



Estudo de juntas tubulares sujeitas a esforços combinados de tração e pressão interior

DANIEL AUGUSTO LOPES RIBEIRO

novembro de 2020

ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS COMBINADOS DE TRAÇÃO E PRESSÃO INTERIOR

Daniel Augusto Lopes Ribeiro

1140346

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento De Engenharia Mecânica



ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS COMBINADOS DE TRAÇÃO E PRESSÃO INTERIOR

Daniel Augusto Lopes Ribeiro

1140346

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 de Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Miguel Pereira Durão

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Eduardo André da Sousa Marques

Investigador, INEGI

AGRADECIMENTOS

Queria deixar um especial agradecimento ao meu orientador, Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela oportunidade que me concedeu, pelo apoio, disponibilidade, incentivo e pelo trabalho incansável que prestou ao longo da realização desta dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), e a todos os Docentes do Departamento de Engenharia Mecânica.

Aos meus amigos e família pelo apoio, incentivo e compreensão que foram transmitidos.

PALAVRAS CHAVE

Juntas Estruturais, Modelação numérica, Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Juntas adesivas tubulares.

RESUMO

Na atualidade, com as necessidades do mercado, as ligações adesivas estão a ser mais utilizadas no desenvolvimento de estruturas mecânicas. Este método apresenta algumas vantagens significativas quando comparado com os métodos tradicionais (Soldadura, ligações aparafusadas). Entre as vantagens que este método proporciona destaca-se a redução de peso da estrutura, e a possibilidade de unir diferentes materiais sem danificar as estruturas a ligar.

Nesta dissertação pretende-se realizar um estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares, e submeter a mesma a esforços combinados de tração e pressão interior. Deste modo irá ser efetuada uma comparação do desempenho das juntas tubulares, com diferentes adesivos, considerando a variação dos parâmetros geométricos principais e dos valores de pressão.

Os parâmetros principais são o comprimento de sobreposição (L_o), a espessura dos aderentes e os adesivos a analisar (Araldite® 2015, Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752).

O trabalho numérico consiste na utilização Método Elementos Finitos, para efetuar uma análise de tensões de corte no regime elástico e do Modelo de Dano Coesivo para a previsão da resistência das juntas.

O estudo paramétrico em juntas tubulares, demonstra que não ocorrem alterações significativas na resistência das juntas. Verifica-se um aumento de $P_{máx}$ com o aumento de L_o , as juntas com Araldite® 2015, são as que apresentam a resistência mais elevada. As juntas com menor resistência são as que apresentam Sikaforce® 7752, os resultados repetem-se com diferentes valores de espessura. O aumento da pressão interior, revela um aumento dos valores de $P_{máx}$, para os diferentes adesivos.

Concluindo-se que o aumento dos valores de L_o , da espessura e da pressão, conduzem a um aumento do valor de $P_{máx}$ e da resistência da junta.

KEYWORDS

Structural joints, Numerical modeling, Finite Element Method, Cohesive Zone Models, Tubular adhesives joints.

ABSTRACT

Nowadays, with market needs, adhesives bonds are being used more in the development of mechanical structures. This method has some significant advantages when compared to traditional methods (Welding, screw connections). Among the advantages that this method provides, the weight reduction of the structure stands out, and the possibility of joining different materials without damaging the structures to be connected.

This dissertation intends to carry out a numerical parametric Study of tubular adhesives joints, and to subject it to combined efforts of traction and interior pressure. In this way a comparison of the performance of the tubular joints will be made, with different adhesives, considering the variation of the main geometric parameters and the pressure values.

The main parameters are the overlap length (L_o), the thickness of the adherents and adhesives to analyse (Araldite® 2015, Araldite® AV138 and Sikaforce® 7752).

Numerical work consists of using Finite Element Method, to perform an analysis of shear stresses in the elastic regime, and the Cohesive Damage Model for predicting joint Strength.

The parametric Study in tubular joints, demonstrates that there are no significant changes in joint Strength. There is an increase in $P_{m\acute{a}x}$ with an increase in L_o , the joints with Araldite® 2015, are those with the highest resistance.

The joints with less resistance are those that present Sikaforce® 7752, the results are repeated with different thickness values. The increase in internal pressure reveals an increase in $P_{m\acute{a}x}$ values for the different adhesives.

In conclusion, the increase in L_o Values, thickness and pressure, leads to an increase in $P_{m\acute{a}x}$ values and joint Strength.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
a.C.	Antes de Cristo
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
EF	Elementos Finitos
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
SDEG	Stiffness Degradation
TFFV	<i>Técnica do Fecho da Fenda Virtual</i>

Lista de Unidades

GPa	GigaPascal
kN	QuiloNewton
kPa	QuiloPascal
mm	Milímetro
MPa	MegaPascal
N	Newton

Lista de Símbolos

d_{SE}	Diâmetro externo do substrato exterior
d_{SI}	Diâmetro externo do substrato interior
E	Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G_C	Tenacidade
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
G_t	Taxa de libertação de energia
k	Fator de momento fletor
K	Rigidez coesiva do adesivo
L	Comprimento da junta
l_{ASI}	Comprimento do chanfro no aderente interior
l_{ASO}	Comprimento do chanfro no aderente exterior

L_O	Comprimento de sobreposição
L_S	Comprimento dos substratos
L_T	Comprimento total da junta adesiva tubular
P	Pressão interior
$P_{m\acute{a}x}$	Força máxima
$P_{m\acute{a}x} Méd$	Media da força máxima
t	Espessura do substrato
U	Energia dissipada
γ_f	Deformação de rotura ao corte
$\delta_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Aumento percentual
ϵ	Deformação
ϵ_f	Deformação de rotura à tração
θ	Ângulo entre os aderentes
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão principal
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_{rr}	Tensão radial
σ_y	Tensão de cedência à tração
$\sigma_{\theta\theta}$	Tensão circunferencial
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte

τ_y	Tensão de cedência ao corte
τ_{zr}	Tensão de corte no plano z e direção r
τ_{zr}	Tensão de corte no plano z e direção r
$\tau_{\theta r}$	Tensão de corte no plano θ e direção r
$\tau_{\theta r}$	Tensão de corte no plano θ e direção r

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de tensões em juntas adesivas, rebitadas e soldadas [7].....	6
Figura 2 - Estrutura <i>Honeycomb</i> [8].....	7
Figura 3 – Concentração de tensões em juntas rebitadas e adesivas [9].....	11
Figura 4 - Aplicação de ligações adesivas no Airbus A380 [14].	12
Figura 5 - Áreas de aplicação de ligações adesivas num automóvel [17].....	13
Figura 6 - Representação de algumas aplicações de adesivos num barco [22].....	14
Figura 7 - Estorços em juntas adesivas: a) compressão; b) tração; c) corte; d) arrancamento; e) clivagem [25].....	15
Figura 8 - Esforço de tração e respetiva distribuição de tensões [5].....	16
Figura 9 - Esforço de compressão e respetiva distribuição de tensões [5].	16
Figura 10 - Esforço de corte e respetiva distribuição de tensões [5].	17
Figura 11- Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte [5].	18
Figura 12 - Esforços de arrancamento e clivagem, e respetivas distribuições de tensões [5].	18
Figura 13 - Modos de rotura em juntas adesivas [28].	19
Figura 14 - Tipos de juntas adesivas usadas em engenharia [5, 28].....	21
Figura 15 - Modo como uma JSS sobre esforços de flexão devido ao desalinhamento da força de corte em relação à carga aplicada [7].	21
Figura 16 - Configurações possíveis de juntas de sobreposição [25].	22
Figura 17 - Configurações possíveis de juntas com tira [1].	23
Figura 18 - Configurações possíveis de juntas topo a topo [7].....	24
Figura 19 - Alguns exemplos de juntas em T e de canto [34].	24
Figura 20 - Configurações possíveis para juntas tubulares: a) Ligações em varões; b) Ligações em tubos [7].....	25
Figura 21 - Junta tubular com as extremidades dos substratos: a) Sem a presença de chanfro nos tubos; b) Com a presença de chanfros nos tubos [1].....	25
Figura 22 - Juntas tubulares com a existência de orifícios para permitir a libertação do ar [25].....	26
Figura 23 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) [50].	29

Estudo de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços combinados de tração e pressão interior

Figura 24 - Modelo coesivo triangular [62, 63]	31
Figura 25 - Geometria do provete DCB [75].	33
Figura 26 - Geometria do provete ENF [75].	33
Figura 27 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [90].	35
Figura 28 - Junta tubular e junta tubular com chanfro [93].	36
Figura 29 - Modelo axissimétricos 2D, representando parâmetros geométricos, carga e condições fronteira [94].	37
Figura 30 - Malha de elementos finitos da junta adesiva tubular: a) modelo completo; b) zona aproximada da região de sobreposição [95].	38
Figura 31 - Junta tubular com uma manga sob tensão axial: a) geometria global; b) típico elemento diferencial [97].	39
Figura 32 - Comportamento plástico de dois comprimentos de sobreposição diferentes, L, resultante do teste de torção estático, mostrando o número de amostras para cada comprimento [91].	40
Figura 33 - Distribuição das tensões de Von Mises, ao longo do comprimento de sobreposição em função da torção aplicada [91].	41
Figura 34 - Modelos de elementos finitos, utilizados das duas juntas delaminadas: a) junta adesiva tubular; b) junta adesiva tubular com casquilho [101].	43
Figura 35 - Esquema da junta tubular em estudo: a) vista isométrica; b) vista transversal [102].	44
Figura 36 - Dimensões das amostras utilizadas no estudo realizado por Reedy et al [105].	45
Figura 37 - Configurações da geometria do provete [106].	49
Figura 38 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [110].	51
Figura 39 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [111].	52
Figura 40 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 [111].	54
Figura 41 - Curvas σ - ϵ do adesivo SikaForce® 7752 [114].	54
Figura 42 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm [106].	56
Figura 43 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138 b) $L_0=40$ mm [106].	56
Figura 44 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm [106].	58
Figura 45 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015 b) $L_0=40$ mm [106].	58
Figura 46 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752, para $L_0=20$ mm [106].	59
Figura 47 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752, para $L_0=40$ mm [106].	59

Figura 48 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [106].	62
Figura 49 - Lei coesiva triangular [115].	63
Figura 50 - MDC triangular [112].	63
Figura 51 - Atribuição dos respectivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS [106].	67
Figura 52 - Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS® [106].	68
Figura 53 - Desenho 2D de uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm no ABAQUS® [106].	69
Figura 54 - Diferentes partições existentes no modelo criado no ABAQUS® [106].	69
Figura 55 - Definição de incrementos para análise no ABAQUS® [106].	70
Figura 56 - Representação condições de fronteira [106].	71
Figura 57 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=20$ mm [106].	72
Figura 58 - Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS® [106].	73
Figura 59 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [106].	74
Figura 60 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [106].	76
Figura 61 - 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 [106].	77
Figura 62 - 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 [106].	78
Figura 63 - 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 [106].	78
Figura 64 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [106].	80
Figura 65 – Esquema do comprimento sobreposição (L_0) e espessura substrato (t)	83
Figura 66 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.	84
Figura 67 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.	85
Figura 68 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.	85

Figura 69 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.	86
Figura 70 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.	86
Figura 71 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.	86
Figura 72 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.	87
Figura 73 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.	87
Figura 74 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.	88
Figura 75 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.	88
Figura 76 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.	89
Figura 77 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.	89
Figura 78 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 10 MPa e espessura 1 mm.	90
Figura 79 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 10 MPa e espessura 1 mm.	90
Figura 80 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 10 MPa e espessura 1 mm.	90
Figura 81 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 25 MPa e espessura 1 mm.	91
Figura 82 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 25 MPa e espessura 1 mm.	91
Figura 83 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 25 MPa e espessura 1 mm.	92
Figura 84 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.	92
Figura 85 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.	93

Figura 86 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm	93
Figura 87 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 10 MPa e espessura 2 mm.	94
Figura 88 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 10 MPa e espessura 2 mm.	94
Figura 89 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 10 MPa e espessura 2 mm.	94
Figura 90 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 25 MPa e espessura 2 mm.	95
Figura 91 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 25 MPa e espessura 2 mm.	95
Figura 92 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 25 MPa e espessura 2 mm.	96
Figura 93 – Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.	100
Figura 94 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.	100
Figura 95 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.	101
Figura 96 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.	101
Figura 97 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.	102
Figura 98 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.	102
Figura 99 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.	103
Figura 100 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.	103
Figura 101 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.	104
Figura 102 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.	104
Figura 103 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.	105
Figura 104 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.	105
Figura 105 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 10 MPa e espessura 1 mm.	106
Figura 106 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 10 MPa e espessura 1 mm.	106
Figura 107 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 10 MPa e espessura 1 mm.	106
Figura 108 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 25 MPa e espessura 1 mm.	107
Figura 109 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 25 MPa e espessura 1 mm.	107

Figura 110 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 25 MPa e espessura 1 mm.	108
Figura 111 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.	108
Figura 112 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.	109
Figura 113 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.	109
Figura 114 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 10 MPa e espessura 2 mm.	110
Figura 115 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 10 MPa e espessura 2 mm.	110
Figura 116 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 10 MPa e espessura 2 mm.	110
Figura 117 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 25 MPa e espessura 2 mm.	111
Figura 118 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 25 MPa e espessura 2 mm.	111
Figura 119 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 25 MPa e espessura 2 mm.	112
Figura 120 – SDEG para Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa.	115
Figura 121 - SDEG para Araldite® AV138, pressão 10 MPa.	116
Figura 122 - SDEG para Araldite® AV138, pressão 25 MPa.	116
Figura 123 - SDEG para Araldite® 2015, pressão 0,1 MPa.	118
Figura 124 - SDEG para Araldite® 2015, pressão 10 MPa.	118
Figura 125 - SDEG para Araldite® 2015, pressão 25 MPa.	119
Figura 126 - SDEG para SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa.	120
Figura 127 - SDEG para SikaForce® 7752, pressão 10 MPa.	120
Figura 128 - SDEG para SikaForce® 7752, pressão 25 MPa.	121
Figura 129 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 0,5 mm e pressão 0,1 MPa.	122
Figura 130 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 0,1 MPa.	122
Figura 131 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 0,1 MPa.	123
Figura 132 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 0,5 mm e pressão 10 MPa.	123
Figura 133 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 10 MPa.	123
Figura 134 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 2 mm e pressão 10 MPa.	124
Figura 135 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 0.5 mm e pressão 25 MPa.	124
Figura 136 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 25 MPa.	124
Figura 137 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 2 mm e pressão 25 MPa.	125
Figura 138 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 0.5 mm e pressão 0.1 MPa.	125

Figura 139 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 1 mm e pressão 0.1 MPa.....	125
Figura 140 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 2 mm e pressão 0,1 MPa.....	126
Figura 141 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 0.5 mm e pressão 10 MPa.....	126
Figura 142 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 1 mm e pressão 10 MPa.....	126
Figura 143 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 2 mm e pressão 10 MPa.....	127
Figura 144 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 0,5 mm e pressão 25 MPa.....	127
Figura 145 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 1 mm e pressão 25 MPa.....	127
Figura 146 - Curvas P - δ da Araldite® 2015, para espessura 2 mm e pressão 25 MPa.....	128
Figura 147 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 0,5 mm e pressão 0,1 MPa.	128
Figura 148 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 1 mm e pressão 0,1 MPa.	128
Figura 149 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 2 mm e pressão 0,1 MPa.	129
Figura 150 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 0,5 mm e pressão 10 MPa	129
Figura 151 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 1 mm e pressão 10 MPa	129
Figura 152 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 2 mm e pressão 10 MPa	130
Figura 153 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 0,5 mm e pressão 25 MPa	130
Figura 154 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 1 mm e pressão 25 MPa	130
Figura 155 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 2 mm e pressão 25 MPa	131
Figura 156 - Provedor com adesivo Araldite® 2015 a sofrer estrição.	132
Figura 157 – Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para Araldite® AV138 à pressão 0,1 MPa.....	133
Figura 158 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para Araldite® 2015 à pressão 0,1 MPa.	133
Figura 159 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para SikaForce® 7752 à pressão 0,1 MPa.....	134
Figura 160 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para Araldite® AV138 à pressão 10 MPa.....	134
Figura 161 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para Araldite® 2015 à pressão 10 MPa.	135
Figura 162 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para SikaForce® 7752 à pressão 10 MPa.....	135
Figura 163 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para Araldite® AV138 à pressão 25 MPa.....	136
Figura 164 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para Araldite® 2015 à pressão 25 MPa.	136
Figura 165 - Evolução de $P_{\text{máx}}$ em relação L_o , para SikaForce® 7752 à pressão 25 MPa.....	137
Figura 166 – Energia dissipada no adesivo Araldite® AV138 para pressão 0,1 MPa.	139
Figura 167 - Energia dissipada no adesivo Araldite® 2015 para pressão 0,1 MPa.	140

Figura 168 - Energia dissipada no adesivo SikaForce® 7752 para pressão 0,1 MPa.....	140
Figura 169 - Energia dissipada no adesivo Araldite® AV138 para pressão 10 MPa.....	141
Figura 170 - Energia dissipada no adesivo Araldite® 2015 para pressão 10 MPa.	141
Figura 171 - Energia dissipada no adesivo SikaForce® 7752 para pressão 10 MPa.....	142
Figura 172 - Energia dissipada no adesivo Araldite® AV138 para pressão 25 MPa.....	142
Figura 173 - Energia dissipada no adesivo Araldite® 2015 para pressão 25 MPa.	143
Figura 174 - Energia dissipada no adesivo SikaForce® 7752 para pressão 25 MPa.....	143

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Diferenças entre os vários tipos de ligações (adaptado de [1, 9, 10]).	8
Tabela 2 – Características das juntas adesivas (adaptado de [1]).	10
Tabela 3 – Designação das cotas dos provetes e respetivos valores (em mm) [106].	50
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [110-112].	52
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [110, 111, 113].	53
Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [96, 113, 114].	55
Tabela 7 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138.	57
Tabela 8 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015.	58
Tabela 9 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752.	60
Tabela 10 - $P_{máxMéd}$ (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares.	61
Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [108].	65
Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [121].	66
Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [114].	67
Tabela 14 - Deslocamentos impostos nos modelos de juntas adesivas tubulares em função do adesivo utilizado e valor de L_0 [106].	71
Tabela 15 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [106].	75
Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [106].	77
Tabela 17 - Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0 [106].	79
Tabela 18 - Valores de $P_{máx}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa [106].	81
Tabela 19 – Valores máximos de tensão de arrancamento absoluto para pressão 0,1 MPa.	98
Tabela 20 - Valores máximos de tensão de arrancamento absoluto para pressão 10 MPa.	99
Tabela 21 - Valores máximos de tensão de arrancamento absoluto para pressão 25 MPa.	99
Tabela 22 - Valores máximos de tensão de corte absoluto para pressão 0,1 MPa.	113
Tabela 23 - Valores máximos de tensão de corte absoluto para pressão 10 MPa.	113
Tabela 24 - Valores máximos de tensão de corte absoluto para pressão 25 MPa.	114

Tabela 25 – Valores máximos de SDEG para Araldite® AV138	117
Tabela 26 - Valores máximos de SDEG para Araldite® 2015	119
Tabela 27 - Valores máximos de SDEG para SikaForce® 7752.....	121
Tabela 28 - Valores de $P_{máx}$ em kN, para pressão 0,1 MPa.	137
Tabela 29 - Valores de $P_{máx}$ em kN, para pressão 10 MPa.....	137
Tabela 30 - Valores de $P_{máx}$ em kN, para pressão 25 MPa.....	137

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização da dissertação	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Ligações adesivas	5
2.1.1	Enquadramento histórico.....	5
2.1.2	Caracterização das juntas.....	6
2.1.3	Aplicações comuns das juntas adesivas	11
2.1.3.1	Indústria aeronáutica.....	11
2.1.3.2	Indústria automóvel.....	12
2.1.3.3	Indústria da construção civil	13
2.1.3.4	Indústria naval	14
2.1.4	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	15
2.1.4.1	Esforços de tração.....	15
2.1.4.2	Esforços de compressão	16
2.1.4.3	Esforços de corte	17
2.1.4.4	Esforços de clivagem e arrancamento	18
2.1.5	Modos de rotura em juntas adesivas	19
2.1.6	Configurações possíveis de junta	20
2.1.6.1	Juntas de sobreposição.....	21
2.1.6.2	Juntas com tira.....	22
2.1.6.3	Juntas topo a topo	23
2.1.6.4	Juntas de canto e T	24

2.1.6.5	Juntas tubulares.....	24
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	26
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	27
2.2.2	Mecânica da fratura	28
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	29
2.2.3.1	Tipo de leis coesivas.....	30
2.2.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	31
2.2.4	Mecânica do dano	33
2.2.5	Método de elementos finitos estendido.....	34
2.3	Juntas adesivas tubulares	36
2.3.1	Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração.....	37
2.3.2	Juntas tubulares sujeitas a esforços de corte.....	40
2.3.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga	44
3	DESENVOLVIMENTO	49
3.1	Validação dos MDC com dados experimentais.....	49
3.1.1	Descrição da geometria e materiais.....	49
3.1.1.1	Substratos	50
3.1.1.2	Adesivos	51
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	51
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	53
3.1.1.2.3	SikaForce® 7752	54
3.1.2	Resultados experimentais obtidos	55
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	56
3.1.2.2	Araldite® 2015	57
3.1.2.3	SikaForce® 7752.....	59
3.1.3	Comparação de resultados.....	60
3.1.4	Modelo de dano coesivo triangular.....	62
3.1.4.1	Determinação das propriedades coesivas	64

3.1.4.1.1	Araldite® AV138	65
3.1.4.1.2	Araldite® 2015.....	65
3.1.4.1.3	SikaForce® 7752	66
3.1.5	Condições da análise numérica	67
3.1.6	Análise de tensões nas juntas	73
3.1.6.1	Tensões de arrancamento	73
3.1.6.2	Tensões de corte.....	76
3.1.7	Previsão da resistência por MDC.....	77
3.1.8	Discussão dos resultados obtidos.....	78
3.1.9	Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais	80
3.2	Trabalho numérico	82
3.2.1	Condições da análise numérica	82
3.2.2	Condições estudadas.....	83
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	84
3.2.3.1	Tensões de arrancamento	84
3.2.3.2	Tensões de corte.....	99
3.2.4	Estudo da variável de dano	114
3.2.4.1	Araldite® AV138.....	114
3.2.4.2	Araldite® 2015	117
3.2.4.3	SikaForce® 7752.....	119
3.2.5	Previsão da resistência	122
3.2.5.1	Comprimento de sobreposição.....	122
3.2.5.2	Espessura dos aderentes	138
3.2.5.3	Pressão interior.....	138
3.2.6	Previsão da energia dissipada	138
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	147
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	151

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Na atualidade, com as necessidades do mercado e com o desenvolvimento da indústria, as ligações adesivas revelam-se uma excelente solução quando se pretende unir componentes de uma estrutura. Visto que este método de união, apresenta características que o favorecem relativamente aos métodos convencionais de ligação tais como a soldadura, brasagem, ligações aparafusadas e rebitadas. Este método de união tem vindo a expandir, visto apresentar boas características, como facilidade de produção, menores custos, facilidade em unir diferentes materiais, melhor resistência à fadiga, elevada capacidade de amortecimento de vibrações. As juntas também apresentam uma ótima distribuição de tensões mais uniforme, apresentam uma boa união de superfícies, mesmo estas sendo bastante irregulares. Estas ligações apresentam algumas limitações como a desmontagem e a baixa resistência ao arrancamento [1].

A indústria tem vindo a evoluir, começando a utilizar mais usualmente as ligações adesivas. Neste sentido, estas ligações têm sido utilizadas em diversas áreas como a indústria aeroespacial, aeronáutica, defesa, automóvel, de componentes de eletrónica, da construção civil, do calçado e das madeiras.

De entre os tipos de ligação mais comuns, referem-se as juntas de sobreposição simples, sobreposição dupla, com chanfro interior e em degrau. Outros tipos de juntas adesivas, como por exemplo as juntas tubulares, apresentam aplicações específicas, como por exemplo para os nós de ligação de estruturas em treliça ou para ligação de tubos com pressão interior. A utilização desta tecnologia, aplicado em juntas tubulares, poderá beneficiar a estrutura, no sentido de reduzir o peso da estrutura, distribuir de forma mais uniforme as tensões, não danifica os materiais a unir comparado com os métodos tradicionais [2]. Na geometria das juntas tubulares é crucial, ter em consideração a geometria da junta otimizada. Pois a secção com adesivo é baixa, de forma a obter uma maior resistência mecânica. As características dimensionais, como o comprimento de sobreposição e espessura irá afetar o comportamento da junta adesiva, quando a mesma estiver solicitada a esforços [2].

Com as necessidades da indústria nos dias de hoje, torna-se importante, desenvolver métodos numéricos para analisar as juntas adesivas.

O método de elementos finitos, bem como os modelos de dano, apresentam-se como uma ótima ferramenta para o desenvolvimento das ligações adesivas. No âmbito das técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo, são uma ferramenta que combina a resistência mecânica e tenacidade dos adesivos de forma a prever o comportamento da junta [3].

1.2 Objetivos

Nesta dissertação pretendemos realizar um estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares, e submeter a mesma a esforços de tração e de pressão interior. Desta forma serão criadas juntas adesivas tubulares, com tubos de alumínio e ligadas com três adesivos distintos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) e diferentes geometrias (comprimento de ligação e espessura dos tubos). Os comprimentos de ligação serão os seguintes: 10mm, 20mm, 30mm e 40mm. No que diz respeito às espessuras serão utilizadas as seguintes espessuras: 0,5mm, 1mm e 2mm. Assim o trabalho pressupõe a utilização de ensaios experimentais já realizados, efetuando o tratamento dos mesmos, bem como de toda a análise dos resultados. O trabalho numérico consiste na utilização do Método de Elementos Finitos para efetuar uma análise de tensões e corte no regime elástico, e dos Modelos de Dano Coesivo para estudo da variável de dano e para previsão da resistência das juntas com diferentes geometrias.

1.3 Organização da dissertação

Nesta dissertação é possível verificar que a mesma se encontra dividida em quatro capítulos distintos, de forma a uma melhor interpretação da mesma.

No primeiro capítulo, encontra-se o enquadramento do trabalho realizado e os objetivos da dissertação.

O capítulo dois consiste na revisão bibliográfica, em que é abordado os diferentes tipos de ligação, tipos de junta, os adesivos estruturais, os métodos de determinação das propriedades dos adesivos, os tipos de esforços aplicados nas juntas adesivas tubulares e os modelos de previsão da resistência das juntas.

No capítulo três, é abordada a validação dos resultados numéricos, relativamente aos experimentais. Este estudo numérico é realizado no *software* ABAQUS. Neste capítulo, também é abordado a previsão da resistência da junta, quando a mesma é submetida a esforços de tração e de pressão interior.

No que diz respeito ao último capítulo é abordada as conclusões obtidas, através dos resultados obtidos tanto experimentalmente como em método numérico.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

2.1.1 Enquadramento histórico

A origem do adesivo é difícil de se perceber. Contudo, existem evidências de que os adesivos são usados há milhares de anos, quer para fazer ligações mais resistentes quer para ligações de pouca responsabilidade. Isto é, os adesivos passaram por um processo gradual de evolução.

Os adesivos, segundo evidências arqueológicas, começaram a ser usados antes do homem moderno. Os Neandertais (Alemanha, com cerca de 50 mil a 60 mil anos) usavam um tipo de cola (adesiva) feita com o líquido da bétula. Mais recentemente, também existem provas de adesivos na Babilónia, na época do Neolítico, na civilização Egípcia. Consegue-se visualizar uma evolução para os diferentes objetos que utilizam o adesivo, incluindo a própria aplicação da cola (os Egípcios usavam um pincel para esta aplicação) e os materiais usados para a produção desta cola [4].

O uso de betume como elemento adesivo é descrito e referenciado na bíblia, por exemplo quando Noé construiu a arca. *When God was instructing how to build the ark, he told Noah to cover it inside and out with pitch' (Genesis 6: 14)"* [4] e na construção da Torre de Babel. O adesivo também foi utilizado, mais tarde, para a construção de decorações das igrejas.

O uso dos adesivos para a medicina da antiguidade, por exemplo os gregos usavam adesivos animais, para limpar feridas e reparar partes do corpo partidas, como os narizes.

A primeira patente atribuída a um adesivo ocorreu em 1750, na Inglaterra, e tratou-se de uma cola elaborada a partir de peixe. As patentes seguintes foram para colas à base de borracha, leite, caseína e goma.

Nos primeiros anos do século XX, surgiram fábricas de adesivos. A primeira e a segunda guerra mundial, através da indústria aeronáutica, promoveram um incremento na utilização da ligação adesiva [5, 6].

Em suma, os vários tipos de adesivo e a suas aplicações foram evoluindo e atravessando os séculos para diferentes utilizações. Atualmente os adesivos são

usados em aplicações críticas, com elevada responsabilidade, como por exemplo indústria automóvel e aeronáutica.

