdot \alpha \cdot e^{-\alpha x})}{2\pi R}, \quad (2.21)$$

em que ν_a é o coeficiente de *Poisson* do adesivo, E_a o módulo de *Young* do adesivo e ε_x , ε_θ e ε_r as deformações axiais, cilíndricas e radiais, respetivamente, obtidas segundo as equações:

$$\varepsilon_x(x) = \frac{N}{2} \left(\frac{f(x)}{E_1 \cdot A_1} + \frac{(1-f(x))}{E_2 \cdot A_2} \right), \quad (2.22)$$

$$\varepsilon_\theta(x) = \frac{N}{2} \left(\frac{\nu_2 (f(x)-1)}{E_2 \cdot A_2} - \frac{\nu_1 f(x)}{E_1 \cdot A_1} \right) \quad (2.23)$$

$$\varepsilon_r(x) = \frac{NR}{h} \left(\frac{\nu_2 (1-f(x))}{E_2 \cdot A_2} - \frac{\nu_1 f(x)}{E_1 \cdot A_1} \right), \quad (2.24)$$

onde N é a força axial exercida na junta adesiva, R o raio exterior do tubo 2, h a espessura da camada adesiva, E_1 e E_2 o módulo de *Young* do tubo 1 e 2 respetivamente, A_1 e A_2 a área da secção transversal do tubo 1 e 2, respetivamente, ν_1 e ν_2 o coeficiente de *Poisson* do tubo 1 e 2 respetivamente e $f(x)$ é uma função representada por:

$$f(x) = C_1 \cdot e^{\alpha x} + C_2 \cdot e^{-\alpha x} + \beta, \quad (2.25)$$

sendo as constantes α , β , C_1 e C_2 calculadas a partir das seguintes equações:

$$\alpha = \sqrt{\frac{2\pi R G_a}{h} \cdot \frac{(E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2)}{E_1 \cdot A_1 \cdot E_2 \cdot A_2}}, \quad (2.26)$$

$$\beta = \frac{E_1 \cdot A_1}{E_1 \cdot A_1 + E_2 \cdot A_2}, \quad (2.27)$$

$$C_1 = \frac{e^{-\alpha c}}{e^{-2\alpha c} - e^{2\alpha c}} + \beta \frac{e^{\alpha c} - e^{-\alpha c}}{e^{-2\alpha c} - e^{2\alpha c}}, \quad (2.28)$$

$$C_2 = \frac{e^{\alpha c}}{e^{2\alpha c} - e^{-2\alpha c}} + \beta \frac{e^{-\alpha c} - e^{\alpha c}}{e^{2\alpha c} - e^{-2\alpha c}}, \quad (2.29)$$

e c metade do comprimento de sobreposição da junta adesiva.

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Descrição do trabalho experimental para validação
- 3.2 Previsão da resistência

3 DESENVOLVIMENTO

Este capítulo é dedicado à análise detalhada do comportamento de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração, essencialmente a partir de um estudo analítico no qual são explorados dois diferentes modelos e posteriormente comparados.

De forma a tornar a análise mais rigorosa e completa, o estudo analítico é comparado com o estudo numérico desenvolvido por intermédio do *software* Simulia ABAQUS® (Dassault Systèmes) por Ferreira et al. [81] e o estudo experimental realizado por Barbosa et al. [61], sendo assim possível validar ou revogar a análise desenvolvida por meio dos métodos analíticos.

Assim sendo, no capítulo 3.1 descreve-se o trabalho realizado por estes autores, enquanto no capítulo 3.2 se apresenta o resultado do trabalho analítico realizado na presente dissertação e respetiva comparação com os dados da literatura.

3.1 Descrição do trabalho experimental para validação

3.1.1 Geometria das juntas tubulares

Neste subcapítulo são descritos todos os materiais necessários para a elaboração do trabalho experimental, mais propriamente os aderentes e os adesivos, com o propósito de ser efetuada uma avaliação pormenorizada das propriedades mecânicas dos mesmos. Estes materiais devem ser adequados aos processos de fabrico escolhidos e fornecer informação relevante sobre o comportamento das juntas tubulares adesivas, que pela sua geometria se tornaram alvo de estudo.

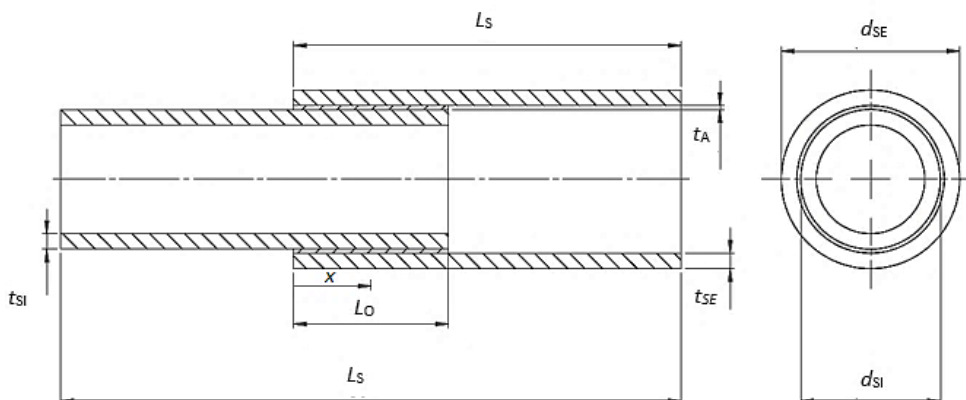


Figura 39 – Configuração da geometria do provete

A Figura 39 e a Tabela 3 representam, respetivamente, a configuração e a designação dos parâmetros geométricos utilizados dos provetes.

Tabela 3 – Designação das cotas dos provetes e respetivos valores (em mm)

Designação	Cota (mm)	
Comprimento de sobreposição, L_O	20	40
Comprimento dos aderentes, L_S	50	60
Comprimento total da junta tubular, L_T	80	80
Diâmetro externo do aderente interior, d_{SI}	20,0	20,0
Diâmetro externo do aderente exterior, d_{SE}	24,4	24,4
Espessura do aderente interior, t_{SI}	2	2
Espessura do aderente exterior, t_{SE}	2	2
Espessura do adesivo, t_A	0,2	0,2

Os provetes utilizados possuem uma forma cilíndrica, já que os tubos e alumínio utilizados nas juntas possuem uma secção circular. A espessura do adesivo (t_A) é a mesma para todas as amostras (0,20 mm), tal como a espessura do aderente interior (t_{SI}) e exterior (t_{SE}) (2 mm). O mesmo sucede relativamente ao diâmetro externo dos tubos: interior (d_{SI}) 20 mm e exterior (d_{SE}) 24,40 mm. O comprimento dos aderentes (L_S) tem o valor de 50 ou 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 em estudo não depende de L_O (80 mm).

3.1.2 Materiais utilizados

3.1.2.1 Aderentes

Os aderentes de todas as juntas adesivas concebidas e estudadas são em alumínio, nomeadamente a liga AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só pelas boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em

trabalhos anteriores [82], onde foram obtidas as seguintes propriedades: módulo de *Young* de $70,07 \pm 0,83$ GPa, tensão de cedência à tração de $261,67 \pm 7,65$ MPa, resistência à tração de $324,00 \pm 0,16$ MPa, deformação de rotura à tração de $21,70 \pm 4,24\%$ e coeficiente de *Poisson* de 0,33.

Na Figura 40 é possível observar as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos aderentes de alumínio, foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [82]. Está representada também a aproximação numérica usada nos modelos MDC [83].

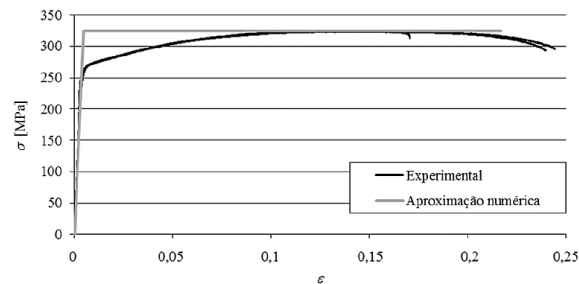


Figura 40 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [84]

3.1.2.2 Adesivos

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

3.1.2.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 com o endurecedor HV 998 é um sistema epóxico bi-componente que, quando combinado, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. É um adesivo frágil. A combinação dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/40 g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso ao uso de uma espátula [85]. Este adesivo é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [86].

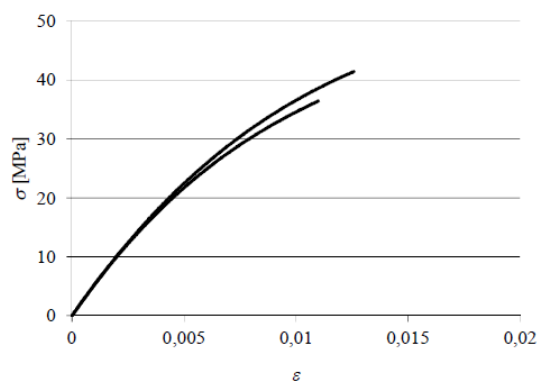


Figura 41 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [84]

As curvas σ - ε de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 41. Estas curvas foram obtidas experimentalmente. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [87]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E (GPa)	$4,89 \pm 0,81$
Coefficiente 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 [87]

^b valor do fabricante

3.1.2.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural bi-componente, de ductilidade moderada e que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [86]. O Araldite® 2015 é fornecido em cartuchos, possui dois componentes, e a sua cura é efetuada à temperatura ambiente. A sua razão de aplicação é de 50 g/50 g, sendo a mistura realizada por um bico e aplicado por meio de uma pistola de aplicação [85]. As curvas σ - ε de provetes

maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 42. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 5.

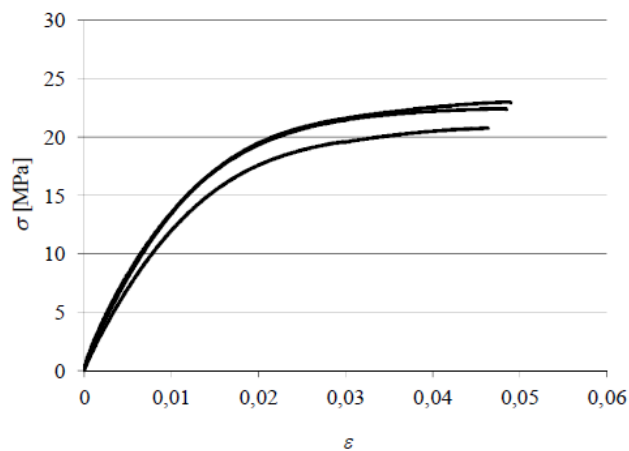


Figura 42 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [86]

Tabela 5 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [86]

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) ^a	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, G_{IIC} (N/mm) ^a	$4,70 \pm 0,34$

^a valor do fabricante

Comparando os valores da Tabela 4 com os valores da Tabela 5, verifica-se que a deformação de rotura ao corte do adesivo Araldite® 2015 é quase seis vezes superior ao valor apresentado para o adesivo Araldite® AV138. No entanto, a tensão de rotura ao corte do adesivo Araldite® AV138 é praticamente o dobro da registada para o adesivo Araldite® 2015.

3.1.2.2.3 SikaForce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor (FRW L60). A sua relação de mistura em peso é de 5 para 1. Trata-se de um adesivo dúctil que, comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, é o que apresenta a menor resistência ao corte e à tração.

Na Figura 43 estão representadas as curvas σ - ϵ do adesivo e na Tabela 6 as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes do adesivo.

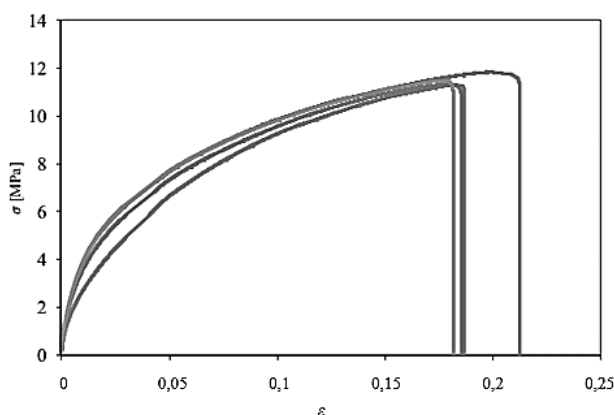


Figura 43 - Curvas σ - ϵ do adesivo SikaForce® 7752 [88]

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas com este adesivo seja elevada, pois o mesmo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são esperadas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como um efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [89].

Tabela 6 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [86]

Propriedades	Araldite® 2015
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 (MPa)	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

3.1.3 Fabrico e ensaio das juntas

A junta adesiva deve ser fabricada de forma rigorosa com o objetivo de cumprir com exatidão as dimensões em estudo. Para isso, o fabrico das juntas assenta em três fases principais, sendo estas a maquinagem dos aderentes, a preparação do adesivo e a produção da junta adesiva.

Primeiramente é realizada a maquinagem dos aderentes a partir de varão redondo em alumínio (AW6082-T651) com $\varnothing 25$ mm e 120 mm de comprimento para os aderentes exteriores, e $\varnothing 20$ mm com 120 mm para os aderentes interiores. Para que a adesão do adesivo aos aderentes seja eficaz, as superfícies dos aderentes são submetidas a um processo de granalhagem e posterior limpeza dos mesmos com acetona. São ainda efetuadas marcações de referência no que diz respeito ao comprimento de secção (20 mm e 40 mm), para que seja possível montar os provetes com maior facilidade. Após ser executado o alinhamento devido dos aderentes, seguiu-se a preparação do adesivo.

Para a preparação do adesivo é necessária a adição de um endurecedor ao mesmo. No adesivo Araldite® AV138 é adicionado o endurecedor (HV998) de acordo com as respetivas proporções mássicas. Relativamente ao Araldite® 2015, o fabricante fornece o adesivo e endurecedor numa bisnaga cujo bico de aplicação faz a mistura ao aplicar o adesivo.

Depois de ser concluída a preparação do adesivo, segue-se a aplicação deste nos aderentes e o seu espalhamento com a ajuda de espátulas para os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, enquanto que o adesivo Araldite® 2015 é colocado nos aderentes através de um bico de mistura. Posteriormente, são colocados fios de nylon calibrados para garantir uma espessura homogénea de adesivo quando se der o processo de cura e deixa-se os provetes a repousar sobre calços retificados. Por último, são retirados os excessos de adesivo.

Para executar a recolha de dados experimentais é fundamental ser realizada uma série de ensaios destrutivos nos provetes pelo que, antes de se iniciar qualquer recolha, é necessário atribuir a cada provete uma referência para identificação dos resultados. Os ensaios são realizados através de uma máquina Shimadzu modelo AG-X 100 com uma célula de carga de 100 kN, à temperatura ambiente (cerca de 25°C) e em controlo de deslocamentos. A velocidade de ensaio foi de 2 mm/min. A distância entre amarras foi de 80 mm, e realizaram-se cinco ensaios para cada um dos três adesivos, para cada comprimento de sobreposição, perfazendo um total de trinta provetes. Após serem registados os valores dos ensaios lidos pela máquina, é efetuado o processamento dos dados.

3.1.4 Resultados experimentais

Neste subcapítulo é efetuada a análise dos dados obtidos por meio dos ensaios de tração dos provetes. A partir desta análise é possível verificar os modos de rotura e a resistência da junta e obter as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para os diferentes adesivos e valores de L_0 , comparando os valores máximos das forças aplicadas nos provetes de forma a avaliar a força máxima ($P_{máx}$) e o desvio padrão.

3.1.4.1 Modos de rotura

Através da inspeção visual dos provetes verifica-se que, na maioria destes, foi observada rotura coesiva no adesivo, garantindo assim que o adesivo é o elo mais fraco nos provetes e que os valores obtidos pertencem ao adesivo (alvo de estudo) e não aos aderentes. A rotura coesiva é visualizada em todos os provetes com os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Contudo, nos provetes com o adesivo Araldite® AV138 e com diferentes valores de L_0 verifica-se que existe rotura pelo aderente, uma vez que foi atingida a tensão de rotura do mesmo.

Na Figura 44 é representada uma pequena amostra de provetes dos três diferentes adesivos com $L_0=40$ mm, onde se verifica que o provete com o adesivo Araldite® AV138 apresenta rotura pelo aderente e os provetes com os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam rotura coesiva.

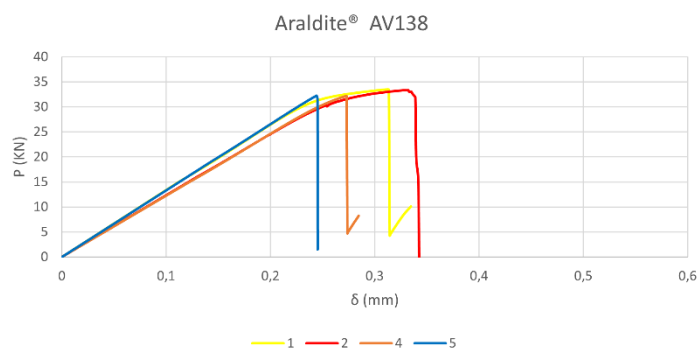


Figura 44 - Rotura registada numa amostra de provetes dos adesivos Araldite® AV138 (a), Araldite® 2015 (b) e SikaForce® 7752 (c) com $L_0=40$ mm

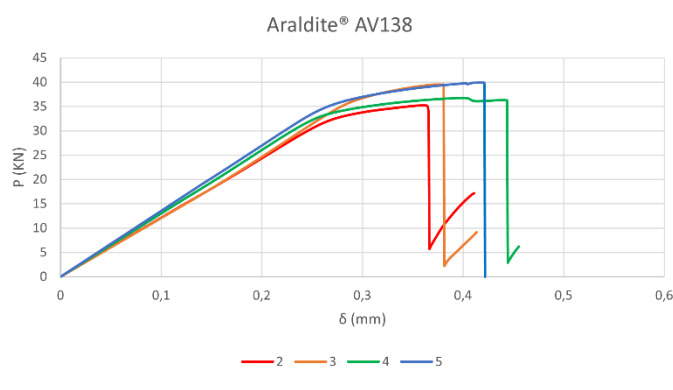
3.1.4.2 Curvas $P-\delta$

3.1.4.2.1 Araldite® AV138

Por intermédio dos dados fornecidos pela máquina, são obtidas as curvas $P-\delta$ apresentadas na Figura 45, para o adesivo Araldite® AV138. Na Tabela 7 podem-se observar os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para este adesivo e para os diferentes valores de L_0 , bem como o desvio padrão associado. De salientar que alguns provetes foram considerados inválidos e, como tal, não são sujeitos a análise.



(a)



(b)

Figura 45 – 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 45 a) constata-se a ocorrência de plastificação dos aderentes nas amostras 1 e 2, possivelmente devido ao excesso de adesivo na junta, originando uma área de contacto superior à desejada e, conseqüentemente, uma força máxima suportada superior às restantes amostras. As amostras 4 e 5 apresentam um comportamento linear até à rotura.

Para as juntas adesivas com $L_0=40$ mm (Figura 45 b) ocorre sempre a plastificação dos aderentes. Verifica-se que, na maioria das amostras, existe boa precisão das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento. 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.

Tabela 7 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138

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

Os provetes cujos valores não são apresentados na Tabela 7 foram considerados inválidos e, por esse motivo, foram removidos desta análise, visto que apresentavam discrepâncias demasiado elevadas entre $P_{m\acute{a}x}$ e $P_{m\acute{a}x}$ Méd. Desta forma, verifica-se uma redução do desvio padrão percentual relativamente ao respetivo valor médio. A dispersão dos valores obtidos é muito reduzida, sendo que o maior desvio padrão percentual registado para o Araldite® AV138 foi nos provetes com $L_0=40$ mm (5,15%). As diferenças da força máxima obtida nas amostras devem-se eventualmente a questões relacionadas com o fabrico dos provetes, constituição dos materiais e a máquina de ensaios.

3.1.4.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 46 são apresentadas as curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Na Tabela 8 é possível observar os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente para o mesmo adesivo, em função de L_0 .

Neste adesivo verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=20$ mm (Figura 46 a). Porém, nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 46 b) verifica-se plastificação dos aderentes. Na maioria das amostras existe boa precisão das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento. São visíveis nestes ensaios, em particular para $L_0=20$ mm, pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas.

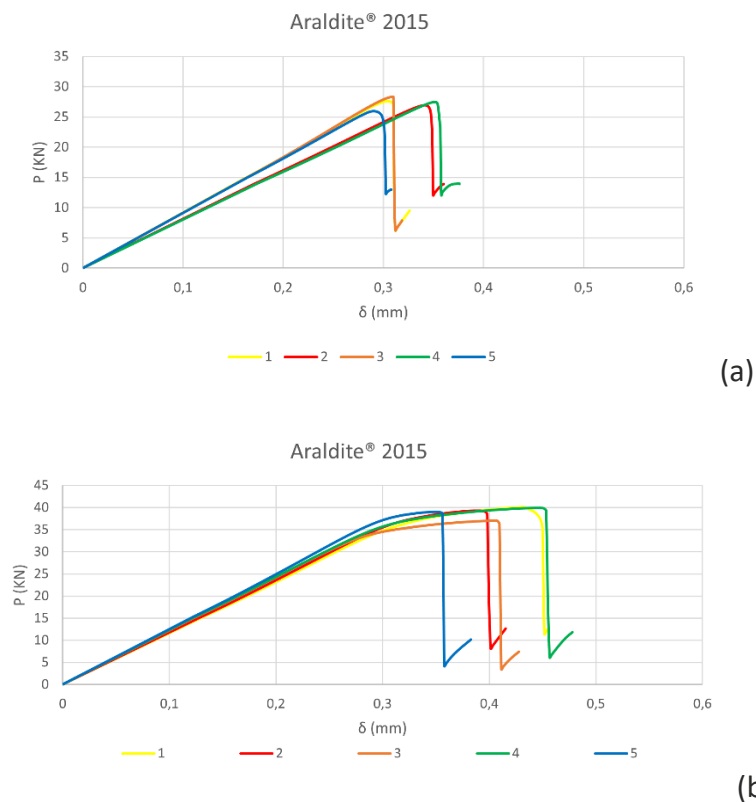


Figura 46 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Tabela 8 – Valores de $P_{\text{máx}}$ (N) obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015

L_0 (mm)	$P_{\text{máx}}$					$P_{\text{máx}}$ Méd	Desvio Padrão/ %	
	1	2	3	4	5			
20	27576,1	26895,8	28306,9	27433,8	25979,6	27238,4	774,1	2,84
40	40062,5	39280,9	36980,6	39958,7	39051,2	39066,8	1112,2	2,84

Foi registado o desvio padrão percentual de 2,84% para ambos L_0 , verificando-se assim que os dados deste adesivo apresentam desvio inferior em relação aos outros adesivos. De referir que foram considerados todos os provetes ensaiados, reforçando a validade dos dados recolhidos.

3.1.4.2.3 SikaForce® 7752

As curvas P - δ do adesivo SikaForce® 7752 são apresentadas na Figura 47, e na Tabela 9 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente em função de L_0 do respetivo adesivo.