2.1.2 Caracterização das juntas

As ligações adesivas nasceram da necessidade de unir materiais da mesma natureza ou mesmo materiais de naturezas diferentes. Este tipo de ligações adesivas são métodos de ligação para ligar materiais avançados de alta resistência, como é o caso dos compósitos de matriz polimérica. Nesta situação, as ligações mecânicas (ligações rebitadas e/ou aparafusadas) são menos eficientes do que nos materiais metálicos, devido à baixa ductilidade e à fraca resistência ao esmagamento dos materiais compósitos [5]. Outro método de ligação é a soldadura, contudo em alguns casos não irá ser aplicada, dos quais as matrizes poliméricas, porque irá fundir com o material. Estes pontos anteriormente referidos, são a justificação para o avanço das ligações adesivas entre outros aspetos [1].

As ligações adesivas apresentam diversas vantagens [7], que contribuíram para o avanço deste método de ligação:

- Distribuição mais uniforme das tensões Figura 3, ao longo da área colada, o que permite uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando assim uma redução de peso e menor custo. A Figura 1 apresenta uma comparação das distribuições de tensões teóricas numa junta adesiva, soldada e rebitada. A melhor distribuição uniforme é na junta adesiva, permitindo também uma melhor resistência à fadiga.

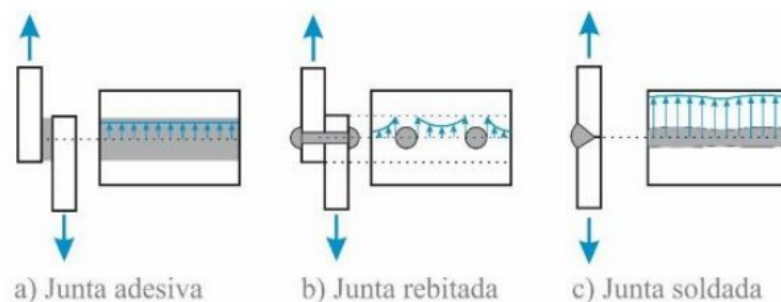


Figura 1 - Distribuição de tensões em juntas adesivas, rebitadas e soldadas [7].

- A natureza viscoelástica do adesivo promove o amortecimento de vibrações, o que permite que as tensões sejam parcialmente absorvidas, melhorando assim a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados;
- É considerado o método mais conveniente e efetivo de ligar dois materiais, uma vez que pode ser automatizado, o que permite aumentar as cadências

de produção e baixar os custos. A mistura e a aplicação do adesivo podem ser realizadas por um *robot*;

- Possibilita o uso de novos conceitos e materiais – torna o projeto mais flexível. Um exemplo são as estruturas *honeycomb*, Figura 2 onde o material do núcleo é colado a duas peles de metal ou compósito, resultando numa excelente rigidez específica;

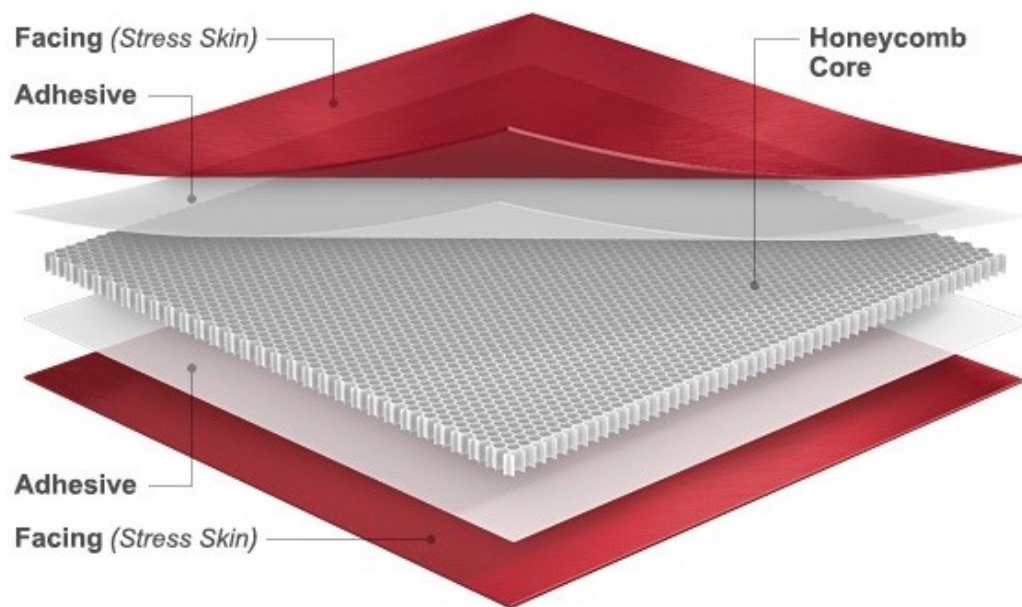


Figura 2 - Estrutura *Honeycomb* [8].

- Capacidade de vedação e de isolamento térmico e acústico;
- Permite a ligação de qualquer combinação de materiais (similares ou dissimilares);
- Prevenção da corrosão galvânica ao evitar o contacto entre metais diferentes;
- Maior facilidade de adaptação à junção de superfícies irregulares;
- Possibilidade de obtenção de contornos suaves, o que é particularmente importante em termos aerodinâmicos e no aspeto estético;
- Obtenção de estruturas com contornos regulares porque evita furos (rebites ou parafusos) e marcas devidas à soldadura;
- Capacidade de ligar substratos sensíveis ao choque;
- Redução do peso da estrutura;
- Maior tolerância a diferentes dilatações térmicas;
- Maior tolerância dimensional;
- Redução de custos, uma vez que projetos envolvendo ligações com adesivos tendem a ser mais económicos;
- As propriedades dos materiais geralmente não são afetadas. Não há distorção do substrato porque, ao contrário da soldadura, as peças não são aquecidas.

- Não há alterações estruturais e não danificam o substrato;

Na Tabela 1 é possível visualizar uma tabela resumo com algumas diferenças entre os vários métodos de ligação.

Tabela 1 - Diferenças entre os vários tipos de ligações (adaptado de [1, 9, 10]).

	Ligação adesiva	Soldadura	Fixações mecânicas
Permanência	Junta permanente	Junta permanente	Permite desmontagem
Distribuição de tensões	Boa distribuição de tensões pelas superfícies	Cria tensões internas na estrutura	Pontos de alta tensão nos locais de fixação
Aparência	Boa aparência, sem marcas na superfície	Aparência aceitável. Obtenção de superfícies lisas requer acabamento posterior	Descontinuidade da superfície
Materiais Ligados	Ideal para a maioria de pares de materiais diferentes	Limitado a grupos e pares de materiais similares	Aplicável a maioria de formas e combinações de materiais
Resistência Temperatura	Fraca resistência a altas temperaturas	Resiste a temperaturas muito elevadas	Resiste a temperaturas elevadas
Resistência Mecânica	Resiste à corrosão e à fadiga	Necessita de tratamentos para obter boa resistência mecânica	Pouco resistente à fadiga. Cuidado com o enfraquecimento da ligação
Preparação da junta	Limpeza da superfície	Preparação dos bordos para chapas espessas	Preparação de furos e roscas
Pós-processamento	Nem sempre necessário	Por vezes necessários tratamentos térmicos	Geralmente não é necessário
Equipamento	Apenas alguns adesivos são caros	Caro, por vezes volumoso e de grande consumo energético	Relativamente barato e portátil

	Ligação adesiva	Soldadura	Fixações mecânicas
Taxa de produção	Varia de segundos a horas, depende do tipo de adesivo	Pode ser rápido	A preparação da junta e aperto manual é lenta. Aperto automático é rápido
Garantia de qualidade	Aplicação de ensaios não destrutivos é limitada	Na maioria dos processos aplicável ensaios não destrutivos	Confiança razoável quando se controla o binário de aperto.

Desvantagens das ligações adesivas:

- **Desvantagens [7]:**
 - Necessidade de um tratamento das superfícies a ligar: as ligações adesivas baseiam-se no fenómeno da adesão para transferirem carga;
 - O processo de endurecimento pode ser bastante moroso;
 - Pode ser necessário temperatura e pressão;
 - Resistência e durabilidade fortemente dependentes das condições de processamento;
 - Durabilidade limitada em condições extremas de serviço (nomeadamente de temperatura);
 - Pode necessitar de ferramentas especiais para garantir o posicionamento e alinhamento dos substratos;
 - Podem ser mais caras do que as fixações mecânicas;
 - Desmontagem impossível ou difícil;
 - Fraca resistência à propagação de fissuras de alguns adesivos;
 - Fraca resistência aos esforços de arrancamento e de clivagem;
 - A fluência pode ser um problema, especialmente em situações de exposição contínua e prolongada a temperaturas elevadas;
 - Tempo de vida limitado de alguns adesivos;
 - Toxicidade e inflamabilidade de alguns adesivos (deve ser tomada alguma precaução para evitar efeitos nefastos provocados por solventes e outros químicos);
 - Existem muitos tipos de adesivos que exigem cuidado e conhecimento para a sua seleção;
 - Difícil inspeção para verificação da qualidade da ligação;

- Conhecimento: menor conhecimento e falta de experiência de utilização desta tecnologia relativamente às ligações mecânicas tradicionais;
- Geralmente é necessário um controle rigoroso do processo: necessidade de recorrer a pessoal especializado;
- Não existe um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura.

Na Tabela 2 é possível visualizar uma tabela síntese de algumas características importantes nas ligações adesivas.

Tabela 2 – Características das juntas adesivas (adaptado de [1]).

Principais características	Juntas adesivas
Tipo de ligação	Tipicamente permanentes
Distribuição de tensões	Uniforme
Aparência	Apenas visível no contorno da área ligada
Ligações de diferentes materiais	Boa ligação entre materiais diferentes, e com diferentes coeficientes de expansão térmica
Resistência à temperatura	Fraca resistência a temperaturas elevadas
Resistência mecânica	Boas propriedades de fadiga e de resistência à corrosão
Preparação	Preparação demorada das superfícies de adesão e com necessidade de cuidados especiais
Equipamento	Custo elevado
Automatização	Possível
Tempo de produção	Dependendo da necessidade de preparar as superfícies e/ou devido ao tempo de cura do adesivo pode demorar entre minutos a horas
Avaliação/inspeção	Métodos de controlo da qualidade e segurança da junta limitados

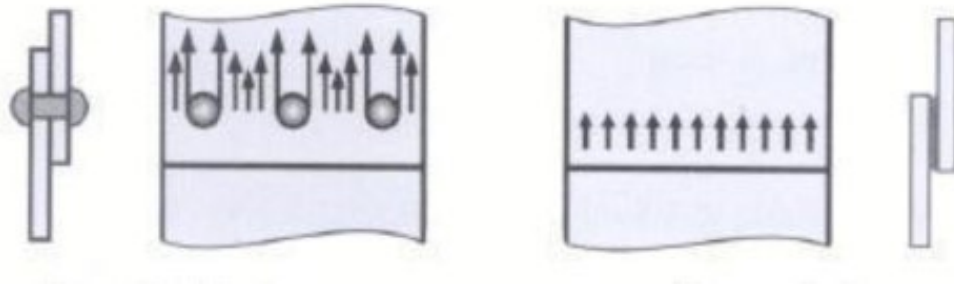


Figura 3 – Concentração de tensões em juntas rebitadas e adesivas [9].

2.1.3 Aplicações comuns das juntas adesivas

Atualmente com as novas tecnologias, conduzem a um avanço nas investigações na área das ligações adesivas, levando a que estas tenham revolucionado as indústrias. A principal área com que esta tecnologia se relaciona são as construções mecânicas. Foi possível concluir que esta tecnologia é economicamente viável a sua utilização quando comparada com os métodos típicos de ligação mecânica (rebitagem, soldadura ou aparafusamento) [7].

Existem diversas aplicações do método em análise. Contudo, a indústria aeronáutica foi uma das indústrias que deram um impulso para o avanço das ligações adesivas. A indústria aeronáutica apresenta necessidade de reduzir o peso dos aviões, e com esta solução é capaz de reduzir| eliminar a necessidade de parafusos ou rebites [1, 11].

A indústria automóvel e ferroviária também estão a utilizar as ligações adesivas, com o objetivo de reduzir o peso das estruturas que produzem [1]. Outras indústrias como a construção civil, eletrónica e de calçado também utilizam este método de ligação. Além destas áreas de aplicação, nas áreas da indústria biomédica está a ser desenvolvido processos baseados na adesão de células e adesão de proteínas em superfícies de forma a permitir a biocompatibilidade de materiais para próteses, órgãos e adesivos cirúrgicos [1].

2.1.3.1 Indústria aeronáutica

No capítulo anterior foi referido, que esta indústria foi a impulsionadora do desenvolvimento deste método. Contudo pretende-se referir que nesta indústria já se utilizava adesivos entre 1910 e 1920, com o objetivo de unir placas de madeira. Posteriormente, na segunda guerra mundial, foi utilizado para unir componentes de alumínio e compósito [4].

Anteriormente foi referido que a utilização deste método, tem como objetivo reduzir o peso da estrutura [1]. Contudo, para além desta vantagem apresentam-se muitas

outras, como a possibilidade de unir materiais de diferentes tipos. Os adesivos permitem unir materiais como vidro, metal, cerâmico, madeira e plástico, originando uma redução substancial da massa da estrutura, mantendo ou melhorando a sua resistência [12].

Na Figura 4 encontram-se exemplos de aplicações dos adesivos na indústria aeronáutica [13].

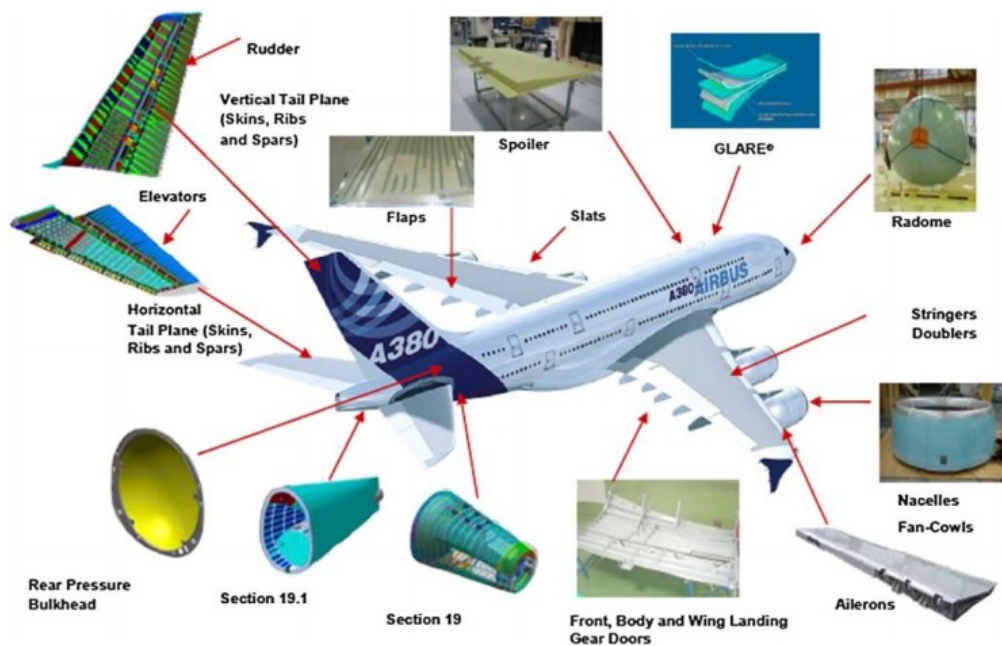


Figura 4 - Aplicação de ligações adesivas no Airbus A380 [14].

2.1.3.2 Indústria automóvel

No que diz respeito à indústria automóvel, os fabricantes pretendem construir veículos com um excelente rendimento energético. Assim, um dos principais fatores que influenciam diretamente esta preocupação é a massa do automóvel, pois quanto menor for, impõem que os consumos de combustível sejam menores, sendo que também serão menores as emissões para a atmosfera.

Ao encontro de outras indústrias, consegue-se visualizar um crescimento de utilização das ligações adesivas. As ligações adesivas revelam-se um ótimo método de ligação e fixação, permitindo reduzir peso da estrutura e mantendo a resistência.

Nos automóveis, a utilização de ligações adesivas iniciou-se há décadas, com a colagem do para-brisas e vidros traseiros. Mais tarde, começaram-se a utilizar adesivos para preencher vazios/lacunas e posteriormente a ser aplicados de forma a

melhorar a rigidez à torção da estrutura dos veículos. Observou-se que houve uma melhoria em relação à resistência à corrosão.

Mais tarde começaram-se a utilizar adesivos com grande capacidade de absorção de energia, ideais em caso de acidentes, levando a que os mesmos sejam utilizados como elementos estruturais da carroçaria. Os adesivos são indispensáveis nesta indústria devido à sua capacidade de ligar grandes variedades de materiais. Com este método, podem-se fixar diversos componentes, garantir a impermeabilização, amortecer vibrações, e com isto, melhorar a resistência à fadiga [15, 16].

Na Figura 5 é possível observar as diversas áreas de aplicação na construção de um automóvel.

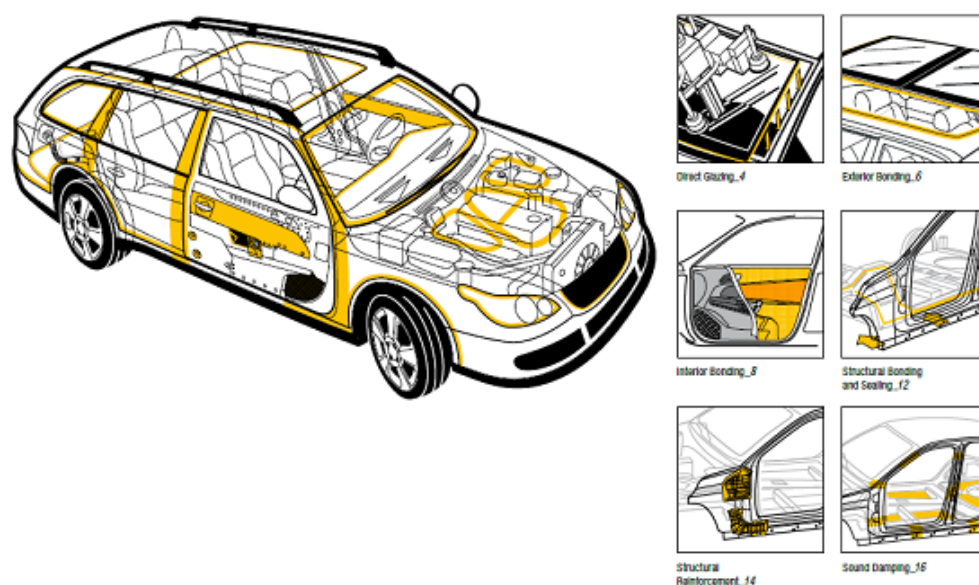


Figura 5 - Áreas de aplicação de ligações adesivas num automóvel [17].

2.1.3.3 Indústria da construção civil

Na construção de edifícios, o uso de ligações adesivas tornou-se um método muito utilizado, levando a um crescimento das ligações adesivas. Sendo que esta tecnologia apresenta uma evolução nesta indústria [18].

Na construção civil sempre se procedeu à colagem e vedação recorrendo a cimento, gesso ou adesivos naturais para utilização em ladrilhos e azulejos de cerâmica, construção de paredes e peças de decoração. Hoje, estes materiais evoluíram e originaram-se novas técnicas de pré-fabricação, proporcionando uma construção e montagem mais acelerada por meio de componentes pré-fabricados como painéis, coberturas e divisórias [19, 20].

Neste tipo de indústria, os adesivos têm uma grande utilização no interior de edifícios, sobretudo com propósitos decorativos tais como azulejos e mosaicos no chão e paredes, revestimentos flexíveis para portas e janelas, revestimento térmico, entre outros. Para aplicações exteriores, a utilização de adesivos estruturais é um pouco menor, contudo as exigências que os mesmos devem cumprir são superiores [13, 21].

Apresentam-se alguns exemplos destas aplicações:

- Painéis em *sandwich* estrutural e painéis de revestimento;
- Ligação de elementos de madeira;
- Silicones estruturais para colar vidro;
- Ligações aço/madeira em vigas;
- Ligações entre metais e plásticos;
- Reforço de estruturas de betão com placas de aço.

2.1.3.4 Indústria naval

Na indústria naval também são aplicadas ligações adesivas como nas outras indústrias. Contudo este método já é utilizado na construção de barcos de madeira. Após a apresentação das resinas de poliéster, foi construído um navio em fibra de vidro, com um reforço de resina de poliéster. Os fabricantes utilizaram as ligações adesivas, na produção de painéis em *sandwich* e na união de diversos componentes das embarcações [13]. Na Figura 6 é apresentada algumas áreas de aplicação de adesivo em navios.

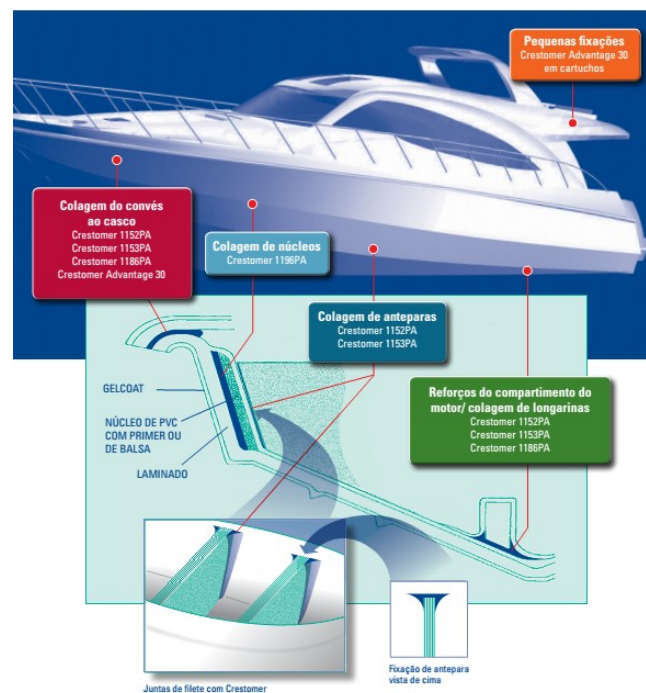


Figura 6 - Representação de algumas aplicações de adesivos num barco [22].

2.1.4 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

É importante que as ligações adesivas sejam produzidas de forma a que os esforços sejam dirigidos ao longo das direções onde o adesivo apresenta uma maior resistência [23]. No projeto de uma junta, tem-se como objetivo conhecer quais as tensões envolvidas na mesma e o modo como estas influenciam o seu comportamento [24].

Numa junta adesiva podem ser aplicadas forças que podem induzir grandes concentrações de tensões. Neste sentido é importante estudar as tensões aplicadas às juntas, de forma a proporcionar um aumento da resistência da junta, e de forma a alcançar um melhor aproveitamento desta técnica.

Existem situações em que é possível observar uma distribuição de tensões não uniforme, devido a certos pontos existentes na área de sobreposição, que produzem picos de tensões, sendo que estes valores poderão ultrapassar a tensão média de rotura da junta [25].

Em relação a este ponto, existem os seguintes esforços: tração, compressão, corte, arrancamento e clivagem. Os mesmos podem ser visualizados na Figura 7.

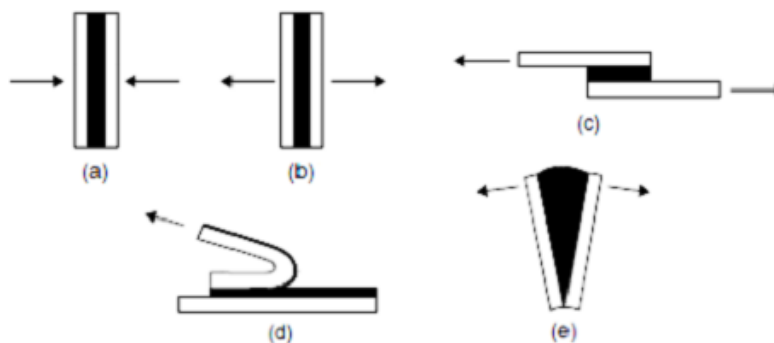


Figura 7 - Esforços em juntas adesivas: a) compressão; b) tração; c) corte; d) arrancamento; e) clivagem [25].

2.1.4.1 Esforços de tração

Os esforços de tração Figura 8, ocorrem quando é aplicada uma força, que irá dividir os dois substratos de forma perpendicular. Assim, aparecerão tensões normais distribuídas uniformemente ao longo da área de ligação. Neste esforço, o adesivo sofre picos de tensão nas extremidades, podendo causar o início do dano. A origem de uma pequena fenda prematura poderá causar uma propagação da mesma pela área de ligação, causando uma rotura na ligação adesiva.

Em termos do contexto prático, é impossível manter uma espessura constante do adesivo, de modo a que a distribuição de tensões seja uniforme, ou que possibilite a axialidade de cargas, originando esforços de clivagem ou arrancamento, que não são

favoráveis. É necessário que os substratos possuam uma rigidez tal que permita a distribuição dos esforços de forma equilibrada por toda a área de sobreposição [7, 24, 25].

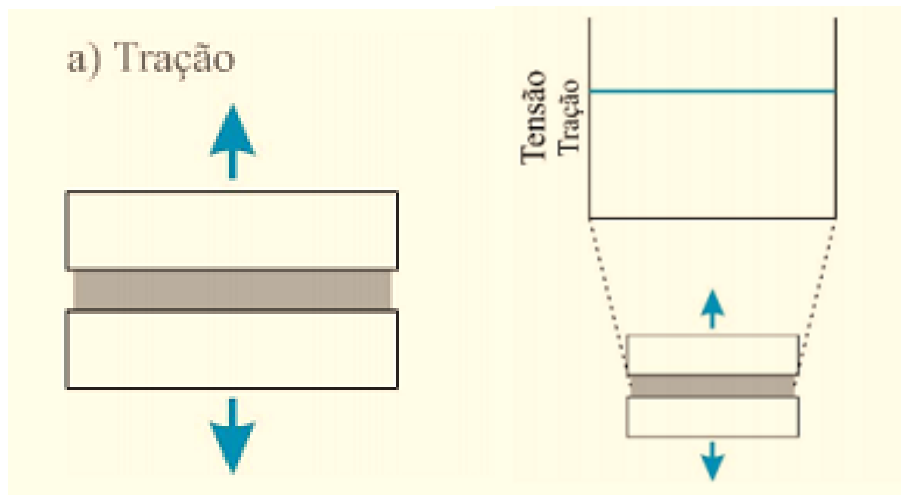


Figura 8 - Esforço de tração e respetiva distribuição de tensões [5].

2.1.4.2 Esforços de compressão

Nos esforços de compressão Figura 9, é importante manter as cargas nas extremidades alinhadas de forma perpendicular aos substratos, mas no sentido oposto ao efeito de tração. Quando a ligação adesiva está sujeita a cargas de compressão, é difícil que ocorra uma rutura da mesma. No entanto, o adesivo pode ceder devido aos picos de tensão gerados na área colada. Se uma junta estiver sujeita a compressão “pura”, a mesma não necessita de adesivo, pois pressupõem-se que a carga seja de valor elevado, não ocorrendo movimento relativo dos substratos [7, 25].

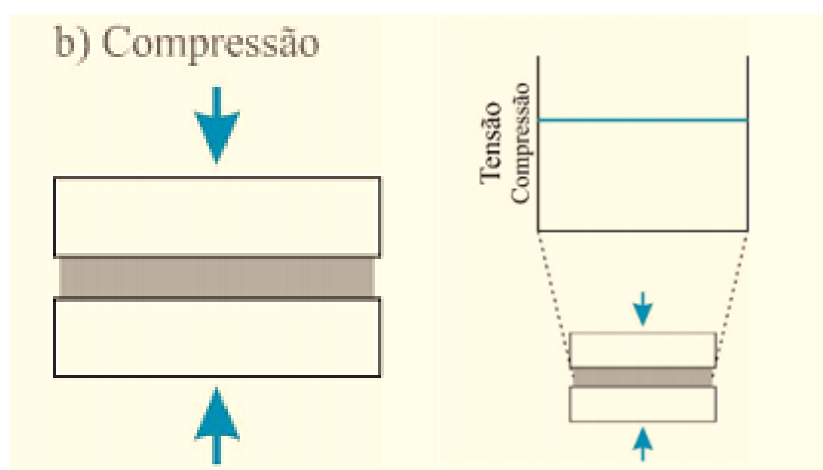


Figura 9 - Esforço de compressão e respetiva distribuição de tensões [5].

2.1.4.3 Esforços de corte

Os esforços de corte Figura 10, ocorrem quando existe um carregamento que irá provocar um escorregamento dos aderentes. Deste modo, toda a área de sobreposição está a contribuir para a distribuição de tensões e os substratos mantêm-se alinhados. Assim, os adesivos funcionam melhor quando estão sob o esforço de corte [7].

Em termos da distribuição das tensões de corte numa junta de sobreposição simples, consegue-se observar uma maior concentração de tensões nas extremidades da junta do que no centro da junta. Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente desde uma extremidade até ao lado oposto [26]. Com o aumento do comprimento de sobreposição o efeito fica cada vez mais marcante [27]. Desta forma conclui-se que a largura de sobreposição é mais importante que o seu comprimento. A Figura 11 mostra que o aumento da largura de ligação torna a junta mais resistente, porque aumenta a área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que representam os locais onde os níveis de tensão são mais elevados. No entanto, o aumento do comprimento de sobreposição provoca um aumento da resistência da junta, mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes.

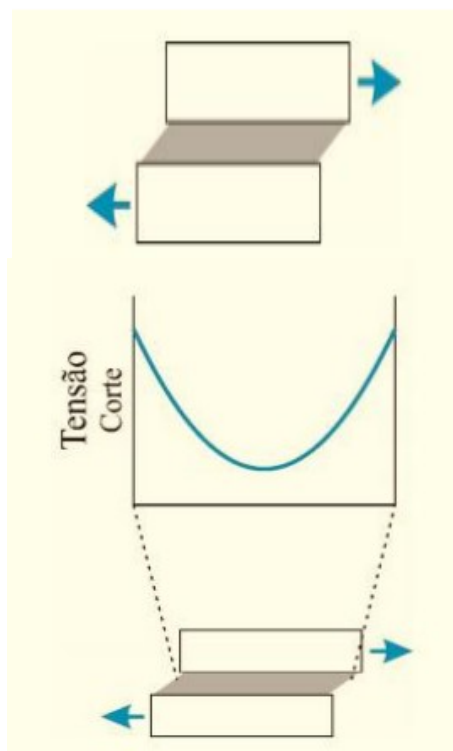


Figura 10 - Esforço de corte e respetiva distribuição de tensões [5].

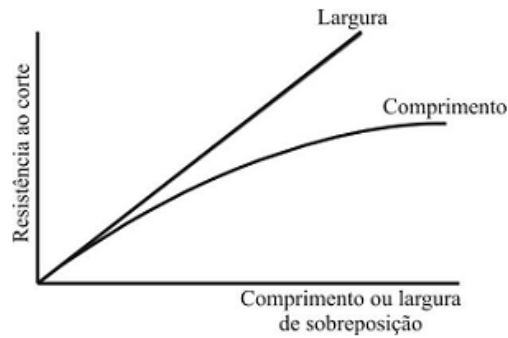


Figura 11- Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte [5].

2.1.4.4 Esforços de clivagem e arrancamento

Tanto as tensões de clivagem como as de arrancamento aparecem como as mais severas nas juntas coladas. Quando as forças na extremidade de uma junta rígida tendem a separar os substratos geram-se tensões de clivagem no adesivo. As tensões de arrancamento, representadas na Figura 12, são idênticas às de clivagem, com a diferença de que um ou ambos os substratos são flexíveis, podendo assim deixar-se deformar plasticamente e levar à concentração das forças trativas numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação [5, 25].

Na Figura 12 é possível ver a distribuição típica das tensões para esforços de clivagem e arrancamento.

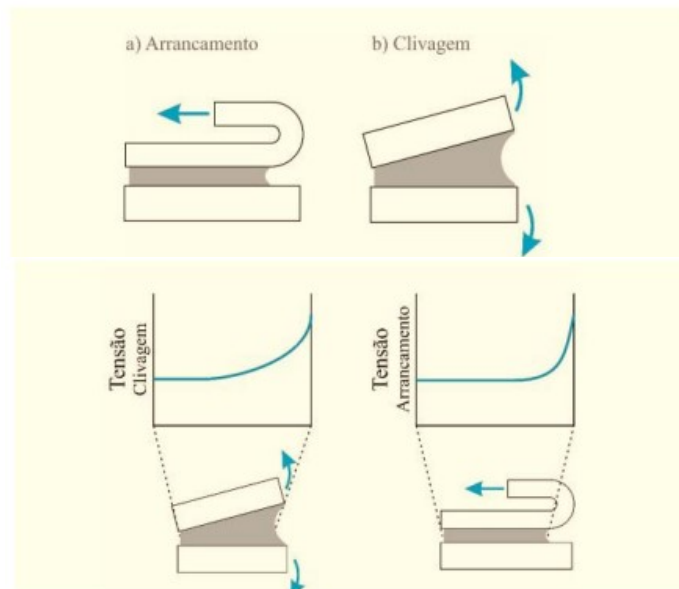


Figura 12 - Esforços de arrancamento e clivagem, e respetivas distribuições de tensões [5].

As juntas sob este tipo de esforços possuem menos resistência do que as sujeitas a corte porque a tensão está localizada na extremidade da junta e está concentrada

numa área muito menor. Os adesivos frágeis e rígidos são sensíveis às forças de arrancamento. Noutra perspetiva os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e também uma maior resistência da junta [28].

2.1.5 Modos de rotura em juntas adesivas

Numa junta adesiva a mesma está sujeita a determinados esforços. Deste modo, é recomendado que a mesma transmita os esforços entre os dois substratos ligados, de forma a manter a integridade da estrutura. De tal forma deve ser assegurado que o adesivo não é o elemento mais fraco da ligação.

De forma a garantir a integridade da estrutura e o seu correto funcionamento, deverão ser efetuados estudos nos modos de falha, com o objetivo de melhorar as propriedades e assegurar que os objetivos são cumpridos. Normalmente são efetuados ensaios destrutivos, para efetuar estas análises [13, 28].

De seguida são abordados os principais tipos de rotura Figura 13.

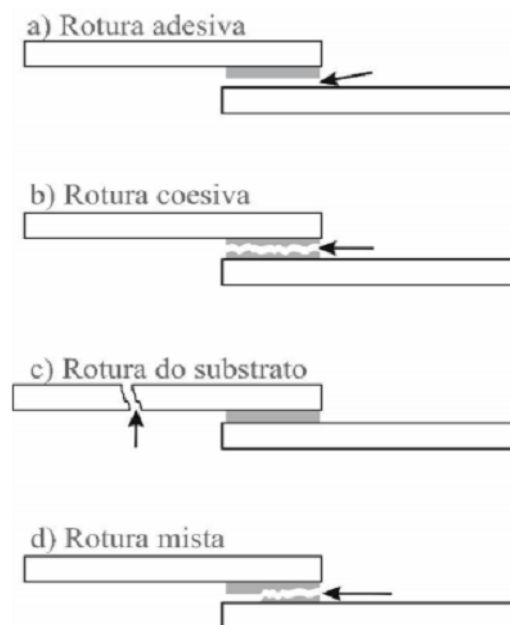


Figura 13 - Modos de rotura em juntas adesivas [28].

Rotura Coesiva

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, levando a que neste caso ambas as superfícies do substrato estejam cobertas por uma película de adesivo [13, 28].

Rotura adesiva

No caso da rotura adesiva, ocorre uma falha na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Depois da rotura verifica-se que uma das superfícies do substrato não apresenta qualquer resíduo de adesivo. Este tipo de rotura pode aparecer devido á má preparação das superfícies ou então devido à incompatibilidade entre o material dos substratos e do adesivo.

Isto resulta muitas vezes de uma má preparação/limpeza das superfícies dos substratos. Contudo, alguns trabalhos feitos mais recentemente [29-32] mostram que existem variações de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo e que os valores máximos ocorrem junto da interface.

A junta tem de ser devidamente preparada e projetada de modo a que não ocorra este tipo de rotura [5, 28].

Rotura mista

Este tipo de rutura consiste numa combinação de uma rutura adesiva com a coesiva. Esta situação ocorre principalmente devido à limpeza ineficiente de uma região da superfície do substrato, ou por um defeito existente no próprio adesivo, como por exemplo impurezas [13].

Rotura pelo substrato

A rotura pelo substrato ocorre quando a resistência interna do aderente é inferior à do adesivo, tanto no interior como na interface.

2.1.6 Configurações possíveis de junta

O desempenho de um adesivo numa junta colada depende da configuração e do modo de carregamento. As juntas que originam distribuições de tensões mais uniformes são na maior parte dos casos mais resistentes e duráveis do que aqueles que produzem concentrações de tensões. Deste modo, as juntas são mais eficazes quando submetidas a esforços maioritariamente de corte e de compressão, do que a esforços de arrancamento e clivagem [7, 33].

Uma junta ideal é aquela em que o adesivo deve de ser solicitado numa direção segundo a qual a junta irá resistir mais. No seu processo de produção, deve ter-se em consideração que a sua configuração transmita esforços segundo uma direção que lhe seja mais favorável. Existem vários tipos de juntas adesivas, contudo em alguns casos as geometrias podem ser difíceis de fabricar, ou de elevado custo. Na Figura 14 estão os diversos tipos de juntas representadas, embora as mais utilizadas são as seguintes:

- a) Juntas de sobreposição simples (JSS);
- b) Juntas de sobreposição dupla (JSD);

- c) Juntas com chanfro (*scarf Joint*);
 d) Juntas em degraus.

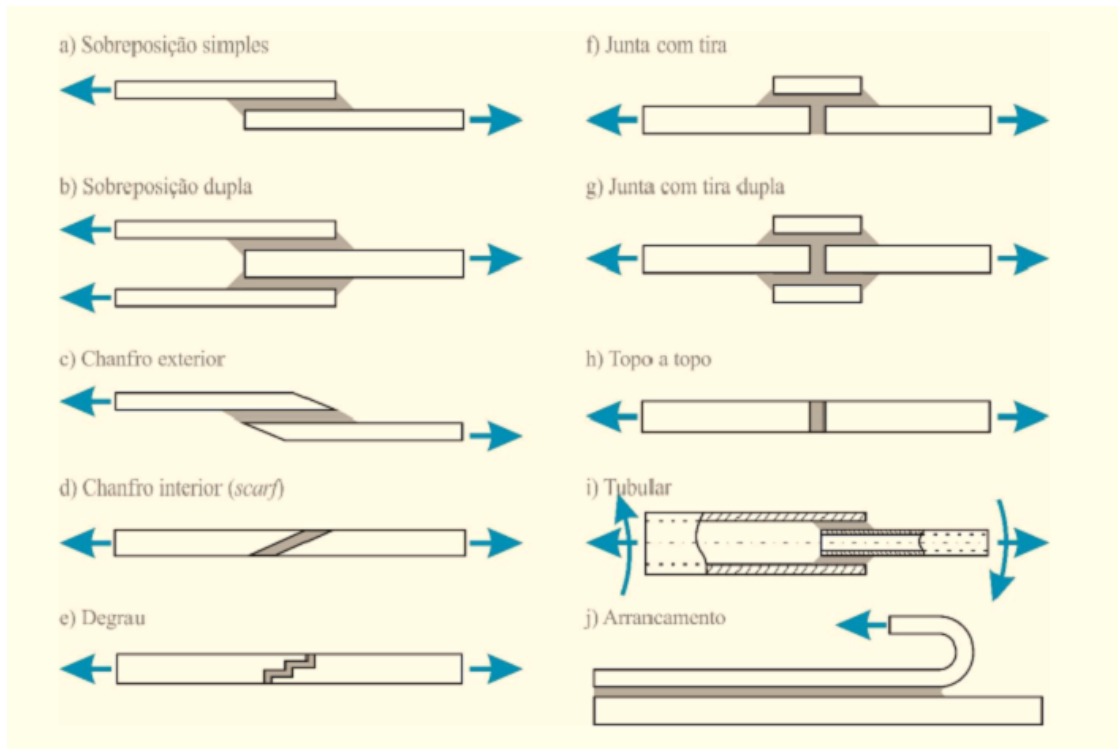


Figura 14 - Tipos de juntas adesivas usadas em engenharia [5, 28].

2.1.6.1 Juntas de sobreposição

Estas juntas são as mais utilizadas, pois são fáceis de produzir, aplicáveis em situações em que os aderentes são finos e a junta está sujeita a esforços de corte [3]. Contudo, uma vez que os aderentes não se encontram no mesmo plano, é gerado um momento fletor que irá criar esforços de clivagem/arrancamento Figura 15, que comprometem o funcionamento da ligação adesiva.

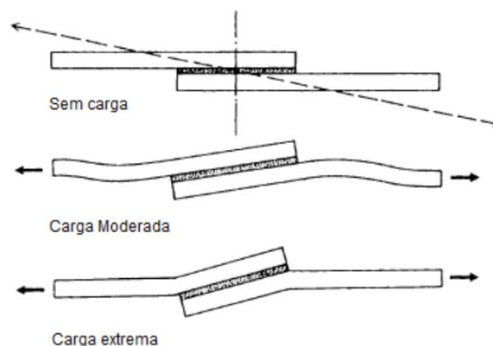


Figura 15 - Modo como uma JSS sobre esforços de flexão devido ao desalinhamento da força de corte em relação à carga aplicada [7].

Com a evolução das ligações adesivas, foram surgindo algumas modificações neste tipo de juntas, originando diferentes configurações que permitem [7]:

- Redimensionar a junta de forma a alinhar a força aplicada relativamente aos aderentes;
- Alterar os aderentes para outros mais rígidos de forma a que não se deformem tanto devido à excentricidade da carga;
- Tornar as extremidades da área de adesivo mais flexíveis;

Na Figura 16 encontram-se ilustradas as várias configurações que uma junta de sobreposição pode apresentar. As juntas com ressalto (d, e, e f) permitem um alinhamento do esforço de corte, diminuindo ou eliminando a geração de momento fletor. O ressalto pode ser feito a partir da dobra da chapa. As tiras usadas em (e e f), têm como objetivo aumentar a área de adesivo, aumentando a resistência da junta [7, 25].

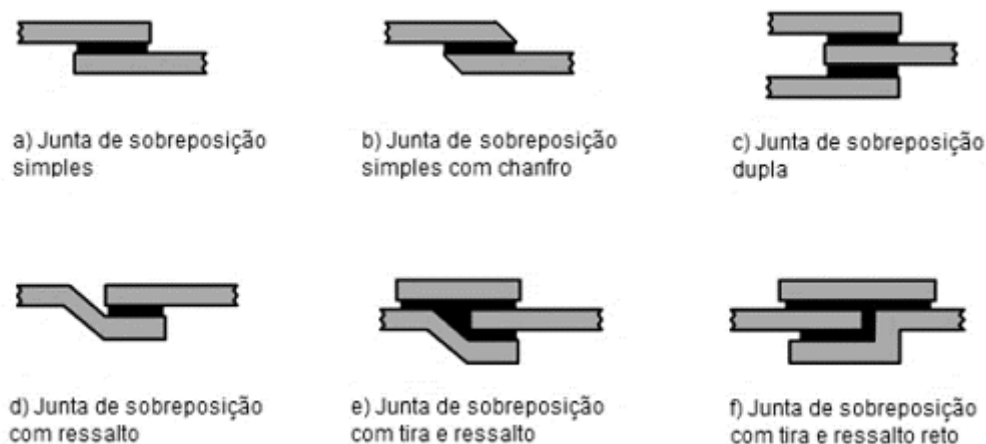


Figura 16 - Configurações possíveis de juntas de sobreposição [25].

A junta de sobreposição dupla (c) apresenta um bom equilíbrio estrutural. A junta de sobreposição com chanfro (b) também apresenta melhor comportamento que a típica junta de sobreposição simples, uma vez que a criação do chanfro permite uma melhor distribuição das tensões, reduzindo os esforços de clivagem/arrancamento [7, 25].

2.1.6.2 Juntas com tira

As juntas com tira são normalmente utilizadas de forma a manter a carga de trabalho orientada, quando a espessura dos aderentes é demasiado elevada. As diversas configurações deste tipo de juntas estão apresentadas na Figura 17. Este tipo de junta apresenta-se sensível aos esforços de flexão, sofrendo clivagem com uma maior facilidade, tal como acontece na junta de sobreposição simples e nas juntas de topo a topo.

Como alternativa, pode-se aplicar uma junta de tira dupla, que permite diminuir o efeito de flexão. De forma a alcançar uma maior resistência aos esforços de flexão introduzidos na junta, as juntas mais eficientes são as de tira dupla com duplo rebaixo, ou a junta de tira dupla com chanfro. Estas juntas requerem processos de maquinagem com os seus respetivos custos associados [7, 25].

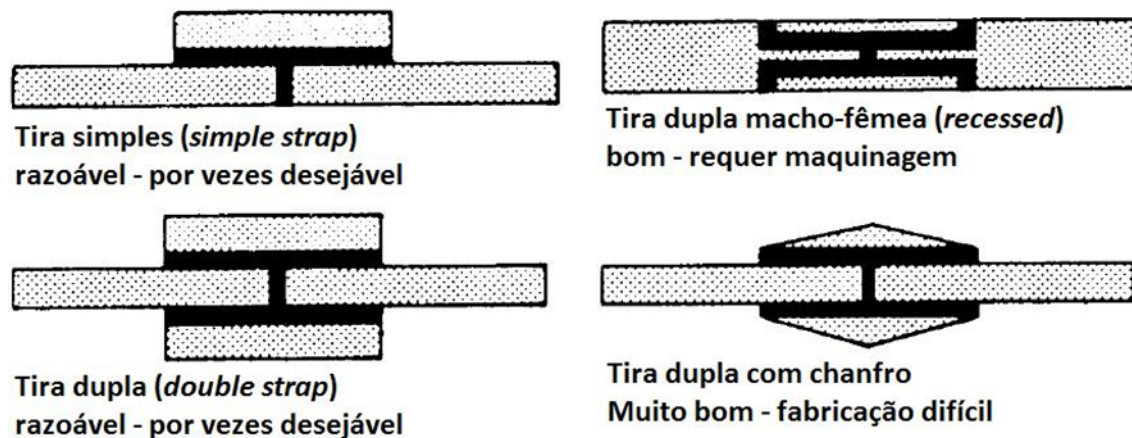


Figura 17 - Configurações possíveis de juntas com tira [1].

2.1.6.3 Juntas topo a topo

As juntas topo a topo são de fabrico relativamente simples. Contudo, são sensíveis a esforços de flexão, uma vez que os carregamentos expõem os adesivos a esforços de clivagem. De modo a minimizar este efeito, este tipo de juntas apresenta várias configurações, que permitem a diminuição da suscetibilidade aos esforços de clivagem devido à aplicação de um carregamento lateral, são sugestões para quando existe impossibilidade de conceber juntas de sobreposição simples devido à elevada espessura dos aderentes [7, 25].

A Figura 18 apresenta as diversas configurações das juntas de topo a topo. As juntas b) e c) permitem um melhor alinhamento de forças relativamente à junta a), uma vez que o chanfro apresentado atua de forma a evitar o desalinhamento de forças no eixo da ligação adesiva. As juntas “macho-fêmea”, d) e e), permitem um centramento dos substratos, para além de permitirem aplicar uma maior quantidade de adesivo na ligação que, por sua vez, aumenta a área adesiva, contribuindo para uma maior resistência da junta [7, 25].

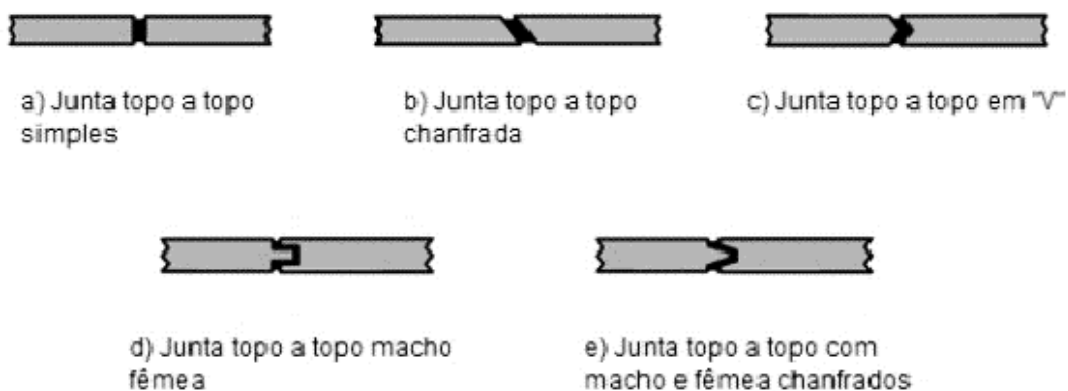


Figura 18 - Configurações possíveis de juntas topo a topo [7].

2.1.6.4 Juntas de canto e T

As juntas em T caracterizam-se pela orientação perpendicular dos substratos, embora também seja possível que o ângulo entre os dois aderentes seja diferente de 90° . O intuito principal das propostas efetuadas é a diminuição das forças de arrancamento e a maximização de solicitações de corte no adesivo [5, 7]. As juntas de canto são bastante semelhantes às juntas em T, e devem ser projetadas de modo a diminuir o arrancamento no adesivo. A Figura 19 apresenta exemplos de juntas de canto e em T [34].

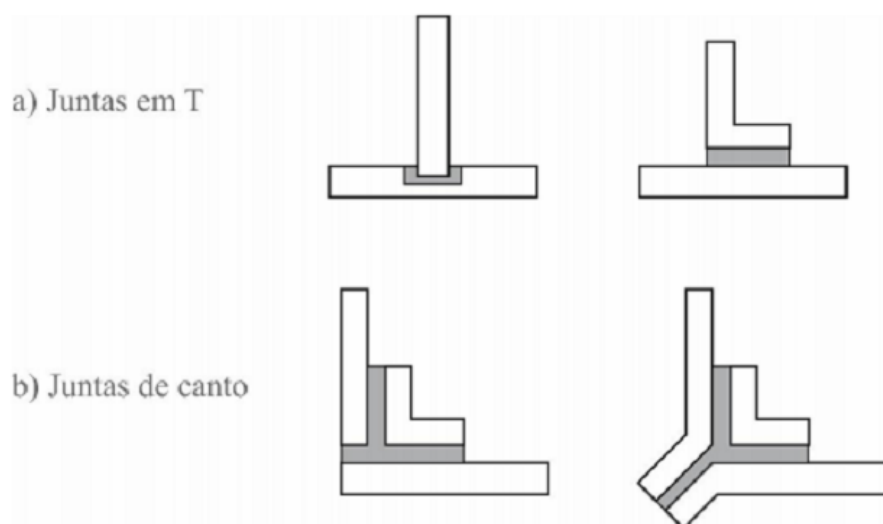


Figura 19 - Alguns exemplos de juntas em T e de canto [34].

2.1.6.5 Juntas tubulares

Para fazer a ligação de varões ou tubos este tipo de juntas é o mais usual. As ligações adesivas tubulares são mais vantajosas em relação às ligações topo a topo em

consequência da sua elevada resistência a esforços de flexão. Para além disso, também geram uma maior área de sobreposição [7]. Na Figura 20 é apresentada algumas configurações das juntas tubulares.

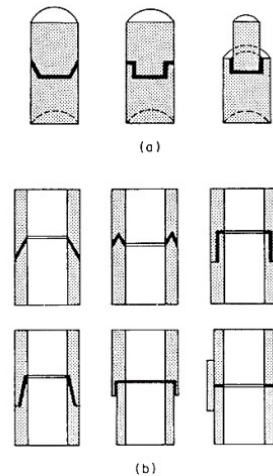


Figura 20 - Configurações possíveis para juntas tubulares: a) Ligações em varões; b) Ligações em tubos [7].

O tipo de forças impostas neste tipo de ligação pode ser de torção ou axial. No caso de ser de torção, apenas se dá o efeito de deformação diferencial tal como acontece nas juntas de sobreposição simples ao corte. Se for axial, dá-se uma maior concentração de tensões nas extremidades da área de sobreposição, tal como acontece nas juntas de sobreposição simples. Com vista a diminuir a concentração de tensões quando se dá a existência de esforços axiais, podem-se fazer chanfros nos tubos. Na Figura 21 é possível visualizar juntas tubulares com e sem chanfro. Esta modificação permite criar uma maior área de ligação e, devido a isso, consegue-se uma maior uniformidade na distribuição de tensões, para além de aumentar a probabilidade da ligação adesiva sofrer clivagem [1].

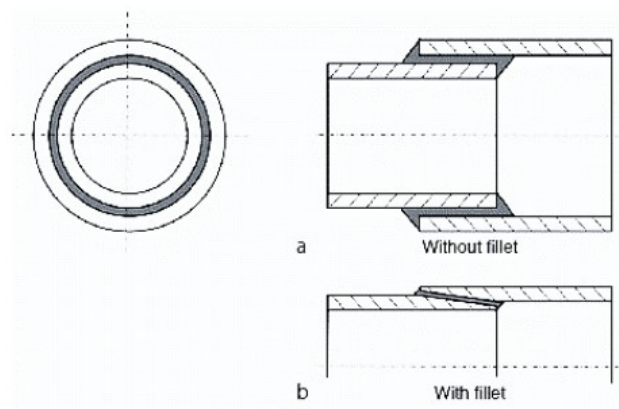


Figura 21 - Junta tubular com as extremidades dos substratos: a) Sem a presença de chanfro nos tubos; b) Com a presença de chanfros nos tubos [1].

A alteração geométrica é uma boa solução para aumentar o desempenho da junta. No entanto, existem desvantagens existentes neste processo. Recorrendo a processos de maquinagem, o fabrico da junta torna-se mais caro. Este tipo de juntas dificulta a inspeção do interior das ligações. Por outro lado, uma vez que este tipo de ligação é interior, o processo de colocação do adesivo torna-se mais complicado. Muitas vezes é necessário gerar orifícios para libertar o ar que fica retido, com o propósito de facilitar o preenchimento da cavidade da junta pelo adesivo. Na Figura 22 é possível ver exemplos de juntas com o orifício.

É conveniente usar espaçadores, para garantir uma espessura de adesivo mais uniforme em torno da área de colagem. No final da montagem da junta deve-se efetuar a rotação entre os substratos cilíndricos de modo a espalhar o adesivo e uniformizá-lo na junta [25].

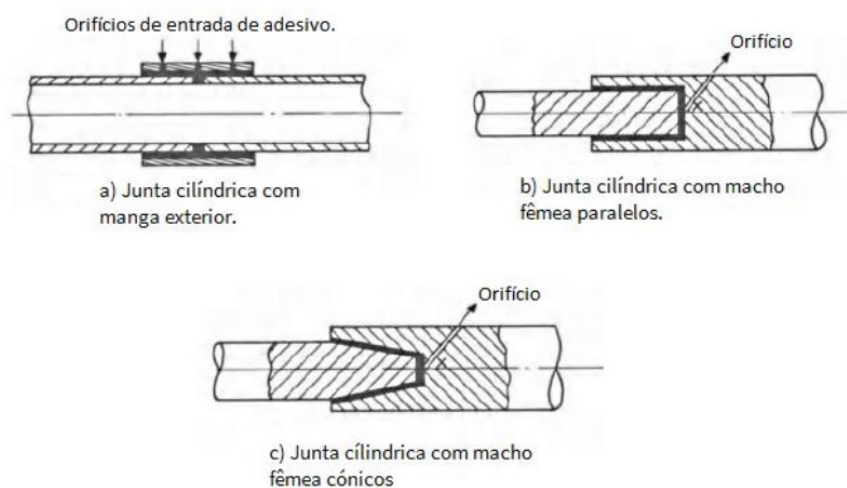


Figura 22 - Juntas tubulares com a existência de orifícios para permitir a libertação do ar [25].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

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

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [35], que parte do princípio que os

materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [36] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [37], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [38]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

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

2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [35], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [39] usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e

deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [40]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [37], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [9]. 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.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [42]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [43] e por Rice [44] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [45, 46], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [47] e Dugdale [48], 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 [49].

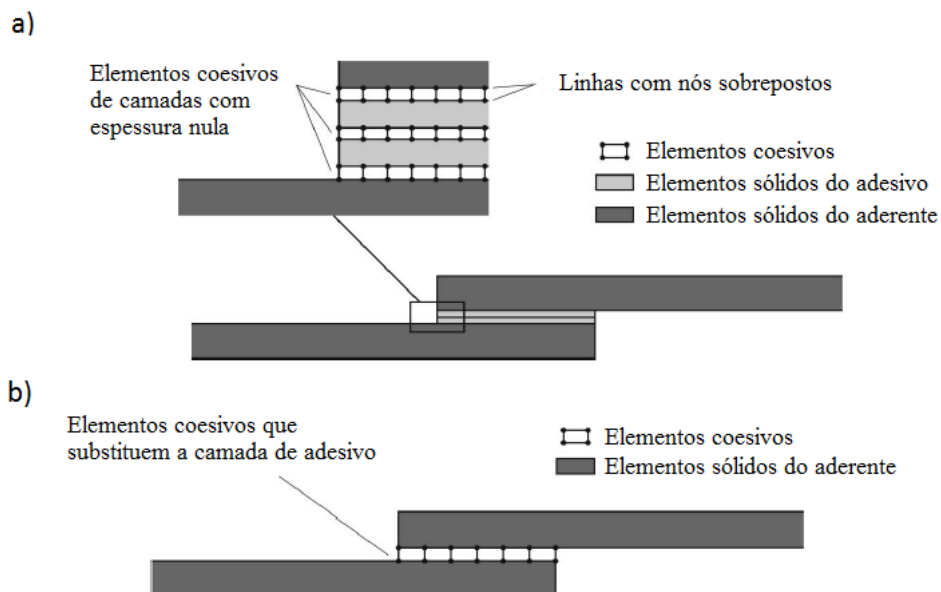


Figura 23 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) [50].