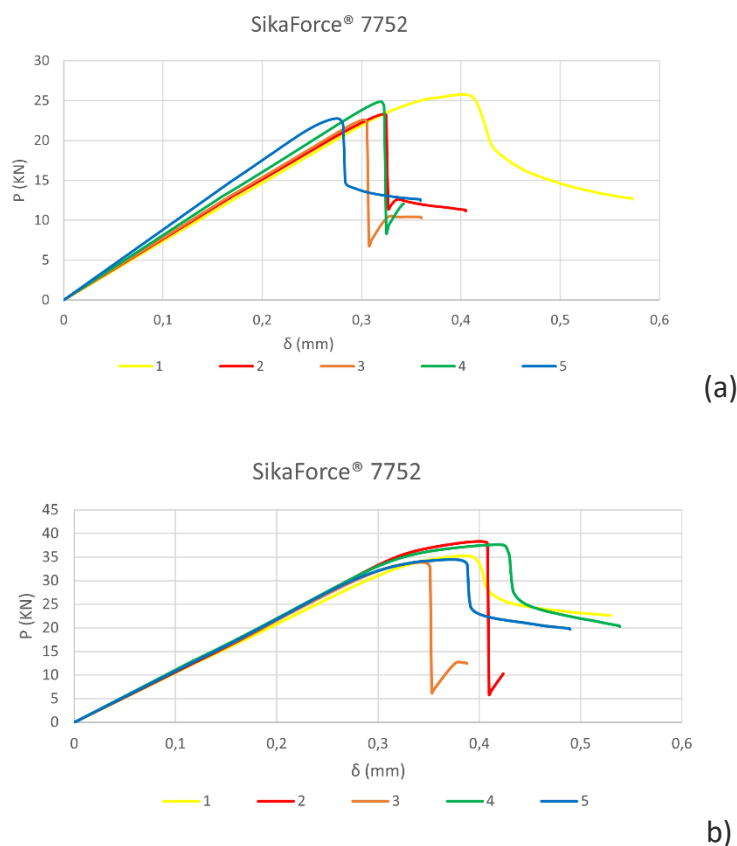


Figura 47 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 47 a) verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura, exceto na amostra 1 que apresenta plasticidade dos aderentes e um deslocamento até à rotura claramente superior aos restantes provetes. O comportamento das juntas deve-se possivelmente à deposição de uma espessura de adesivo superior à prevista ou à acumulação de adesivo em excesso na zona interior e inacessível da junta adesiva.

Nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 47 b) observou-se plastificação dos aderentes. O provete 3 apresenta uma deformação até à rotura menor em relação aos outros

provetes, devido a defeitos decorrentes do processo de maquinagem ou mesmo defeitos do material.

Na generalidade, verifica-se a uma boa precisão das curvas no que diz respeito à rigidez. Como foi apontado para os adesivos anteriores, é evidente a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes.

Tabela 9 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752

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

O adesivo SikaForce® 7752 é, dos três adesivos ensaiados, aquele que apresenta as dispersões mais elevadas: 5,24% para $L_0=20$ mm e 4,87% para $L_0=40$ mm. As diferenças registadas entre os valores podem ser justificadas pelos mesmos motivos mencionados no caso do Araldite® AV138.

3.1.4.3 Resistência das juntas

Os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas e o desvio padrão de cada valor de L_0 , referentes aos três adesivos, são representados na Figura 48. Na Tabela 10 estão presentes os valores médios da carga máxima em função de L_0 e o aumento percentual dos mesmos, para cada adesivo.

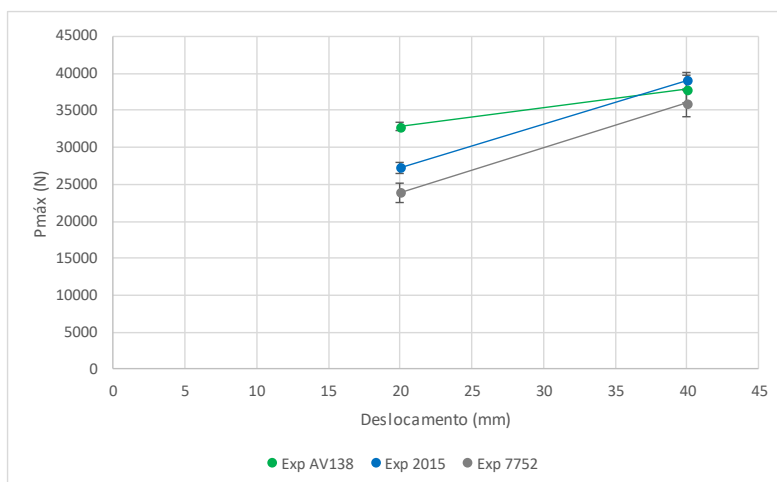


Figura 48 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos

Tabela 10 – $P_{\text{máx}}$ Méd (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{\text{máx}}$ (%)) 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	$\Delta P_{\text{máx}}$ (%)
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,4
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,4
SikaForce® 7752	23856,4	35929,9	50,6

O adesivo Araldite® AV138 é, para o valor de L_0 de 20 mm, o adesivo que suporta o maior carregamento (32797,5 N). Para $L_0=40$ mm, $P_{\text{máx}}$ aumenta em cerca de 15,4% até 37857,2 N, verificando-se que é o adesivo com o menor aumento percentual. Este aumento relativamente reduzido do Araldite® AV138 comprova a fragilidade deste adesivo.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{\text{máx}}=27238,4$ N para $L_0=20$ mm, o que corresponde um valor inferior ao do Araldite® AV138, porém apresenta um aumento percentual (43,4%) muito superior ao mesmo. Este comportamento deve-se ao facto de ser um adesivo mais dúctil. Por isso, serão aplicadas cargas mais elevadas e, conseqüentemente, ocorre a plastificação dos aderentes. Para $L_0=40$ mm, a carga máxima que a junta adesiva suporta é de 39066,8 N, apresentando assim uma resistência superior à do Araldite® AV138.

O adesivo SikaForce® 7752 é aquele que apresenta o maior aumento de resistência percentual (50,6%) entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Tal ocorrência deve-se ao facto de este adesivo ser o mais dúctil dos três em estudo. Para um L_0 de 20 mm, o adesivo apresenta um $P_{\text{máx}}$ de 23856,4 N e, para $L_0=40$ mm, de 35929,9 N. Contudo, apesar do grande aumento de resistência na junta adesiva, a carga máxima suportada pelos provetes com o adesivo SikaForce® 7752 manteve-se sempre abaixo dos adesivos anteriormente descritos.

A realização dos ensaios experimentais permitiu constatar um comportamento bastante distinto entre os três adesivos, uma vez que o aumento de $P_{\text{máx}}$ com L_0 varia consoante o adesivo. O adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os adesivos que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares para ambos os L_0 , seguidos do Sikaforce® 7752, que apresenta uma redução significativa em termos de resistência face aos dois referidos adesivos. Em contrapartida, 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 .

3.2 Previsão da resistência

A previsão da resistência de juntas adesivas tubulares pode ser efetuada por meio de métodos analíticos e numéricos. Nesta dissertação são abordados três modelos analíticos e um modelo numérico baseado no MEF. Desta forma, inicialmente é efetuada a descrição do pré-processamento do MEF. Dois dos métodos analíticos são analisados e comparados tendo em conta a distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e as tensões de corte (τ_{xy}) no plano médio da espessura do adesivo para diferentes valores de L_0 . Numa segunda fase, é obtida a resistência das juntas, segundo diferentes critérios de rotura e efetuada a respetiva comparação com os resultados experimentais, acrescentando também o modelo da tensão de cedência generalizada [10] aos métodos analíticos de forma a complementar a análise.

Neste estudo, os resultados demonstrados graficamente apresentam as distribuições de tensões absolutas e normalizadas por τ_{avg} , que representa a média de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de L_0 . O valor de L_0 foi normalizado (x/L_0), através da divisão da distância desde o início da sobreposição até ponto em análise pelo comprimento total, em que x está definido na Figura 39. Os resultados apresentados são compreendidos no intervalo ($0 \leq x/L_0 \leq 1$), no qual $x/L_0=0$ representa a extremidade da ligação que corresponde ao topo do tubo exterior e $x/L_0=1$ representa a extremidade da ligação oposta (topo do tubo interior).

3.2.1 Pré-processamento do MEF

O estudo das juntas tubulares desenvolvido a partir de uma análise numérica é baseado no MEF. Para isso, foi escolhido o *software* ABAQUS® (Dassault Systèmes) que permite a utilização do módulo integrado de MDC para a previsão da resistência das juntas adesivas.

A análise bidimensional de MEF tem por base a utilização de elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes, e elementos coesivos axissimétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para a camada do adesivo, como aproximação da geometria em análise, fornecendo resultados precisos para este tipo de geometrias. O MDC aplicado é o modelo de dano triangular disponível no ABAQUS®, sendo descrito no subcapítulo 2.2.2.3. Este modelo caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

O pré-processamento da modelação em MEF é executado de acordo com o procedimento que se descreve de seguida, fazendo referência aos módulos de *software* em que a informação foi introduzida: *Part, Property, Assembly, Step, Load, Mesh* e *Job*.

No primeiro passo – *Part* – é efetuada o desenho da junta adesiva, tal como é representado na Figura 49. Para modelar os aderentes e o adesivo foi desenhado apenas

um corpo, posteriormente dividido em partições para a atribuição dos respetivos materiais. Na camada do adesivo, modelada por elementos MDC, considerou-se apenas um elemento na direção de t_a . Como está em causa a análise de elementos axissimétricos, o eixo de revolução é de extrema importância, uma vez que para além de posicionar o modelo no centro do sistema de eixos, vai ditar o diâmetro da junta adesiva tubular.

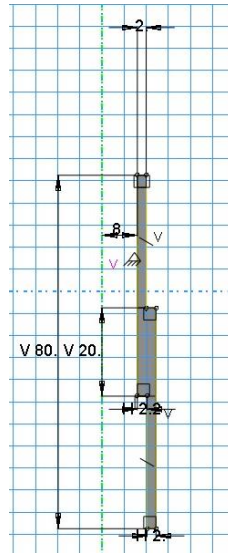


Figura 49 - Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS®

No segundo passo – *Property* – são atribuídas as propriedades mecânicas das partições anteriormente criadas (adesivo e aderentes), representadas na Figura 50. Também neste módulo são criados os materiais e são atribuídas secções às respetivas partições. O alumínio é modelado considerando a rigidez do material e a sua plasticidade, de forma a ser verificado se os tubos cedem antes ou depois da camada adesiva.

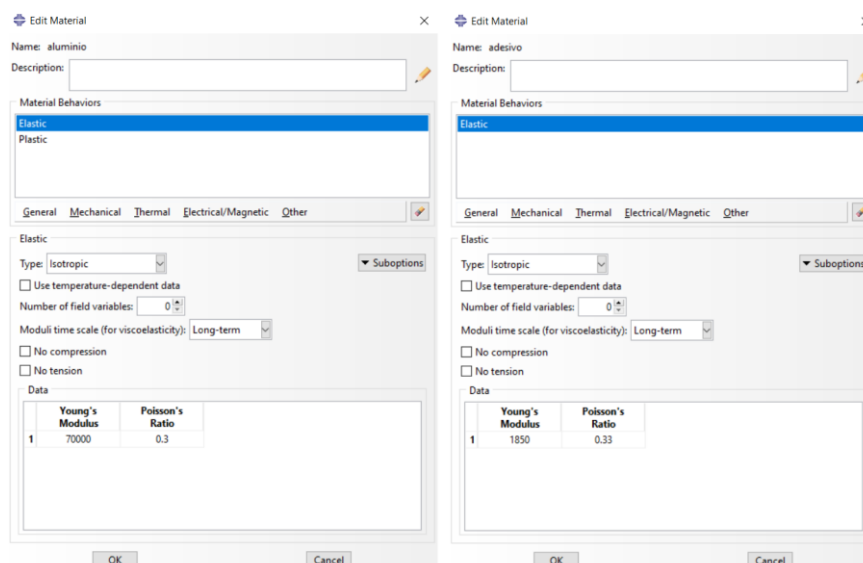


Figura 50 - Propriedades do aderente AW 6082-T651 e do adesivo Araldite® 2015

No terceiro passo – *Assembly* – não é necessário executar nenhuma operação, para esta modelação, visto que os modelos são apenas constituídos por um componente (embora dividido em partições relativas aos diferentes constituintes da junta).

No quarto passo – *Step* – são introduzidos os parâmetros de computação da simulação. De forma a não exceder o número de incrementos permitido, considera-se um valor de 10000 para o número máximo de incrementos a realizar na análise. Foi considerado um tamanho inicial de incremento de 1% do deslocamento aplicado nos modelos e o tamanho máximo também em 1% do deslocamento aplicado. Foram tidas em conta não-linearidades geométricas, de forma a obter um comportamento mais fidedigno, principalmente nas tensões na junta em função da carga aplicada.

No quinto passo – *Load* – são aplicadas condições de fronteira à junta adesiva (Figura 51), de modo a simular o carregamento de tração. Numa das extremidades do aderente é simulado um encastramento, enquanto na outra extremidade é aplicado um deslocamento vertical e uma restrição horizontal à secção.

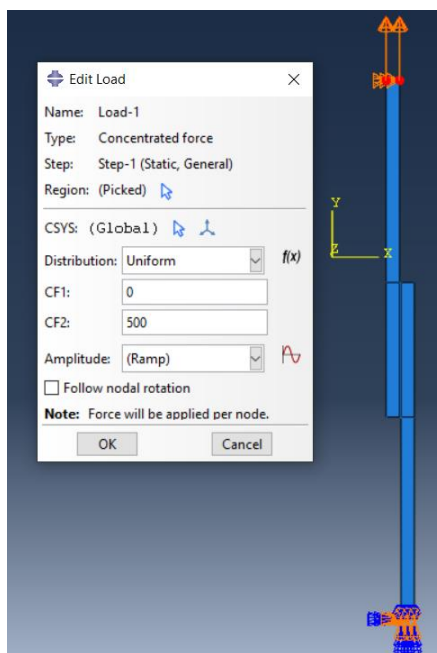


Figura 51 - Representação das condições de fronteira na simulação

No sexto passo – *Mesh* – 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, uma vez que as zonas mais próximas das extremidades da sobreposição estão mais refinadas do que o centro da junta, como é possível verificar na Figura 52. Em função dos constituintes da junta o tipo de malha é diferente, sendo malha estruturada para os aderentes e malha do tipo *sweep* para os adesivos.

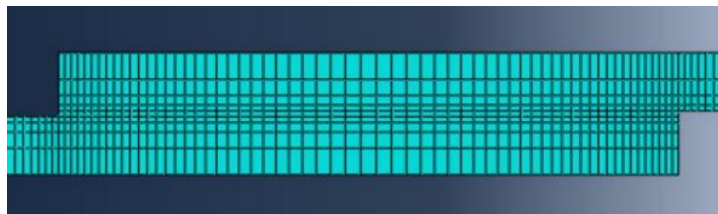


Figura 52 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=20$ mm

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. Para $L_0=20$ mm existem 61 elementos do meio para extremidade da sobreposição e no caso de $L_0=40$ mm consideraram-se 122 elementos, considerando-se em ambos os casos o tamanho da aresta na extremidade de 0,2 e no meio de 0,5. 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 [90]. De seguida, foram adicionados os parâmetros da viscosidade aos elementos coesivos de forma a evitar problemas de convergência, visto que torna o processo de rotura mais suave.

Por fim, no sétimo passo – *Job* – dá-se início à simulação da junta, onde é inserido o nome e a capacidade computacional que se pretende dedicar à simulação. De seguida submete-se a simulação e, caso seja desejado, segue-se a evolução da análise.

3.2.2 Tensões

De forma a analisar o comportamento das juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração, são estudados dois modelos analíticos: Nayeb-Hashemi et al. [79] e Pugno e Carpinteri [80], que são comparados com uma análise elástica pelo MEF.

Os modelos analíticos foram processados no *software* Microsoft Excel®, tendo em conta as equações apresentadas no subcapítulo 2.3.4, os dados fornecidos da geometria da junta tubular no subcapítulo 3.1.1, e as propriedades dos materiais no subcapítulo 3.1.2.

Para uma análise crítica e comparação das tensões entre os métodos analíticos e o MEF, é simulado o carregamento axial com a força de 1000 N. Este valor foi atribuído de acordo com a resistência suportada pela junta sem a ocorrência da plastificação dos adesivos e aderentes. Dos modelos apresentados são obtidas as distribuições das tensões absolutas e normalizadas de arrancamento (σ_y) e corte (τ_{xy}).

3.2.2.1 Forma geral das tensões de arrancamento e de corte

Neste capítulo as tensões de arrancamento e de corte são abordadas de uma forma mais generalizada, tendo em conta a sua distribuição ao longo da junta. Para isso, são representadas as tensões absolutas e normalizadas para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no

adesivo Araldite® AV138 segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] e o MEF. É dada preferência ao modelo de Pugno e Carpinteri [80], em detrimento do modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79], uma vez que este modelo contempla as tensões de arrancamento e de corte, para além de que a distribuição de tensões de corte é igual nestes dois modelos. Esta igualdade de distribuição de tensões deve-se ao facto de ambos modelos terem sido desenvolvidos com base no modelo de deformação diferencial.

3.2.2.1.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 53 são apresentadas as distribuições das tensões σ_y absolutas e normalizadas nas juntas adesivas tubulares para o adesivo Araldite® AV138 segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] e o MEF.

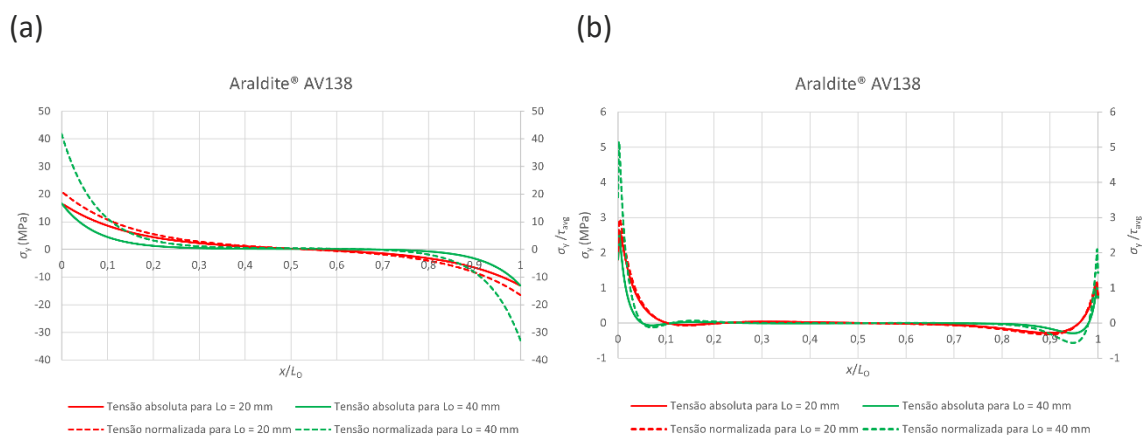


Figura 53 - Distribuição das tensões σ_y absolutas e normalizadas nas juntas adesivas tubulares para o adesivo Araldite® AV138 segundo o modelo de Pugno e Carpinteri (a) e o MEF (b)

Comparando as tensões σ_y segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] com o MEF, verifica-se uma divergência acentuada no que diz respeito aos picos máximos obtidos e à distribuição de tensões. Esta divergência deve-se ao facto de o modelo de Pugno e Carpinteri [80] ser um modelo concebido apenas de acordo com o comportamento elástico da junta, abordando as tensões σ_y de forma mais aproximada, considerando que a tensão τ_{xy} é predominante. A única semelhança que tem com o MEF é na região central da junta, onde as tensões σ_y são nulas, variando o tamanho da região com tensões σ_y nulas em função da rigidez do adesivo.

No que diz respeito à distribuição das tensões σ_y normalizadas, representadas graficamente, verifica-se o aumento da magnitude nas extremidades da junta e do gradiente das curvas para $L_0=40$ mm. Esta situação deve-se ao facto de a distribuição das tensões τ_{xy} absolutas para $L_0=40$ mm ser pouco uniformizada e das maiores amplitudes nas extremidades da sobreposição em comparação com $L_0=20$ mm, diminuindo assim o valor de τ_{avg} .

Tendo em conta a distribuição de tensões σ_y obtida pelo MEF, constata-se que, na região central da sobreposição, as tensões σ_y são aproximadamente nulas, com gradiente crescente com o aumento de L_0 . Na região intermédia da camada do adesivo são geradas tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tração devido à curvatura ou deformação transversal da junta. Estas tensões de compressão provocam a separação nas extremidades da camada de adesivo e a compressão na zona intermédia da mesma. Sabe-se que as tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura prematura [91, 92].

Para valores de L_0 mais elevados, observam-se picos compressivos na proximidade das singularidades, que aumentam de magnitude com L_0 . Ao mesmo tempo, as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se menos significativas. Esta tendência tende a parar a propagação de dano após dano localizado nas zonas de singularidades [93], o que justifica algumas vezes que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é obtido após a iniciação da fenda [94]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 deve reduzir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente para juntas com adesivos frágeis [95].

3.2.2.1.2 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} absolutas e normalizadas nas juntas adesivas tubulares para o adesivo Araldite® AV138 segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79] e o MEF estão representadas na Figura 54.

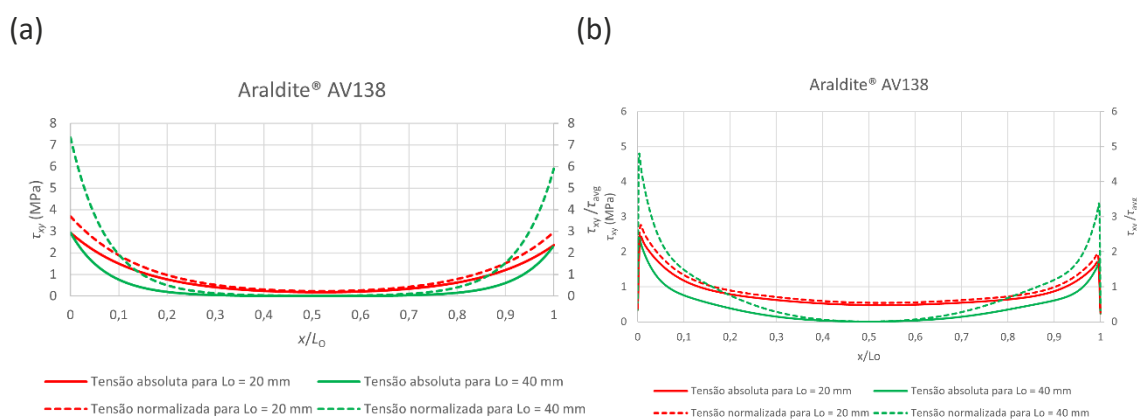


Figura 54 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas e normalizadas nas juntas adesivas tubulares para o adesivo Araldite® AV138 segundo o modelo de Nayeb-Hashemi (a) e o MEF (b)

Por observação da Figura 53 (a) e Figura 54 (a) verifica-se que as tensões absolutas τ_{xy} possuem uma amplitude do pico de tensões nas extremidades da ligação da junta inferior ao pico das tensões σ_y , o que não é desejável dado que, quando aplicados esforços de tração, ocorrem predominantemente tensões τ_{xy} .

De acordo com os gráficos exibidos na Figura 54, constata-se uma boa precisão da distribuição de tensões τ_{xy} segundo modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79] e o MEF.

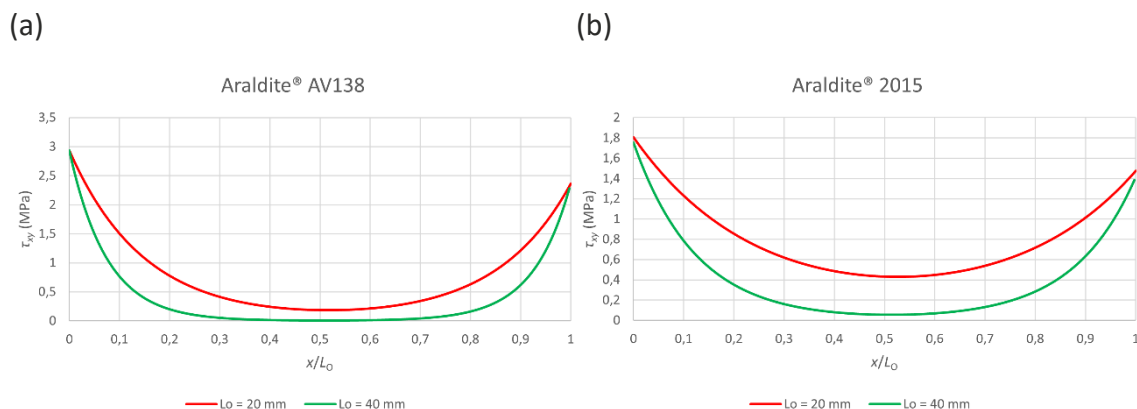
Através da observação dos gráficos, verifica-se que as tensões τ_{xy} possuem uma magnitude superior às tensões σ_y para o MEF, exceto em zonas localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [96, 97]. A distribuição de tensões τ_{xy} apresenta ligeiras semelhanças com a distribuição de tensões σ_y , constatando-se que os valores são mais reduzidos na região central de L_0 e o máximo é atingido nas extremidades da sobreposição [98, 99]. Este comportamento deve-se à deformação diferencial de cada um dos tubos ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre e tem um aumento progressivo até à extremidade oposta [10, 31, 100]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se apliquem adesivos frágeis, a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição [100]. No que concerne aos adesivos dúcteis, estes permitem uma melhor redistribuição de tensões nas extremidades, ao mesmo tempo que a região interna da sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes, o que possibilita um aumento da resistência da junta [91, 101].

3.2.2.2 Modelo de Nayeb-Hashemi et al.

O modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79] apresentado no subcapítulo 2.3.4.1 permite a obtenção das tensões τ_{xy} a meio da espessura da camada do adesivo.

3.2.2.2.1 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} absolutas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos são apresentadas na Figura 55.



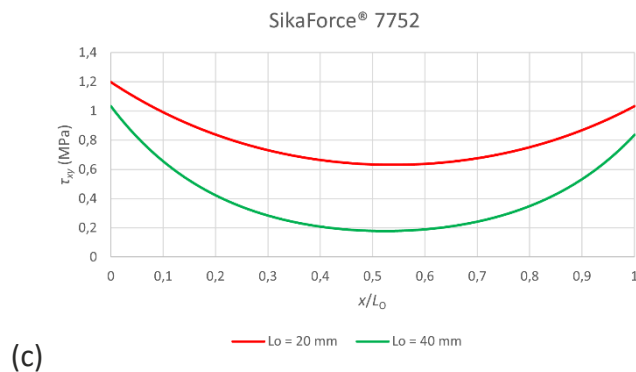


Figura 55 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al.: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Na Tabela 11 estão representados os valores máximos de τ_{xy} para os três adesivos, verificando-se que o adesivo Araldite® AV138 apresenta o maior valor para ambos L_0 . Estes valores devem-se ao facto de que, dentro da seleção de adesivos, o Araldite® AV138 é o adesivo mais rígido, provocando uma concentração de tensões τ_{xy} bastante elevada nas extremidades da junta adesiva. O Araldite® 2015 apresenta um pico de tensões τ_{xy} inferior, uma vez que este é um adesivo de rigidez inferior ao Araldite® AV138. O adesivo SikaForce® 7752 apresenta o menor pico de tensões τ_{xy} dos três adesivos, visto que tem uma rigidez bastante inferior aos outros dois adesivos.

Tabela 11 - Valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al., para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	2,94	2,93
Araldite® 2015	1,81	1,76
SikaForce® 7752	1,20	1,03

As distribuições das tensões τ_{xy} normalizadas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos são apresentadas na Figura 56.

Os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} , para os três adesivos, estão representados na Tabela 12, verificando-se que o adesivo Araldite® AV138 apresenta o maior valor para ambos L_0 uma vez que, como já se constatou anteriormente, este é o adesivo mais rígido, seguido do Araldite® 2015. O adesivo SikaForce® 7752 é o adesivo com menores picos de tensões τ_{xy} normalizadas uma vez que é o adesivo que apresenta menor rigidez dos três em estudo.

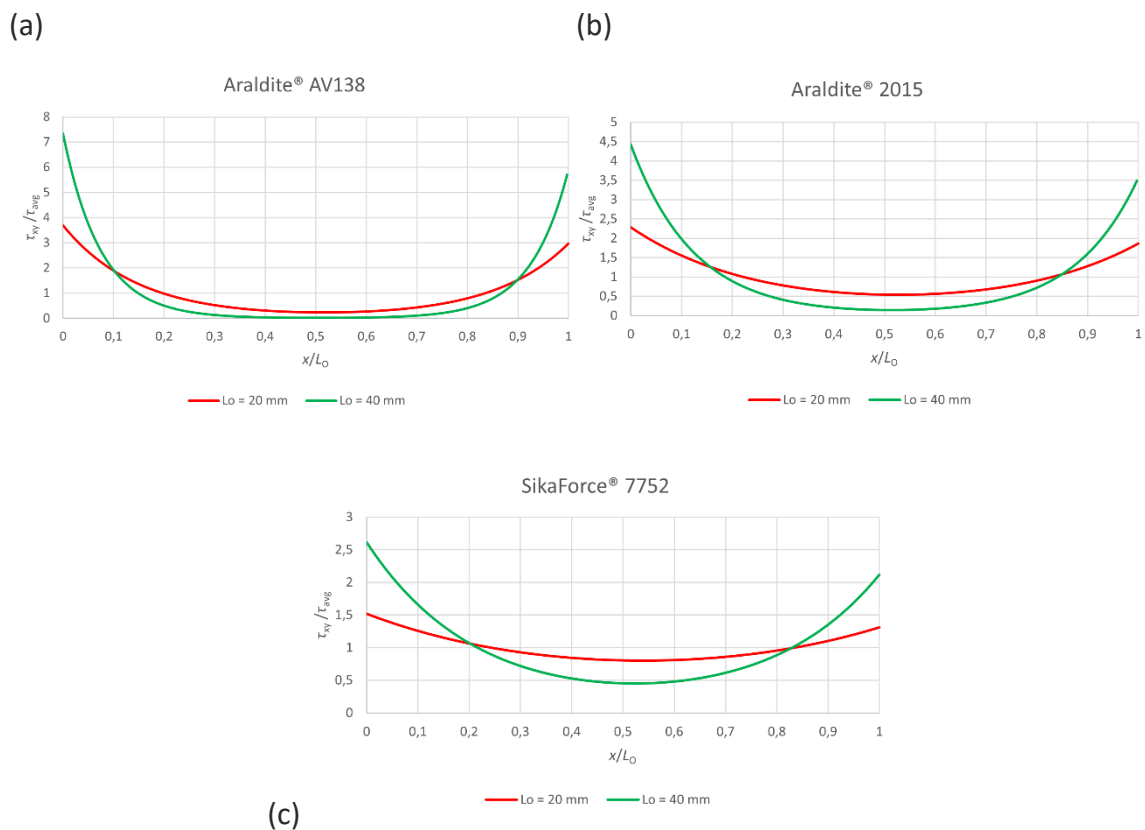


Figura 56 - Distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al.: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 12 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al., para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	3,69	7,34
Araldite® 2015	2,28	4,43
SikaForce® 7752	1,52	2,61

3.2.2.3 Modelo de Pugno e Carpinteri

O modelo de Pugno e Carpinteri [80] apresentado no subcapítulo 2.3.4.2 permite a obtenção das tensões σ_y e τ_{xy} a meio da espessura da camada do adesivo.

3.2.2.3.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 57 são apresentadas as distribuições das tensões σ_y absolutas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos.

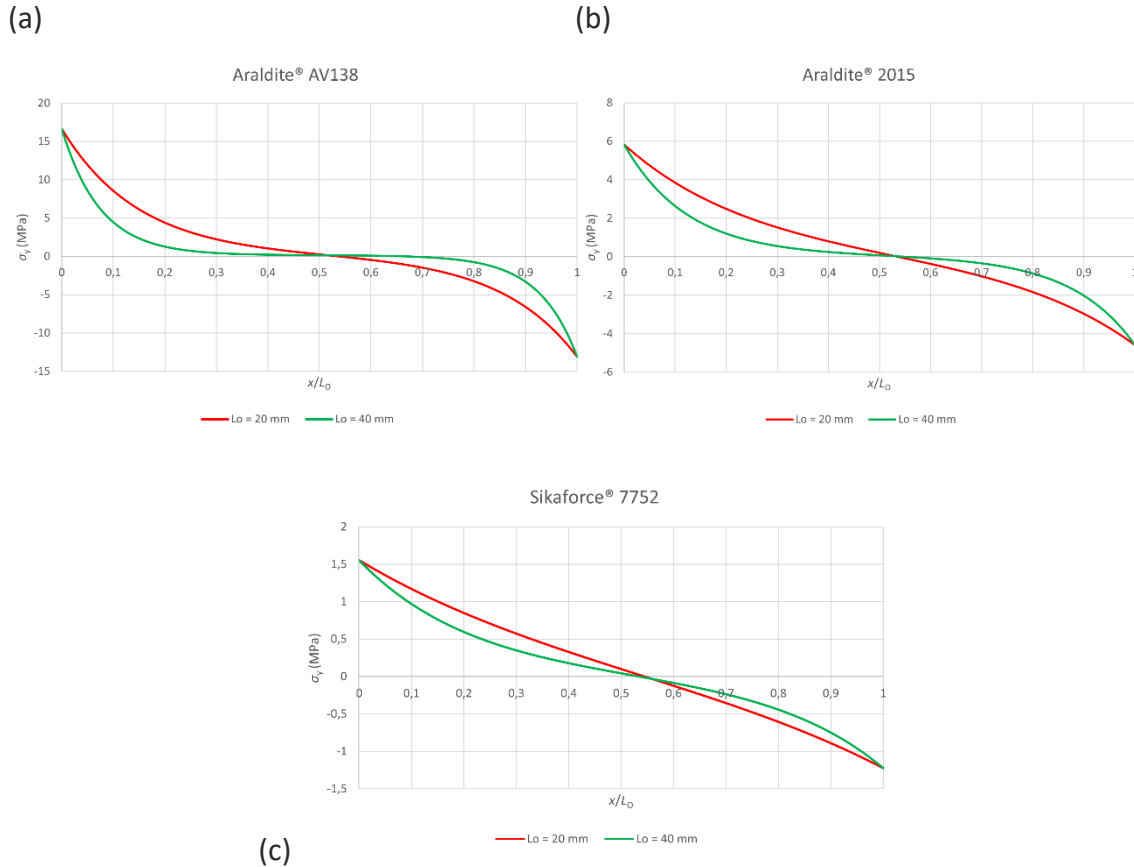


Figura 57 - Distribuição das tensões σ_y absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

A partir da observação valores máximos de σ_y relativos aos três adesivos, na Tabela 13, verifica-se que este modelo não é o mais adequado para a obtenção das tensões σ_y , uma vez que as curvas das juntas com $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm apresentam valores iguais. Visto que o Araldite® AV138 é o adesivo mais rígido dos três em estudo, este apresenta o maior valor máximo de σ_y para ambos L_0 . Já o Araldite® 2015 obteve um pico de tensões σ_y inferior ao Araldite® AV138, uma vez que é um material com uma rigidez inferior. O adesivo SikaForce® 7752 apresenta o menor pico de tensões σ_y dos três adesivos, visto que apresenta uma rigidez bastante inferior aos outros dois adesivos.

Tabela 13 - Valores máximos de σ_y (MPa) para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	16,68	16,68
Araldite® 2015	5,82	5,82
SikaForce® 7752	1,55	1,55

As distribuições das tensões σ_y normalizadas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos são apresentadas na Figura 58.

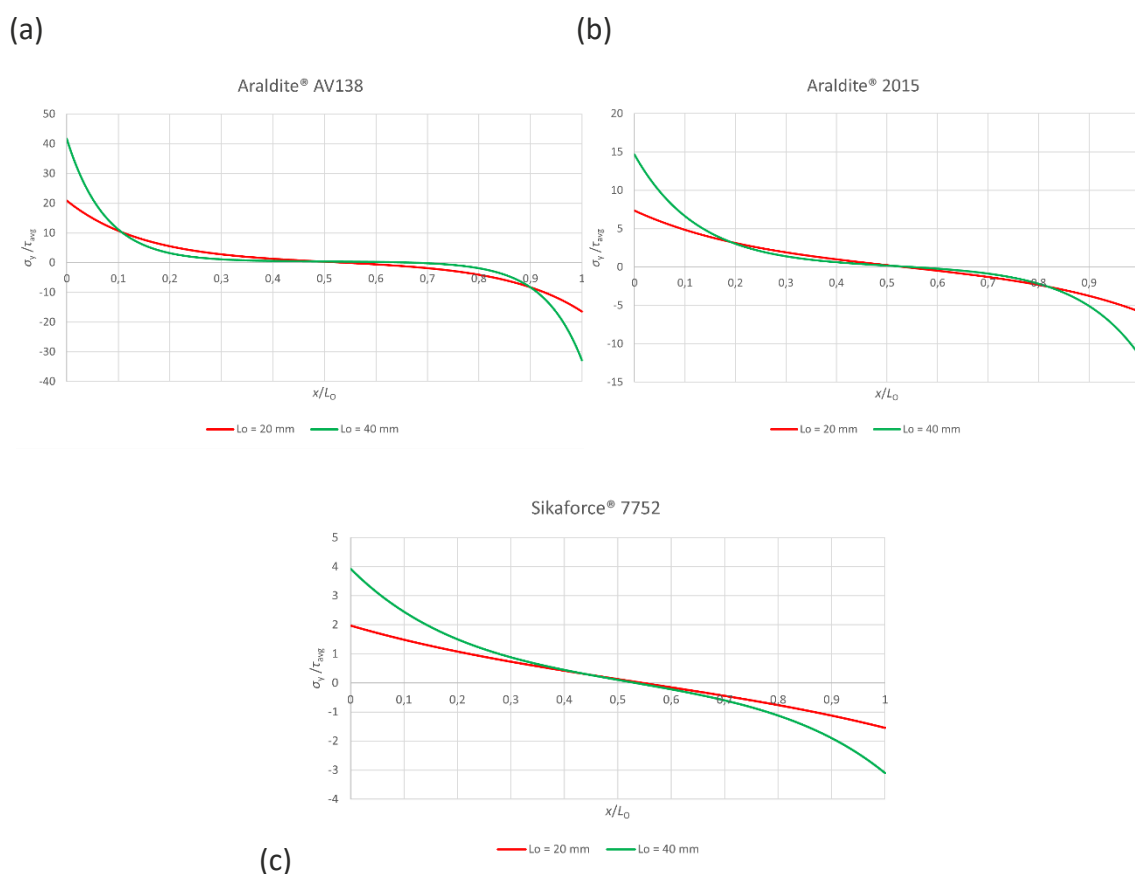


Figura 58 - Distribuição das tensões σ_y normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

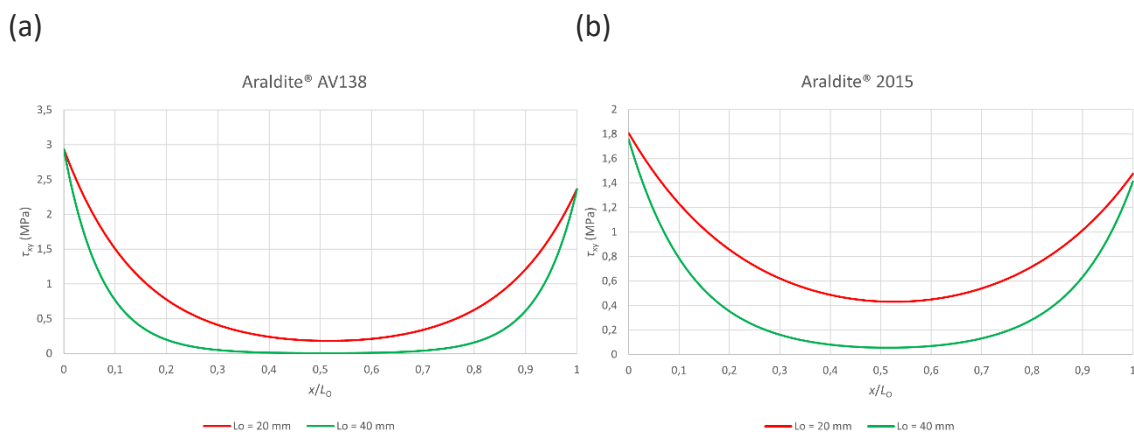
De acordo com a Tabela 14, onde estão representados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, verifica-se o aumento considerável dos picos máximos da tensão para $L_0=40$ mm. Dos três adesivos em estudo, o Araldite® AV138 é o que apresenta o maior valor de tensão para ambos L_0 , devido à sua elevada rigidez, seguido do Araldite® 2015. Em relação ao adesivo SikaForce® 7752, este apresenta o menor pico de tensões σ_y normalizadas dos três adesivos.

Tabela 14 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	20,93	41,75
Araldite® 2015	7,35	14,67
SikaForce® 7752	1,97	3,93

3.2.2.3.2 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} absolutas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos são apresentadas na Figura 59.



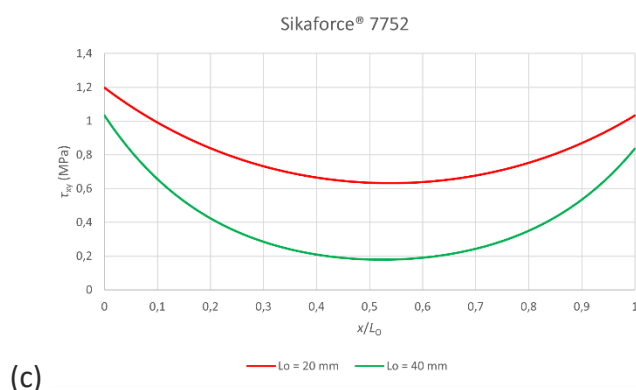


Figura 59 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Na Tabela 15 são apresentados os valores máximos de τ_{xy} para os três adesivos, onde se constata que os picos de tensão τ_{xy} mais elevados são obtidos pelo adesivo mais rígido (Araldite® AV138) para ambos L_0 . O Araldite® 2015 apresenta picos de tensões τ_{xy} inferiores, uma vez que é um material com rigidez inferior ao Araldite® AV138. Por fim, os menores picos de tensões τ_{xy} dos três adesivos são referentes ao adesivo SikaForce® 7752, visto que é o adesivo com uma rigidez bastante inferior aos outros dois adesivos.

Tabela 15 - Valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	2,94	2,93
Araldite® 2015	1,81	1,76
SikaForce® 7752	1,20	1,03

Na Figura 60 estão expressas as distribuições das tensões τ_{xy} normalizadas para as juntas adesivas tubulares relativamente aos três adesivos obtendo-se, à semelhança dos restantes gráficos relativos às tensões normalizadas, curvas das tensões com maiores gradientes e magnitudes para $L_0=40$ mm relativamente $L_0=20$ mm.

Tal como já se verificou anteriormente, o adesivo Araldite® AV138 apresenta o maior pico máximo de τ_{xy}/τ_{avg} para ambos L_0 (Tabela 16). O Araldite® 2015 apresenta um pico de tensões τ_{xy} normalizadas inferior ao Araldite® AV138 e o adesivo SikaForce® 7752

apresenta o menor pico de tensões τ_{xy} normalizadas dos três adesivos, visto que apresenta uma rigidez bastante inferior aos outros dois adesivos.

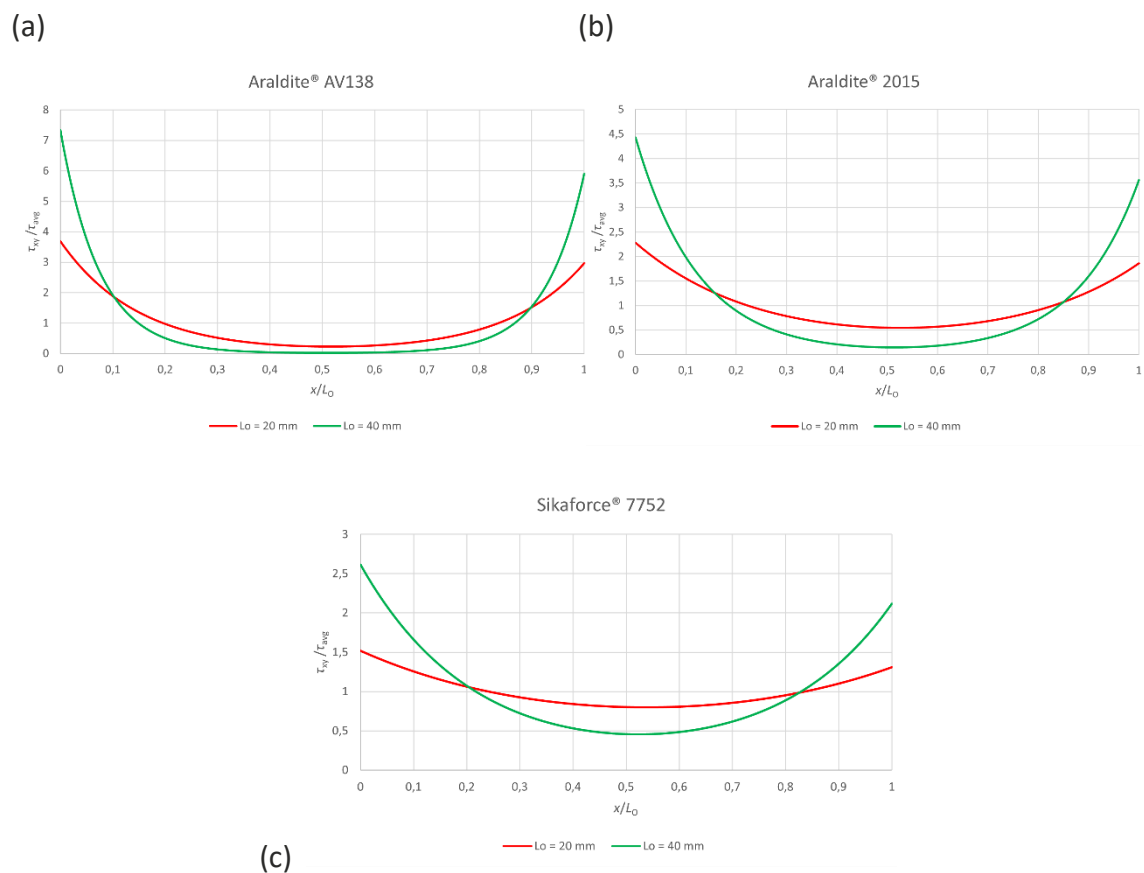


Figura 60 - Distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o modelo de Pugno e Carpinteri: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	3,69	7,34
Araldite® 2015	2,28	4,43
SikaForce® 7752	1,52	2,61

3.2.2.4 MEF

O MEF é apresentado no subcapítulo 2.2.2 e pré-processado através das etapas expostas no subcapítulo 3.2.1, permitindo a obtenção das tensões σ_y e τ_{xy} a meio da espessura da camada do adesivo.