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [51]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma

descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 23), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [52], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [53].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenômenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [54]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [55].

2.2.3.1 Tipo de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [56], triangular [57], exponencial [58], polinomial [59] e trapezoidal [53]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [60].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [61]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [62] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto.

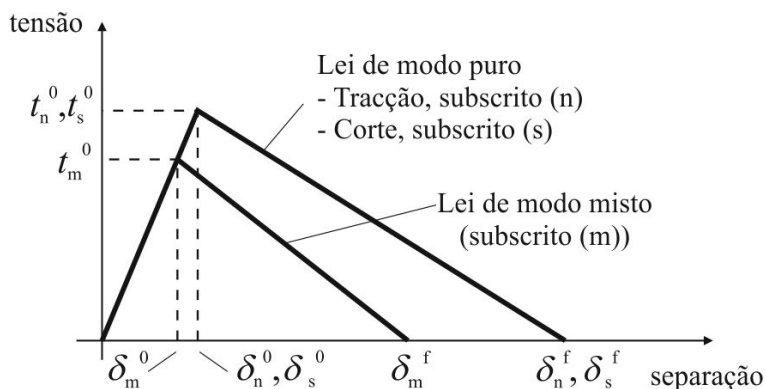


Figura 24 - Modelo coesivo triangular [62, 63].

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [64].

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I/31 e modo II [65].

2.2.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [66]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [67], alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados [53, 68].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto este método é particularmente crítico devidos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e a ligação adesiva [69]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as

fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [70]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [71]. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [69], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- J [72]. Rice [44] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do método de integral- J , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [73]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [65]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [74], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 25. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de forma a evitar deformação

plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (1) em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e s_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

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

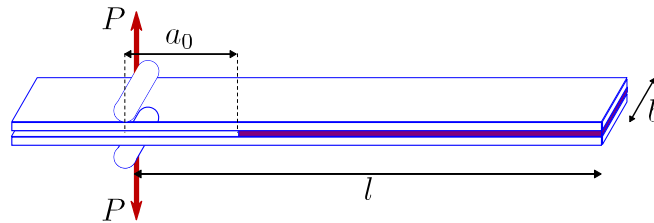


Figura 25 - Geometria do provete DCB [75].

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 26). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2L$) [76]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{Ic} por esta medição [77].

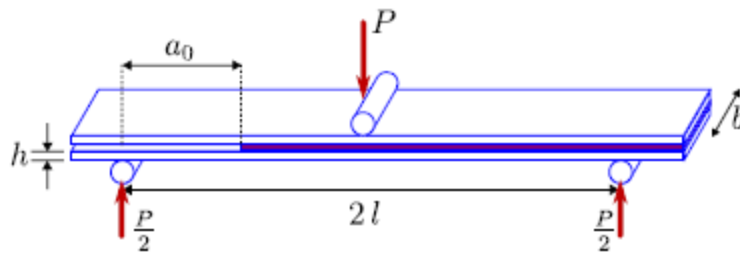


Figura 26 - Geometria do provete ENF [75].

2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [78] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou

de Khoramishad et al. [79] 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 [49].

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 gênero específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [80]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas ou do número de ciclos para análises de fadiga [81, 82]. 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 trajetórias pré-definidas [83].

Hua et al. [84] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [85] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de *Poisson* (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.2.5 Método de elementos finitos estendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte

correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [86]. Belytschko e Black [87], 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 da extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [88]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [89].

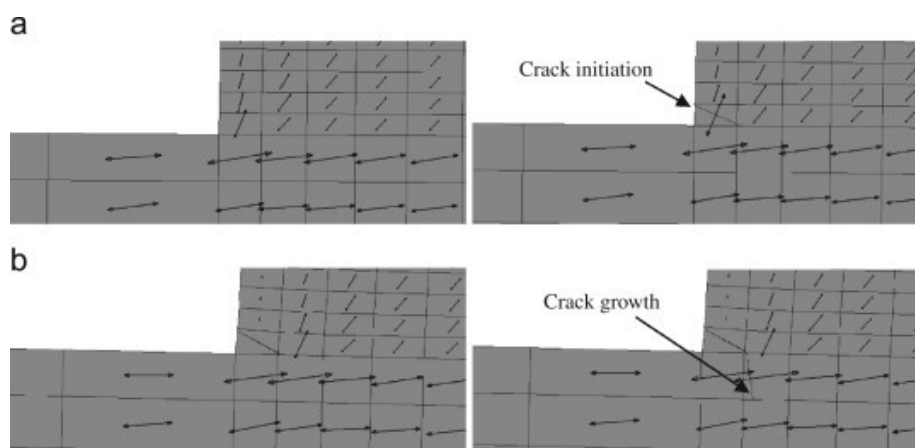


Figura 27 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento do dano do aderente de alumínio (b) [90].

Campilho et al. [90] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 27). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto

na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

2.3 Juntas adesivas tubulares

As ligações adesivas são um método muito aplicado na indústria nos dias de hoje, sendo que apresentam uma aplicação extensa nas juntas tubulares. Esta solução tem sido aplicada por apresentar um elevado rácio resistência/peso, e por propriedades que tornam estas juntas muito resistentes à corrosão. Como as ligações adesivas apresentam um bom comportamento em juntas tubulares, estão a ser efetuados estudos de forma a expandir a sua utilização [91].

Com o passar do tempo, vários autores efetuaram estudos experimentais e antilíticos em relação às juntas tubulares, sujeitas a diversos esforços. Adams e Peppiatt [92] foram os pioneiros nestes estudos, levando ao estudo em juntas elásticas isotrópicas sujeitas a cargas axiais e torsionais. Para isto foi utilizado o método de elementos finitos, com elementos axissimétricos. Para além destes autores, muitos outros têm explorado as juntas adesivas tubulares [91].

As juntas adesivas tubulares, Figura 28, apresentam um peso mais reduzido, quando comparado com os métodos tradicionais, possibilitando a união de materiais dissimilares, não alterando as propriedades dos materiais a unir, apresentam elevada capacidade de carga e boa distribuição de tensões [2].

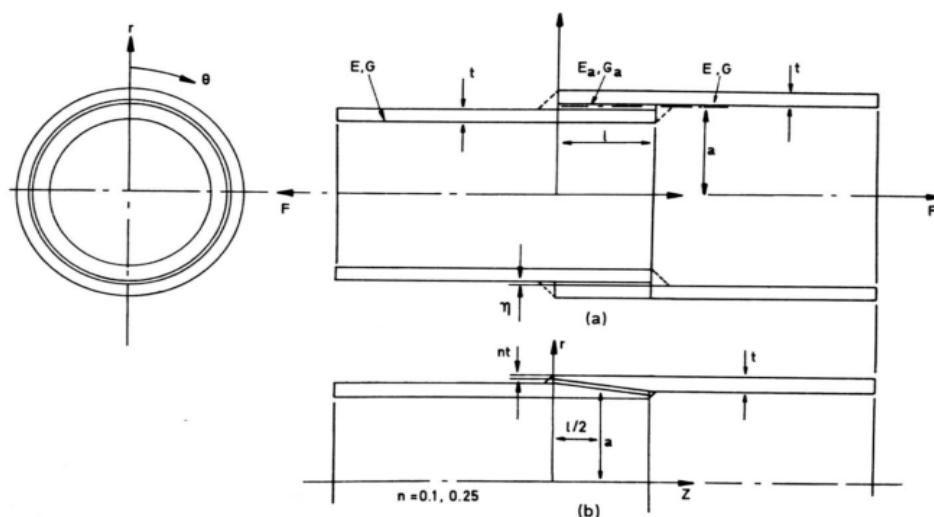


Figura 28 - Junta tubular e junta tubular com chanfro [93].

2.3.1 Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração

Labbé e Drouet [94] fizeram um estudo que consistiu na melhoria de juntas adesivas tubulares expostas a cargas axiais. Com isto, visualizou-se a influência que os parâmetros geométricos têm na distribuição de tensões na junta. Tendo em consideração que a carga axial e a geometria tubular não são simétricas, estes representaram com este trabalho, a junta tubular a partir de um modelo 2D. Esta geometria é definida pelos parâmetros geométricos apresentados na figura seguinte.

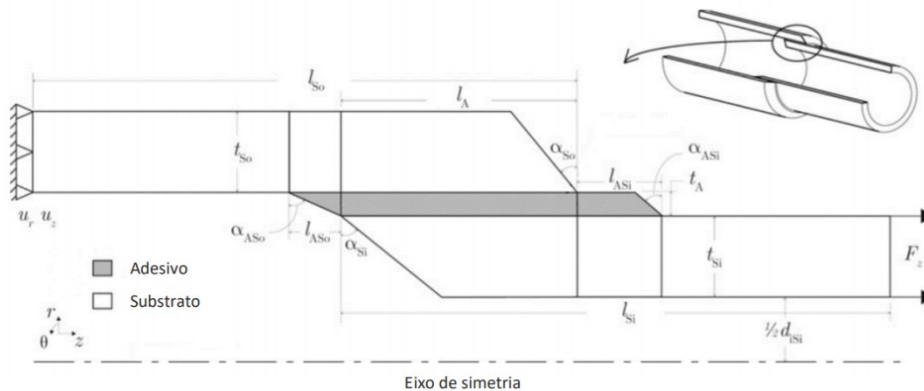


Figura 29 - Modelo axissimétricos 2D, representando parâmetros geométricos, carga e condições fronteira [94].

O artigo apresentado mostra como a tensão axial é afetada pela variação dos diversos parâmetros geométricos. Impondo uma carga de 1 N, os resultados do estudo paramétrico realizado demonstraram que quanto maior a espessura do substrato t_{si} e t_{so} , maior será a tensão normal nas extremidades. A tensão normal é menos sensível à espessura do adesivo na zona central da área de sobreposição do que nas suas extremidades. O ângulo dos chanfros na extremidade dos substratos, α_{si} e α_{so} , sendo superiores a 45° , produzem um aumento de tensões normais na camada de adesivo na extremidade do tubo interior, contudo a distribuição das mesmas permanece igual ao longo da película de adesivo. No entanto, a influência é baixa quando comparada à de outros parâmetros geométricos, tal como a espessura dos substratos.

Quanto maior é o chanfro, l_{Asi} e l_{Aso} , maior é a concentração de tensões. A magnitude das tensões normais também diminui quando o diâmetro do substrato interior aumenta. Em suma, verificou-se que todos os parâmetros geométricos têm uma influência significativa a nível de tensões exceto o ângulo dos substratos na extremidade dos mesmos [2].

Numa pesquisa realizada por Das e Pradhan [95], comparou-se uma análise baseada em modelos de elementos finitos de uma junta tubular de plástico reforçado com fibra de vidro, com dados de outros autores. Foi considerada uma análise tridimensional da

junta tubular em questão, mostrando a importância que existe em não negligenciar os efeitos tridimensionais da junta. O esforço de corte ($\tau_{\theta r}$) é extremamente sensível a efeitos tridimensionais quando comparado a outros planos de tensão (τ_{zr} , σ_r). Desta forma, a análise 3D serviu para calcular as tensões fora do plano de tensões (σ_r , τ_{zr} , $\tau_{\theta r}$). Na Figura 30 é possível ver um exemplo de uma malha de EF de uma junta adesiva tubular.

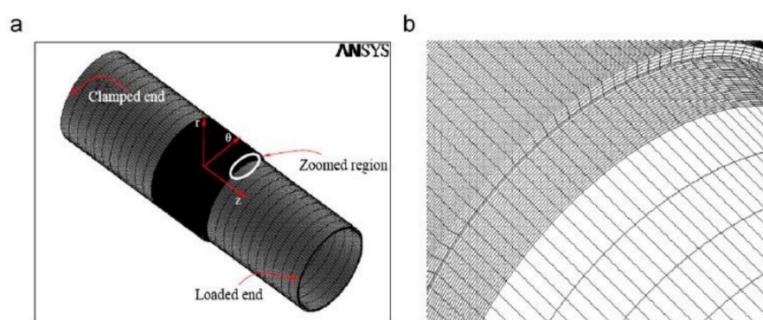


Figura 30 - Malha de elementos finitos da junta adesiva tubular: a) modelo completo; b) zona aproximada da região de sobreposição [95].

Através destas análises, Das e Pradhan [96] obtiveram as seguintes conclusões:

- As extremidades livres da sobreposição do adesivo-aderente ilustram a existência de um estado de tensão tridimensional quando comparadas com as regiões interiores, podendo ser o resultado da presença de descontinuidades geométricas, da não homogeneidade do material ao longo da espessura da junta ou devido à diferença de rigidez entre os aderentes e o adesivo;
- A magnitude das tensões de arrancamento é superior em relação à das tensões de corte nas superfícies críticas na região de sobreposição, o que influencia a rotura induzida por tensões fora de plano;
- A rotura do adesivo inicia-se na extremidade da interface aderente-adesivo;
- O dano propaga-se sobretudo no modo de corte dentro do plano. As contribuições dos modos de abertura e de corte fora de plano são insignificantes;
- Camadas de fibra orientadas angularmente são mais sensíveis ao crescimento do dano quando sujeitas ao modo de abertura. Por esta razão devem ser evitadas em juntas adesivas tubulares;
- Camadas de fibra de vidro orientadas a 0° e $30^\circ/60^\circ$ são mais suscetíveis a sofrer rutura a partir de tensões de corte quando sujeitas ao modo de corte, devendo por isso ser evitadas em juntas adesivas tubulares;

- Camadas de fibras orientadas a 90° têm melhor resistência tanto no modo de abertura como no de corte e, por isso, são as mais indicadas a ser usadas em juntas adesivas tubulares;
- O aumento do grau de anisotropia do aderente reduz a tendência da propagação do dano.

Noutro estudo realizado por Qiu et al. [97], foi desenvolvida uma formulação teórica de forma a gerar a capacidade de carga axial em juntas constituídas por tubos de aço ligados por uma manga de compósito, Figura 31, validada posteriormente por resultados experimentais que cobrem várias secções geométricas e comprimentos de sobreposição.

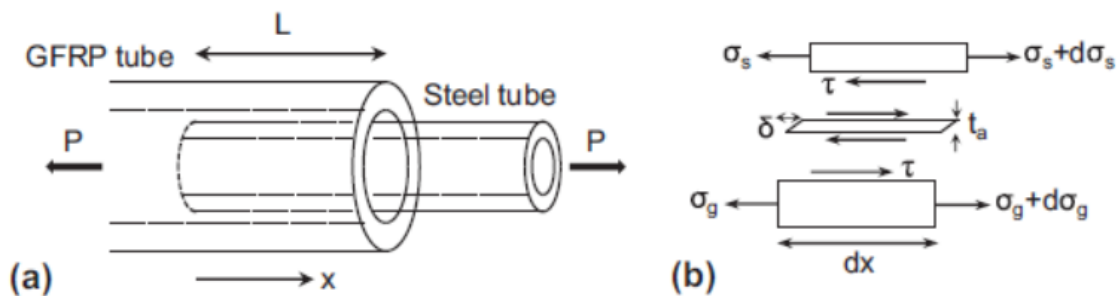


Figura 31 - Junta tubular com uma manga sob tensão axial: a) geometria global; b) típico elemento diferencial [97].

Além disso, foi conduzida uma análise tridimensional em elementos finitos de forma a estimar a capacidade da junta em questão e descrever a distribuição das tensões de corte geradas na camada adesiva, desta forma averiguando a fiabilidade dos resultados teóricos. Posto isto, obtiveram-se as seguintes conclusões:

- A formulação teórica desenvolvida, baseada em aderentes com um comportamento linear elástico, demonstra uma boa previsão da capacidade da junta ao arrancamento para os provetes com diferentes secções transversais e comprimentos de sobreposição;
- A modelação em elementos finitos produziu uma resistência mecânica ligeiramente inferior à modelação teórica, o que pode ser explicado através da ilustração mais conservativa da área de colagem utilizada na modelação e a consideração da não-linearidade do material do aderente. A modelação mostrou uma representação precisa do modo de arrancamento quando comparada ao estudo experimental;
- O comprimento efetivo da junta foi o parâmetro que contribuiu mais para o aumento da resistência da mesma. Este comprimento efetivo pode ser obtido através da formulação teórica validada pelos resultados da modelação por elementos finitos;

- A capacidade máxima da junta no limite elástico dá-se quando os aderentes têm a mesma rigidez. Este facto é viável tanto para juntas de sobreposição simples ou dupla. Para o estado último de tensão, a capacidade máxima da junta surge quando o rácio de rigidez entre os aderentes está próximo de 0,8. Quando a razão de rigidez é igual a 1, a distribuição de tensões de corte é simétrica, caso contrário existirá um deslocamento (δ) do aderente com menor rigidez relativamente ao de maior rigidez.

2.3.2 Juntas tubulares sujeitas a esforços de corte

Hosseinzadeh et al. [91] conduziram uma investigação na qual se estudou a resposta de juntas adesivas tubulares de aço em resposta a uma carga torsional, considerando diferentes comprimentos de sobreposição. Utilizou-se o modelo de plasticidade de Ramberg-Osgood [98, 99] para descrever o comportamento não linear das juntas em estudo. Os resultados obtidos foram comparados com a solução obtida pela simulação em elementos finitos, realizada em ABAQUS®.

Demonstrou-se que o modelo de plasticidade de Ramberg-Osgood consegue simular o comportamento das juntas, com uma variação de comprimentos com uma boa precisão. Com este modelo, foi possível perceber a forma como as tensões se distribuem pela junta assim como o modo de rutura. Os resultados mostraram que a resistência da junta está altamente dependente da energia de deformação absorvida pela mesma. De facto, à medida que o comprimento de sobreposição aumenta, mais quantidade de energia é absorvida pela junta, apesar de esta se encontrar num estado plástico. A Figura 32 apresenta os resultados de um ensaio estático de torção típico para os comprimentos de sobreposição de 30 mm e 40 mm.

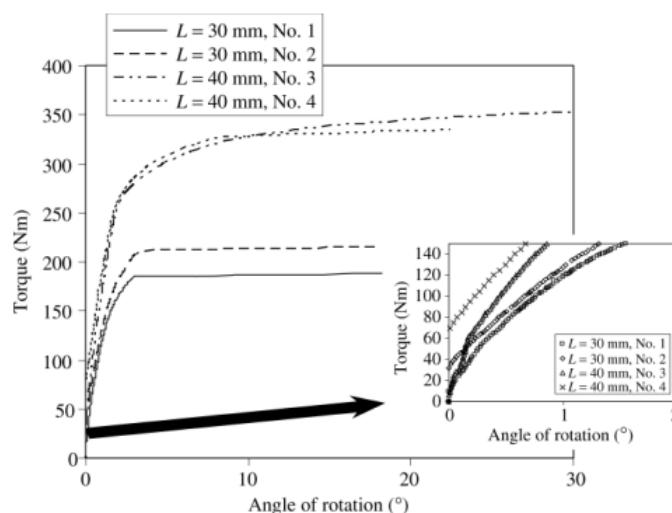


Figura 32 - Comportamento plástico de dois comprimentos de sobreposição diferentes, L, resultante do teste de torção estático, mostrando o número de amostras para cada comprimento [91].

Para garantir a consistência dos ensaios, foram testadas duas amostras de cada comprimento. Como demonstrado, a resposta do adesivo à torção é completamente plástica. Mesmo após ampliar a torção versus rotação na fase inicial do ensaio, é possível observar que o comportamento não é linear. Contudo, de maneira a criar um modelo preciso da resposta em questão, o mesmo deve conseguir suportar um comportamento totalmente plástico (modelo de Ramberg-Osgood). Os autores constataram também que o modelo elástico criado numa análise linear feita pelos mesmos num trabalho anterior [100] não conseguiu prever com exatidão a resistência final da junta [91].

Os resultados da análise dos elementos finitos, tendo em atenção ao comportamento linear do adesivo, mostraram que as juntas com o comprimento de sobreposição de 30 mm e 40 mm, experienciaram as mesmas tensões máximas sob a mesma magnitude de binário, isto porque em ambas as amostras o “comprimento efetivo” foi ultrapassado. Na Figura 33 é possível ver um gráfico a relacionar os parâmetros referidos. No entanto, ao considerar o comportamento não linear do adesivo, o comprimento de 40 mm produzia um aumento de 33% na resistência máxima ao torque comparativamente ao de 30 mm. A substituição dos parâmetros elásticos para plásticos fez com que, na junta com comprimento de sobreposição de 40 mm, a tensão numa das extremidades se mantivesse relativamente constante, enquanto o nível de tensões no meio cresceu à medida que a torção subia, indicando que as regiões nas extremidades se deformaram plasticamente, enquanto a região central da junta continuou elástica. A rutura era considerada quando as tensões distribuídas por toda a área de sobreposição se tornam constantes e iguais à tensão de rutura ao corte do adesivo. Isto sucedeu-se nas simulações por elementos finitos, para valores de torção de aproximadamente 320 N.m, muito próximo dos valores experimentais (340 N.m) [91].

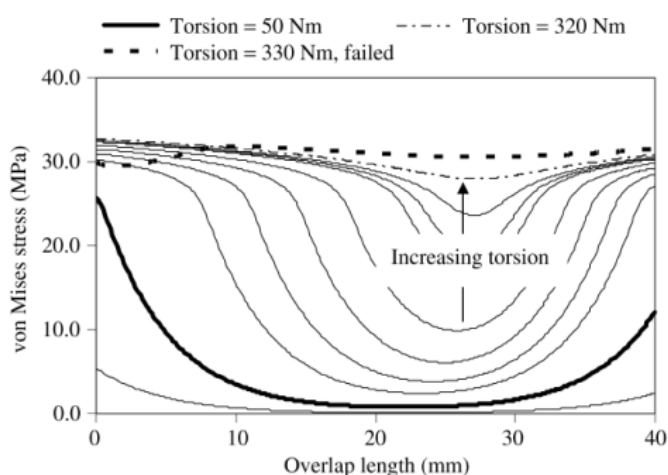


Figura 33 - Distribuição das tensões de Von Mises, ao longo do comprimento de sobreposição em função da torção aplicada [91].

Num outro estudo [101], agora totalmente paramétrico e recorrendo ao *software ABAQUS*, investigou-se o comportamento de juntas tubulares com e sem casquilho, compostas por aderentes em compósito (fibra de vidro e resina de epóxido), considerando o efeito da delaminação. Foi estudada a influência de diversos parâmetros na distribuição de tensões nas juntas adesivas em questão, considerando juntas com ambos os aderentes em compósito e outras entre aderentes de compósito e alumínio. O estudo focou-se sobretudo nas tensões de corte e de arrancamento na camada adesiva após as juntas serem submetidas a um esforço de torção, e permitiu chegar às seguintes conclusões:

- Todas as componentes de tensão na camada adesiva levaram a assumir valores superiores nas extremidades do comprimento de sobreposição ou próximo delas, mas chegam perto de zero ao longo do restante comprimento. Refere-se como exceção a tensão de corte τ_{12} que, como esperado, apresentou um valor constante diferente de zero ao longo do adesivo nas zonas afastadas das extremidades;
- Apontou-se uma descida no valor da tensão de corte na camada adesiva na região em que a delaminação decorre através da espessura; apesar disso, as tensões introduzidas no aderente de compósito na vizinhança da localização da delaminação não se alteraram com a presença do respetivo defeito;
- Os valores de tensão de corte e arrancamento passam ser máximos quando o comprimento da delaminação sobe. Além disso, um pico de tensão secundário, tanto de corte como de arrancamento, foi registado exatamente no fim da zona de delaminação;
- As concentrações de tensões na junta tubular com o casquilho (Figura 34), desenvolveram-se nas extremidades do adesivo, mas também nas zonas de descontinuidade entre os aderentes (onde os aderentes se encontram), causando uma descontinuidade considerável no estado de tensão;
- O pico de tensões secundário gerado na junta tubular, também foi observado na junta tubular com casquilho;
- Para ambos os modelos em estudo, quando a delaminação através da espessura era numa zona mais profunda, a amplitude do pico secundário diminui significativamente e os valores das tensões máximas nas extremidades aproximam-se daqueles quando a junta está intacta.

A orientação das fibras não demonstrou qualquer efeito importante em termos de tensões de arrancamento na junta com o casquilho. Para além disso, foram testadas amostras com camadas de fibra orientadas a 45° , registando-se um maior decaimento das tensões de corte.

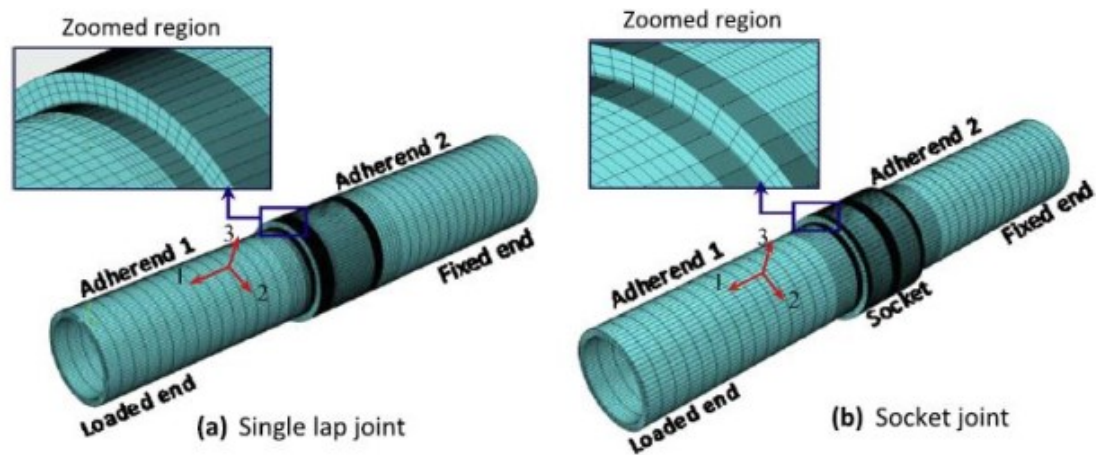


Figura 34 - Modelos de elementos finitos, utilizados das duas juntas delaminadas: a) junta adesiva tubular; b) junta adesiva tubular com casquilho [101].

Xu et al. [102] publicaram um trabalho em que se modelou uma junta adesiva tubular sob a forma de um corpo elástico 3D. Assim, excluiu-se a hipótese de que as tensões de corte e arrancamento fossem constantes através da espessura da camada de adesivo.

Neste estudo, é analisada teoricamente a distribuição de tensões numa junta adesiva tubular com aderentes em compósito (fibra de vidro e resina de epóxido) sujeita a torção. Foi considerado o método das diferenças finitas de forma a solucionar as equações de equilíbrio obtidas. A solução é posteriormente validada e comparada com dados obtidos experimentalmente na literatura por parte dos autores [103]. As conclusões retiradas do respetivo estudo resumem-se da seguinte forma:

- Existe uma variação significativa de tensão ao longo da espessura do adesivo. Por este motivo, assumiu-se uma distribuição de tensão uniforme para simplificar o problema;
- As tensões de corte e arrancamento apresentam-se elevadas em compósitos laminados perto das extremidades da junta devido às tensões normais e de corte dentro do plano;
- As tensões normais no plano são significativas apenas nas proximidades das extremidades livres. As tensões de corte no interior do plano são consideráveis ao longo da maior parte do comprimento de sobreposição. As tensões fora e dentro do plano, nos aderentes com camadas de fibra dispostas angularmente, conduzem a movimentos longitudinais e radiais sob cargas torsionais, Figura 35;
- Um comprimento de sobreposição mais elevado leva a uma redução da tensão de corte longitudinal e de arrancamento, e afeta ligeiramente a tensão de corte circunferencial. O aumento da espessura do adesivo diminui a concentração de

tensões, mas aumenta a tensão de corte circunferencial. Em ordem a reduzir a concentração de tensões, aplicou-se uma rigidez inferior num adesivo com uma resistência superior;

- De forma a evitar encurvamento e ressonância, geralmente é adequado utilizar em veios camadas de fibra orientadas a 0° e 90° .

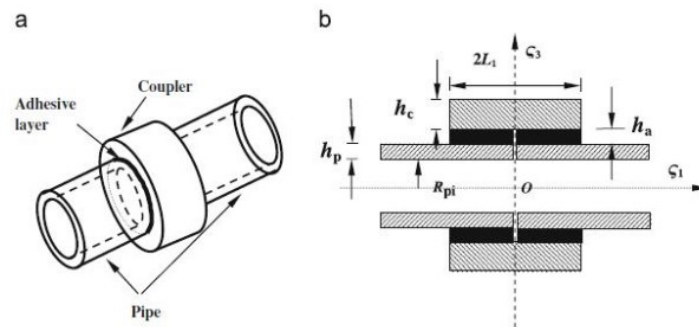


Figura 35 - Esquema da junta tubular em estudo: a) vista isométrica; b) vista transversal [102].

2.3.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

A fadiga em estruturas de engenharia consiste na perda da integridade estrutural ao longo do tempo, devido à aplicação de esforços variáveis. A resposta a este tipo de solicitações é muitas vezes denominada por fadiga estática, contudo o termo “fadiga” é geralmente associado a um carregamento cíclico intermitente.

Desta forma, a importância da fadiga em engenharia baseia-se na frequente ocorrência de rotura sob cargas repetitivas muito inferiores àquelas necessárias para causar rutura quase-estática. Este fenómeno é muito comum para a maioria dos materiais e estima-se que cerca de 80% dos casos de rotura estão relacionados com o mesmo.

O custo destas roturas é elevado em termos económicos, mas também quando se trata de vidas humanas. Por este motivo tem-se investido neste tipo de estudos de forma a melhor compreender os mecanismos de fadiga e métodos de previsão dos mesmos [4]. Neste capítulo dá-se ênfase aos fenómenos de fadiga que surgem em juntas adesivas tubulares derivados às diversas solicitações externas a que as mesmas ficam sujeitas e, como tal, são mencionados e descritos alguns trabalhos de forma a fornecer um melhor enquadramento deste tema.

Num estudo experimental conduzido por Knox et al. [104], com o objetivo de investigar o comportamento de uma junta adesiva tubular com 100 mm de diâmetro em tubos de compósito (fibra de vidro e resina de epóxico), foi estudado o comportamento à fadiga para carregamentos axiais e de flexão. Considerou-se a presença de grandes defeitos axissimétricos e, posteriormente, os resultados obtidos

foram comparados com dados obtidos através da modelação por modelos finitos, como forma de validação. Do artigo em questão retiraram-se as seguintes conclusões:

- Um carregamento axial à fadiga em juntas tubulares fabricadas por enrolamento filamentar afeta mais a vida útil à fadiga do que um carregamento cíclico devido a pressão interna;
- O envelhecimento do adesivo à temperatura e humidade ambiente pode ser benéfico para a resistência à fadiga a longo prazo;
- Em flexão e tração, temperaturas elevadas (90°C) reduzem a vida útil de fadiga;
- Grandes defeitos axissimétricos podem estar presentes em zonas críticas da ligação adesiva, tais como nas suas extremidades. Apesar disso, consegue-se manter a sua integridade por um longo período.

Reedy et al. [105] investigaram a resistência ao esforço axial e à fadiga em juntas adesivas tubulares de paredes espessas com aderentes em alumínio. Neste estudo, as amostras são constituídas pela ligação de um tubo de alumínio com um diâmetro externo de 63 mm, com um de compósito com 6 mm de espessura e 300 mm de comprimento. Os tubos de alumínio com 12,5 mm de espessura foram utilizados sem chanfro, exceto em quatro amostras.

Nestas últimas, foi maquinado um chanfro com 1 mm de espessura relativamente à parede exterior do tubo. Os resultados obtidos através de um estudo por elementos finitos num modelo axissimétrico promoveram a comparação posterior com os dados experimentais. Para todas as situações de carga, a rotura na junta inicia-se na extremidade interior da ligação. A rotura surge quando a fenda cresce no adesivo adjacente à interface. Os resultados para o carregamento à fadiga indicaram que a mesma, de facto, pode degradar severamente o comportamento da junta. Relativamente às juntas com chanfro, o esforço à tração e a resistência à fadiga são substancialmente superiores comparativamente ao caso descrito antes.

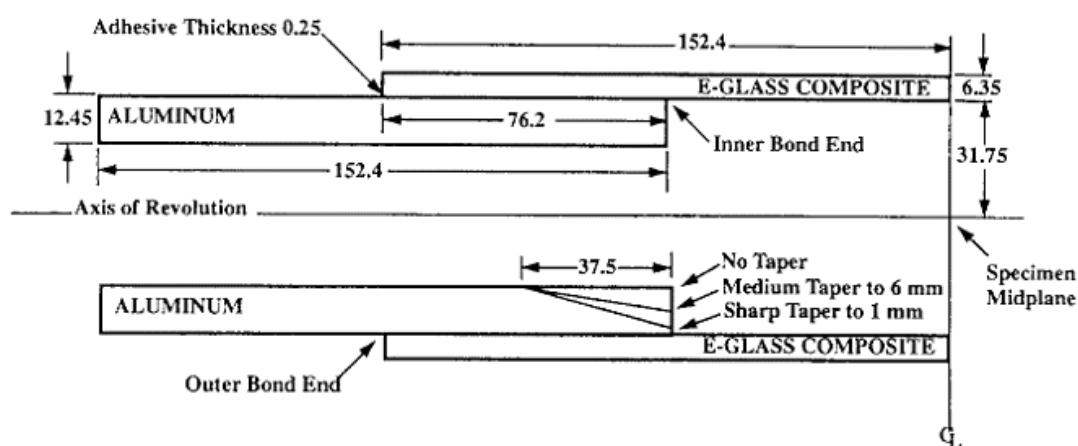


Figura 36 - Dimensões das amostras utilizadas no estudo realizado por Reedy et al [105].

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação dos MDC com dados experimentais

3.1.1 Descrição da geometria e materiais

Neste subcapítulo serão abordados todos os materiais utilizados no trabalho experimental, bem como será efetuada uma análise dos resultados obtidos nos ensaios. Posteriormente será efetuada a respectiva comparação dos valores obtidos, nos ensaios laboratoriais, efetuados por um colega anterior [106], com o objetivo de realizar uma avaliação detalhada das propriedades mecânicas de forma a validar os valores obtidos no trabalho numérico, com o âmbito de os tornar aceitáveis para posterior estudo paramétrico nas juntas adesivas tubulares.

Na Figura 37 e Tabela 3 encontram-se apresentadas as configurações e as designações das cotas utilizadas dos provetes.

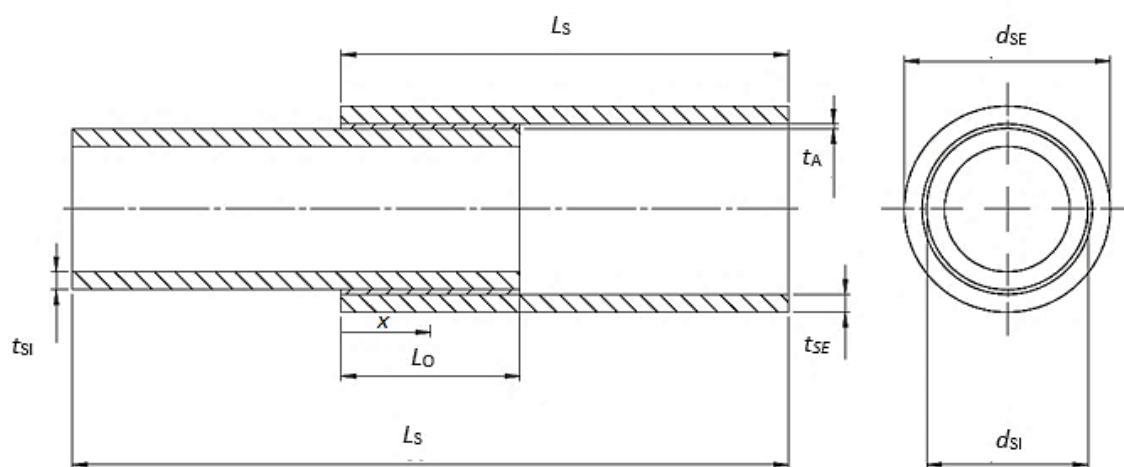


Figura 37 - Configurações da geometria do provete [106].

Tabela 3 – Designação das cotas dos provetes e respectivos valores (em mm) [106].

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

Os provetes utilizados possuem uma forma cilíndrica, pois os tubos e alumínio utilizados nas juntas possuem secção circular. A espessura do adesivo (t_A), é a mesma para todas as amostras (0.20 mm) tal como a espessura dos substratos interior (t_{SI}) e exterior (t_{SE}) (2 mm). O mesmo sucede relativamente ao diâmetro externo dos tubos sendo o interior (d_{SI}) de 20mm e o exterior (d_{SE}) de 22,40 mm. O comprimento dos substratos (L_S) tem o valor de 50 mm até aos pontos de amarração. Foram produzidas 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 depende de L_O [106].

3.1.1.1 Substratos

Os substratos 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 que apresenta, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [107, 108], onde foram obtidas as seguintes propriedades:

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

Na Figura 38 é possível observar as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [107, 108]. Está representada também a aproximação numérica usada nos modelos MDC e MEFX [109].

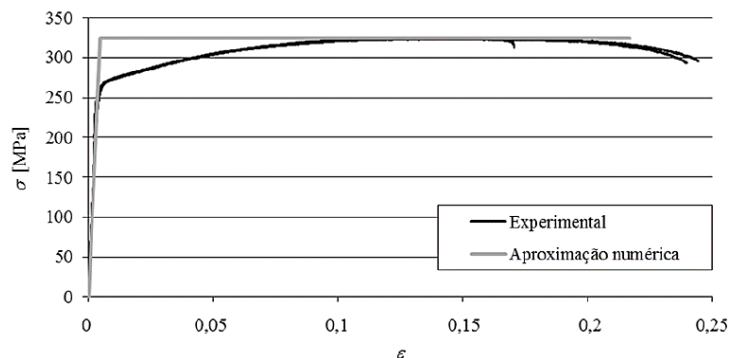


Figura 38 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [110].

3.1.1.2 Adesivos

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

3.1.1.2.1 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 e endurecedor faz-se numa razão de 100 g por 40 g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso ao uso de uma espátula [3].

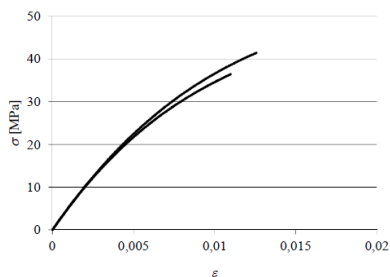


Figura 39 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [111].

Este adesivo é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [111]. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 39 [111]. Estas curvas foram obtidas experimentalmente, e as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [110-112].

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 [111]

^b valor do fabricante

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural bi-componente, de ductilidade moderada e que, 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 típicas de concentração, que normalmente são nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [111]. O adesivo 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 por 50 g, sendo a mistura realizada por um bico e inserido por meio de uma pistola de aplicação [3]. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 40, e as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo estão expostas na Tabela 5.

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [110, 111, 113].

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

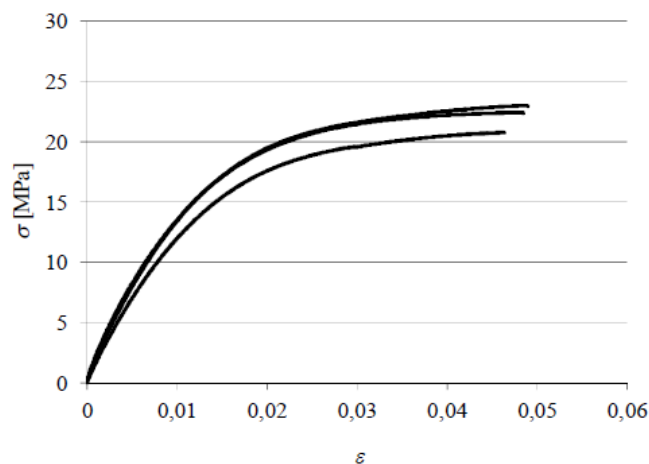


Figura 40 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 [111].

3.1.1.2.3 SikaForce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor (FRW L60). 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 41 estão representadas as curvas σ - ϵ do adesivo e na Tabela 6 as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo.

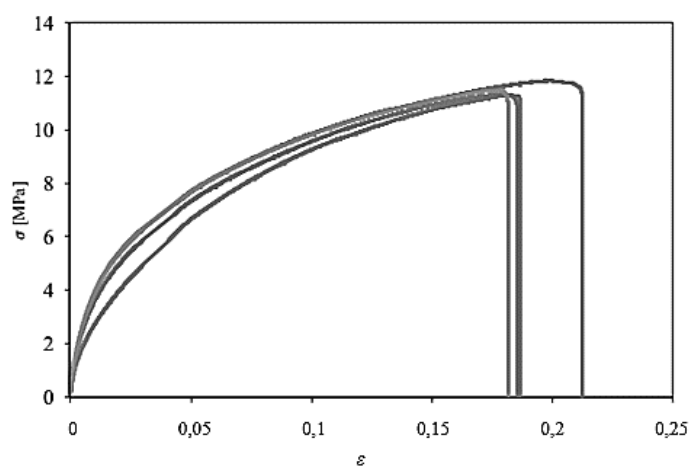


Figura 41 - Curvas σ - ϵ do adesivo SikaForce® 7752 [114].

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 [96].

Tabela 6 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [96, 113, 114].

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

^a valor do fabricante

3.1.2 Resultados experimentais obtidos

Neste subcapítulo serão apresentadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para os diferentes adesivos e valores de L_o , que o colega [106] analisou durante o ensaio laboratorial. Foram retirados os valores de $P_{m\acute{a}x}$, para os diferentes adesivos, sendo

realizados cinco ensaios para cada situação. Nestes ensaios obteve-se uma rutura coesiva para as amostras testadas. Nas tabelas são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de L_0 , sendo que também foram obtidos o valor médio e o desvio padrão, o qual fornece uma dispersão dos valores obtidos.

3.1.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 42 e Figura 43 são apresentadas as curvas $P-\delta$, enquanto na Tabela 7 podem ser visualizados os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$, para as juntas adesivas tubulares.

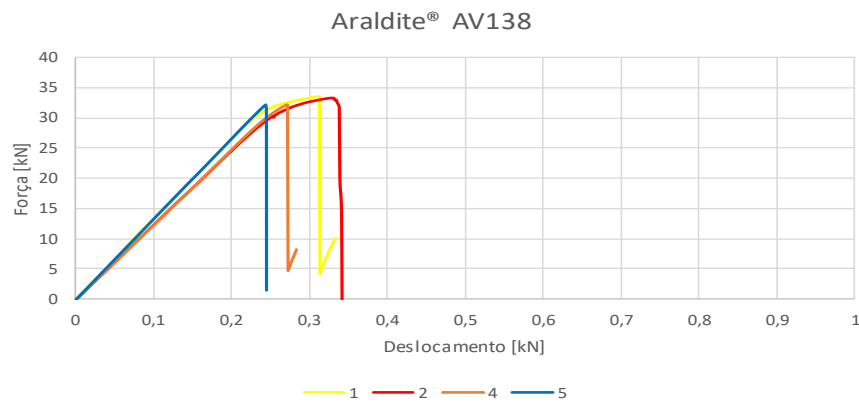


Figura 42 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm [106].

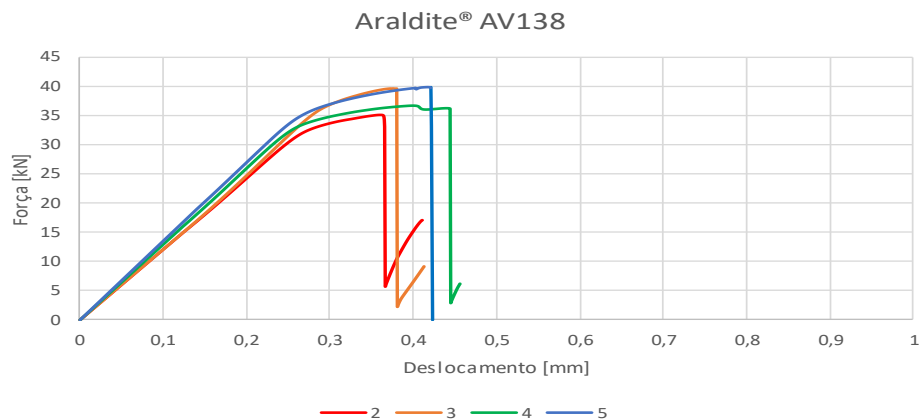


Figura 43 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138 b) $L_0=40$ mm [106].

Nos provetes com $L_0=20$ mm verifica-se a ocorrência de plastificaao dos substratos nas amostras 1 e 2, sendo que uma possível causa seria o excesso de adesivo na junta,

que se infiltrou dentro do tubo interior, gerando uma área de contacto superior à desejada. As restantes amostras apresentam um comportamento linear até à rotura.

Para as juntas adesivas com $L_0=40$ mm ocorre a plastificação dos substratos em todas as amostras. De uma forma geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento para ambos os casos de estudo. Apenas se regista a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e questões de amarração dos provetes [106].

Tabela 7 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138.

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

Os provetes considerados inválidos foram removidos desta análise uma vez que apresentavam discrepâncias bastante elevadas. Com os valores obtidos pode-se verificar uma redução do desvio padrão percentual relativamente ao respetivo valor médio. Assim sendo, é possível obter uma boa repetibilidade das curvas $P-\delta$. A dispersão dos valores obtidos é muito reduzida, sendo que o maior desvio padrão percentual registado para o Araldite® AV138 foi nos provetes com $L_0=40$ mm (5,15%). Este valor poderá ser relacionado com o fabrico dos provetes, constituição dos materiais ou mesmo com a máquina de ensaios, podem ter contribuído para esta diferença.

3.1.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 44 e Figura 45 são apresentadas as curvas $P-\delta$ do adesivo Araldite® 2015. Na Tabela 8 é possível observar os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para o mesmo adesivo, em função de L_0 . Aqui verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=20$ mm. Para o caso dos provetes com $L_0=40$ mm, já se verifica plastificação dos substratos. De uma forma geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento. As pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios, especialmente para $L_0=20$ mm.

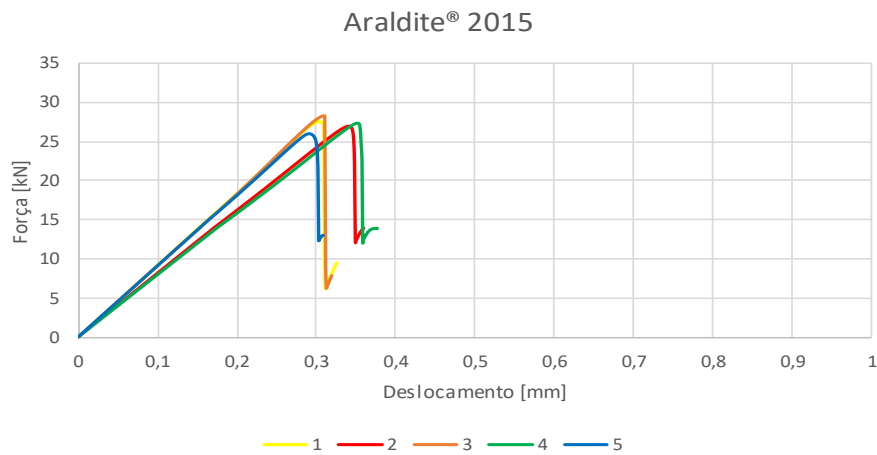


Figura 44 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm [106].

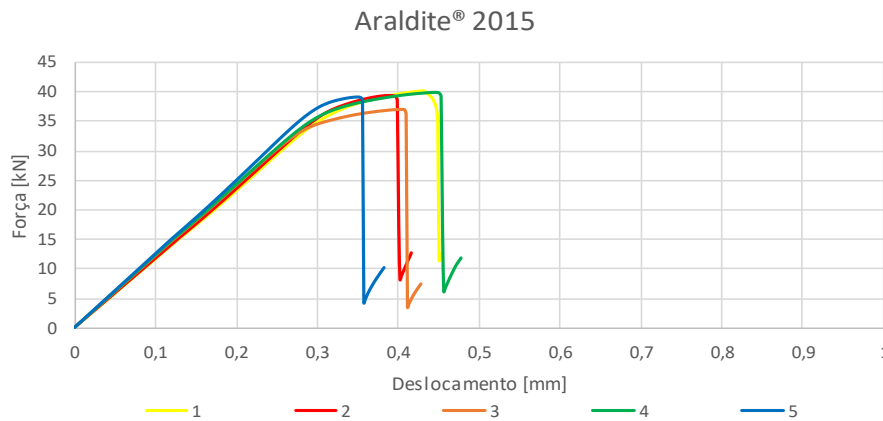


Figura 45 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015 b) $L_0=40$ mm [106].

Tabela 8 - Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015.

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

O adesivo Araldite® 2015 é aquele que apresenta mais coerência em relação à dispersão dos valores obtidos. Com a Tabela 8 é possível observar que o desvio padrão

percentual registado é o mesmo para os dois valores de L_0 , tornando os dados recolhidos mais viáveis.

3.1.2.3 SikaForce® 7752

Como nos outros adesivos, são apresentadas as curvas $P-\delta$ (Figura 46 e Figura 47). Na Tabela 9 estão presentes os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente, para o adesivo SikaForce® 7752, em função de L_0 .

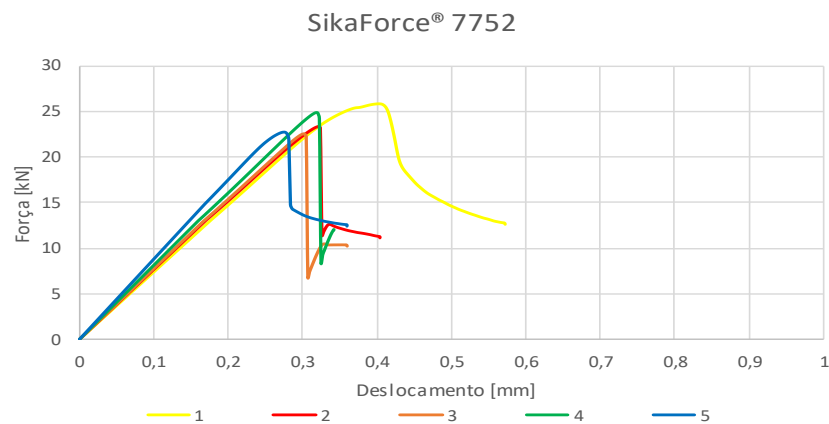


Figura 46 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752, para $L_0=20$ mm [106].

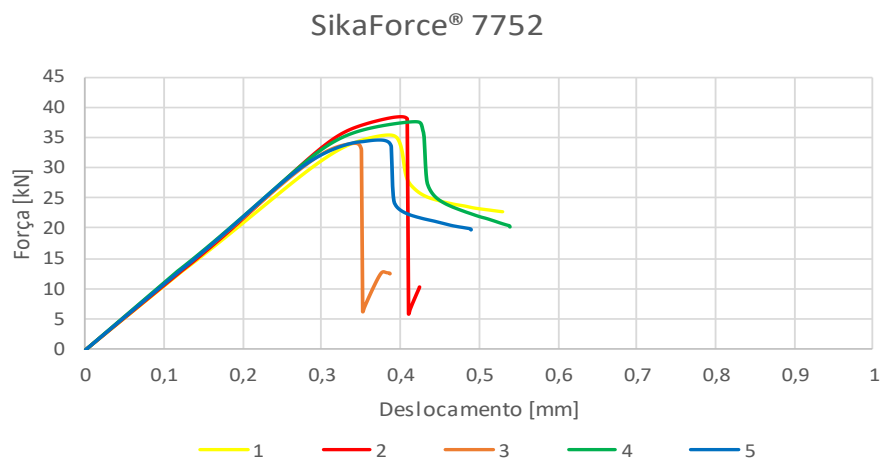


Figura 47 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752, para $L_0=40$ mm [106].

Nos provetes com $L_0=20$ mm, pode-se verificar um comportamento linear das juntas até à rotura, exceto na amostra nº1. A mesma apresenta plasticidade dos substratos e

um deslocamento até à rotura superior em comparação com os restantes provetes. Este comportamento pode ser o resultado da deposição de uma espessura de adesivo superior à prevista ou por se ter acumulado adesivo em excesso dentro da junta adesiva [106].

Nos provetes com $L_0=40$ mm observou-se plastificação dos substratos. O provete 3 apresenta uma deformação até à rotura menor em relação aos outros provetes. Este comportamento poderá ter-se gerado devido a uma espessura de adesivo na junta inferior à pretendida. Apesar das diferenças registadas, em geral consegue-se observar uma boa repetibilidade das curvas no que diz respeito à rigidez. Como foi referido para os adesivos anteriores, é notória a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes.

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. Contudo, não são desvios significativos em relação aos valores individuais dos ensaios relativamente ao respetivo valor médio. As diferenças registadas entre os valores podem ser justificadas pelos mesmos motivos mencionados no caso do Araldite® AV138.

3.1.3 Comparação de resultados

Na Figura 48 está representada a comparação geral dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas com os três adesivos, assim como o desvio padrão de cada valor de L_0 , que mostra a dispersão dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ individuais de cada conjunto de ensaios relativamente à respetiva média. 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.

Tabela 10 - $P_{\text{máx}}^{\text{Méd}}$ (em 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	$L_0=20\text{mm}$	$L_0=40\text{ mm}$	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,4
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,4
SikaForce® 7752	23856,4	35929,9	50,6

Relativamente ao Araldite® AV138, para o valor de L_0 de 20 mm, este adesivo apresenta-se como sendo, dos três, o 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. Este aumento relativamente reduzido do Araldite® AV138 evidencia a sua fragilidade.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{\text{máx}}=27238,4$ N para um $L_0=20$ mm. Contudo, apresenta um aumento percentual muito superior ao Araldite® AV138 devido ao facto de ser um adesivo mais dúctil e, por isso, serão induzidas cargas mais elevadas e, consequentemente, dá-se a plastificação dos substratos. O aumento percentual é de 43,4% e, por esta razão, para um $L_0=40$ mm, a carga máxima que a junta adesiva suporta é de 39066,8 N, ou seja, apresenta uma resistência superior à do Araldite® AV138.

O adesivo SikaForce® 7752 é aquele que apresenta o maior aumento de resistência percentual (50,6%) entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Este acontecimento deve-se ao facto de este adesivo ser o mais dúctil dos três em estudo. Desta forma, para um L_0 de 20 mm, $P_{\text{máx}}$ é de 23856,4 N, e para $L_0=40$ mm é 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.

Através da realização dos ensaios experimentais verifica-se que o aumento de $P_{\text{máx}}$ com L_0 varia consoante o adesivo, o que evidencia um comportamento bastante distinto entre os três adesivos. Deste modo, o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares para ambos os L_0 , seguidos do SikaForce® 7752, que apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos dois referidos adesivos. Por outro lado, o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, por se apresentarem como os adesivos mais dúcteis, são os que revelam um maior aumento percentual de $P_{\text{máx}}$ com o aumento de L_0 .

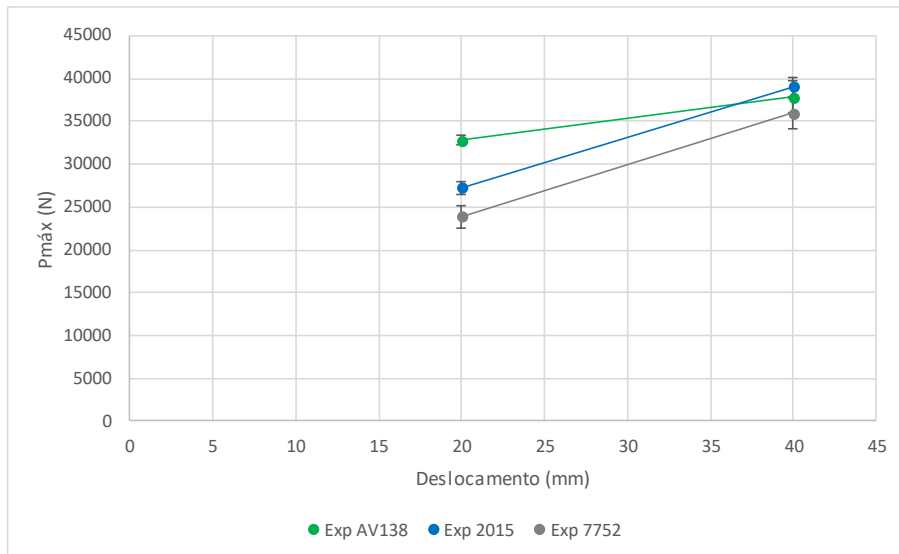


Figura 48 - Variação de $P_{máx}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [106].

3.1.4 Modelo de dano coesivo triangular

A utilização do MDC na análise de juntas adesivas necessita de uma lei constitutiva para descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Podem-se considerar diferentes leis coesivas de modo a obter resultados mais precisos, em função do comportamento do material ou da interface em simulação [60]. Ao longo do tempo foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o modelo triangular [57], o linear-parabólico [56], o exponencial [58], o polinomial [59] e o trapezoidal [53]. O método mais utilizado é o modelo triangular, devido à sua simplicidade, ao reduzido número de parâmetros a determinar e resultados precisos para a maioria das condições reais [61].

A Figura 49 explica de uma forma simplificada a lei coesiva triangular. No ponto O, o material ainda não se encontra em carga e não há separação. Ao longo da linha AO, o material encontra-se no domínio elástico. Em A a tração coesiva alcança o valor máximo admissível. A seguir a este ponto o material começa a sofrer dano e a rigidez coesiva diminui. Num ponto genérico B (com separação δ) entre os pontos A e C, a trajetória do descarregamento é linear em direção ao ponto O. A rigidez coesiva cai assim do valor inicial K para K^δ e a tração admissível desce da resistência coesiva t^0 para o valor atual t . Quando a tração admissível cai para zero no ponto C (que corresponde à extremidade da fenda), a separação é igual a δ^f e ocorre a separação completa do material. Depois, outra fenda é nucleada ou a ponta de uma fenda existente avança. Qualquer ponto à frente de C (por exemplo o ponto D) está agora fora da zona coesiva e pertence às superfícies da fenda localizadas atrás da ponta da mesma [115].