3.2.2.4.1 Tensões de arrancamento

As distribuições das tensões σ_y absolutas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos são apresentadas na Figura 61.

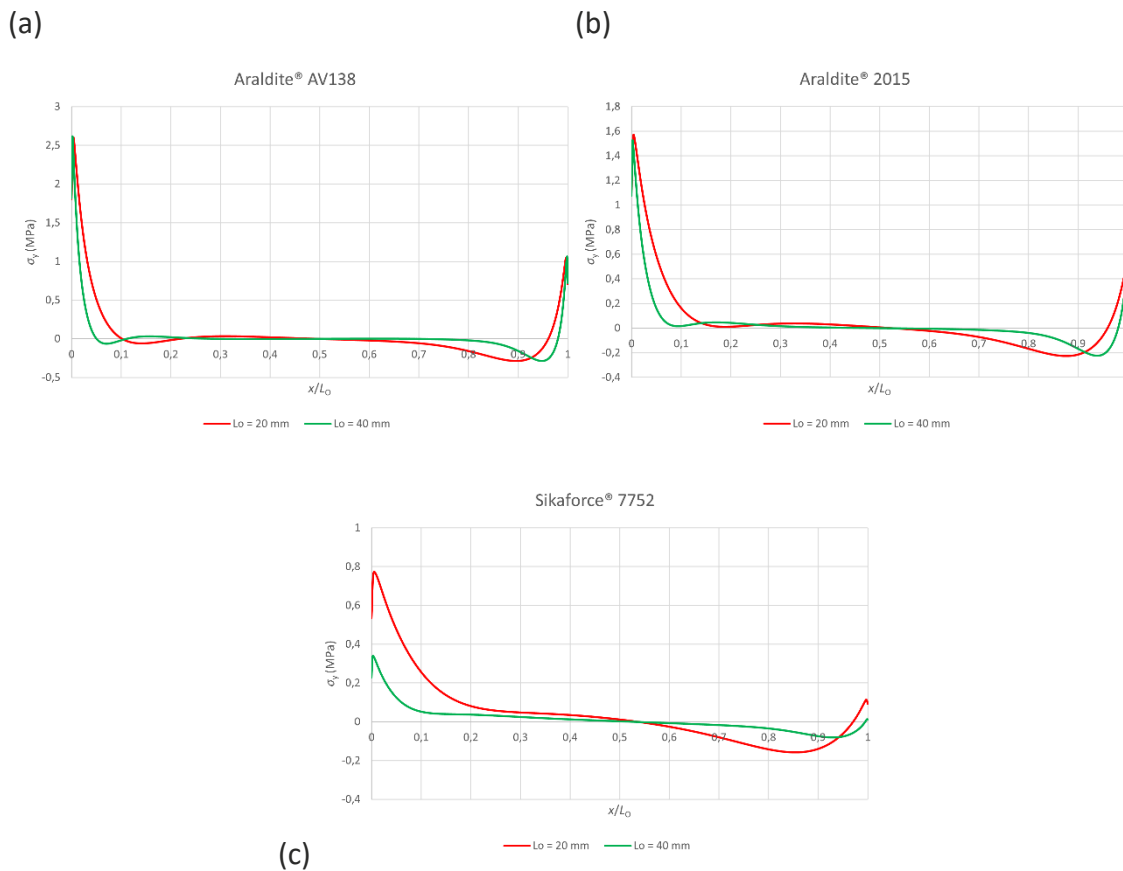


Figura 61 - Distribuição das tensões σ_y absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

A partir dos gráficos apresentados na Figura 61 é possível verificar que o adesivo Araldite® AV138, comparativamente com os outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, que correspondem às extremidades de L_0 na junta da camada de adesivo. Este adesivo possui uma rigidez elevada, o que origina estes picos de concentração de tensões mais elevados que podem levar à rotura prematura da junta.

Na Tabela 17 estão presentes os valores máximos de σ_y para os três adesivos, em função de L_0 . É possível verificar que, tanto para um $L_0=20$ mm como para um $L_0=40$ mm, o

adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta picos de concentração de tensões mais elevados, quando comparado com os outros dois adesivos. O SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os menores valores de σ_y , uma vez que este adesivo é o que apresenta menor rigidez. Como é possível observar na Figura 61 (c), formaram-se picos de concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva claramente inferiores aos dos outros adesivos (Figura 61).

Tabela 17 - Valores máximos de σ_y (MPa) para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	2,60	2,60
Araldite® 2015	1,57	1,53
SikaForce® 7752	0,77	0,34

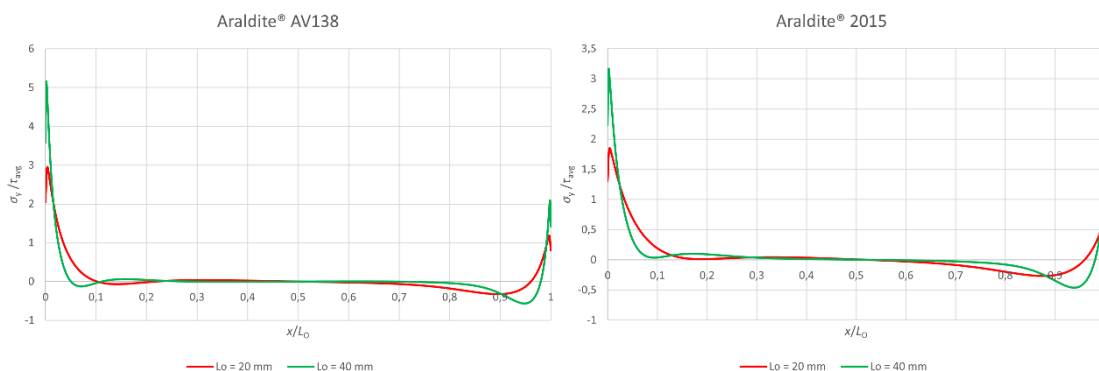
As distribuições das tensões σ_y normalizadas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos são apresentadas na Figura 62.

De acordo com os gráficos apresentados na Figura 62 observa-se o aumento da magnitude da curva das tensões σ_y normalizadas, bem como o gradiente mais acentuado nas extremidades da junta para $L_0=40$ mm.

Na Tabela 18 estão representados os valores máximos de σ_y / τ_{avg} para os três adesivos, verificando-se que o adesivo Araldite® AV138 apresenta o maior valor para ambos L_0 , seguido do Araldite® 2015. O adesivo SikaForce® 7752 apresenta o menor pico de tensões σ_y normalizadas dos três adesivos.

(a)

(b)



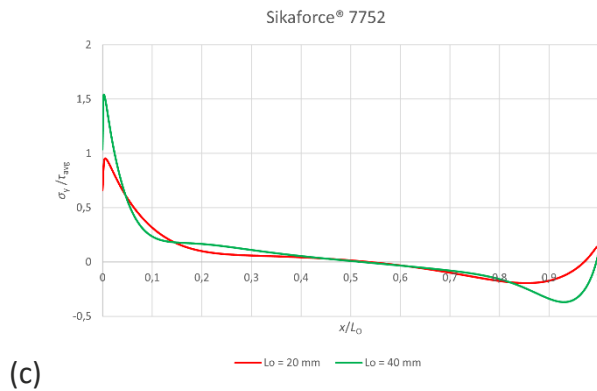


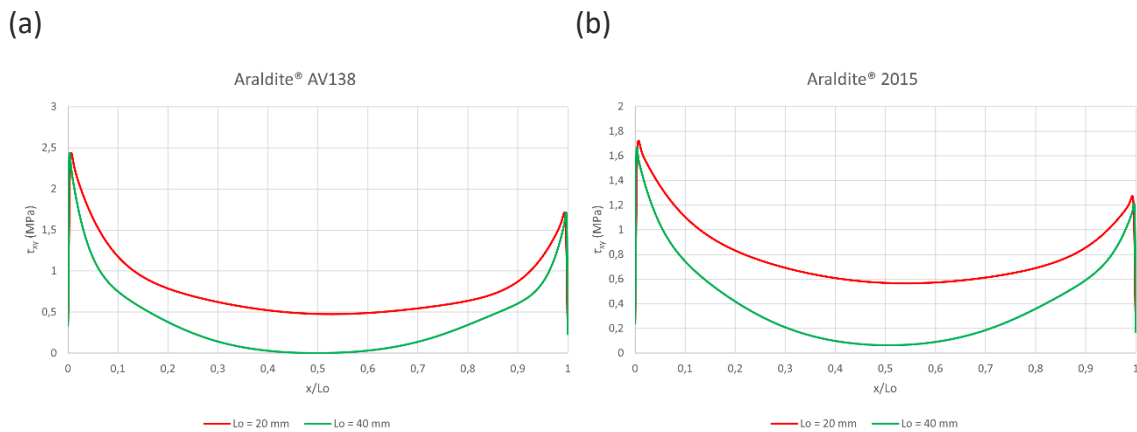
Figura 62 - Distribuição das tensões σ_y normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Tabela 18 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	2,95	5,16
Araldite® 2015	1,85	3,17
SikaForce® 7752	0,95	1,54

3.2.2.4.2 Tensões de corte

Na Figura 63 são apresentadas as distribuições das tensões τ_{xy} absolutas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos.



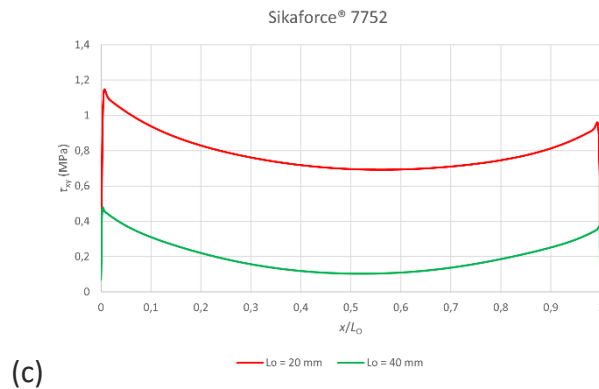


Figura 63 - Distribuição das tensões τ_{xy} absolutas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

O adesivo Araldite® AV138 possui o valor máximo de τ_{xy} (Tabela 19), uma vez que é o adesivo mais rígido dos três, o que conduz a picos de concentração de tensões τ_{xy} muito elevados nas extremidades das juntas. Devido a este efeito, o valor de rigidez que apresenta pode condicionar a resistência da junta e conduzir a uma rotura prematura da mesma. O mesmo se verifica para o caso do Araldite® 2015. Porém, como este adesivo apresenta uma rigidez inferior em comparação com o Araldite® AV138, os picos gerados apresentam valores inferiores. O adesivo SikaForce® 7752 apresenta os menores picos de tensão τ_{xy} , devido a uma rigidez inferior aos outros adesivos.

Tabela 19 - Valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	2,43	2,43
Araldite® 2015	1,72	1,67
SikaForce® 7752	1,15	0,48

Na Figura 64 são apresentadas distribuições das tensões τ_{xy} normalizadas para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos.

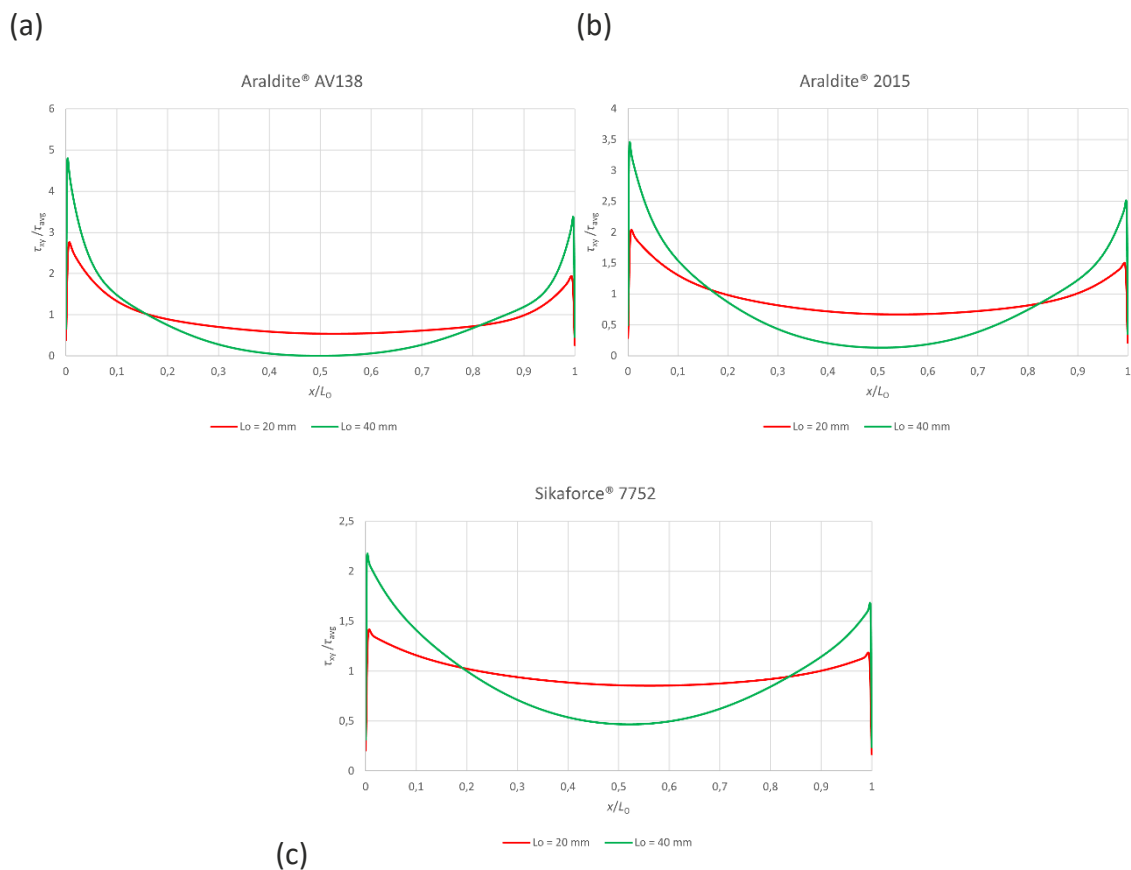


Figura 64 – Distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas nas juntas adesivas tubulares segundo o MEF: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Os valores máximos de τ_{xy} / τ_{avg} para os três adesivos estão representados na Tabela 20, verificando-se que, dos adesivos em estudo, o adesivo Araldite® AV138 apresenta o maior valor para ambos L_0 , seguido do Araldite® 2015. O menor pico de tensões τ_{xy} normalizadas dos três adesivos é obtido pelo adesivo SikaForce® 7752.

Tabela 20 - Valores máximos de τ_{xy} / τ_{avg} para os três adesivos segundo o MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 (mm)	
	20	40
Araldite® AV138	2,76	4,80
Araldite® 2015	2,04	3,46
SikaForce® 7752	1,42	2,18

3.2.2.5 Comparação de tensões

De forma a validar os dois modelos analíticos (Pugno e Carpinteri [80] e Nayeb-Hashemi et al. [79]), são comparadas as distribuições das tensões σ_y e τ_{xy} para os três adesivos com o método numérico (MEF).

3.2.2.5.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 65, Figura 66 e Figura 67 são apresentados os gráficos da comparação das distribuições das tensões σ_y absolutas obtidas pelo modelo de Pugno e Carpinteri [80] e pelo MEF para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente.

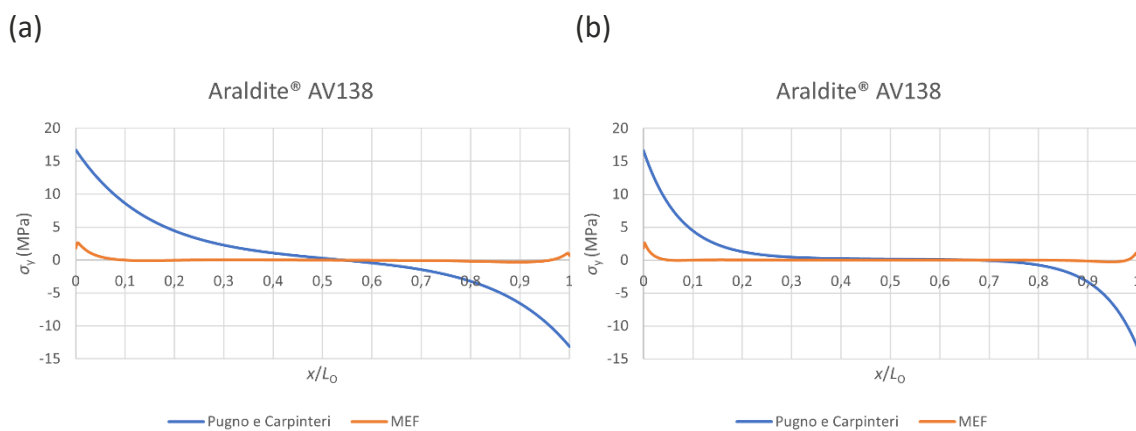


Figura 65 – Comparação da distribuição das tensões σ_y absolutas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® AV138 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

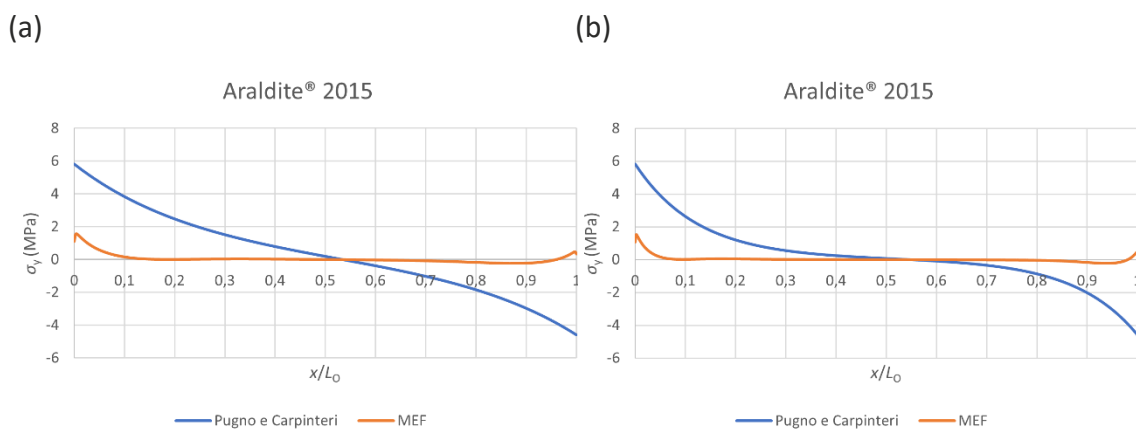


Figura 66 - Comparação da distribuição das tensões σ_y absolutas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

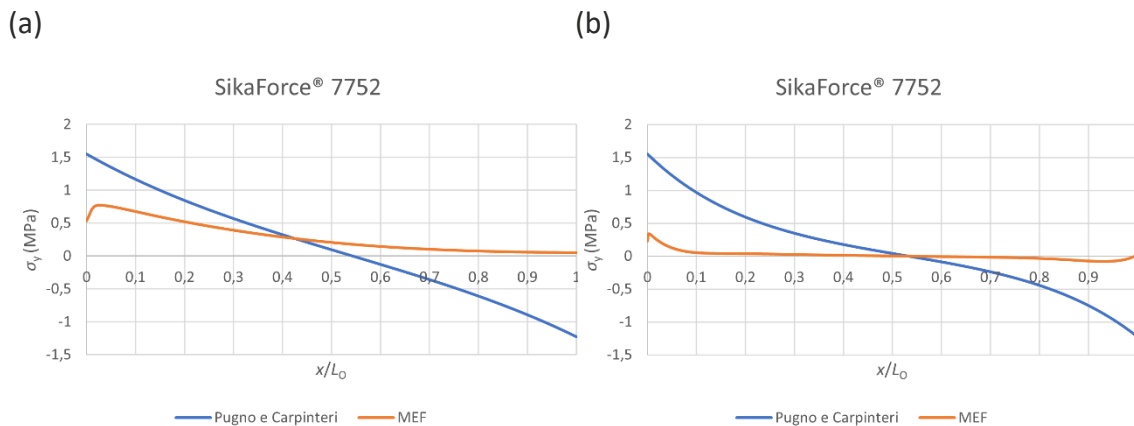


Figura 67 - Comparação da distribuição das tensões σ_y absolutas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo SikaForce® 7752 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

Relativamente à distribuição das tensões σ_y absolutas verifica-se uma grande divergência dos valores, principalmente nas extremidades da junta. Para $x/L_0=0$, o valor obtido segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] é positivo, estando de acordo com os valores representados no MEF. Contudo, para $x/L_0=1$ estes valores são negativos, contrariando os valores positivos mantidos pelo MEF.

Nas extremidades das juntas, os valores máximos de σ_y , segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80], são bastante superiores aos obtidos pelo MEF, adquirindo valores 541,5% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm em adesivos mais rígidos como o Araldite® AV138 (Tabela 21). No entanto, para o adesivo Araldite® AV138 verifica-se uma maior concentração de tensões próximas de zero na região central da junta quando $L_0=40$ mm, em conformidade com o MEF.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta picos de tensão σ_y 270,7% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 280,4% para $L_0=40$ mm (Tabela 21), o que constitui uma diferença menor do que o adesivo Araldite® AV138 devido à consequente menor rigidez do mesmo. Embora evidencie uniformidade das tensões σ_y na região central da junta para $L_0=40$ mm, esta região tem um comprimento inferior ao do adesivo Araldite® AV138.

O adesivo SikaForce® 7752 apresenta picos de tensão σ_y 101,3% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 355,9% para $L_0=40$ mm (Tabela 21), sendo o adesivo com menor discrepância de valores em relação aos picos de tensões σ_y obtidos pelo MEF para $L_0=20$ mm, uma vez que apresenta a menor rigidez dos três adesivos.

Tabela 21 – Comparação dos valores máximos de σ_y (MPa) para os três adesivos através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752		
	L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
MEF		2,60	2,60	1,57	1,53	0,77	0,34
Modelo de Pugno e Carpinteri		16,68	16,68	5,82	5,82	1,55	1,55
$\Delta\sigma_y$ (%)		541,5	541,5	270,7	280,4	101,3	355,9

Na Figura 68, Figura 69 e Figura 70 são apresentados os gráficos da comparação das distribuições das tensões σ_y normalizadas obtidas pelo modelo de Pugno e Carpinteri [80] e pelo MEF, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente.

Nos gráficos apresentados verifica-se o aumento da magnitude das tensões σ_y normalizadas nas extremidades das juntas, dado que a distribuição das tensões σ_y absolutas é mais uniforme na região central da junta. Verifica-se também que a distribuição das tensões σ_y normalizadas é menos uniforme na região central da junta para $L_0=40$ mm.

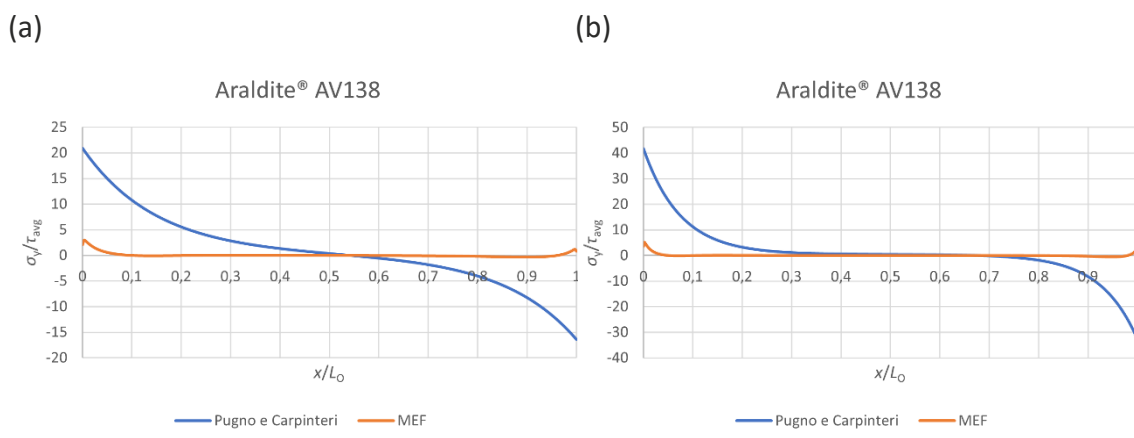


Figura 68 - Comparação da distribuição das tensões σ_y normalizadas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® AV138 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

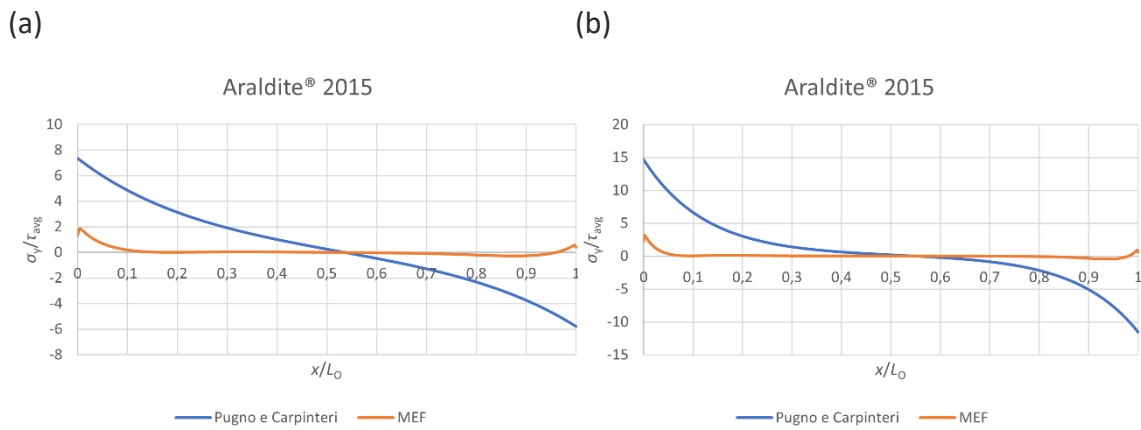


Figura 69 - Comparação da distribuição das tensões σ_y normalizadas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

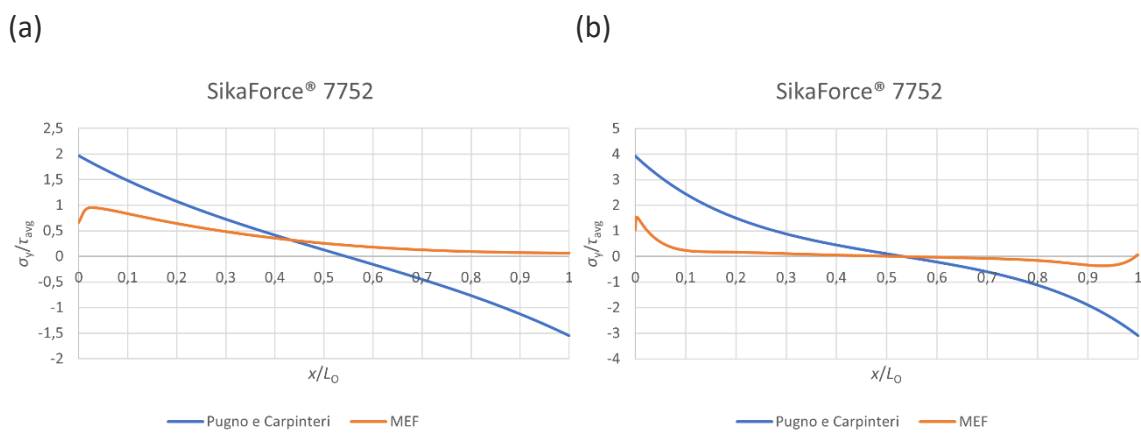


Figura 70 - Comparação da distribuição das tensões σ_y normalizadas através do modelo de Pugno e Carpinteri e do MEF, no adesivo SikaForce® 7752 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

Na Tabela 22 estão representados os valores máximos da tensão σ_y/τ_{avg} obtidos a partir do modelo de Pugno e Carpinteri [80] e do MEF, verificando-se picos de tensão σ_y normalizada bastante superiores aos obtidos pelo MEF, para adesivos mais rígidos como o Araldite® AV138. Os picos da tensão σ_y normalizada, obtidos analiticamente para este adesivo, são 609,5% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 709,1% para $L_0=40$ mm.

Relativamente a adesivos menos rígidos como o Araldite® 2015, os picos de tensão σ_y normalizada apresentam uma diferença percentual inferior aos valores do Araldite® AV138. Os picos de tensão σ_y normalizada são 297,3% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 362,8% para $L_0=40$ mm.

O SikaForce® 7752, sendo o adesivo menos rígidos dos três, é o que apresenta menor divergência do pico da tensão σ_y normalizada obtido pelo MEF, sendo 107,4% superior ao MEF para $L_0=20$ mm e 155,2% para $L_0=40$ mm.

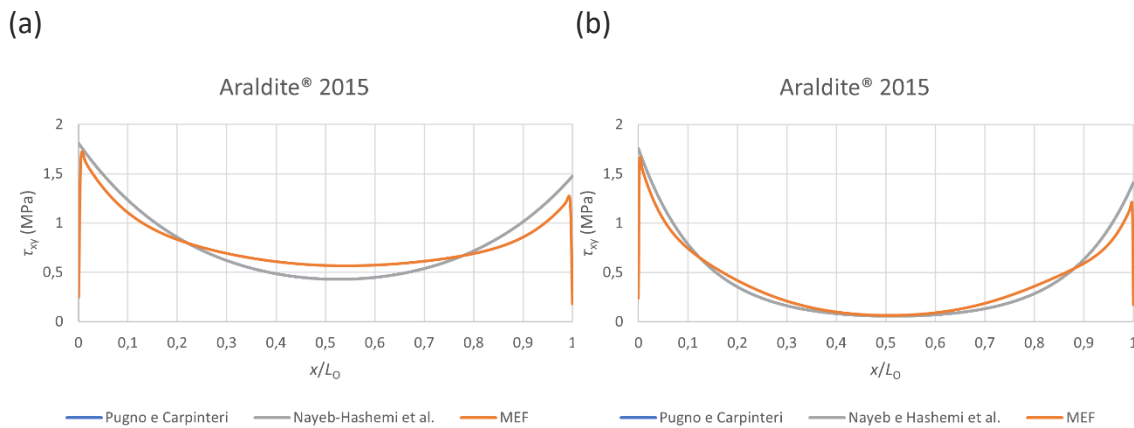


Figura 72 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} absolutas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

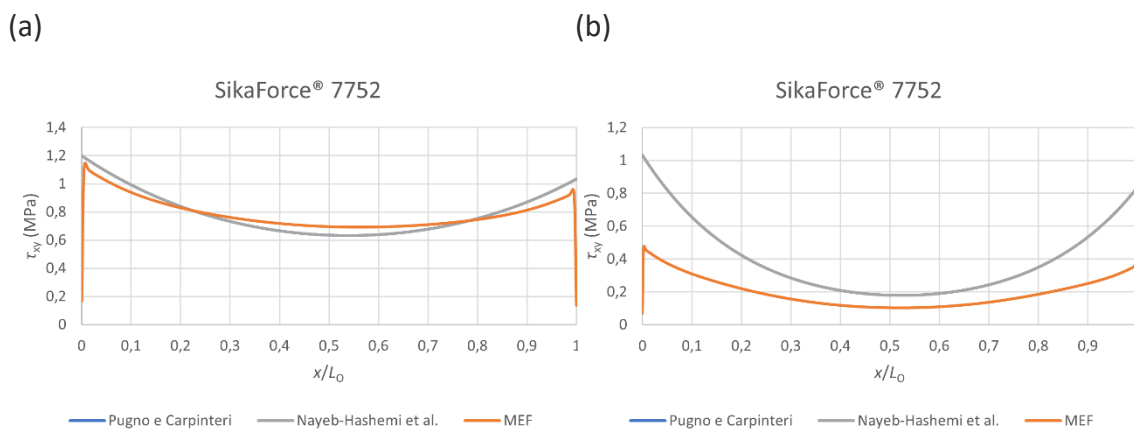


Figura 73 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} absolutas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo SikaForce® 7752 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

Por intermédio da análise dos modelos de Nayeb-Hashemi et al. [79] e de Pugno e Carpinteri [80] verifica-se uma igual distribuição das tensões τ_{xy} entre os dois modelos, uma vez que ambos são baseados no modelo da deformação axial. Comparativamente com a distribuição de tensões τ_{xy} obtida a partir do MEF, os modelos analíticos têm, na generalidade, boa aproximação quer nas extremidades da junta, quer na região central.

De acordo com os valores máximos das tensões τ_{xy} apresentados na Tabela 23, o adesivo Araldite® AV138 obteve os valores de tensões mais altos e uma boa precisão em relação aos resultados obtidos pelo MEF, verificando-se que os picos máximos são 21,0% maiores do que os do MEF para $L_0=20$ mm e 20,1% para $L_0=40$ mm. Já o adesivo Araldite® 2015 apresenta tensões τ_{xy} 5,2% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 5,4% para $L_0=40$ mm, tendo uma menor divergência relativamente aos resultados do MEF do que o adesivo Araldite® AV138 e, obtendo as menores diferenças dos três adesivos no que concerne aos dois L_0 .

O adesivo SikaForce® 7752 apresenta tensões τ_{xy} 4,3% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm, sendo o adesivo com menor discrepância de valores em relação ao MEF do pico para $L_0=20$ mm. Contudo apresenta tensões τ_{xy} 114,6% superiores ao MEF para $L_0=40$ mm, obtendo uma maior diferença relativa, tal como o sucedido para as tensões σ_y .

Tabela 23 - Comparação dos valores máximos de τ_{xy} (MPa) para os três adesivos através de dois métodos analíticos e do MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752		
	L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
MEF		2,43	2,43	1,72	1,67	1,15	0,48
Modelo de Nayeb-Hasehmi		2,94	2,93	1,81	1,76	1,20	1,03
Modelo de Pugno e Carpinteri		2,94	2,93	1,81	1,76	1,20	1,03
$\Delta \tau_{xy}$ (%) N-H / P&C		21,0	20,1	5,2	5,4	4,3	114,6

Na Figura 74, Figura 75 e Figura 76 são exibidos os gráficos da comparação das distribuições das tensões de corte τ_{xy} normalizadas obtidas pelo modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79], Pugno e Carpinteri [80] e pelo MEF, quando $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 respetivamente.

(a)

(b)

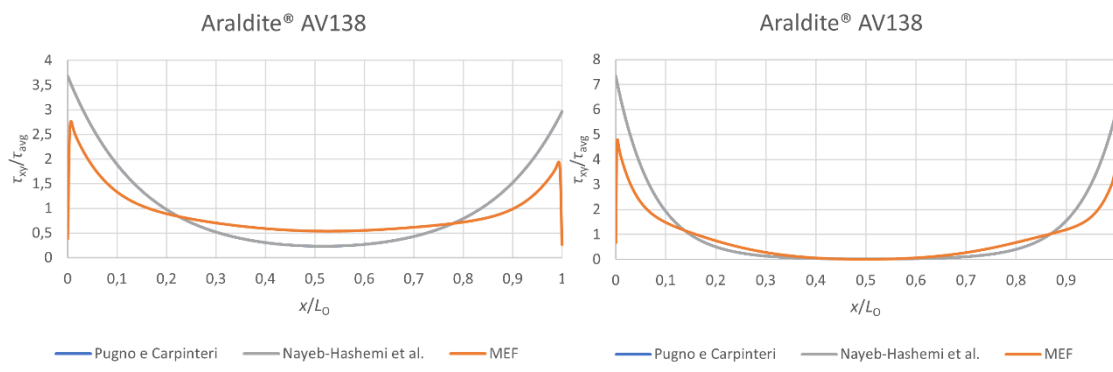


Figura 74 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo Araldite® AV138 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

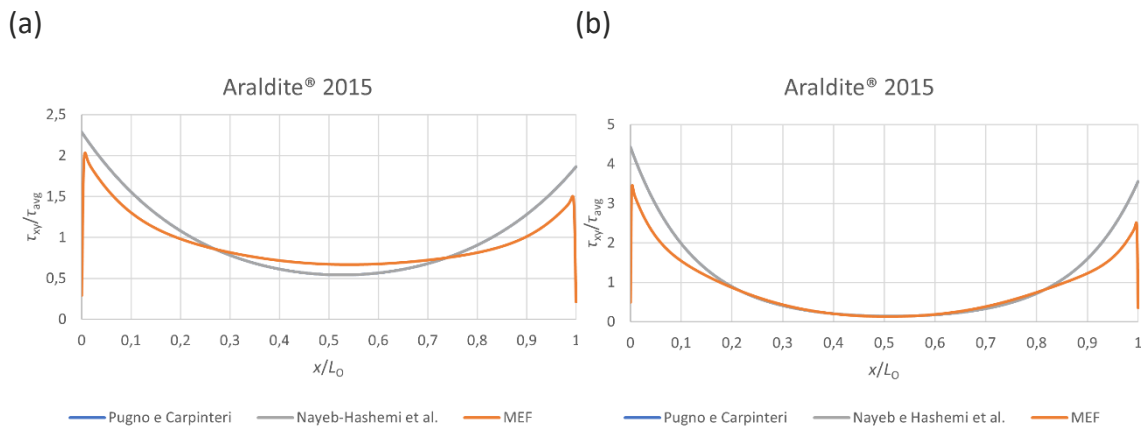


Figura 75 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo Araldite® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

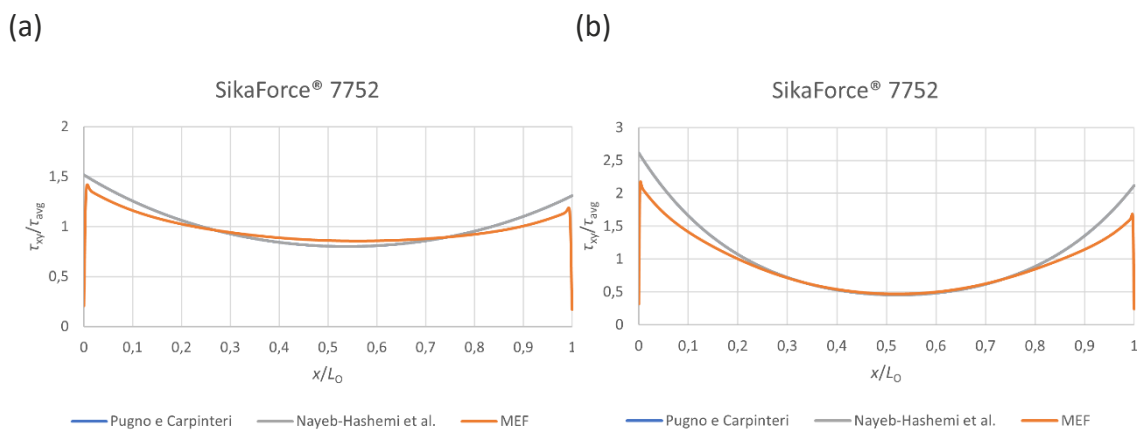


Figura 76 - Comparação da distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas através de dois métodos analíticos e do MEF, no adesivo SikaForce® 2015 para (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

Através da observação dos gráficos verifica-se novamente uma igual distribuição das tensões τ_{xy} normalizadas entre os dois modelos analíticos, bem como a existência de uma melhor precisão das tensões τ_{xy} normalizadas, principalmente na região central da junta para $L_0=40$ mm. Nas extremidades da junta, há uma maior diferença de valores de pico das tensões τ_{xy} normalizadas, para os métodos analíticos e numéricos, em comparação com as tensões τ_{xy} absolutas.

Segundo os valores de pico das tensões τ_{xy}/τ_{avg} apresentados na Tabela 24, verifica-se que os picos de tensão τ_{xy} normalizada são ligeiramente superiores aos obtidos pelo MEF, sendo o adesivo Araldite® AV138, como adesivo mais rígido dos três, o que obteve a maior diferença relativa dos valores em relação ao MEF, com picos de tensão τ_{xy} normalizada 33,7% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 52,9% para $L_0=40$ mm.

Já o adesivo Araldite® 2015, menos rígido que o Araldite® AV138, apresenta picos de tensão τ_{xy} normalizada 11,8% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 28,0% para $L_0=40$ mm.

O adesivo SikaForce® 7752, sendo o adesivo menos rígidos dos três em estudo, tem os picos de tensão τ_{xy} normalizada mais próximos dos obtidos pelo MEF, apresentando picos de tensão τ_{xy} normalizada 7,0% superiores ao MEF para $L_0=20$ mm e 19,7% para $L_0=40$ mm.

Tabela 24 - Comparação dos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos através de dois métodos analíticos e do MEF, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752		
	L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
MEF		2,76	4,8	2,04	3,46	1,42	2,18
Modelo de Nayeb-Hasehmi		3,69	7,34	2,28	4,43	1,52	2,61
Modelo de Pugno e Carpinteri		3,69	7,34	2,28	4,43	1,52	2,61
$\Delta \tau_{xy} / \tau_{avg}$ (%) N-H / P&C		33,7	52,9	11,8	28,0	7,0	19,7

3.2.3 Resistência da junta

Neste capítulo é realizada a comparação dos resultados obtidos através dos ensaios experimentais com as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ exercida na junta adesiva tubular, pelos métodos analíticos e pelo MEF, de forma a efetuar a respetiva validação destes métodos, nomeadamente os analíticos. Relativamente aos métodos analíticos, são analisados os modelos de Nayeb-Hashemi et al. [79], de Pugno e Carpinteri [80] e da tensão de cedência generalizada [10]. A resistência da junta é obtida no momento da rotura coesiva da mesma, através da mecânica dos meios contínuos, exceto no MDC, referente aos métodos numéricos.

3.2.3.1 Modelo de Nayeb-Hashemi et al.

A Figura 77 representa os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e a previsão analítica por meio do modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79], considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, de acordo com o critério da tensão de corte máxima.

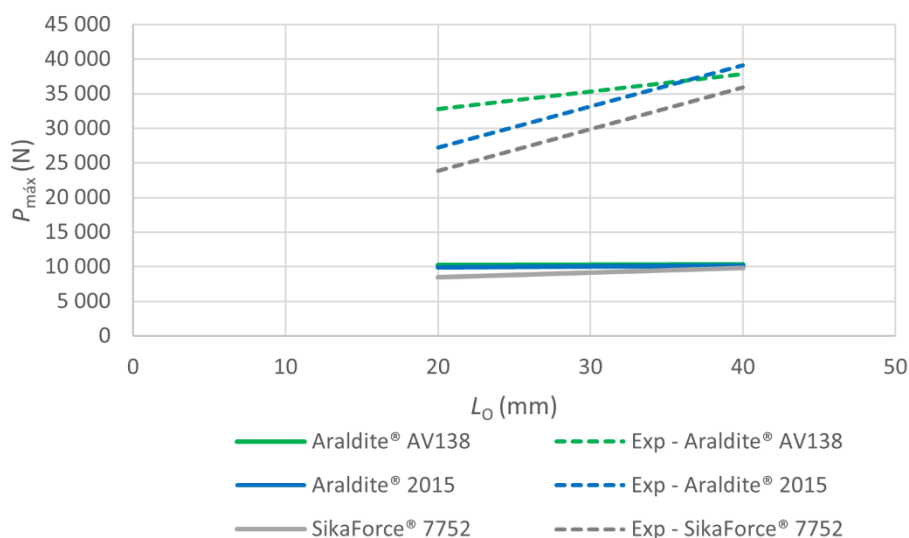


Figura 77 - $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Nayeb-Hashemi et al.

A partir da observação do gráfico verifica-se uma grande discrepância dos valores da resistência da junta obtidos experimentalmente, em comparação com o modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79]. Esta discrepância de valores deve-se à não consideração do comportamento plástico dos adesivos e aderentes neste modelo.

De acordo com os valores de $P_{máx}$ suportados numa junta, exibidos na Tabela 25, quando está sujeita a um carregamento axial, constata-se que o adesivo Araldite® AV138 é o adesivo que suporta o maior carregamento para $L_0=20$ mm (10278,4 N) e para $L_0=40$ mm (10298,5 N) comprovando a sua alta resistência. No entanto, dos três adesivos estudados, é o adesivo com o menor aumento percentual (0,2%).

Tabela 25 - $P_{máx}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Nayeb-Hashemi et al.

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{máx}$ (%)
Araldite® AV138	10278,4	10298,5	0,2
Araldite® 2015	9896,5	10182,7	2,9
SikaForce® 7752	8491,9	9844,9	15,9

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{máx}$ inferior ao adesivo Araldite® AV138 para $L_0=20$ mm (9896,5 N) e para $L_0=40$ mm (10182,7 N), visto que é um adesivo com menor rigidez e resistência. Este adesivo apresenta um aumento percentual (2,9 %) superior ao Araldite® AV138.