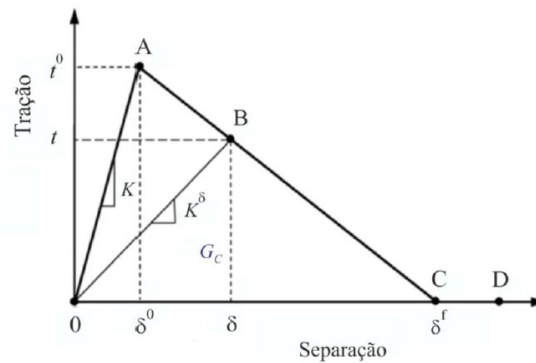


Figura 49 - Lei coesiva triangular [115].

A energia crítica coesiva ou tenacidade à fratura, G_c , é dada pela área do triângulo, está relacionada com outros dois parâmetros através da relação de área $G_c = t^0 \times \delta^f / 2$. Assim, quaisquer dois dos três parâmetros (por exemplo t^0 e G_c) podem ser escolhidos como entradas para a lei coesiva triangular. Além dos dois parâmetros t^0 e δ^f , outro parâmetro tem de ser definido para descrever completamente a forma da lei coesiva triangular. Este parâmetro pode ser a rigidez coesiva inicial K ou a separação normal característica δ^0 , que corresponde à tração máxima. Estes parâmetros relacionam-se por $\delta^0 = t^0 / K$ [115].

Formulação do modelo

O modelo de dano triangular pode ser 2D ou 3D. No que diz respeito ao 2D, existem dois modos: o puro e o misto. O modo puro divide-se em modo I, a fenda abre por esforços de tração, e em modo II, a fenda desliza por esforços de corte [116]. O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Nos dois modos, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar tração e corte [64].

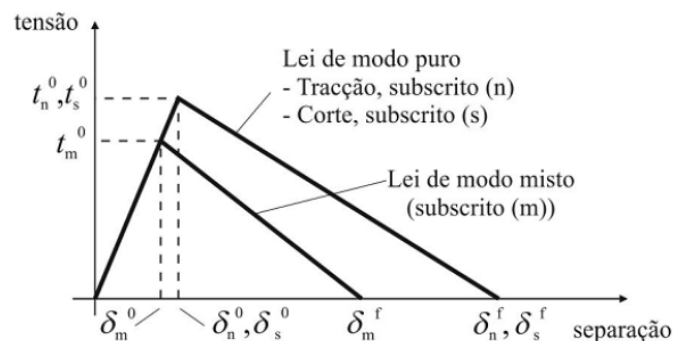


Figura 50 - MDC triangular [112].

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

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

No caso de a formulação ser local, os elementos coesivos são usados para simular fraturas de espessura nula. Nestas condições, os parâmetros de \mathbf{K}_{COH} possuem valores extremamente elevados, tendo por finalidade não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [111]. Na formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para as ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (2), onde G é o módulo de elasticidade transversal:

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

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [64]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério da tensão nominal quadrática, expresso pela expressão (3):

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

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. A evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_m^f , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} [50]:

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

3.1.4.1 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . Já foram realizados estudos em que assumem que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivo maciço [111, 117]. A restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de

geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [118-120]. É recomendado a utilização de métodos de definição de valores que traduzem o comportamento dos adesivos em condições que vão ser utilizados.

3.1.4.1.1 Araldite® AV138

Na determinação das leis coesivas foi utilizado um método inverso num trabalho anterior [121]. Devido a não existir ensaios de caracterização de fratura, o procedimento foi ligeiramente diferente. Assim foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de adesivo maciço e de corte designados por *Thick Adherend Shear Test (TAST)*, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, usando valores iniciais típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testa, e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram aplicados a todas as configurações testadas obtendo-se ótimos resultados. Os valores de E e G , também foram determinados experimentalmente, (TAST). No trabalho mencionado [108], foi concluído que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. Na Tabela 11 encontram-se os parâmetros utilizados na simulação da camada, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 11 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [108].

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
4890	1560	39,45	30,20	0,20	0,38
MPa				N/mm	

3.1.4.1.2 Araldite® 2015

As leis coesivas da camada de adesivo Araldite® 2015, foram determinadas num trabalho anterior [121], por um método inverso, para determinar t_n^0 e t_s^0 . Esta metodologia consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *Double-Cantilever Beam (DCB)* e *End-Notched Flexure (ENF)*. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro, que inicialmente tem um valor

aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico, com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 são definidos utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. Na Tabela 12, podemos visualizar os parâmetros utilizados para simular o adesivo [122]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [123] e ensaios TAST.

Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [121].

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
1850	650	21,63	17,90	0,43	4,70
MPa				N/mm	

3.1.4.1.3 SikaForce® 7752

O processo de obtenção das propriedades coesivas do adesivo, seguiu um processo idêntico ao adesivo anterior. Assim sendo, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de um ajuste para a estimativa de t_s^0 [124]. Os valores utilizados são os valores médios de G_{IIC} e t_s^0 obtidos no trabalho de Azevedo [124], no qual o desvio dos provetes é muito reduzido, traduzindo-se na repetibilidade dos ensaios. O Valor de G_{IIC} foi obtido em ensaios de fratura DCB [114]. O valor de t_s^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados [114]. Como foi referido nos trabalhos anteriores, na sollicitação à tração, o valor de t_n^0 não tem influencia até 25% do valor obtido pelo método inverso [114], sendo que não foi considerado relevante o seu procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [114]. Na Tabela 13 é possível observar os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [114].

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
493,81	37,49	12,25	10,50	2,36	5,56
MPa				N/mm	

3.1.5 Condições da análise numérica

A análise numérica é baseada no MEF, e as simulações numéricas foram realizadas no *software* ABAQUS®. Este *software* possui uma biblioteca de elementos e grande aplicação em diversos trabalhos na área da adesão. O mesmo permite o uso do MDC, para prever a resistência das juntas tubulares. De seguida são apresentados passos de pré-processamento da modelação, utilizando os termos do *software* (*Parts, Property, Assembly, Step, Load* e *Mesh*) [125].

A análise de MEF tem por base a utilização de elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) para a modelação dos substratos, e elementos coesivos axissimétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para a camada do adesivo como aproximação da geometria em análise, que fornece resultados precisos para este tipo de geometrias. Na Figura 51 encontra-se o método de atribuir os materiais aos substratos e ao adesivo. O modelo utilizado é o de dano triangular, pois caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

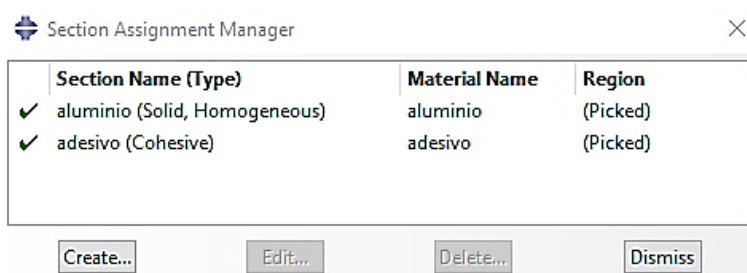


Figura 51 - Atribuição dos respetivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS [106].

Na interface gráfica deverão ser levados em atenção alguns passos. Deste modo, serão descritas as etapas realizadas na criação de juntas de sobreposição simples, JSS, através do *software*.

1º Passo – Part

Neste passo foi efetuado o desenho da junta adesiva (Figura 52). Para modelar os substratos e o adesivo desenhou-se apenas um corpo, que foi posteriormente dividido em partições e atribuído os respectivos materiais. A modelação dos aderentes foi efetuada com elementos axissimétricos deformáveis. Na análise de rotura por MDC considerou-se o comportamento não linear geométrico das juntas.



Figura 52 - Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS® [106].

Na simulação numérica foram construídos modelos com as dimensões de cada configuração. A Figura 53 mostra a construção de uma junta com $L_0=20$ mm. Os elementos axissimétricos são de elevada relevância, estando assinalado a verde o eixo de revolução. O eixo de revolução permite posicionar o modelo no centro dos eixos, bem como definir o diâmetro da junta. Deste modo, consegue-se obter forças, deslocamentos e tensões na camada de adesivo.

No desenho de conjunto foi necessário efetuar partições Figura 54 (camada de adesivo, aderentes) e atribuir as diferentes propriedades e comportamentos.

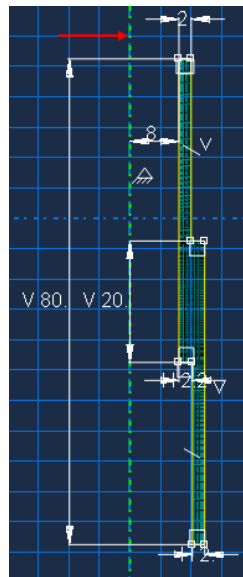


Figura 53 - Desenho 2D de uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm no ABAQUS® [106].

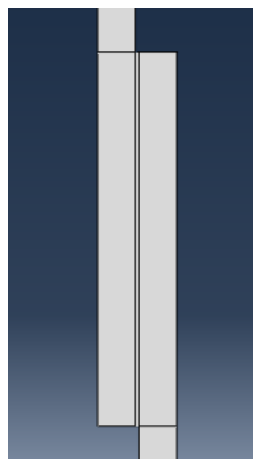


Figura 54 - Diferentes partições existentes no modelo criado no ABAQUS® [106].

2º Passo – *Property*

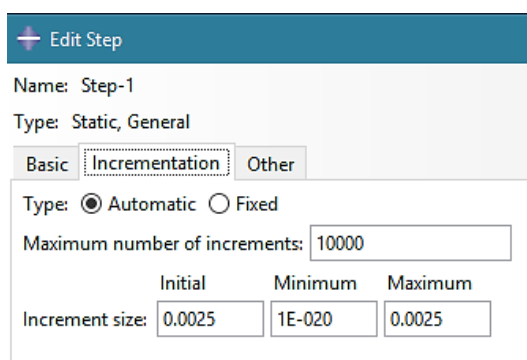
As propriedades mecânicas das partições anteriormente criadas são atribuídas nesta secção (adesivo e substratos). Neste módulo são criados os materiais e são atribuídas secções às respetivas partições. O alumínio é modelado considerando a rigidez do material e a sua plasticidade de forma a aferir se os tubos cedem antes ou depois da camada adesiva.

3º Passo – *Assembly*

Como os modelos são constituídos por um componente (embora dividido em partições) não é necessário executar nenhuma operação nesta etapa.

4º Passo – Step

É nesta secção que os parâmetros de computação da simulação são introduzidos. Na Figura 55 estão descritos os incrementos utilizados e o tamanho dos incrementos. De modo a evitar a paragem da análise por exceder o número de incrementos permitido, foi considerado um valor de 10000 para o número máximo de incrementos a realizar na análise. Considerou-se um tamanho inicial de incremento de 1% do deslocamento aplicado nos modelos. O tamanho máximo do incremento foi também fixo em 1% do deslocamento aplicado. O tamanho mínimo do incremento foi um valor reduzido para contabilizar a redução de tamanho do incremento que o *software* tem necessidade de aplicar, para evitar os problemas de convergência associados.



The screenshot shows the 'Edit Step' dialog box for 'Step-1'. The 'Type' is 'Static, General'. The 'Incrementation' tab is selected. The 'Type' is set to 'Automatic'. The 'Maximum number of increments' is 10000. The 'Increment size' is defined by three input fields: 'Initial' (0.0025), 'Minimum' (1E-020), and 'Maximum' (0.0025).

Figura 55 - Definição de incrementos para análise no ABAQUS® [106].

5º Passo – Interaction

Não é necessário executar nenhuma ação neste módulo uma vez que os modelos são constituídos por uma única peça.

6º Passo – Load

Para simular o carregamento à tração é necessário aplicar as condições fronteira na junta adesiva. Numa das extremidades do substrato é simulado um encastramento, enquanto na outra é aplicado um deslocamento vertical e uma restrição horizontal. Na Figura 56 encontra-se uma representação das condições fronteira.

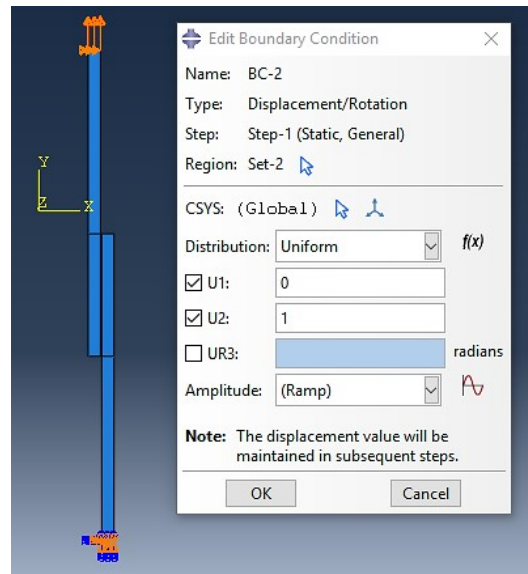


Figura 56 - Representação condições de fronteira [106].

Tabela 14 - Deslocamentos impostos nos modelos de juntas adesivas tubulares em função do adesivo utilizado e valor de L_0 [106].

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	0,45	0,35
Araldite® 2015	0,4	4
SikaForce® 7752	1,25	1,5

Na Tabela 14 é possível observar uma discrepância de valores. Os mesmos são necessários devido à plastificação que os substratos de alumínio sofrem quando ensaiados com o adesivo Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

7º Passo – Mesh

Neste passo de construção do modelo é efetuada a discretização da geometria em elementos finitos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. É possível observar na junta uma variação da dimensão da malha, sendo que as zonas mais próximas das extremidades da sobreposição estão mais refinadas.

De forma a obter valores com precisão, foram atribuídos valores ao número de elementos e ao bias ratio, em função de L_0 . A finalidade dos diferentes valores atribuídos, é a redução do esforço computacional e garantir assim a precisão dos resultados em zonas com variação de tensão [125]. Foi também introduzida viscosidade aos elementos coesivos, de forma evitar problemas convergência, e aplicados os *mesh controls*. Na Figura 57 encontra-se uma representação da malha na zona de sobreposição.

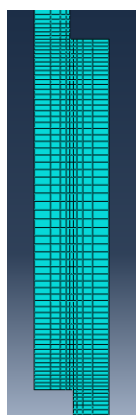


Figura 57 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=20$ mm [106].

8º Passo – *Job*

Nesta etapa dá se inicio à simulação, e é inserido o nome e a capacidade computacional que se pretende aplicar. Posteriormente segue-se com a evolução da análise, através do comando “*Results*”.

9º Passo – *Visualization*

Esta secção corresponde à visualização dos resultados obtidos para a junta. Na Figura 58 é possível ver uma junta tubular após rotura da camada de adesivo. Depois de terminada a simulação, procede-se à análise dos resultados para produzir as curvas $P-\delta$.

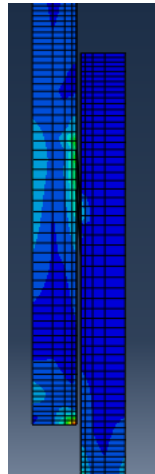


Figura 58 - Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS® [106].

3.1.6 Análise de tensões nas juntas

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

3.1.6.1 Tensões de arrancamento

As distribuições das tensões σ_y para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 59.

De uma forma geral verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , exceto em zonas localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [126, 127].

Na região interior da camada do adesivo geram-se tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tração devido à curvatura ou deformação transversal da junta, a qual é gerada pela deformação dos substratos e provoca uma separação nas extremidades da camada de adesivo, e compressão na zona intermédia. As tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura prematura [111, 128]. As tensões σ_y na região central da sobreposição são aproximadamente nulas, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de L_0 .

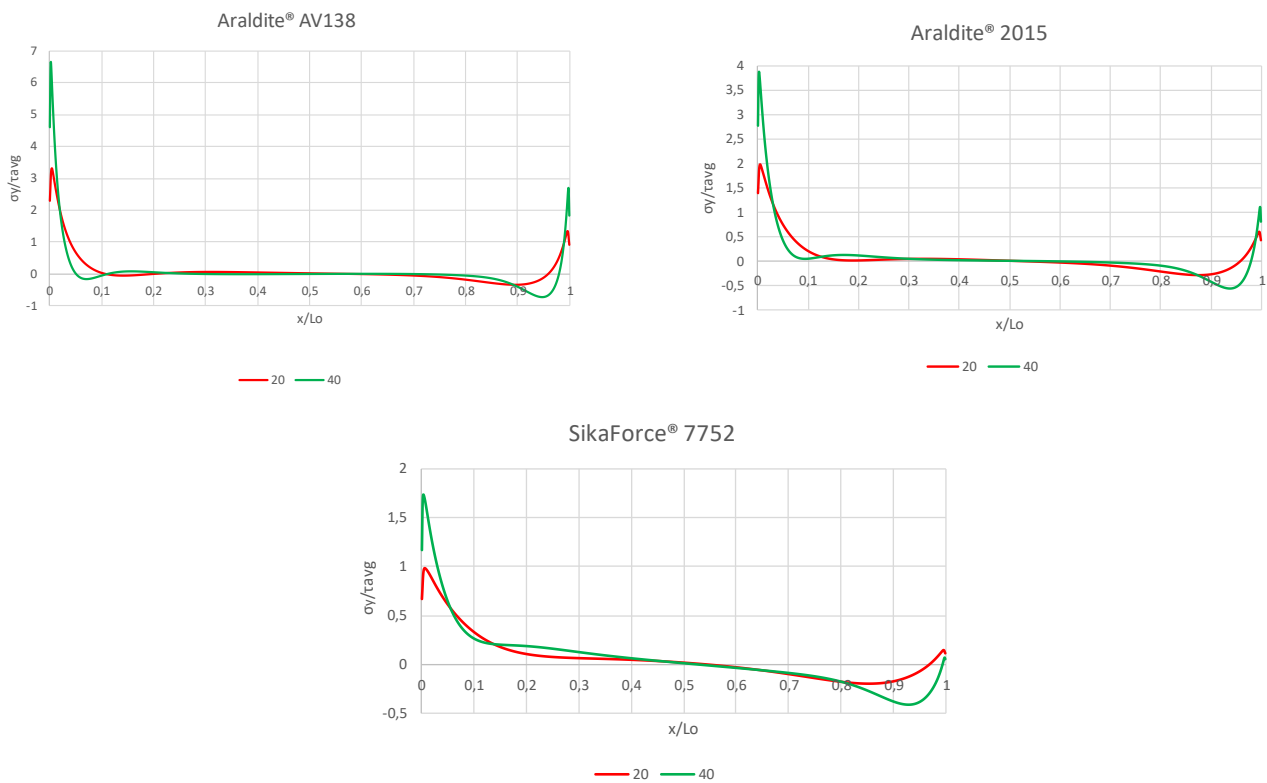


Figura 59 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [106].

Para valores de L_0 mais elevados, observam-se picos compressivos na proximidade das singularidades, que aumentam de magnitude com L_0 . As tensões compressivas na zona interior são menos significativas. Esta tendência tende a parar a propagação de dano após dano localizado nas zonas de singularidades [26], o que justifica algumas vezes que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é obtido após a iniciação da fenda [129]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 deve reduzir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente para juntas com adesivos frágeis [130].

Através dos gráficos, pode-se verificar que o adesivo Araldite® AV138, possui gradientes elevados em $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, que correspondem às extremidades de L_0 . Este adesivo possui rigidez elevada, que origina picos de concentração de tensões elevados, podendo levar á rotura prematura. Na Tabela 15 estão presentes valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos.

O SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os menores valores de σ_y/τ_{avg} . Estes resultados mostram-se satisfatórios pois este adesivo apresenta a menor rigidez. É possível ver picos de concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva inferiores aos outros adesivos.

Tabela 15 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [106].

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

3.1.6.2 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 60.

Tal como para a distribuição de tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} demonstra valores mais reduzidos na região central de L_0 e atinge o máximo nas extremidades da sobreposição [131, 132]. Esta situação acontece devido deformação diferencial do cada tubo ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre e aumenta progressivamente até extremidade oposta [35, 92, 133].

Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se empreguem adesivos frágeis a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição [133]. Os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nessas regiões, enquanto a região interna da sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes, o que possibilita um aumento da resistência da junta [134, 135].

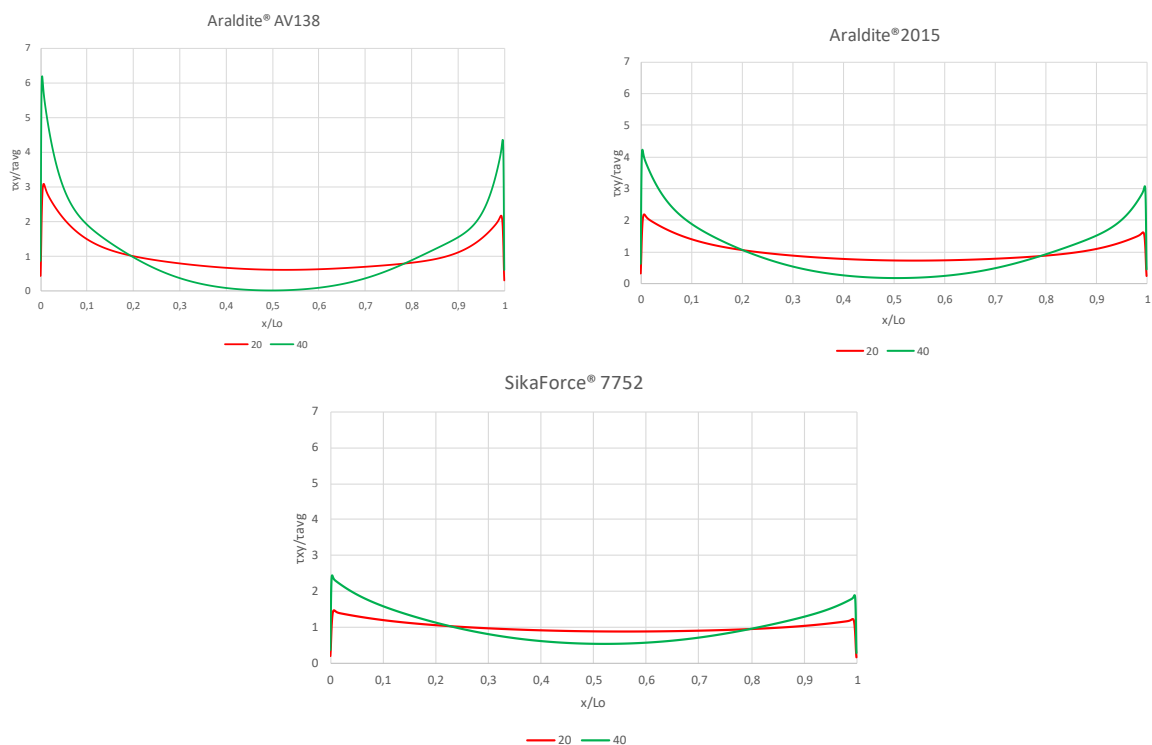


Figura 60 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [106].

O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} observado foi para o Araldite® AV138. Este adesivo é o mais frágil, gerando-se picos de concentração de tensões τ_{xy} elevadas nas extremidades. O valor de rigidez que apresenta pode condicionar a resistência da junta, levando-a a uma rutura prematura. O mesmo acontece com a Araldite® 2015. o adesivo SikaForce® 7752 demonstrou ser o menos resistente uma vez que os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} registados são os mais baixos, devido a um E inferior em relação aos outros adesivos.

Tabela 16 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [106].

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

3.1.7 Previsão da resistência por MDC

Neste capítulo será realizada uma comparação dos resultados dos ensaios experimentais com as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelos MDC, de forma a efetuar a respetiva validação das propriedades obtidas nas análises numéricas. Encontram-se apresentadas as curvas P - δ na Figura 61, Figura 62 e Figura 63.

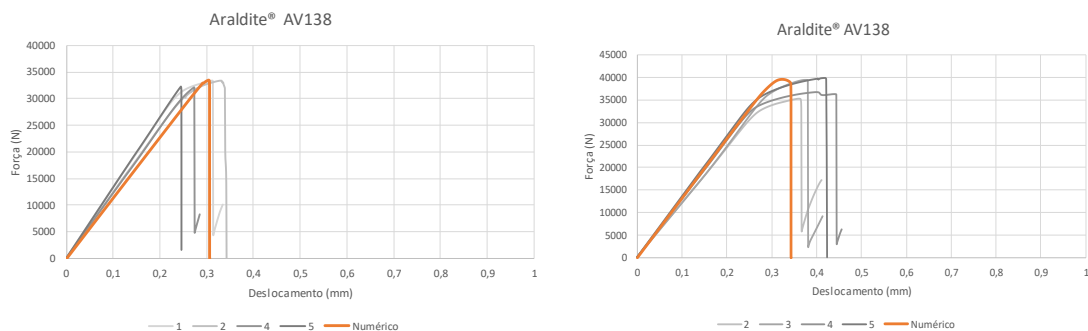


Figura 61 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [106].

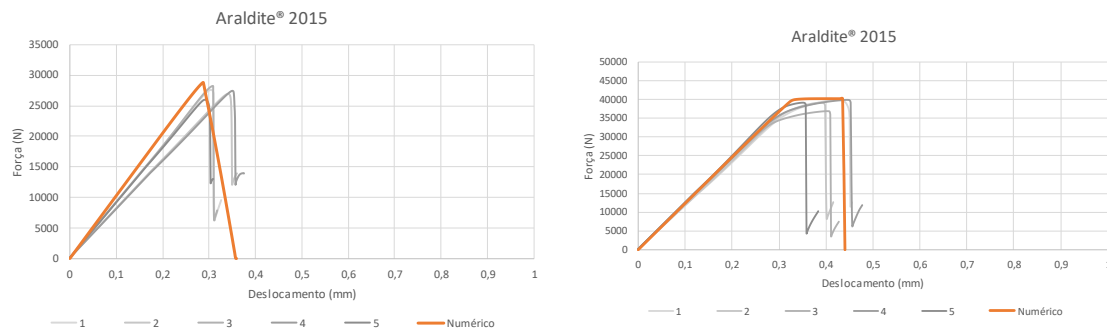


Figura 62 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [106].

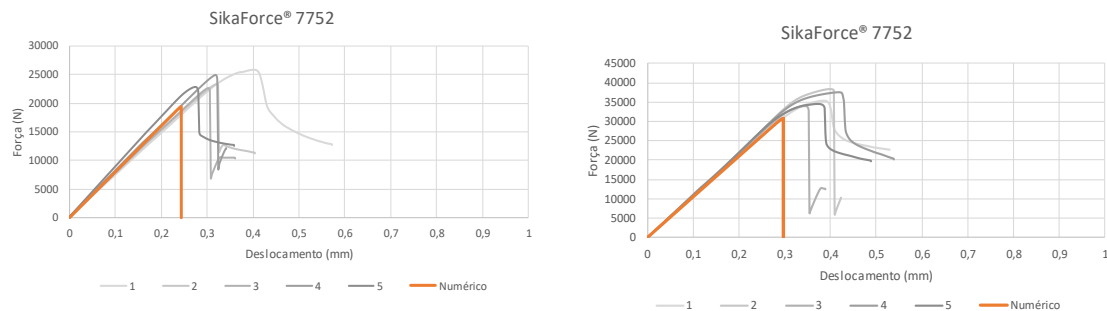


Figura 63 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [106].

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Estas apresentaram boa relação à $P_{m\acute{a}x}$, rigidez e deslocamento de rotura [109]. O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo dúctil, pelo que as leis triangulares de MDC, subestimaram os resultados experimentais [3]. Deste modo o $P_{m\acute{a}x}$ é superior em relação aos numéricos.

3.1.8 Discussão dos resultados obtidos

O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta resistência superior. Esta diferença é visível para $L_0=20$ mm, sendo $P_{m\acute{a}x}\approx 33$ KN. Quando L_0 aumenta para 40 mm, o adesivo Araldite® 2015 passa a apresentar comportamento superior, devido à plastificação que ocorre antes da rotura, tendo um aumento percentual de 43,4%, como referido anteriormente. Deste modo é possível um adesivo dúctil e frágil terem resistência similar [25]. O SikaForce® 7752 combina alta resistência com a ductilidade, a rotura

acontece à semelhança da plastificação até grandes valores de L_0 [135]. Estas juntas apresentam-se as menos resistentes.

Assim, verifica-se que o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752 são os adesivos mais dúcteis, pois apresentam aumentos percentuais elevados entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Este comportamento provoca um aumento de $P_{m\acute{a}x}$, o que origina uma melhoria do seu comportamento mecânico. Na Tabela 17 é possível observar os valores máximos. O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo frágil, a sua capacidade de plastificação é limitada. Deste modo o seu aumento percentual foi de 15,4%, levando à rotura das juntas quando as tensões nas extremidades atingem o valor limite.