O adesivo SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta menor $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm (8491,9 N) e para $L_0=40$ mm (9844,9 N), pois é o adesivo com menor resist\ecencia. Por\em, tem o maior aumento percentual (15,9 %), devido ao facto de ter alta resist\ecencia e baixa rigidez.

Na Tabela 26 \e apresentada a compara\c\o de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais com o modelo de Nayeb-Hashemi et al., verificando-se que a diferen\ca relativa entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm \e pr\oxima nos tr\es adesivos apesar de, no adesivo Araldite® AV138, se verificar uma maior aproxima\c\o devido \a fragilidade do adesivo.

No adesivo Araldite® AV138, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido analiticamente \e 68,7% inferior ao experimental para $L_0=20$ mm, sendo o adesivo com menor diferen\ca relativa para este L_0 , e 72,8% para $L_0=40$ mm. Para o adesivo Araldite® 2015 verifica-se uma diminui\c\o percentual entre os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e anal\ticos de 63,7% para $L_0=20$ mm e 73,9% para $L_0=40$ mm. O SikaForce® 7752 apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 64,4% inferior analiticamente em rela\c\o ao valor experimental para $L_0=20$ mm, e 72,9% inferior para $L_0=40$ mm, sendo o adesivo com menor diferen\ca relativa para $L_0=40$ mm.

Tabela 26 - Compara\c\o dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do modelo de Nayeb-Hashemi et al. em fun\c\o do adesivo e L_0

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
	20	40	20	40	20	40
Experimental	32797,5	37857,2	27238,4	39066,8	23856,4	35929,9
Modelo de Nayeb-Hasehmi	10278,4	10298,5	9896,5	10182,7	8491,9	9844,9
Diferen\ca relativa (%)	-68,7	-72,8	-63,7	-73,9	-64,4	-72,6

3.2.3.2 Modelo de Pugno e Carpinteri

A previs\o da resist\ecia da junta segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] \e realizada atrav\es da mec\nica dos meios cont\nuos. Neste modelo, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ s\o obtidos para tr\es situa\c\es diferentes: crit\rio da tens\o de arrancamento m\axima, crit\rio da tens\o de corte m\axima e para a primeira destas situa\c\es a ocorrer.

$P_{m\acute{a}x}$ segundo o critério da tensão de arrancamento máxima

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e analiticamente segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] de acordo com o critério da tensão de arrancamento máxima, são apresentados na Figura 78, em função de L_0 e para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

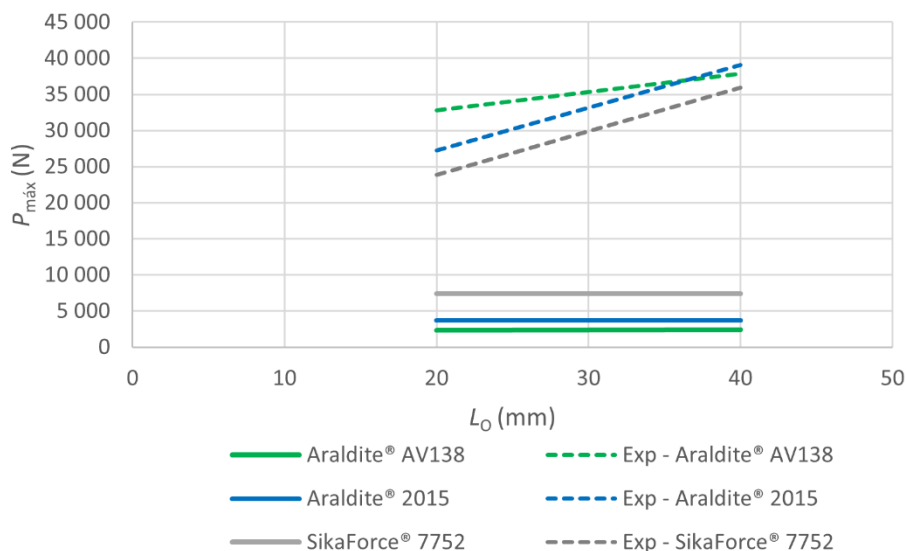


Figura 78 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f

De acordo com os valores de $P_{m\acute{a}x}$ apresentados na Tabela 27, é possível concluir diretamente que, para a tensão de rotura à tração, o modelo de Pugno e Carpinteri [80] tem valores de $P_{m\acute{a}x}$ opostos aos que eram previstos. O facto de o adesivo mais frágil e mais resistente (Araldite® AV138) corresponder ao adesivo que suporta menor carga axial para $L_0=20$ mm (2364,7 N) e para $L_0=40$ mm (2444,6 N), obtendo um aumento percentual de 3,4%, contrariamente a adesivos mais dúcteis, em que a diferença relativa é nula, são algumas das razões a destacar.

Tabela 27 - $P_{m\acute{a}x}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
Araldite® AV138	2364,7	2444,6	3,4
Araldite® 2015	3715,7	3715,7	0,0
SikaForce® 7752	7394,6	7394,6	0,0

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{m\acute{a}x}$ superior ao adesivo Araldite® AV138 para ambos L_0 (3715,7 N), confirmando-se assim a diferença relativa nula de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm. O adesivo SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta maior $P_{m\acute{a}x}$ para ambos L_0 (7394,6 N) Porém, à semelhança do Araldite® 2015, este adesivo apresenta uma diferença relativa nula de $P_{m\acute{a}x}$ entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

Apesar dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos analiticamente estarem desenquadrados com os valores experimentais, verifica-se, na Tabela 28, que a diferença relativa para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm, é semelhante entre os adesivos.

Para adesivos mais rígidos (Araldite® AV138), as diferenças relativas do valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido via experimental e analítica são maiores, sendo 92,8% inferiores para $L_0=20$ mm e 93,5% para $L_0=40$ mm. No adesivo Araldite® 2015, verificam-se diferenças relativas menores ao Araldite® AV138, com resultados de 86,4% inferiores ao $P_{m\acute{a}x}$ experimental para $L_0=20$ mm e 90,5% inferiores para $L_0=40$ mm. O SikaForce® 7752, uma vez que é o adesivo menos rígido, apresenta as menores diferenças relativas dos três adesivos, tendo um valor analítico de $P_{m\acute{a}x}$ 69,0% inferior ao experimental quando $L_0=20$ mm e 79,4% inferior quando $L_0=40$ mm.

Tabela 28 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f em função do adesivo e L_0

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752		
	L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
Experimental		32797,5	37857,2	27238,4	39066,8	23856,4	35929,9
Pugno e Carpinteri - σ_y		2364,7	2444,6	3715,7	3715,7	7394,6	7394,6
Diferença relativa (%)		-92,8	-93,5	-86,4	-90,5	-69,0	-79,4

$P_{m\acute{a}x}$ segundo o critério da tensão de corte máxima

Na Figura 79 são exibidos os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e analiticamente segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] de acordo com o critério da tensão de corte máxima, em função de L_0 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

Na comparação das tensões de corte entre os dois modelos analíticos e o MEF, no subcapítulo 3.2.2.5.2, verificou-se igual distribuição das tensões τ_{xy} entre os dois modelos. Uma vez que, para uma força exercida de 1000 N na junta adesiva tubular,

observam-se valores de pico das tensões τ_{xy} iguais nos modelos de Pugno e Carpinteri [80] e Nayeb-Hashemi et al. [79], então também são previstos valores de $P_{m\acute{a}x}$ semelhantes, constatando-se de igual forma uma discrepância equivalente dos valores da resistência da junta obtidos experimentalmente.

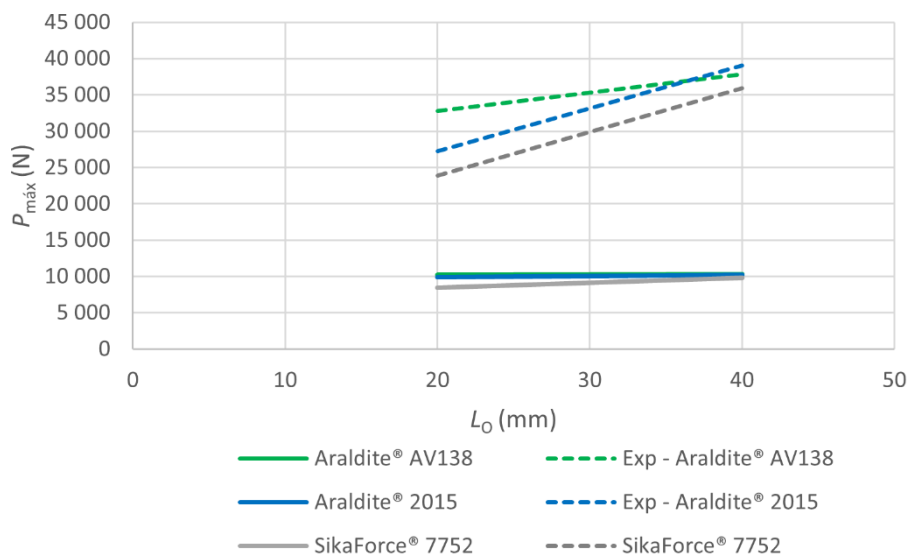


Figura 79 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f

Na Tabela 29 estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$, verificando-se de forma análoga aos valores da Tabela 25, que o adesivo Araldite® AV138 é o adesivo que apresenta maior $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm (10278,3 N) e para $L_0=40$ mm (10298,3 N). Em contrapartida, devido à sua rigidez, é o adesivo com menor aumento percentual (0,2%).

Tabela 29 - $P_{m\acute{a}x}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
Araldite® AV138	10278,3	10298,3	0,2
Araldite® 2015	9896,4	10182,6	2,9
SikaForce® 7752	8491,7	9844,7	15,9

Com $P_{m\acute{a}x}$ inferior ao adesivo Araldite® AV138, encontra-se o adesivo Araldite® 2015 suportando 9896,4 N para $L_0=20$ mm e 10182,6 N para $L_0=40$ mm. Este adesivo apresenta também um aumento percentual (2,9 %) superior ao Araldite® AV138.

Relativamente ao SikaForce® 7752, este é o adesivo que apresenta menor $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm (8491,7 N) e para $L_0=40$ mm (9844,7 N), em virtude da sua menor rigidez em

comparação com os outros adesivos. No entanto, a sua menor rigidez permite que tenha o maior aumento percentual (15,9 %).

A comparação de $P_{m\acute{a}x}$ obtido experimentalmente com os valores do modelo de Pugno e Carpinteri é apresentada na Tabela 30. Tal como acontece na Tabela 26, verifica-se que a diferença relativa entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm é próxima nos três adesivos.

O valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido analiticamente para o adesivo Araldite® AV138, é 68,7% inferior ao experimental para $L_0=20$ mm e 72,8% para $L_0=40$ mm. No adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diminuição percentual de 63,7% para $L_0=20$ mm e 73,9% para $L_0=40$ mm. Por fim, o SikaForce® 7752 apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 64,4% inferior ao valor experimental, para $L_0=20$ mm e 72,9% inferior para $L_0=40$ mm.

Tabela 30 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f em função do adesivo e L_0

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752		
	L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
Experimental		32797,5	37857,2	27238,4	39066,8	23856,4	35929,9
Pugno e Carpinteri - τ_{xy}		10278,3	10298,3	9896,4	10182,6	8491,7	9844,7
Diferença relativa (%)		-68,7	-72,8	-63,7	-73,9	-64,4	-72,6

$P_{m\acute{a}x}$ para o primeiro valor atingido segundo o critério da tensão de arrancamento e de corte máxima

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com os valores obtidos analiticamente segundo o modelo de Pugno e Carpinteri [80] para o primeiro valor atingido segundo o critério da tensão de arrancamento e de corte máxima, são apresentados na Figura 80, em função de L_0 e para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

No subcapítulo 3.2.2.5 são comparadas as tensões de arrancamento e de corte verificando-se que, ao contrário do que seria expectável, os picos máximos das tensões σ_y são superiores aos picos máximos das tensões τ_{xy} para os três adesivos e ambos L_0 . Desta forma, a resistência da junta foi obtida tendo em conta apenas o critério da tensão de arrancamento máxima, de igual forma como já foi analisado anteriormente.

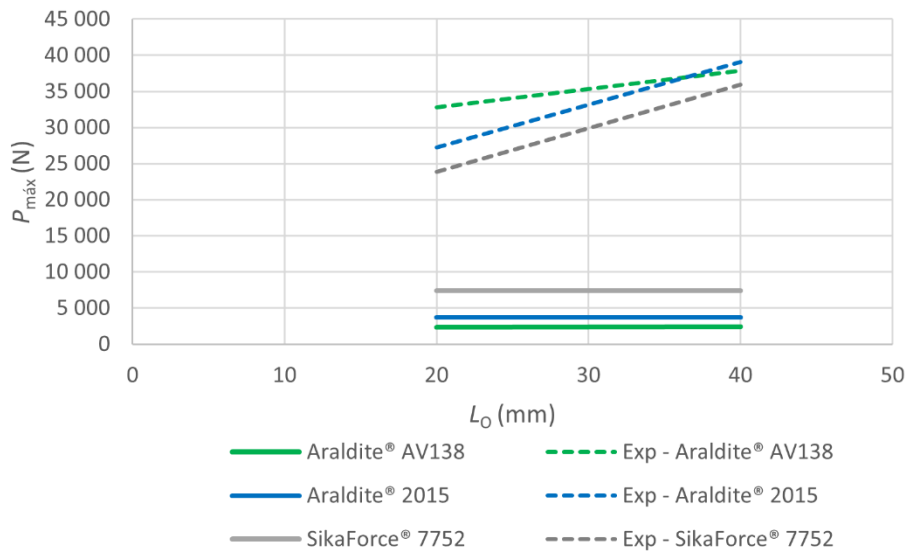


Figura 80 - $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo de Pugno e Carpinteri para o primeiro valor atingido entre σ_f e τ_f

3.2.3.3 Tensão de cedência generalizada

Na Figura 81 são apresentados os valores de $P_{máx}$ obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelo modelo tensão de cedência generalizada segundo o critério da tensão de corte máxima, em função de L_0 para os três adesivos.

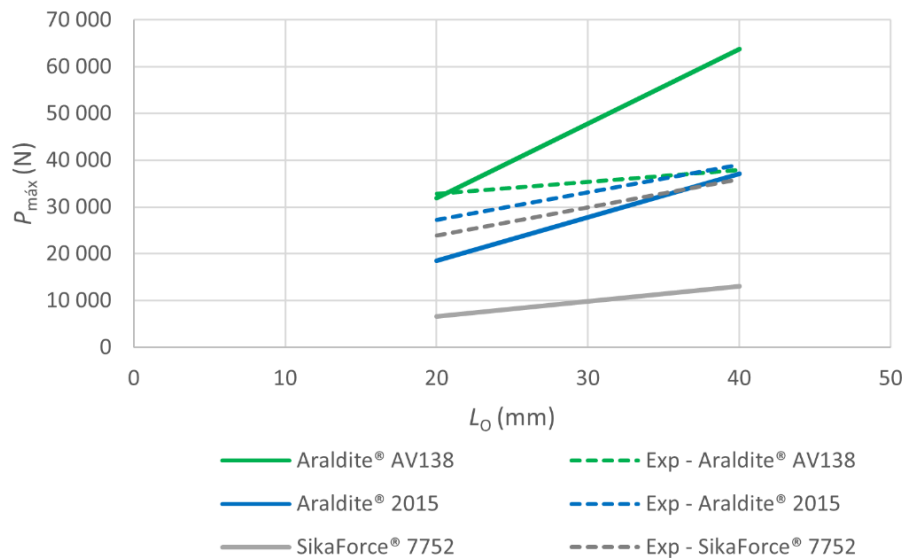


Figura 81 - $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo modelo da tensão de cedência generalizada

A partir dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ apresentados na Tabela 31, verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 apresenta os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos tr\^es adesivos para $L_0=20$ mm (31857,0 N) e para $L_0=40$ mm (63714,0 N), uma vez que \^e um adesivo r\^ıgido e com alta resist\^encia.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{m\acute{a}x}$ inferior ao adesivo Araldite® AV138 para $L_0=20$ mm (18530,4 N) e para $L_0=40$ mm (37060,7 N), visto que apresenta menor rigidez e resist\^encia.

O adesivo SikaForce® 7752 \^e o adesivo que apresenta menor $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm (6549,1 N) e para $L_0=40$ mm (13098,2 N), pois \^e o adesivo com menor rigidez.

O aumento percentual de 100,0% em todos os adesivos deve-se \^a formula\~c\~ao direta deste modelo, uma vez que os resultados s\~ao obtidos a partir de valores constantes ao longo da junta de sobreposi\~c\~ao e seguindo a proporcionalidade direta dos mesmos em fun\~c\~ao de $P_{m\acute{a}x}$.

Tabela 31 - $P_{m\acute{a}x}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)) em fun\~c\~ao de L_0 para os tr\^es adesivos segundo o modelo da tens\~ao de ced\^encia generalizada

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
Araldite® AV138	31857,0	63714,0	100,0
Araldite® 2015	18530,4	37060,7	100,0
SikaForce® 7752	6549,1	13098,2	100,0

Na Tabela 32 \^e apresentada a compara\~c\~ao de $P_{m\acute{a}x}$ obtido experimentalmente com os valores obtidos segundo o modelo da tens\~ao de ced\^encia generalizada, verificando-se que o adesivo Araldite® AV138, obteve um valor de $P_{m\acute{a}x}$ analiticamente 2,9% inferior ao experimental para $L_0=20$ mm, sendo o adesivo com menor diferen\~ca relativa para este L_0 , e um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 68,3% superior ao experimental para $L_0=40$ mm, visto que \^e um adesivo com maior rigidez. Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diminui\~c\~ao percentual entre os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e anal\^ıticos de 32,0% para $L_0=20$ mm e 5,1% para $L_0=40$ mm, sendo o adesivo que apresenta uma diferen\~ca relativa mais pr\^oxima devido ao facto de ser menos r\^ıgido e resistente. O SikaForce® 7752 apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 72,5% inferior analiticamente em rela\~c\~ao ao valor experimental, para $L_0=20$ mm e 63,5% inferior para $L_0=40$ mm, dado que \^e um adesivo que, embora tenha a menor rigidez dos tr\^es adesivos, tem alta resist\^encia.

Tabela 32 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do modelo da tensão de cedência generalizada em função do adesivo e L_0

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
	20	40	20	40	20	40
L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
Experimental	32797,5	37857,2	27238,4	39066,8	23856,4	35929,9
Tensão de cedência generalizada	31857,0	63714,0	18530,4	37060,7	6549,1	13098,2
Diferença relativa (%)	-2,9	68,3	-32,0	-5,1	-72,5	-63,5

3.2.3.4 MEF

A previsão da resistência da junta segundo o MEF é realizada a partir da mecânica dos meios contínuos e do MDC. Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são obtidos por meio da mecânica dos meios contínuos para três situações diferentes: critério da tensão de arrancamento máxima, critério da tensão de corte máxima e para a primeira destas situações a ocorrer.

$P_{m\acute{a}x}$ segundo o critério da tensão de arrancamento máxima

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e pelo MEF, de acordo com critério da tensão de arrancamento máxima, encontram-se representados na Figura 82, em função de L_0 e para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

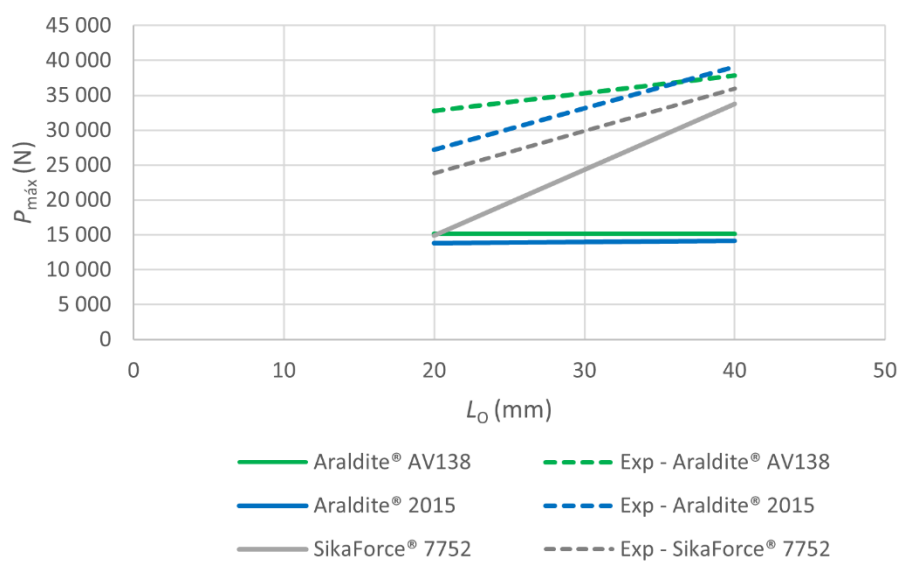


Figura 82 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MEF para σ_f

A partir da observação do gráfico verifica-se uma divergência dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente com os valores obtidos pelo MEF, nomeadamente para o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 em ambos L_0 e no SikaForce® 7752 para $L_0=20$ mm.

De acordo com os valores de $P_{m\acute{a}x}$ apresentados na Tabela 33, verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 é o mais resistente para $L_0=20$ mm (15173,1N), o que comprova a sua alta resistência. No entanto, para $L_0=40$ mm, este adesivo mantém o mesmo valor de $P_{m\acute{a}x}$, obtendo um aumento percentual nulo.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{m\acute{a}x}$ inferior ao adesivo Araldite® AV138 para $L_0=20$ mm (13777,1 N) e para $L_0=40$ mm (14137,3 N), devido à sua menor resistência, embora seja mais flexível, tendo um aumento percentual (2,9%) superior ao Araldite® AV138.

O SikaForce® 7752, sendo o adesivo mais flexível, embora com menos resistência, apresenta o segundo valor mais alto de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm (14922,1 N) e o valor mais alto dos três adesivos para $L_0=40$ mm (33794,1 N), devido ao seu aumento percentual de 126,5%.

Tabela 33 - $P_{m\acute{a}x}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para σ_f

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
Araldite® AV138	15173,1	15173,1	0,0
Araldite® 2015	13777,1	14137,3	2,6
SikaForce® 7752	14922,1	33794,1	126,5

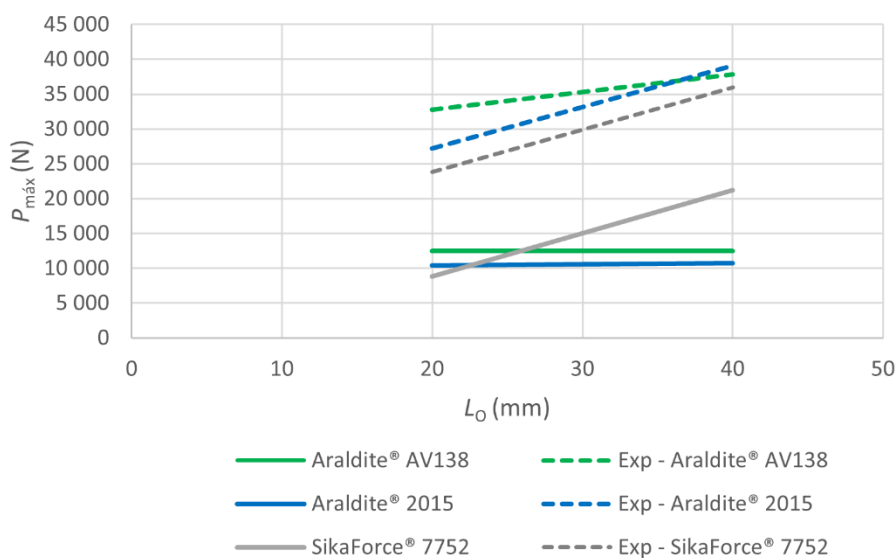
A comparação de $P_{m\acute{a}x}$ obtido experimentalmente com os valores obtidos por meio do critério da tensão de arrancamento máxima é exibida na Tabela 34, verificando-se que o adesivo Araldite® AV138 obteve um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 53,7% inferior ao experimental para $L_0=20$ mm, e um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 59,9% inferior ao experimental para $L_0=40$ mm, comprovando a baixa dispersão de valores entre L_0 , uma vez que é um adesivo rígido. Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diminuição percentual de 49,4% para $L_0=20$ mm e 63,8% para $L_0=40$ mm. O SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os valores mais próximos dos experimentais, obtendo analiticamente um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 37,5% inferior em relação ao valor experimental para $L_0=20$ mm, e 5,9% inferior para $L_0=40$ mm, verificando-se baixa dispersão de valores entre L_0 , visto que é o adesivo menos rígido em estudo.

Tabela 34 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do MEF para σ_f em função do adesivo e L_0

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
	20	40	20	40	20	40
L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
Experimental	32797,5	37857,2	27238,4	39066,8	23856,4	35929,9
MEF - σ_f	15173,1	15173,1	13777,1	14137,3	14922,1	33794,1
Diferença relativa (%)	-53,7	-59,9	-49,4	-63,8	-37,5	-5,9

$P_{m\acute{a}x}$ segundo o critério da tensão de corte máxima

Na Figura 81 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelo MEF de acordo com o critério da tensão de corte máxima, em função de L_0 para os três adesivos.

Figura 83 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MEF para τ_f

Igualmente aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo MEF de acordo com o critério da tensão de arrancamento máxima, verifica-se uma grande diferença em relação aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais para os três adesivos, embora uma menor diferença para $L_0=40$ mm no SikaForce® 7752.

Na Tabela 35 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$, verificando-se que o adesivo Araldite® AV138 é o mais resistente para $L_0=20$ mm (12428,0 N) confirmando a sua alta

resistência. Todavia, devido à sua alta rigidez, é obtido o mesmo valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=40$ mm e conseqüentemente um aumento percentual nulo.

Uma vez que o adesivo Araldite® 2015 apresenta menor rigidez e resistência, foram obtidos valores de $P_{m\acute{a}x}$ inferiores ao adesivo Araldite® AV138 para $L_0=20$ mm (10407,0 N) e para $L_0=40$ mm (10718,6 N), Apesar deste facto, observou-se uma ligeira diferença entre L_0 , correspondente a um aumento percentual de 3,0%.

Já o SikaForce® 7752 apresenta o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm (8843,5 N), porém destaca-se por ter obtido o valor mais alto dos três adesivos para $L_0=40$ mm (21187,5 N), tendo um aumento percentual de 126,5%, uma vez que é o adesivo menos rígido.

Tabela 35 - $P_{m\acute{a}x}$ (N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)) em função de L_0 para os três adesivos segundo o modelo de Pugno e Carpinteri para τ_f

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
Araldite® AV138	12428,0	12428,0	0,0
Araldite® 2015	10407,0	10718,6	3,0
SikaForce® 7752	8843,5	21187,5	139,6

A partir da Tabela 36 é possível verificar as diferenças relativas do valor de $P_{m\acute{a}x}$ experimental e segundo o MEF de acordo com o critério da tensão de corte máxima nos adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

Tabela 36 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do MEF para τ_f em função do adesivo e L_0

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752	
	L_0 (mm)	L_0 (mm)	L_0 (mm)	L_0 (mm)	L_0 (mm)	L_0 (mm)
Experimental	32797,5	37857,2	27238,4	39066,8	23856,4	35929,9
MEF - τ_{xy}	12428,0	12428,0	10407,0	10718,6	8843,5	21187,5
Diferença relativa (%)	-62,1	-67,2	-61,8	-72,6	-62,9	-41,0

O adesivo Araldite® AV138 obteve diferenças relativas de $P_{m\acute{a}x}$ de 62,1% para $L_0=20$ mm e de 67,2% para $L_0=40$ mm. O Araldite® 2015 apresenta uma diferença relativa mais baixa do que o Araldite® AV138 para $L_0=20$ mm, sendo 61,8% inferior ao $P_{m\acute{a}x}$ experimental, e uma diferença relativa mais alta para $L_0=40$ mm, com um valor 72,6% inferior. O SikaForce® 7752 apresenta a maior diferença relativa dos três adesivos para

$L_0=20$ mm, com um valor de $P_{m\acute{a}x}$ 62,9% inferior ao experimental. Contudo, este adesivo obteve a menor diferença relativa para $L_0=40$ mm, tendo um valor 41,0% inferior.

$P_{m\acute{a}x}$ para o primeiro valor atingido segundo o critério da tensão de arrancamento e de corte máxima

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelo MEF para primeiro valor atingido segundo o critério da tensão de arrancamento e de corte máxima, são apresentados na Figura 84, em função de L_0 e para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

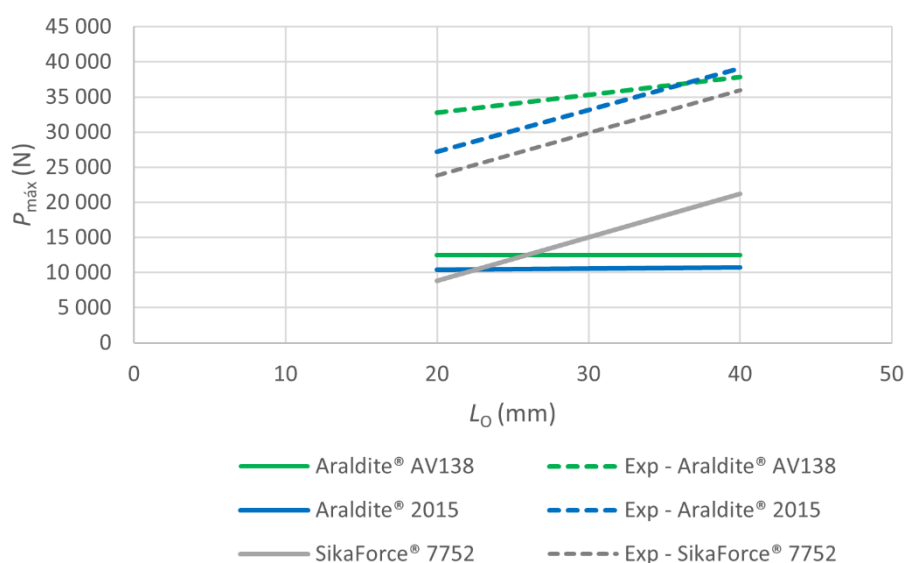


Figura 84 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MEF para o primeiro valor atingido entre σ_f e τ_f

A resistência da junta foi obtida tendo em conta o critério da tensão de corte máxima, dado que os menores valores de $P_{m\acute{a}x}$ foram sempre obtidos através deste critério. Desta forma, os valores obtidos são iguais aos já analisados anteriormente, verificando-se uma grande diferença entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e os valores obtidos pelo MEF, para os três adesivos.

Modelo de dano coesivo

Nas Figura 85, Figura 86 e Figura 87 estão representadas as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e as suas previsões obtidas numericamente pelo MDC para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente, de forma a serem efetuadas comparações entre os resultados.

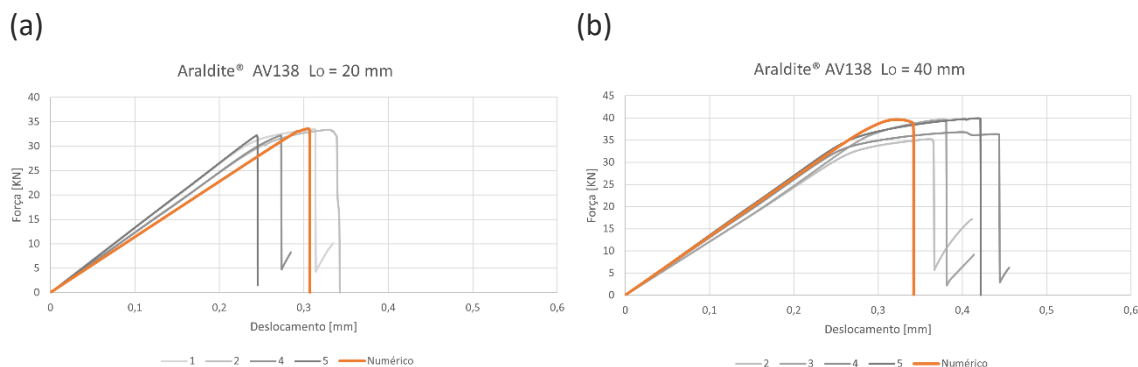


Figura 85 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

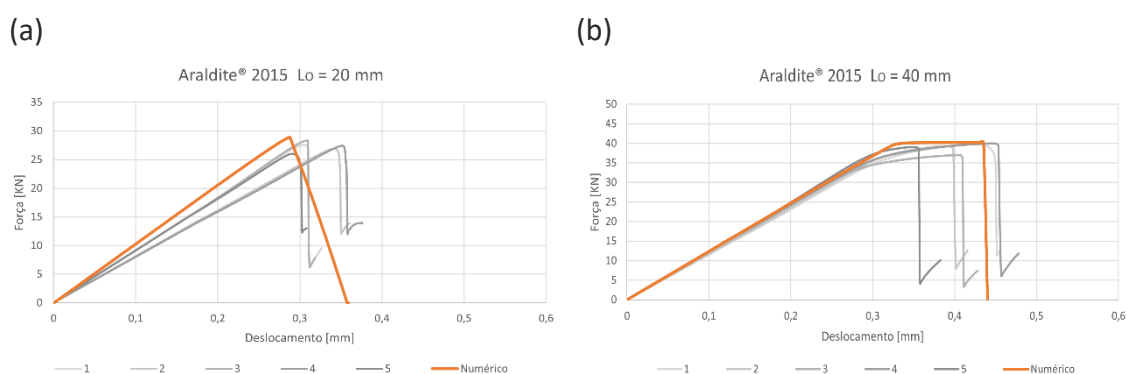


Figura 86 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

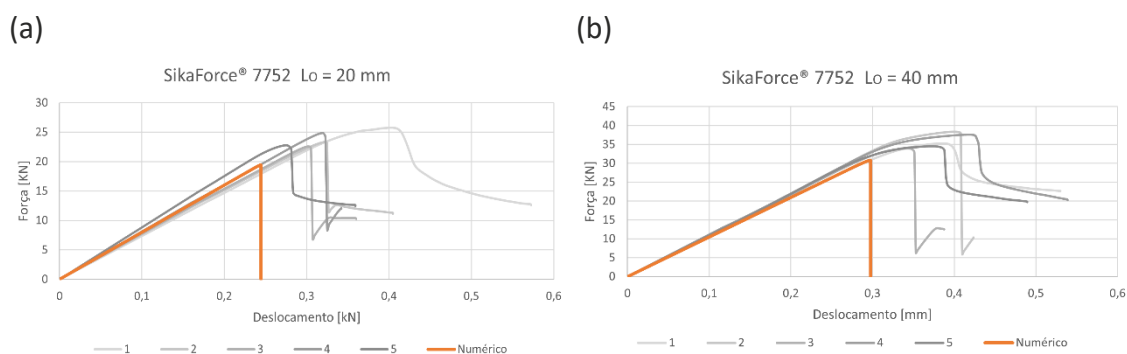


Figura 87 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que foram aplicados os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, em relação à $P_{m\acute{a}x}$, rigidez e deslocamento de rotura [102]. No caso do SikaForce® 7752, uma vez que se trata de um adesivo muito dúctil, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais [103]. Por esta razão os resultados experimentais ($P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento) são um pouco maiores que os

numéricos. Porém, existe uma boa correlação das curvas obtidas experimentalmente para este adesivo.

Na Figura 88 são representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e os valores obtidos pelo MDC, em função de L_0 para os três adesivos.

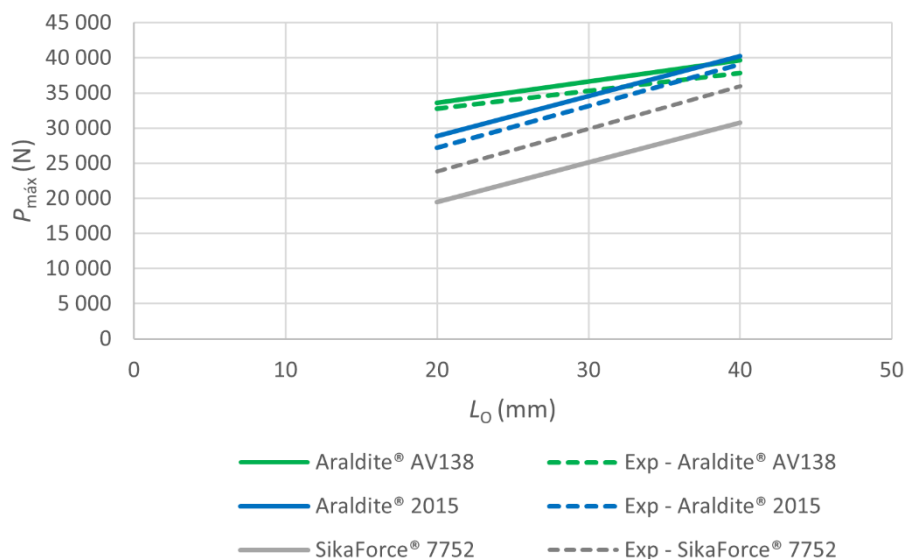


Figura 88 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão pelo MDC, referente ao MEF

Por observação do gráfico verifica-se que, de um modo geral, 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.

A partir dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ apresentados na Tabela 37, verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 é o mais resistente para $L_0=20$ mm (33568,4 N), confirmando a sua alta resistência. Todavia, devido à sua alta rigidez, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=40$ mm é 39631,2 N, obtendo este adesivo o menor aumento percentual dos três adesivos (18,1%).

Visto que o adesivo Araldite® 2015 apresenta menor rigidez e resistência, foram obtidos valores de $P_{m\acute{a}x}$ inferiores ao adesivo Araldite® AV138 para $L_0=20$ mm (28896,6 N), mas valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores para $L_0=40$ mm (40209,7 N), tendo um aumento percentual (39,2%) consideravelmente superior ao do Araldite® AV138.

O SikaForce® 7752 apresenta o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm (19455,5 N) e para $L_0=40$ mm (30778,6 N), porém destaca-se por ter obtido o maior aumento percentual dos três adesivos (58,2%), uma vez que é o adesivo menos rígido.

Tabela 37 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do MDC, referente ao MEF, em função do adesivo e L_0

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ (%)
Araldite® AV138	33568,4	39631,2	18,1
Araldite® 2015	28896,6	40209,7	39,2
SikaForce® 7752	19455,5	30778,6	58,2

Na Tabela 38 é possível verificar as diferenças relativas entre o valor de $P_{m\acute{a}x}$ experimental e do MDC para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

Tabela 38 - Comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ (N) experimentais e do MDC, referente ao MEF, em função do adesivo e L_0

Adesivo	Araldite® AV138		Araldite® 2015		SikaForce® 7752		
	L_0 (mm)	20	40	20	40	20	40
Experimental		32797,5	37857,2	27238,4	39066,8	23856,4	35929,9
MEF - MDC		33568,4	39631,2	28896,6	40209,7	19455,5	30778,6
Diferença relativa (%)		2,4	4,7	6,1	2,9	-18,4	-14,3

O Araldite® AV138 é o adesivo 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, esta 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 percentagem torna-se ainda mais reduzida para $L_0=40$ mm (2,9%).

No caso das juntas com o adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo método numérico são inferiores, apresentando uma diferença de 18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3% para $L_0=40$ mm em relação aos valores experimentais. Isto acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares,

podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [86].

3.2.3.5 Comparação da resistência da junta

3.2.3.5.1 Araldite® AV138

Na Figura 89 é apresentada a diferença relativa dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® AV138.

As abreviaturas exibidas na Figura 89 referem-se ao modelo e critério aplicado, sendo para N-H correspondente ao modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79], TCG ao modelo da tensão de cedência generalizada [10]. P&C – CTAM, P&C – CTCM e P&C – CTAM e CTCM correspondem ao modelo de Pugno e Carpinteri [80] para o critério da tensão de arrancamento, de corte máximas e para o primeiro valor a atingir, respetivamente. MEF – CTAM, MEF – CTM, MEF – CTAM e CTCM e MEF – MDC referem-se ao MEF segundo o critério da tensão de arrancamento, de corte máximas, para o primeiro valor a atingir e MDC, respetivamente.

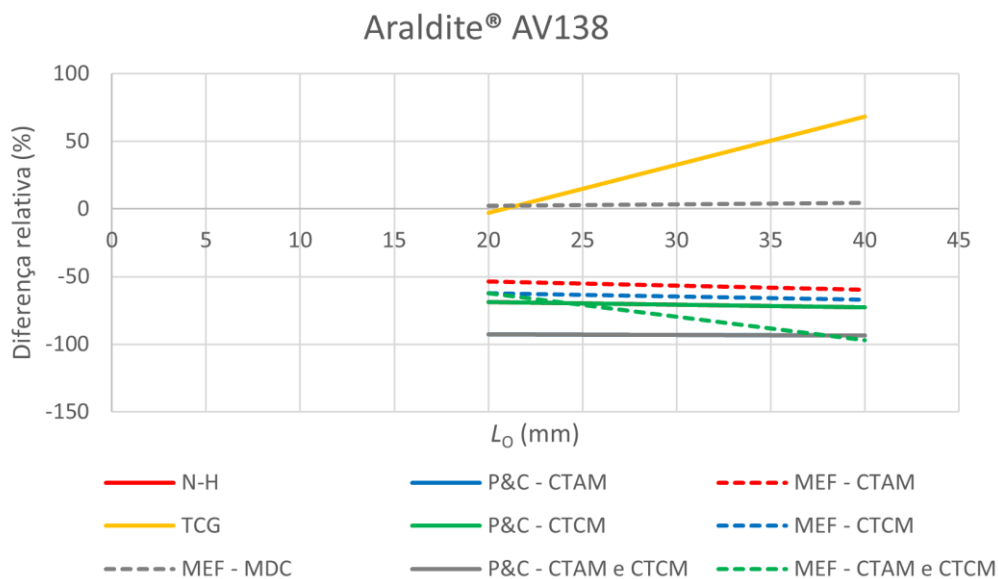


Figura 89 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® AV138

Por observação do gráfico, verifica-se que maior parte dos métodos analíticos e do MEF utilizados para calcular a resistência da junta obtiveram valores entre 53,7% e 92,8% inferiores aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para $L_0=20$ mm e, valores no intervalo de 59,9% a 93,5% inferiores para $L_0=40$ mm, devido à alta rigidez e resistência do adesivo (Tabela 39).

Tabela 39 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® AV138

Adesivo	Araldite® AV138	
	L_0 (mm)	
	20	40
Modelo de Nayeb-Hasehmi	-68,7	-72,8
Pugno e Carpinteri - σ_y	-92,8	-93,5
Pugno e Carpinteri - τ_{xy}	-68,7	-72,8
Pugno e Carpinteri - σ_y e τ_{xy}	-92,8	-93,5
Tensão de cedência generalizada	-2,9	68,3
MEF - σ_y	-53,7	-59,9
MEF - τ_{xy}	-62,1	-67,2
MEF - σ_y e τ_{xy}	-62,1	-67,2
MEF - MDC	2,4	4,7

Os métodos que apresentam valores de $P_{m\acute{a}x}$ dispersos têm a particularidade de serem baseados na mecânica dos meios contínuos. O facto de serem tidos em conta o critério da tensão de arrancamento e de corte máxima influencia diretamente nos resultados obtidos, uma vez que não é considerado como fator a plasticidade dos adesivos e aderentes. Este fator condiciona o valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido, uma vez que os resultados são obtidos quando, após aplicado um esforço de tração na junta, o adesivo atinge o seu limite de resistência nas extremidades da ligação, enquanto a zona intermédia se encontra pouco solicitada. Desse modo, os valores obtidos serão bastante inferiores aos resultados experimentais.

O MDC é o método mais adequado de todos os estudados, para esta situação, obtendo diferenças relativas 2,4% superiores ao $P_{m\acute{a}x}$ experimental para $L_0=20$ mm e 4,7% superiores para $L_0=40$ mm.

Já o modelo da tensão de cedência generalizada obteve o valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm com boa precisão, sendo 2,9% inferior ao valor experimental. No entanto, para $L_0=40$ mm observa-se um aumento da discrepância para valores 68,3% superiores ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido experimentalmente.

Dos métodos analíticos que se encontram com uma grande diferença relativa, destaca-se o modelo de Pugno e Carpinteri [80] e o modelo de Nayeb-Hashemi et al. [79] segundo o critério da tensão de corte máxima, que obtiveram iguais diferenças relativas para ambos L_0 . De acordo com os resultados, para $L_0=20$ mm estes modelos apresentaram valores de $P_{m\acute{a}x}$ 68,7% inferiores aos valores experimentais e 72,8% inferiores para $L_0=40$ mm.

Relativamente ao MEF, segundo o critério da tensão de arrancamento máxima obtiveram-se valores de $P_{m\acute{a}x}$ 53,7% inferiores ao experimental para $L_0=20$ mm e 59,9% inferiores para $L_0=40$ mm.

3.2.3.5.2 Araldite® 2015

A Figura 90 apresenta a diferença relativa dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® 2015.

Através da observação do gráfico, verifica-se uma maior aproximação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ aos valores experimentais comparativamente aos resultados do Araldite® AV138. Mesmo assim, no modelo de Pugno e Carpinteri [80] para o primeiro valor atingido segundo o critério da tensão de arrancamento e de corte máxima e, em igualdade, o modelo de Pugno e Carpinteri [80] segundo o critério da tensão de arrancamento máxima, apresentem valores mais divergentes, sendo 86,4% inferiores aos valores experimentais para $L_0=20$ mm e 90,5% inferiores para $L_0=40$ mm. Esta aproximação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ deve-se à menor rigidez e resistência do adesivo (Tabela 40).

Os restantes métodos analíticos e do MEF apresentam valores entre 49,4% e 63,7% inferiores aos valores obtidos experimentalmente para $L_0=20$ mm e valores no intervalo de 63,8 % a 73,9% inferiores para $L_0=40$ mm.