Tabela 17 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0 [106].

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

Os resultados obtidos apresentam diferentes valores, dependendo das características dos adesivos. O módulo de elasticidade (E) dos adesivos está relacionado com a rigidez e influencia a distribuição de tensões. Assim, quanto menor for E , a distribuição tensões é mais uniforme [4].

No que diz respeito às tensões σ_y , na extremidade interior ocorrem picos de compressão [136]. Esta situação deve-se carregamento simétrico na junta, que evita deflexão transversal do substrato interior [30, 116]. Deste modo, ocorre uma redução das tensões σ_y [137]. Os valores de σ_y no centro são nulos, com gradientes crescentes para as extremidades de sobreposição com incremento de L_0 .

No que respeita ao perfil de tensões τ_{xy} , verificam-se picos de tensões de maior magnitude na extremidade exterior, enquanto na extremidade oposta os picos são menos preponderantes. Isto é decorrente da sollicitação a que o substrato intermédio é sujeito, que se traduz na indução de cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$ [25].

Dos três adesivos ensaiados, o Araldite® AV138 é aquele que apresenta maior valor de E . Por este motivo é que este adesivo apresenta os maiores picos de concentração de tensões, como se pode observar a partir dos perfis das tensões σ_y e τ_{xy} . Este comportamento é mais evidente para valores de L_0 elevados. Os perfis das tensões σ_y e τ_{xy} tornam-se mais constantes com a redução de L_0 , o que torna as sobreposições menores, mas dependentes da resistência do adesivo. Um adesivo frágil sofre rutura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona de ligação, enquanto os adesivos dúcteis permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, enquanto o interior da zona de ligação aumenta a sua contribuição para a resistência da junta [138].

É possível aferir que o adesivo Araldite® AV138 é o que dá à junta adesiva tubular a maior resistência mecânica. Por outro lado, é um adesivo frágil à semelhança dos gradientes de tensões σ_y . Assim verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas. A fratura ocorre quando é atingida τ_f e também devido à capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [133].

A partir do perfil de tensões τ_{xy} é fácil constatar uma boa uniformidade na distribuição de tensões, mais evidente para valores de L_0 inferiores (20 mm). Os picos de tensão gerados são muito reduzidos quando comparados com os dos outros adesivos, o que é benéfico à ligação adesiva, pois reduz a probabilidade da mesma sofrer uma rutura prematura.

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

Neste subcapítulo pretende-se aferir a validade dos resultados numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pela lei coesiva triangular, a partir da sua comparação com resultados experimentais. A Figura 64 representa os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e as previsões numéricas.

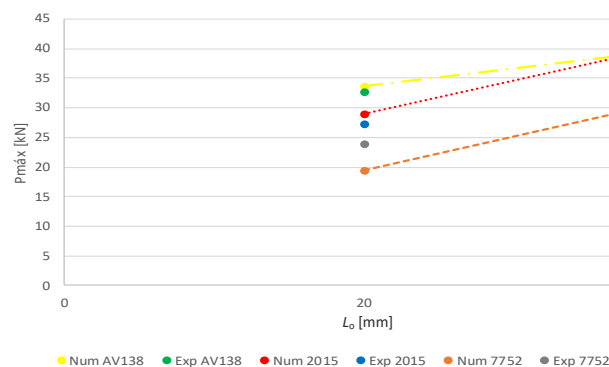


Figura 64 - $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [106].

Tabela 18 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respectiva diferença relativa [106].

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

A Figura 64 demonstra que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a $P_{m\acute{a}x}$ são muito próximos para as juntas tubulares com Araldite® AV138 e Araldite® 2015. O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta as menores diferenças relativas entre os resultados experimentais e numéricos. Para $L_0=20$ mm a diferença relativa foi de 2,4% e, para $L_0=40$ mm, de 4,7%. Os valores numéricos são ligeiramente superiores aos experimentais, contudo é uma diferença reduzida, logo os resultados são adequados. O adesivo Araldite® 2015, verifica uma diferença percentual entre $P_{m\acute{a}x}$ experimental e numéricos de 6,1% para $L_0=20$ mm. Esta discrepância é aceitável pois é muito reduzida, uma vez que $P_{m\acute{a}x}$ experimental ≈ 27 kN e $P_{m\acute{a}x}$ numérico ≈ 29 kN. Esta percentagem torna-se ainda mais reduzida para $L_0=40$ mm (2,9%). Apesar das pequenas diferenças observadas, aceitam-se os valores obtidos pelo MDC. No adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo método numérico são bastante inferiores. Isto acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [111]. Contudo alguns trabalhos de delaminação, mostram que leis coesivas pouco adequadas para um determinado material, ainda permite uma aproximação grosseira do seu comportamento [139]. A diferença de valores experimentais e MDC para o SikaForce® 7752 é de 18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3 para $L_0=40$ mm, com os valores experimentais superiores aos numéricos. Na Tabela 18 encontra-se um resumo dos valores experimentais e numéricos.

Após estas análises consideram-se os resultados numéricos obtidos válidos para serem utilizados como fonte de comparação para o estudo paramétrico que se segue.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo da dissertação procede-se ao estudo paramétrico das juntas adesivas tubulares, realizando um estudo numérico e comparando com os resultados obtidos com os valores experimentais de um colega [106]. Nas análises por MDC são utilizadas propriedades dos materiais que foram validadas anteriormente em ensaios experimentais.

Este trabalho consiste na alteração dos parâmetros geométricos das juntas adesivas tubulares e verificar, a partir das curvas $P-\delta$ e dos gradientes de tensões σ_y e τ_{xy} , as alterações na resistência das mesmas. Assim sendo, os estudos foram realizados a partir das seguintes alterações: variação comprimento de sobreposição, variação da espessura dos aderentes, pressão interior e do tipo de adesivo.

3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica consiste no MEF, de tal forma que foi utilizado um *software* de apoio a esta análise. O *software* utilizado é o ABAQUS®. Este programa possui uma elevada capacidade de trabalho em diversas áreas da adesão, permitindo a utilização de MDC para previsão da resistência das juntas.

A análise de MEF passa pela utilização de elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós, para a modelação dos substratos, e elementos coesivos axissimétricos, para a camada de adesivo. O modelo de dano coesivo utilizado é o modelo de dano triangular. Deste modo foram definidos o substrato e o adesivo.

Os parâmetros geométricos, como a definição da junta, bem como os valores, são atribuídos no progresso da análise. Contudo, estes parâmetros serão explicados no capítulo seguinte com maior profundidade.

Os parâmetros de computação da simulação são introduzidos, desta forma serão descritos os incrementos utilizados e o respetivo tamanho. Assim, de forma a evitar paragens da análise por exceder o número de incrementos permitido, considera-se um valor de 10000 para um número máximo de incrementos a realizar a análise. Quanto ao tamanho inicial do incremento, considerou-se um incremento com 1% do deslocamento aplicado nos modelos. O tamanho máximo do incremento foi definido 1% do deslocamento aplicado. Quanto ao tamanho mínimo do incremento, foi considerado um valor muito reduzido de forma a evitar problemas de convergência associados.

De modo a simular os carregamentos a que a junta estava submetida foram atribuídas condições fronteira. Deste modo foi aplicado um encastramento numa das extremidades do substrato enquanto na outra é aplicado um deslocamento vertical e

uma restrição horizontal à secção. Foi distribuída numa das laterais em estudo uma força uniforme, a qual irá representar a pressão interior aplicada na junta.

No que diz respeito à *mesh*, é o parâmetro em que se descreve a geometria em elementos finitos. De tal modo as zonas onde ocorrem maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinado possível. Na junta adesiva, a malha é mais refinada na zona da camada adesiva e nas suas extremidades.

3.2.2 Condições estudadas

Nesta secção da dissertação é realizada a análise das juntas e do seu comportamento em função das tensões instaladas para os parâmetros em estudo. Assim sendo, foram considerados os seguintes parâmetros: Comprimento de sobreposição (L_0), com os valores 10, 20, 30 e 40 mm. A espessura dos substratos, variou de 0.5 mm a 2 mm. A pressão interior na junta variou de 0.1 a 25 MPa. Os diferentes tipos de adesivo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752), também são um fator que variou, pois estes apresentam comportamentos diferentes quando sujeitos a esforços.

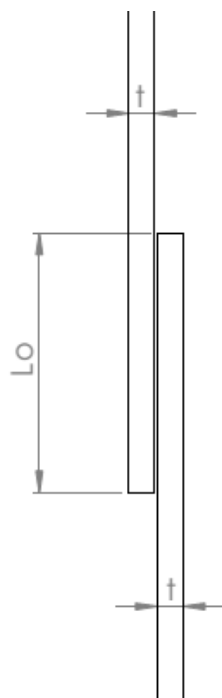


Figura 65 – Esquema do comprimento sobreposição (L_0) e espessura substrato (t)

3.2.3 Análise de tensões na junta

Neste capítulo é realizada a comparação da distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e das tensões de corte (τ_{xy}), para as juntas adesivas tubulares. Estas análises serão obtidas através de modelos numéricos gerados no programa ABAQUS®. Considera-se diferentes valores de comprimento de sobreposição (L_o), de espessura (t), e de pressão, com o objetivo de compreender como é que estes parâmetros influenciam o comportamento das juntas/tensões.

Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , que representa o valor médio de τ_{xy} , na ligação adesiva para cada valor de L_o . As distribuições das tensões σ_y e τ_{xy} são apresentadas em função de x/L_o ($0 \leq x \leq L_o$).

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

Neste capítulo serão abordadas as distribuições das tensões σ_y , para as juntas adesivas tubulares, sujeitas a várias condições como referido anteriormente noutros capítulos. Os gráficos serão apresentados por grupos, ou seja, são apresentados gráficos com as mesmas condições variando apenas um parâmetro. Em geral estas tensões possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , com exceção das extremidades da ligação da junta, nas quais ocorrem singularidades [126, 127]. No interior da região com camada adesiva, criam-se tensões de compressão e nas extremidades de tração, devido à deformação transversal da junta. As tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura prematura [128, 134]. Estas tensões são aproximadamente nulas na região central, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de L_o .

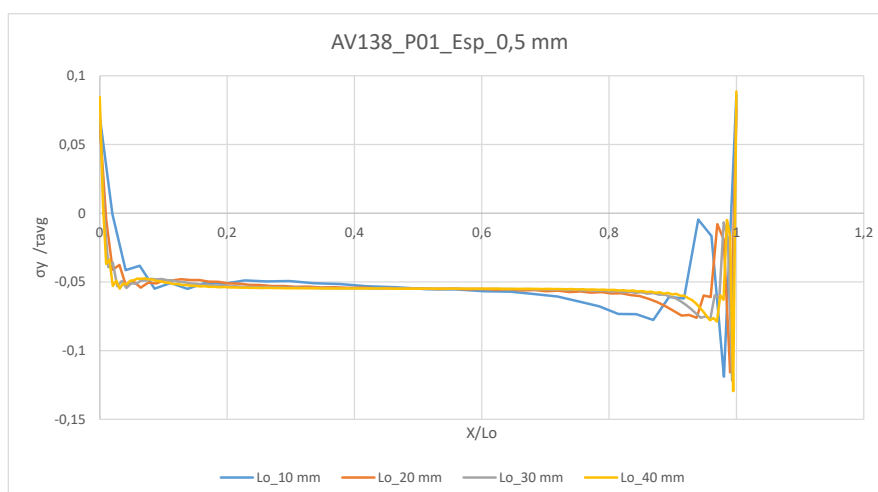


Figura 66 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.

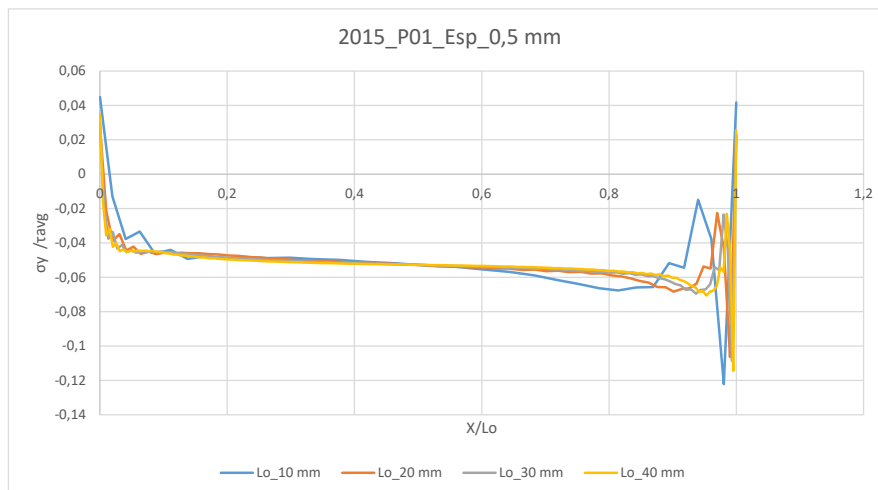


Figura 67 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.

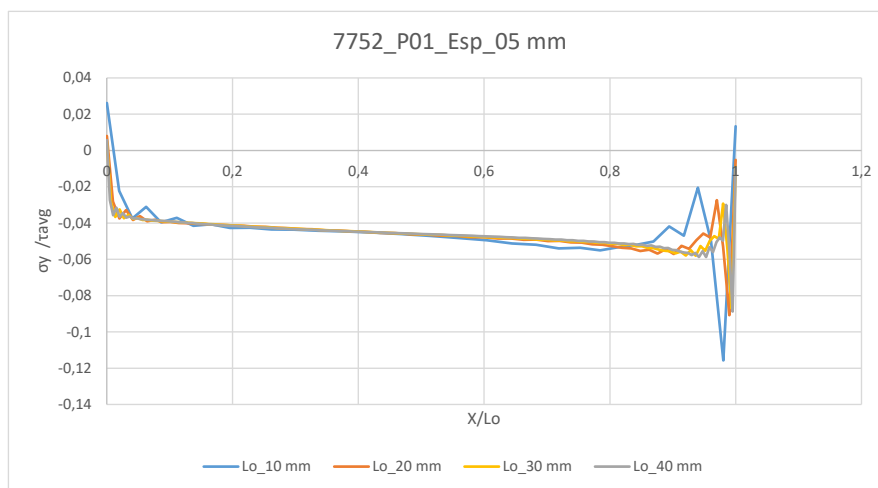


Figura 68 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.

Os gráficos apresentados Figura 68, Figura 67, e Figura 68 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para valor de pressão 0,1 MPa e espessura de 0,5 mm.

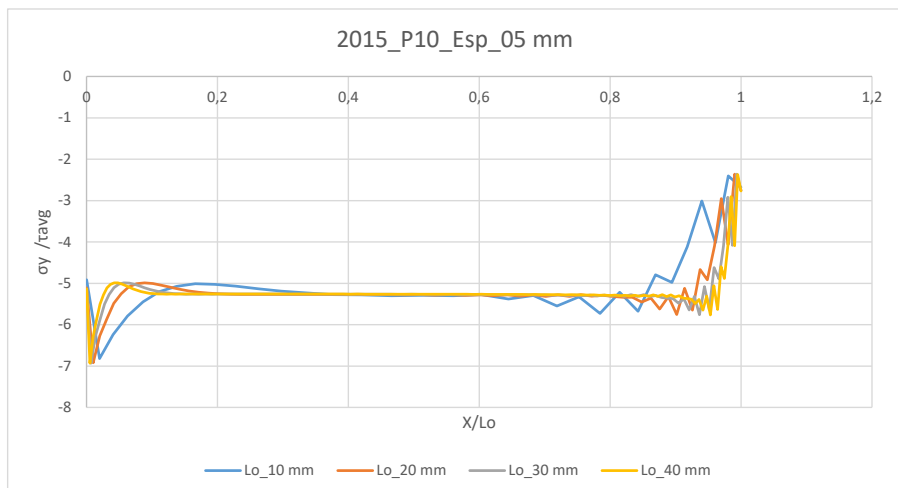


Figura 69 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.

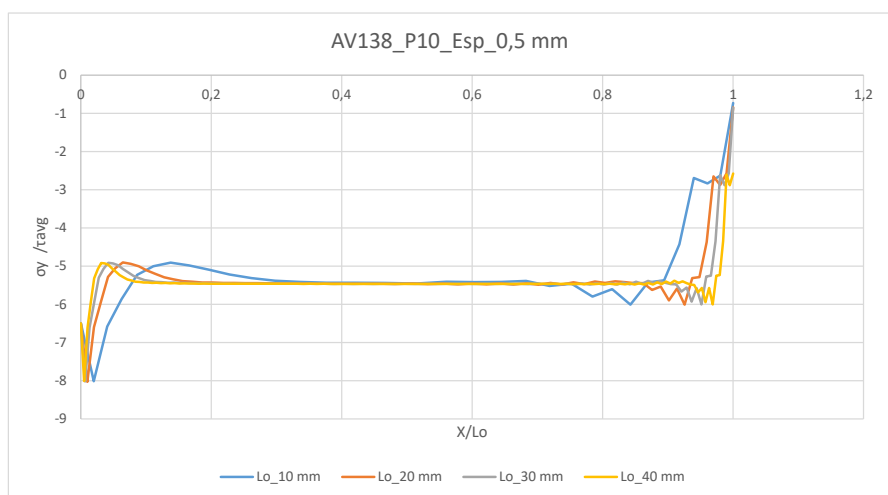


Figura 70 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.

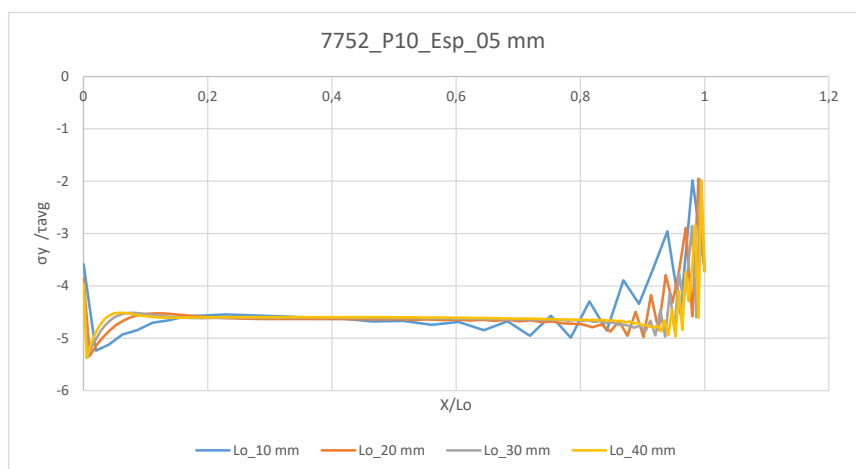


Figura 71 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.

Os gráficos apresentados nas Figura 69, Figura 70 e Figura 71 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 10 MPa e espessura de 0,5 mm.

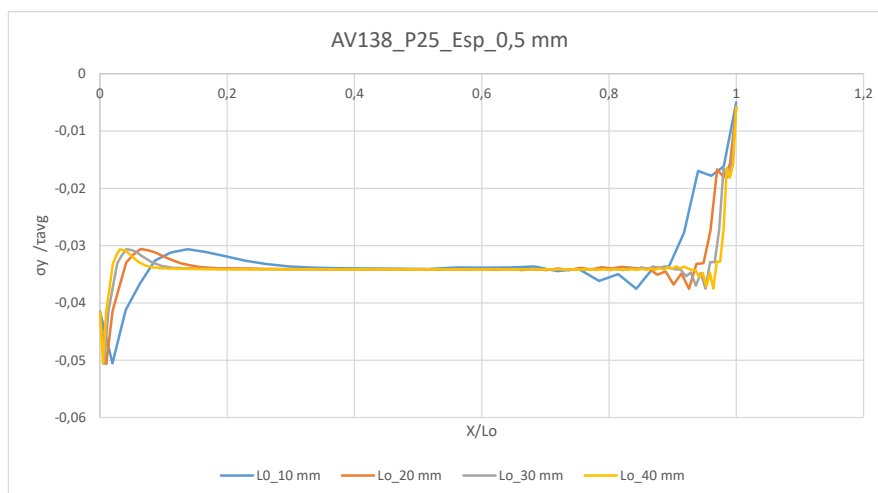


Figura 72 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.

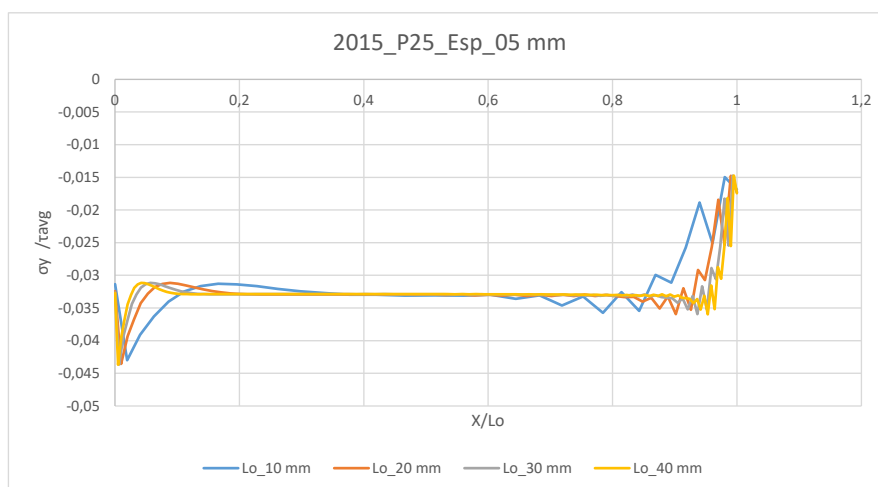


Figura 73 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.

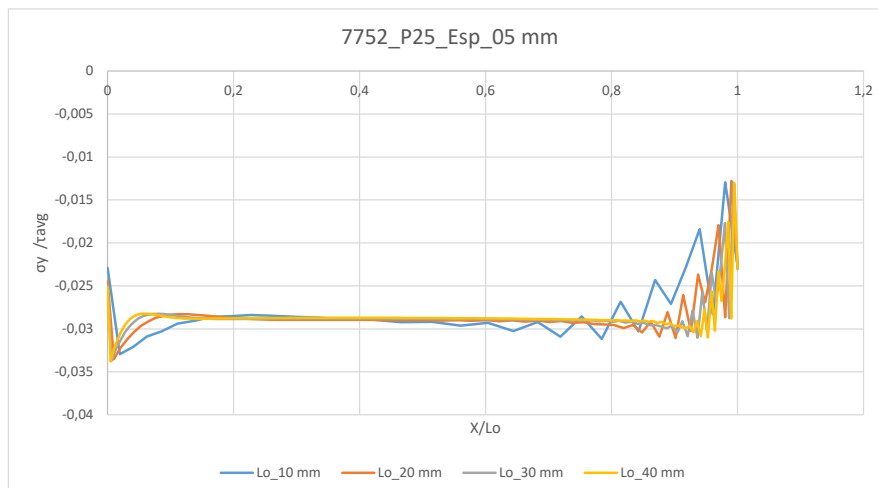


Figura 74 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.

Os gráficos apresentados nas Figura 72, Figura 73 e Figura 74 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_o e para o valor de pressão 25 MPa e espessura de 0,5 mm.

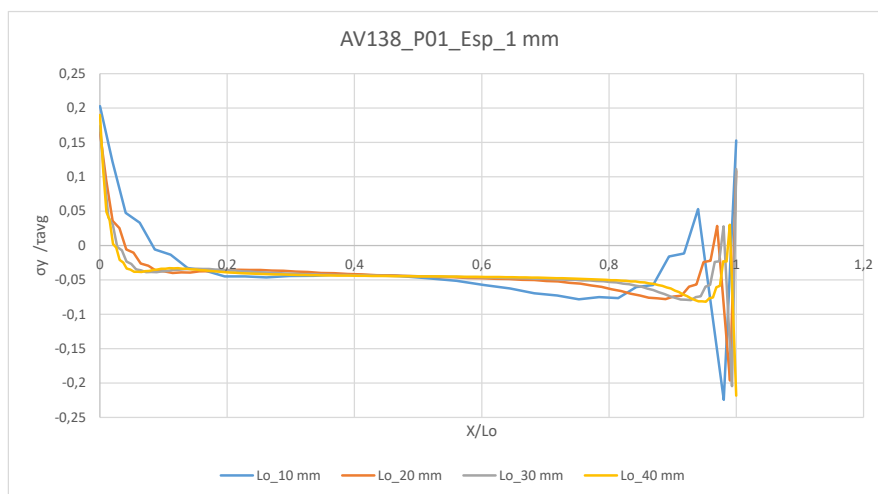


Figura 75 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.

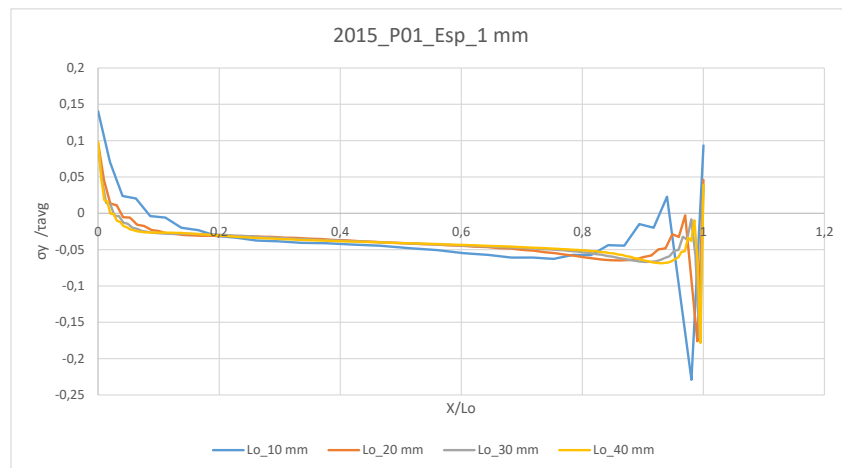


Figura 76 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.

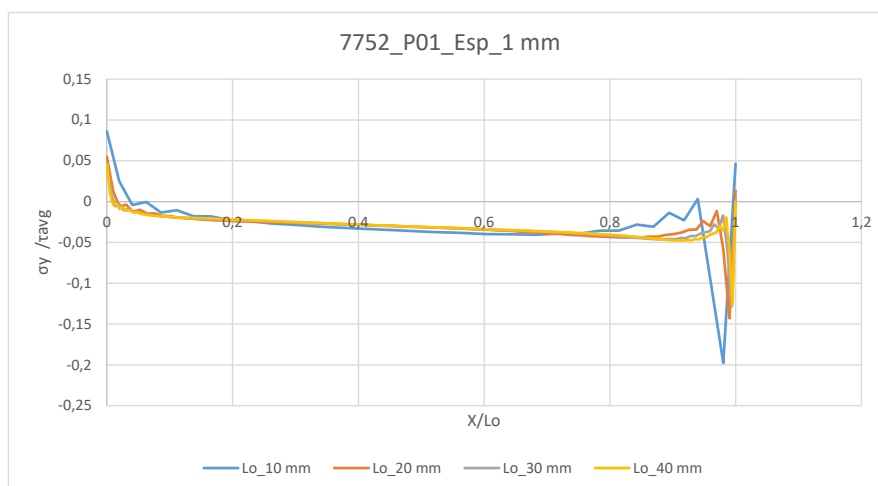


Figura 77 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.

Os gráficos apresentados nas Figura 75, Figura 76 e Figura 77 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 0,1 MPa e espessura de 1 mm.

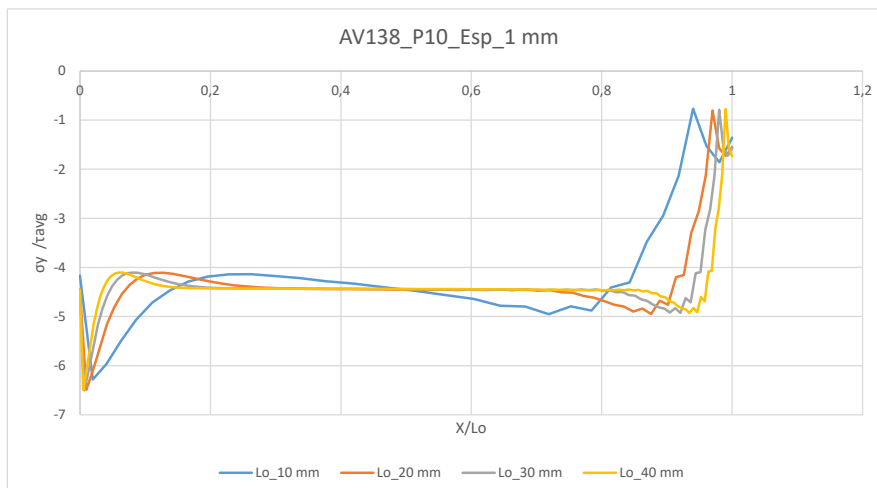


Figura 78 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 10 MPa e espessura 1 mm.