O MDC mantém-se como o método mais preciso, uma vez que sofreu apenas uma ligeira alteração de tensões passando a obter valores mais desviados para $L_0=20$ mm (6,1%) e mais próximos para $L_0=40$ mm (2,9%).

O modelo da tensão de cedência generalizada apresenta, da mesma forma que o MDC, valores mais afastados para $L_0=20$ mm, obtendo valores de $P_{m\acute{a}x}$ 32,0% inferiores aos experimentais, e valores mais próximos para $L_0=40$ mm, sendo estes apenas 5,1% inferiores aos obtidos experimentalmente. Através destes resultados obtidos, verifica-se que este método tem uma melhor previsão para materiais mais dúcteis.

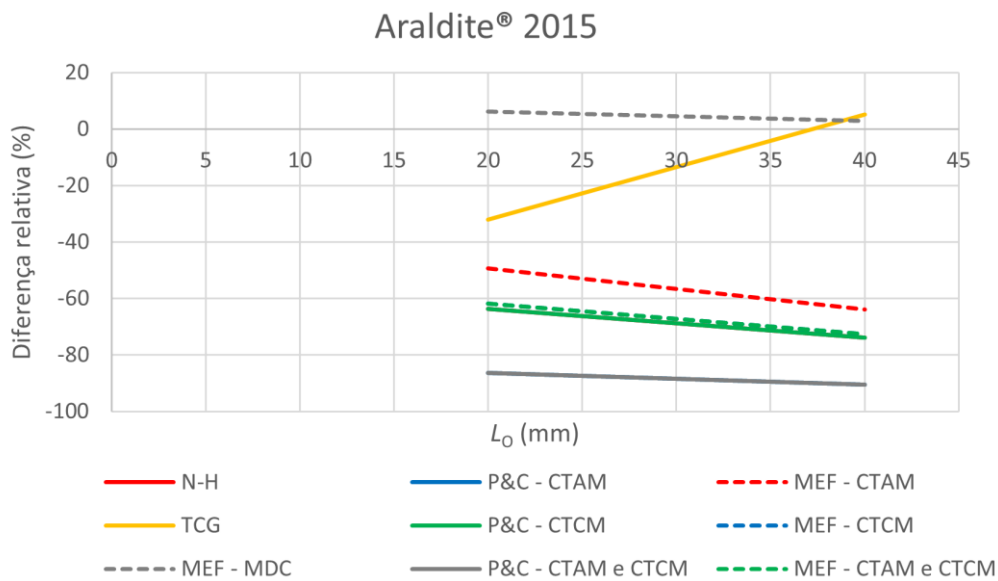


Figura 90 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{máx}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® 2015

Tabela 40 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{máx}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo Araldite® 2015

Adesivo	Araldite® 2015	
	L_0 (mm)	L_0 (mm)
Modelo de Nayeb-Hasehmi	20	40
Pugno e Carpinteri - σ_y	-63,7	-73,9
Pugno e Carpinteri - τ_{xy}	-86,4	-90,5
Pugno e Carpinteri - σ_y e τ_{xy}	-63,7	-73,9
Tensão de cedência generalizada	-86,4	-90,5
MEF - σ_y	-32,0	-5,1
MEF - τ_{xy}	-49,4	-63,8
MEF - σ_y e τ_{xy}	-61,8	-72,6
MEF - MDC	-61,8	-72,6
	6,1	2,9

3.2.3.5.3 SikaForce® 7752

Na Figura 91 é representada a diferença relativa dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF comparativamente com os resultados experimentais, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo SikaForce® 7752.

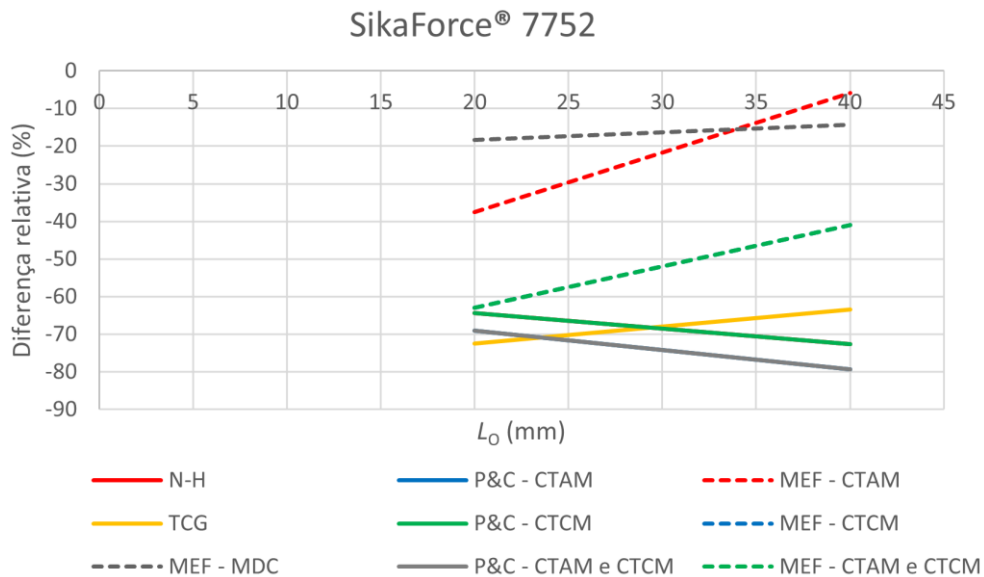


Figura 91 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo SikaForce® 7752

De acordo com o gráfico apresentado verifica-se que a maioria dos métodos se mantém com valores de $P_{m\acute{a}x}$ distantes dos obtidos experimentalmente, havendo a aproximação do MEF segundo o critério da tensão de arrancamento máxima, o afastamento ligeiro dos valores do MDC relativamente aos experimentais e o afastamento acentuado dos valores do método da tensão de cedência generalizada.

Os métodos analíticos e MEF, com valores de $P_{m\acute{a}x}$ largamente diferentes dos valores experimentais, apresentam $P_{m\acute{a}x}$ entre 64,4% e 72,5% inferiores ao experimental para $L_0=20$ mm e valores entre 41,0 % e 79,4%, inferiores para $L_0=40$ mm (Tabela 41).

Relativamente ao MEF segundo o critério da tensão de arrancamento máxima, são obtidos valores mais próximos de $P_{m\acute{a}x}$ em comparação com os outros dois adesivos, uma vez que se registam valores 37,5% inferiores aos experimentais para $L_0=20$ mm e 5,9% inferiores para $L_0=40$ mm., verificando-se que este modelo é mais preciso quando adaptado a materiais poucos rígidos.

O MDC é o método mais preciso, embora tenha uma maior diferença relativa de $P_{m\acute{a}x}$, sendo 18,4% inferior aos resultados experimentais para $L_0=20$ mm e 14,3% inferior para $L_0=40$ mm.

Já o modelo da tensão de cedência generalizada apresenta valores muito diferentes dos expectáveis, obtendo valores de $P_{m\acute{a}x}$ 72,5% inferiores para $L_0=20$ mm e 63,5% inferiores para $L_0=40$ mm. Visto que este modelo é mais adequado para materiais dúcteis, poderão ter ocorrido erros na caracterização do adesivo, nomeadamente o fabrico da junta.

Tabela 41 - Diferença relativa (%) dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos métodos analíticos e do MEF em comparação com os resultados experimentais, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm no adesivo SikaForce® 7752

Adesivo	SikaForce® 7752	
	L_0 (mm)	
	20	40
Modelo de Nayeb-Hasehmi	-64,4	-72,6
Pugno e Carpinteri - σ_y	-69,0	-79,4
Pugno e Carpinteri - τ_{xy}	-64,4	-72,6
Pugno e Carpinteri - σ_y e τ_{xy}	-69,0	-79,4
Tensão de cedência generalizada	-72,5	-63,5
MEF - σ_y	-37,5	-5,9
MEF - τ_{xy}	-62,9	-41,0
MEF - σ_y e τ_{xy}	-62,9	-41,0
MEF - MDC	-18,4	-14,3

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

- 4.1 Conclusões
- 4.2 Propostas de trabalhos futuros

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 Conclusões

Nesta dissertação pretendeu-se estudar e validar métodos analíticos para a obtenção das distribuições de tensões de juntas adesivas tubulares e efetuar a previsão de resistência por métodos da mecânica dos meios contínuos. Inicialmente, pretendeu-se aferir a validade dos resultados obtidos analiticamente das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}), bem como os valores de $P_{m\acute{a}x}$, obtidos pelos modelos de Nayeb-Hashemi et al. [79], Pugno e Carpinteri [80] e da tensão de cedência generalizada [10], a partir da sua comparação com resultados numéricos e experimentais.

As tensões σ_y foram analisadas analiticamente por intermédio do modelo de Pugno e Carpinteri [80], e verificaram-se limitações na obtenção da distribuição de tensões, uma vez que os resultados, em comparação com os obtidos pelo MEF, apresentam valores díspares nas extremidades da camada de adesivo e baixa concentração de valores na região central da mesma, exceto para adesivos com alta rigidez como o Araldite® AV138. O facto de as tensões σ_y serem superiores às tensões τ_{xy} , para as mesmas condições, o que não devia acontecer, dado que o adesivo sofre maioritariamente tensões τ_{xy} , clarifica a imprecisão deste modelo.

No que diz respeito às tensões τ_{xy} , ambos os modelos analíticos apresentam boa conformidade do comportamento das juntas para as tensões, uma vez que ambos se baseiam no modelo de deformação diferencial. Comparativamente ao MEF, os modelos analíticos apresentam maiores picos de tensão τ_{xy} nas extremidades da camada de adesivo e um maior gradiente ao longo da junta, tomando menores valores quanto menor for a rigidez do adesivo. Na análise da distribuição das tensões τ_{xy} verificam-se picos de tensão nas extremidades de sobreposição, enquanto na zona central as tensões τ_{xy} são aproximadamente nulas. O adesivo que registou picos mais elevados de tensão τ_{xy} foi o adesivo Araldite® AV138, devido à sua elevada rigidez. Os outros adesivos em estudo (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) obtiveram menores picos de tensões τ_{xy} , porém uma maior diferença de picos de tensão entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

A partir dos resultados experimentais da resistência da junta, comprova-se que, para adesivos mais rígidos e resistentes, como o Araldite® AV138, são obtidos $P_{m\acute{a}x}$ superiores aos restantes adesivos em estudo, para $L_0=20$ mm, mas obtém-se um menor aumento entre os dois L_0 , resultando em valores superiores de adesivos menos rígidos, para $L_0=40$ mm. Por outro lado, adesivos menos rígidos como Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752

suportam menores $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=20$ mm, mas obtêm um maior aumento percentual, destacando-se o obtido pelo Sikaforce® 7752.

A resistência da junta foi obtida analiticamente com base nos critérios da mecânica dos meios contínuos, verificando-se boa precisão dos modelos de Nayeb-Hashemi et al. [79] e Pugno e Carpinteri [80] com o MEF, principalmente para adesivos mais rígidos, para ambos L_0 . No entanto, tanto os métodos analíticos como o MEF, exceto para o MDC, obtiveram uma grande discrepância dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ em relação aos valores obtidos experimentalmente, uma vez que na modelação não têm em conta a plastificação dos adesivos e aderentes. Para adesivos mais rígidos, como o Araldite® AV138, constata-se a maior diferença entre os valores analíticos e do MEF e os valores experimentais, diminuindo esta diferença para adesivos menos rígidos.

Como exceção, o MDC apresenta resultados próximos dos resultados experimentais e o modelo da tensão de cedência generalizada obtém diferenças relativas razoáveis ao $P_{m\acute{a}x}$ experimental, tendo uma melhor previsão para adesivos mais dúcteis.

Com base no que foi apresentado, verifica-se que os modelos de Nayeb-Hashemi et al. [79] e Pugno e Carpinteri [80] foram desenvolvidos predominantemente para a previsão das tensões de corte, tendo apenas em consideração o comportamento elástico dos adesivos e aderentes. Desta forma, a resistência da junta é prevista de forma sobredimensionada, uma vez que os valores $P_{m\acute{a}x}$ são bastante inferiores aos realmente suportados pela junta.

4.2 Propostas de trabalhos futuros

De forma a aprofundar os conhecimentos das juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração, são apresentadas as seguintes sugestões para trabalhos futuros:

- Efetuar análises para aderentes de materiais diferentes;
- Efetuar análises para aderentes com diferentes espessuras;
- Efetuar análises com a aplicação de solicitações dinâmicas nas juntas;
- Efetuar análises através de outros modelos analíticos com modificação dos critérios de forma a considerar a plasticidade dos adesivos e dos aderentes.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Adams, R.D., *Adhesive bonding: Science, technology and applications*. 2005: Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
2. Ramalho, L.D.C., R.D.S.G. Campilho, J. Belinha, e L.F.M. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.
3. Akhavan-Safar, A., E.A.S. Marques, R.J.C. Carbas, e L.F.M. da Silva, *6 - Stress analysis of adhesive joints*, in *Adhesive Bonding (Second Edition)*, R.D. Adams, Editor. 2021, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England. p. 159-192.
4. Wadley, L., T. Hodgskiss, e M. Grant, *Implications for complex cognition from the hafting of tools with compound adhesives in the Middle Stone Age, South Africa*. National Academy of Sciences, 2009. **106**(24): p. 9590-9594.
5. Wadley, L., *Compound-Adhesive Manufacture as a Behavioral Proxy for Complex Cognition in the Middle Stone Age*. Current Anthropology, 2010. **51**(S1): p. S111-S119.
6. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindustria: Porto.
7. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2015: William Andrew: New York
8. Dillard, D.A., *Advances in structural adhesive bonding*. 2017: Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
9. Kelly, A. e C. Zweben, *Comprehensive Composite Materials*. 2000: Elsevier: Amsterdam
10. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering. 2nd edn*. 1997: Chapman & Hall: London England.
11. Marchione, F. e P. Munafò, *Experimental investigation on timber-glass double-lap adhesive joints reinforced with nylon fabric*. Construction and Building Materials, 2021. **275**: p. 2021-03.
12. Sousa, F.C., L.F.M. da Silva, A. Akhavan-Safar, L.F.M. da Silva, e R. Goyal, *Fatigue life estimation of single lap adhesive joints using a critical distance criterion: An equivalent notch approach*. Mechanics of Materials, 2021. **153**.
13. Maggiore, S., M. Pedemonte, A. Bazurro, P. Stagnaro, R. Utzeri, e G. Luciano, *Characterization of the effect of an epoxy adhesive in hybrid FSW-bonding aluminium-steel joints for naval application*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **103**: p. 102702.
14. Petrie, E., *Handbook of adhesives and sealants*. 2002: McGraw-Hill: New York.
15. Guo, L., J. Liu, H. Xia, X. Li, X. Zhang, e H. Yang, *Effects of surface treatment and adhesive thickness on the shear strength of precision bonded joints*. Polymer Testing, 2021. **94**.

16. Yacobi, B., S. Martin, K. Davis, A. Hudson, e M. Hubert, *Adhesive bonding in microelectronics and photonics*. Journal of Applied Physics, 2002. **91**: p. 6227-6262.
17. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto. p. 372.
18. Davis, M. e D. Bond, *The importance of failure mode identification in adhesive bonded aircraft structures and repairs*. Royal Australian Air Force, 2008.
19. Gursel, A., A.A. Mohamad, M. Firdaus, e M.F. Mohd Nazeri, *Adhesion mechanism and failure modes in adhesively bonded joints*. International Conference on Material Science and Technology in Kizilcahamam/Ankara (IMSTEC), 2019.
20. Eusebio, 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.
21. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology Vol. 2*. 2011: Springer International Publishing: New York USA.
22. Mays, G.C. e A.R. Hutchinson, *Adhesives in civil engineering*. 1992: Cambridge University Press: Cambridge England.
23. Skeist, I., *Handbook of Adhesives*. 2011: Springer Verlag: Berlin
24. Pantelakis, S. e K. Tserpes, *Revolutionizing Aircraft Aaterials and Processes*. 2020: Springer: Cham Switzerland.
25. Huntsman, *Araldite: Reliable and comprehensive bonding solutions*. 2014: Basel Switzerland.
26. Golaz, B., V. Michaud, S. Lavanchy, e J.A.E. Manson, *Design and durability of titanium adhesive joints for marine applications*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **45**: p. 150-157.
27. Momber, A.W., L. Fröck, e T. Marquardt, *Effects of accelerated ageing on the mechanical properties of adhesive joints between stainless steel and polymeric top coat materials for marine applications*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **103**: p. 102699.
28. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants*. 2006: Elsevier Science: Oxford England.
29. Hamilton, A., Y. Xu, N. Gadegaard, D.M. Mulvihill, e M.E. Kartal, *Enhancing strength and toughness of adhesive joints via micro-structured mechanical interlocking*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2021. **105**.
30. da Silva, L.F.M., P.J.C. das Neves, R.D. Adams, e J.K. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion and Adhesives International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 319-330.
31. Volkersen, O., *Rivet Strength Distribution in Tensile-Stressed Rivet Joints with Constant Butt Strap Cross Section*. Luftfahrtforschung. Vol. Vol. 15. 1938. 41.
32. Goland, M.a.E.R., *The Stress in Cemented Joint*. J. of Applied Mechanics, 1944.
33. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded Single-lap Joints*. 1973: National Aeronautics and Space Administration.
34. Pocius, A.V. e D.A. Dillard, *Adhesion Science and Engineering: Surfaces, Chemistry and Applications*. 2002: Elsevier Science.

35. Lucas F. M. da Silva, R.F.T.L., Rui M. S. Teixeira and A. Puga, *Closed-form solutions for adhesively bonded joints* Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
36. Campilho, R., *Strength Prediction of Adhesively-Bonded Joints*. 2016: CRC Press: Florida
37. Quispe Rodríguez, R., W.P. de Paiva, P. Sollero, M.R. Bertoni Rodrigues, e É.L. de Albuquerque, *Failure criteria for adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 26-36.
38. 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.
39. 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.
40. 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.
41. 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.
42. 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.
43. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
44. 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.
45. 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.
46. 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.
47. 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.
48. 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.
49. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
50. 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.

51. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
52. 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.
53. 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.
54. 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.
55. 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.
56. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: For Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley-Blackwell: New Jersey.
57. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **45**(5): p. 601-620.
58. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **46**(1): p. 131-150.
59. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
60. Rosas, M.F.M.O., R.D.S.G. Campilho, e R.D.F. Moreira, *Numerical analysis of geometrical modification combinations of the tensile strength of tubular adhesive joints*. *Procedia Structural Integrity*, 2021. **33**: p. 115-125.
61. Barbosa, D., R. Campilho, R. Rocha, e L.R.F. Ferreira, *Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2018.
62. Dantas, M.A., R.J.C. Carbas, E.A.S. Marques, D. Kushner, e L.F.M. da Silva, *Flexible tubular metal-polymer adhesive joints under torsion loading*. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2021. **105**: p. 102787.
63. Sawa, T., Y. Nakano, e K. Temma, *A Stress Analysis of Butt Adhesive Joints Under Torsional Loads*. *The Journal of Adhesion*, 1987. **24**(2-4): p. 245-258.
64. Sato, C. e K. Ikegami, *Strength of Adhesively-Bonded Butt Joints of Tubes Subjected to Combined High-Rate Loads*. *The Journal of Adhesion*, 1999. **70**(1-2): p. 57-73.
65. Parashar, A. e P. Mertiny, *Adhesively bonded composite tubular joints: Review*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **38**: p. 58-68.
66. Barzegar, M. e M. Mokhtari, *Numerical study of Geostationary Orbit thermal cycle effects of a tubular adhesive joint: Dynamic behavior*. *The Journal of Adhesion*, 2019. **96**: p. 1-18.
67. Guess, T.R., E.D. Reedy, e A.M. Slavin, *Testing Composite-to-Metal Tubular Lap Joints*. *Journal of Composites, Technology and Research*, 1995. **17**(2): p. 117-124.

68. Choi, J.H. e D.G. Lee, *An Experimental Study of the Static Torque Capacity of the Adhesively-Bonded Tubular Single Lap Joint*. The Journal of Adhesion, 1996. **55**(3-4): p. 245-260.
69. Hashim, S.A., M.J. Cowling, e S. Lafferty, *The integrity of bonded joints in large composite pipes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1998. **18**(6): p. 421-429.
70. Huysmans, G., J.-F. Marsol, I. Verpoest, G. De Roeck, L. De Ridder, e J. Vansant, *A field-friendly rigid composite coupler for GRP pipes*. Composite Structures, 1997. **37**(2): p. 155-164.
71. Systems, F.G., *Installation guide for GRE pipe systems*. 2012, NOV FGS.
72. Bouwkamp, J.G., A.K. Vaish, e H.G. Terata. *A Study of Different Flared Joint Configurations*. in *Offshore Technology Conference*. 1970. Houston, Texas.
73. Das, R.R. e B. Pradhan, *Finite Element Based Design and Adhesion Failure Analysis of Bonded Tubular Socket Joints Made with Laminated FRP Composites*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(1-3): p. 41-67.
74. Systems, F.G., *Fiberglass Piping - Corrosion Resistant Systems for Oil & Gas Applications*. 2017: nov.com/fgs.
75. GettyImages, F.i., *How to Glue PVC Pipe*. 2018, Hunker.
76. Labbé, S. e J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **33**: p. 26-35.
77. Galvez, P., A. Quesada, M.A. Martinez, J. Abenojar, M.J.L. Boada, e V. Diaz, *Study of the behaviour of adhesive joints of steel with CFRP for its application in bus structures*. Composites Part B: Engineering, 2017. **129**: p. 41-46.
78. Dragoni, E. e L. Goglio, *Adhesive stresses in axially-loaded tubular bonded joints—Part I: Critical review and finite element assessment of published models*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **47**: p. 35-45.
79. Nayeb-Hashemi, H., J. Rossettos, e A. Melo, *Multiaxial fatigue life evaluation of tubular adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1997. **17**(1): p. 55-63.
80. Pugno, N. e A.J.J.A.M. Carpinteri, *Tubular adhesive joints under axial load*. Journal of Applied Mechanics 2003. **70**(6): p. 832-839.
81. 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.
82. 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.
83. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
84. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.

85. 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.
86. 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.
87. 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.
88. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
89. Fernandes, T.A., R.D. Campilho, M.D. Banea, e L.F. da Silva, *Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
90. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. 2015, Instituto de Engenharia Superior do Porto: Porto.
91. Campilho, R., M. de Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science Technology, 2005. **13**(65): p. 1948-1958.
92. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, e J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
93. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos* 2005, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
94. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
95. Reis, P., F.V. Antunes, e J.A.M. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Composite Structures, 2005. **67**: p. 125–133.
96. Taib, A., R. Boukhili, S. Achiou, e H. Boukehili, *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2006. **26**: p. 237-248.
97. Radice, J. e J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
98. Luo, Q. e L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(7): p. 2349-2370.
99. Vable, M. e J.R. Maddi, *Boundary element analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2006. **26**(3): p. 133-144.
100. Grant, L., R.D. Adams, e L.F. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.

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. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
103. 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.