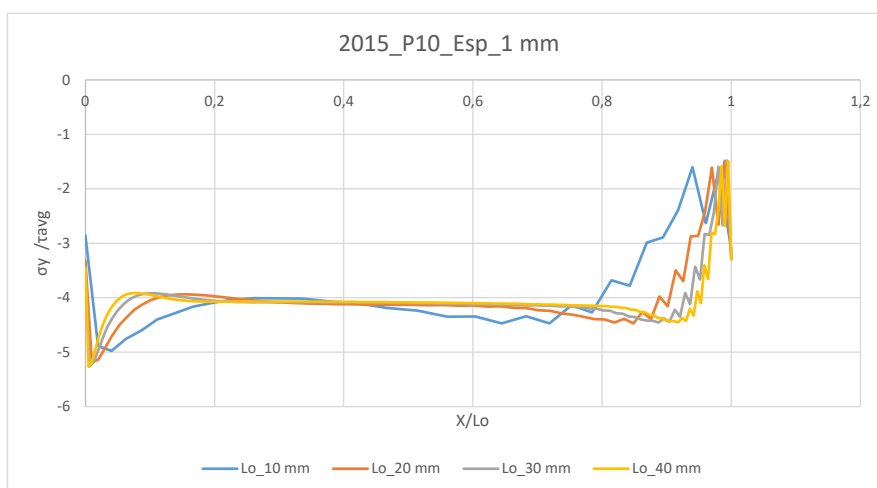


Figura 79 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 10 MPa e espessura 1 mm.

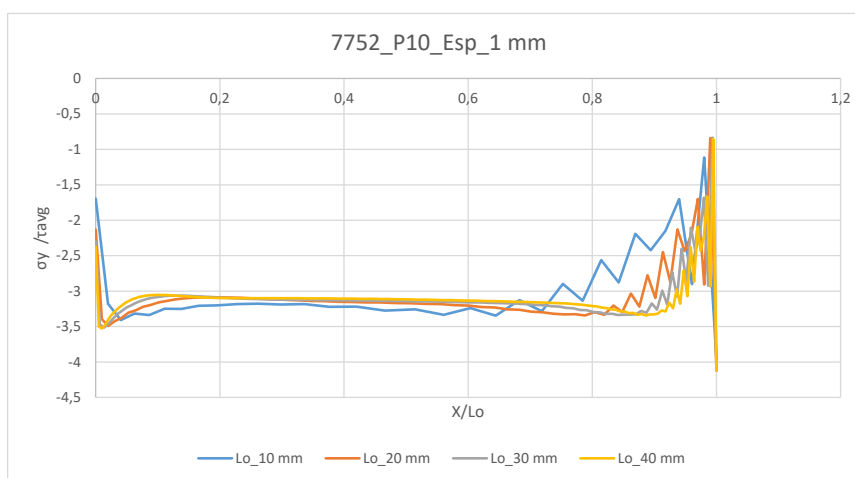


Figura 80 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 10 MPa e espessura 1 mm.

Os gráficos apresentados nas Figura 78, Figura 79 e Figura 80 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 10 MPa e espessura de 1 mm.

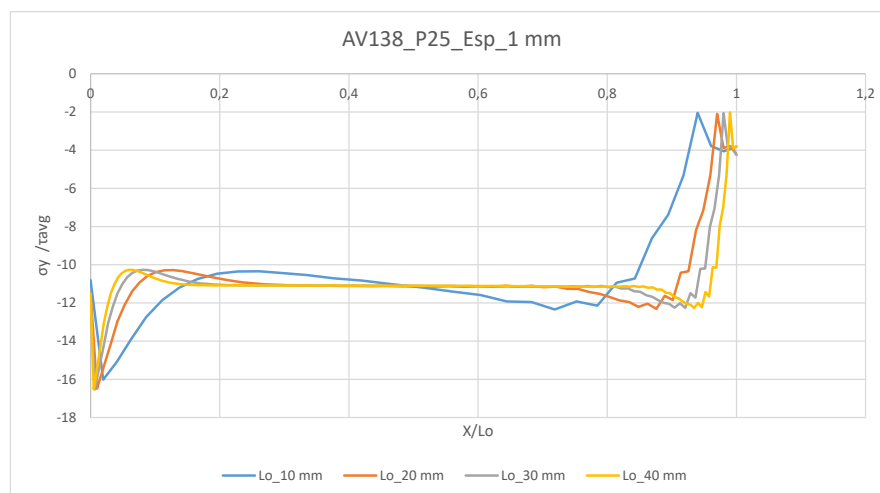


Figura 81 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 25 MPa e espessura 1 mm.

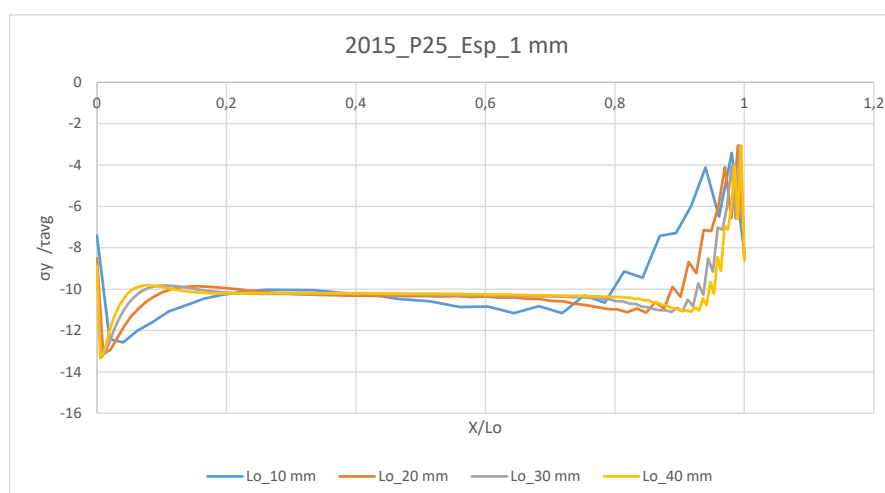


Figura 82 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 25 MPa e espessura 1 mm.

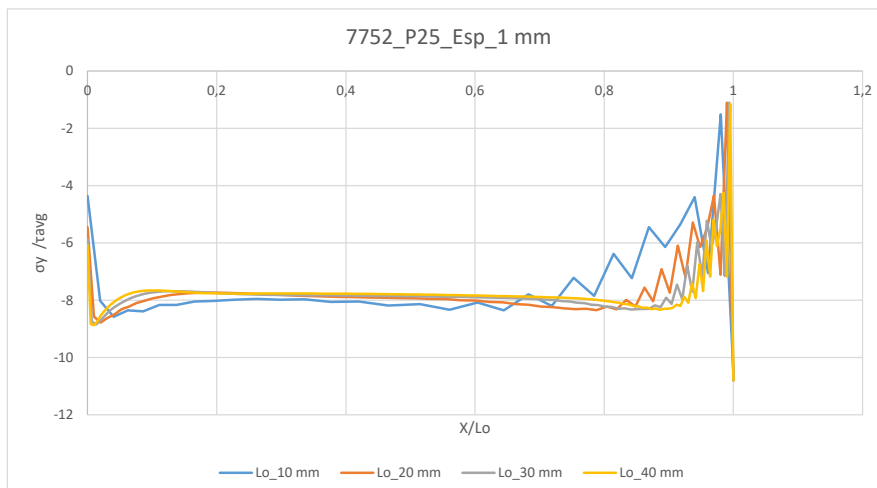


Figura 83 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 25 MPa e espessura 1 mm.

Os gráficos apresentados nas Figura 81, Figura 82 e Figura 83 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 25 MPa e espessura de 1 mm.

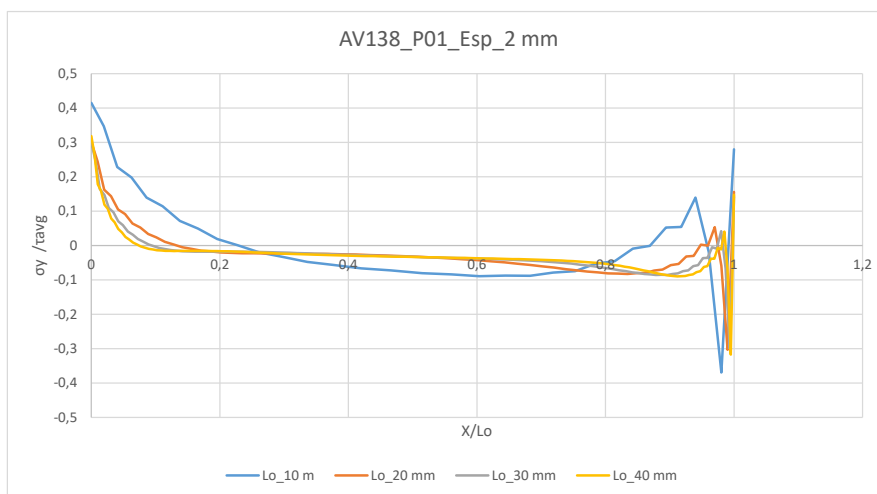


Figura 84 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.

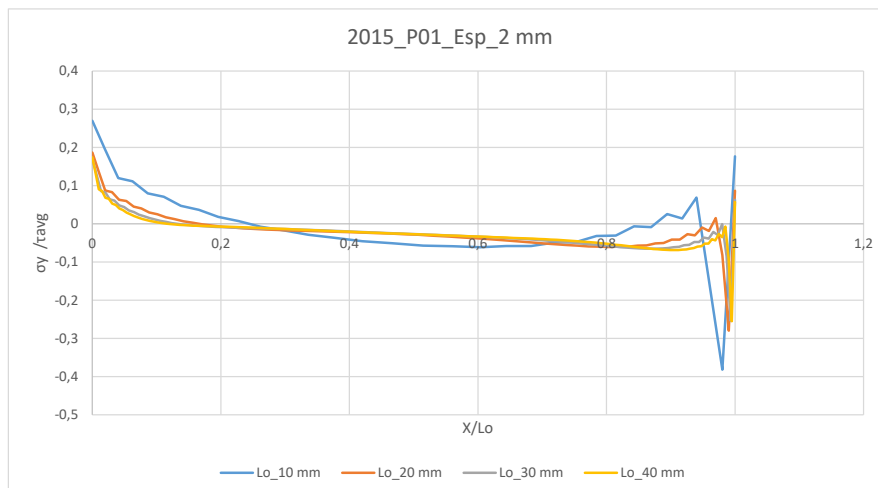


Figura 85 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.

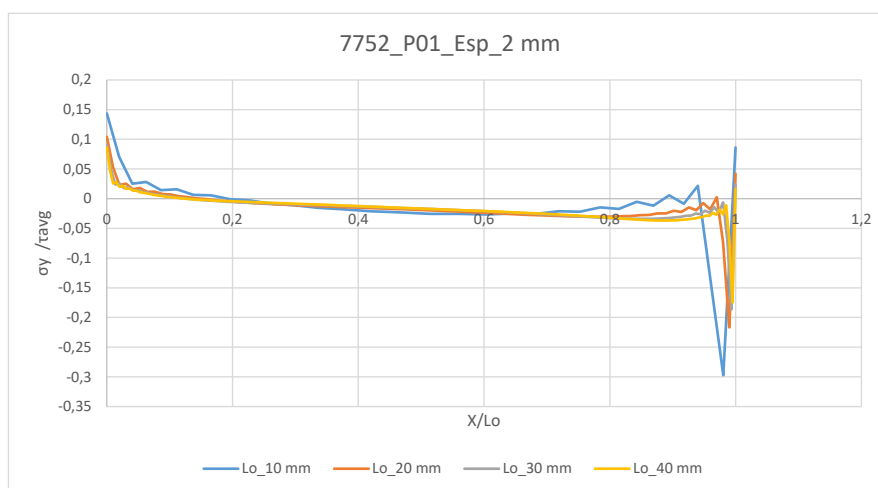


Figura 86 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm

Os gráficos apresentados nas Figura 84, Figura 85 e Figura 86 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 0,1 MPa e espessura de 2 mm.

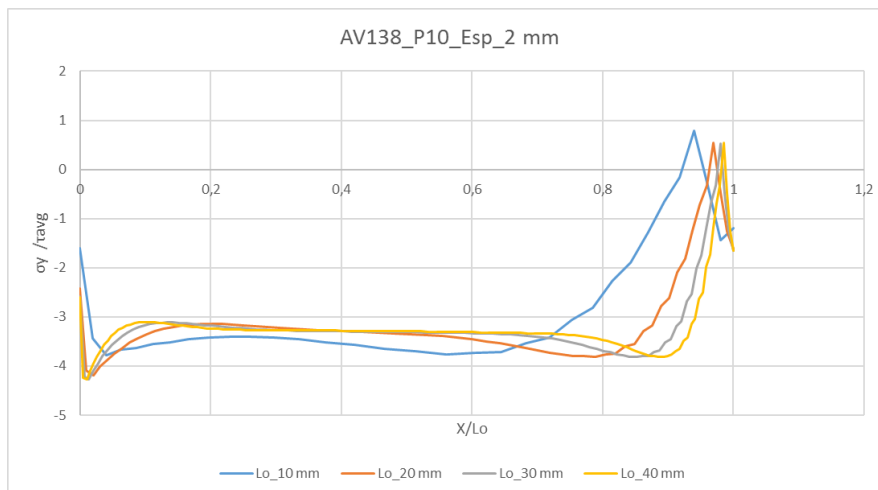


Figura 87 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 10 MPa e espessura 2 mm.

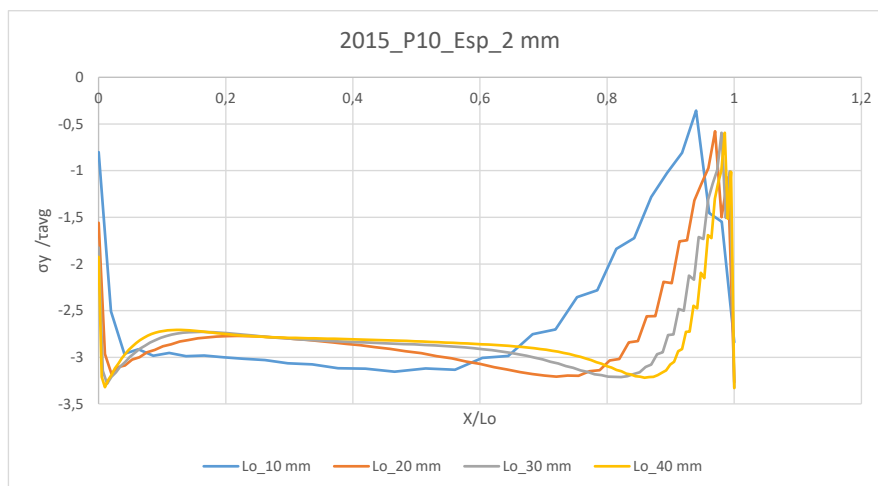


Figura 88 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 10 MPa e espessura 2 mm.

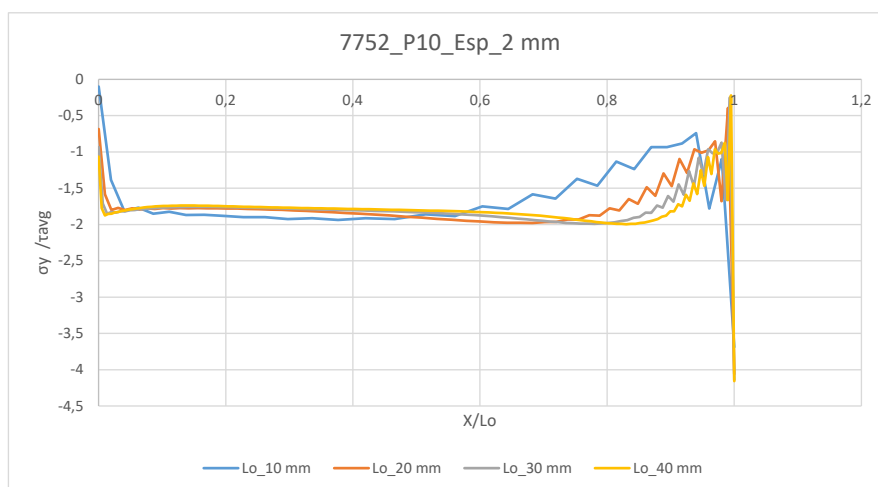


Figura 89 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 10 MPa e espessura 2 mm.

Os gráficos apresentados nas Figura 87, Figura 88 e Figura 89 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 10 MPa e espessura de 2 mm.

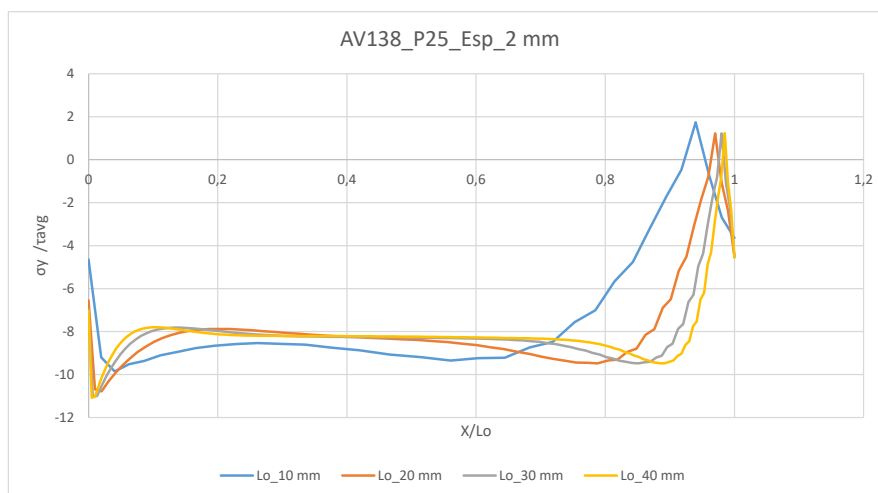


Figura 90 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® AV138, pressão 25 MPa e espessura 2 mm.

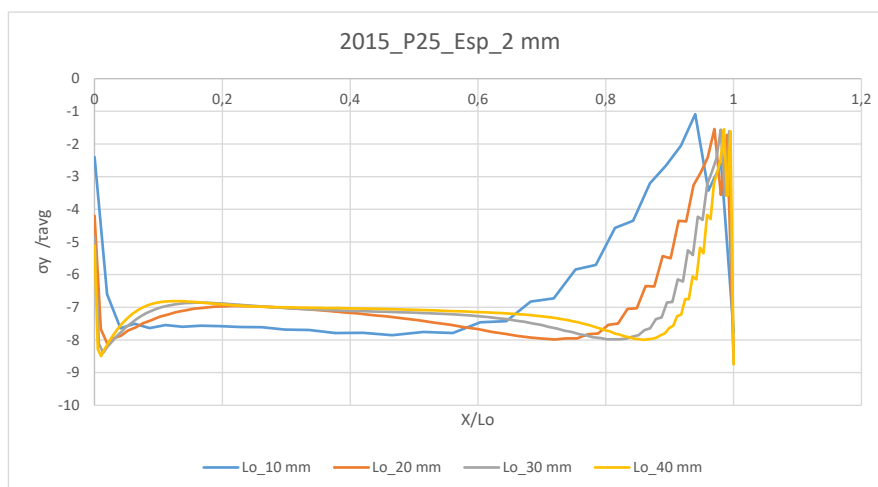


Figura 91 - Tensões de arrancamento, para adesivo Araldite® 2015, pressão 25 MPa e espessura 2 mm.

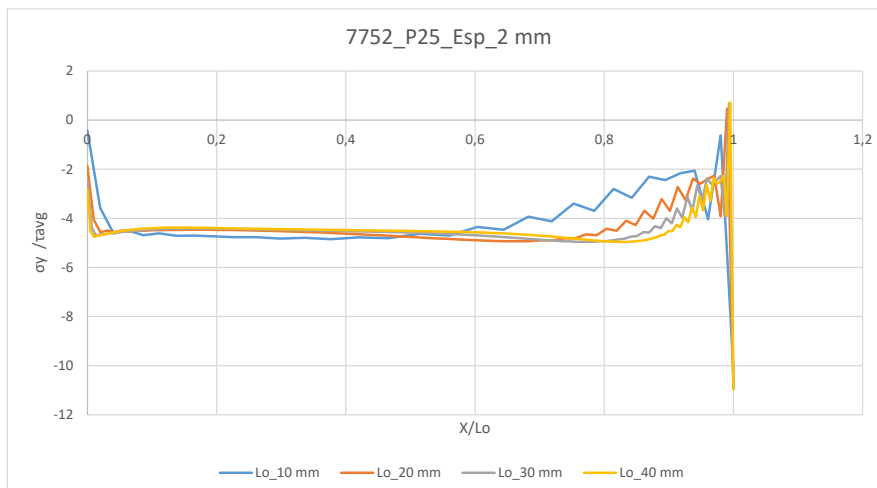


Figura 92 - Tensões de arrancamento, para adesivo SikaForce® 7752, pressão 25 MPa e espessura 2 mm.

Os gráficos apresentados nas Figura 90, Figura 91 e Figura 92 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 10 MPa e espessura de 2 mm.

Os gráficos apresentados para as diversas condições geométricas revelam que, para os mais elevados valores de L_0 , observam-se picos, que aumentam a magnitude com o L_0 . As tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo, são menos significativas. As extremidades da zona com adesivo são bastante importantes, já o centro da junta de sobreposição praticamente não contribui para a resistência da junta. Esta tendência tende a parar a propagação de dano, após dano localizado nas zonas de singularidades [26], o que justifica algumas vezes o valor de $P_{\text{máx}}$ ser obtido após iniciação da fenda [129]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 deve reduzir a resistência média das juntas na área de ligação, principalmente para juntas com adesivos frágeis [131].

Os gráficos apresentados permitem verificar as tensões de arrancamento a diversas condições. Assim, será efetuada uma análise dos gráficos de acordo com a divisão apresentada.

O primeiro caso a ser analisado corresponde aos três adesivos submetidos a uma pressão de 0,1 MPa e para a espessura de 0,5 mm. Nesta situação consegue-se verificar, através da Figura 66, Figura 67 e Figura 68, que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta valores de pico mais elevados, por apresentar uma maior rigidez. É possível também observar que este adesivo possui gradientes mais elevados nas proximidades de $X/L_0=0$ e $X/L_0=1$, que corresponde às extremidades de L_0 , na junta com camada de adesivo. A Araldite® AV138 é o adesivo que possui uma rigidez mais elevada, o que origina estas concentrações de tensões mais elevadas, que por consequência podem encaminhar à rotura prematura da junta. O adesivo SikaForce®

7752, como esperado, apresenta os valores de concentração de tensões mais reduzidas. Estes valores são os esperados, pois este adesivo é um tipo de adesivo flexível, como é possível observar no gráfico da Figura 68.

A segunda condição, Figura 69, Figura 70 e Figura 71, traduz-se no aumento do valor da pressão a que as juntas foram submetidas, ou seja, as juntas passaram de uma pressão de 0,1 MPa para 10 MPa. Nestas condições os resultados obtidos foram idênticos à condição anterior, mas com calores de tensão mais elevados. Ao longo dos gráficos realizados consegue-se visualizar que os valores de tensão (σ_y/τ_{avg}), apresentam valores negativos, o que significa que a junta está a sofrer esforços de compressão.

Na terceira condição Figura 72, Figura 73 e Figura 74 volta-se a aumentar a pressão, sendo esta agora de 25 MPa. Ocorre a mesma situação exposta anteriormente, contudo os valores de tensão são mais reduzidos, sendo que se poderia esperar que os mesmos aumentassem. Contudo, para esta situação em particular, os valores são inferiores porque ocorre a plastificação do substrato no início da simulação, sendo a junta só submetida a esforços de pressão interior, não ocorrendo a segunda etapa do esforço de tração.

A quarta condição consiste em simular os três adesivos diferentes, às pressões analisadas anteriormente, mas aumentando a espessura do substrato para 1 mm (Figura 75, Figura 76 e Figura 77). A primeira análise será para a pressão a 0,1 MPa e com 1 mm de espessura. Os valores para o adesivo Araldite® AV138, são igualmente os mais elevados de pico de tensão quando comparado com os outros adesivos, para as mesmas condições. Os maiores picos de tensão encontram-se nas extremidades da junta de sobreposição, para $X/L_o=0$ e $X/L_o=1$. A zona central da camada com adesivo não afeta significativamente a resistência da junta. O SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os menores valores de σ_y/τ_{avg} . Este resultado mostra-se lógico e satisfatório pois este adesivo é o que apresenta menor rigidez.

No que diz respeito à quinta condição, esta é similar à condição imposta anteriormente (quarta condição), mas com diferença no valor da pressão que aumentou para 10 MPa. Os resultados apresentados nos gráficos da Figura 78, Figura 79 e Figura 80 revelam que ocorrem variações idênticas à condição anterior. Contudo os valores da tensão (σ_y/τ_{avg}) aumentam.

O que ocorre na sexta condição é igual à condição anterior, com exceção da pressão utilizada ser 25 MPa. Contudo as conclusões obtidas são as mesmas, apresentando valores de tensão ainda assim superiores aos da condição anterior.

O sétimo caso a ser analisado traduz-se nas seguintes condições: análise dos três adesivos diferentes, submetidos a uma pressão de 0,1 MPa e a uma espessura de substrato de 2 mm. A Figura 84, Figura 85 e Figura 86 permite visualizar a situação que

está a ocorrer para as condições referidas. Como nos casos anteriores, esta condição apresenta resultados muito semelhantes aos referidos anteriormente. É possível observar que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta valores de pico mais elevados, resultado de uma maior rigidez. Nas extremidades de L_0 é onde se visualiza um gradiente mais elevado. Como a Araldite® AV138 é o adesivo que possui uma rigidez mais elevada, este apresenta concentração de tensões elevadas, podendo levar à rotura prematura da junta. O adesivo SikaForce® 7752, como esperado, apresenta os valores de concentração de tensões reduzidas, devido a ser um adesivo flexível.

Na oitava e nona condições, apresentam-se resultados semelhantes à condição referida anteriormente. Contudo estas duas condições apresentam uma alteração nas condições da análise, sendo uma submetida a uma pressão de 10 MPa e a outra a 25 MPa. A única diferença obtida através da análise dos gráficos é o valor das tensões. De facto, quando aumentada a pressão em estudo, maior irão ser os valores obtidos de tensão.

Na Tabela 19, Tabela 20 e Tabela 21 encontram-se os valores máximos absolutos das tensões de arrancamento. Estes valores são apresentados em função do comprimento de sobreposição, espessura, pressão interior e do tipo de adesivo.

Tabela 19 – Valores máximos de tensão de arrancamento absoluto para pressão 0,1 MPa.

L_0/t	AV138				2015				7752		
	0,5	1	2	t	0,5	1	2	t	0,5	1	2
10	0,119	0,224	0,415		0,122	0,229	0,382		0,116	0,198	0,297
20	0,116	0,196	0,303		0,106	0,176	0,280		0,091	0,143	0,217
30	0,122	0,204	0,301		0,109	0,172	0,255		0,087	0,128	0,186
40	0,129	0,218	0,319		0,114	0,179	0,255		0,089	0,126	0,175

Tabela 20 - Valores máximos de tensão de arrancamento absoluto para pressão 10 MPa.

L_o/t	AV138				2015				7752		
	0,5	1	2	t	0,5	1	2	t	0,5	1	2
10	8,011	6,283	3,775		6,819	4,979	3,154		5,236	3,950	3,688
20	8,026	6,491	4,183		6,919	5,188	3,267		5,335	4,110	4,060
30	8,018	6,504	4,269		6,930	5,255	3,323		5,365	4,123	4,138
40	8,009	6,493	4,277		6,928	5,270	3,331		5,375	4,121	4,157

Tabela 21 - Valores máximos de tensão de arrancamento absoluto para pressão 25 MPa.

L_o/t	AV138				2015				7752		
	0,5	1	2	t	0,5	1	2	t	0,5	1	2
10	0,051	16,012	9,856		0,043	12,573	7,856		0,033	10,526	10,177
20	0,051	16,491	10,776		0,044	13,133	8,632		0,034	10,787	10,805
30	0,051	16,534	11,018		0,044	13,302	8,730		0,034	10,804	10,930
40	0,051	16,526	11,075		0,044	13,345	8,740		0,034	10,802	10,958

3.2.3.2 Tensões de corte

Neste capítulo são estudadas as tensões τ_{xy} e a respetiva influência da variação dos parâmetros: comprimento sobreposição (L_o), espessura (t), pressão interior (P) e o adesivo utilizado.

Como a distribuição de tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} demonstra valores reduzidos na região central de L_o e atinge o máximo nas extremidades da sobreposição [131, 132]. Isto deve-se à deformação diferencial de cada tubo ao longo da sobreposição, que é nula na extremidade livre e aumenta progressivamente até extremidade oposta [35, 93, 133]. Na região central estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta.

Estes gradientes de tensão aumentam com L_o , devido gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos, causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas com adesivos frágeis, a resistência é afetada pelo facto de as tensões não permitirem plastificação nas extremidades de sobreposição [133]. No que diz respeito aos adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nessas regiões, enquanto a região interna de sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes, o que leva a um aumento da resistência da junta [134, 135].

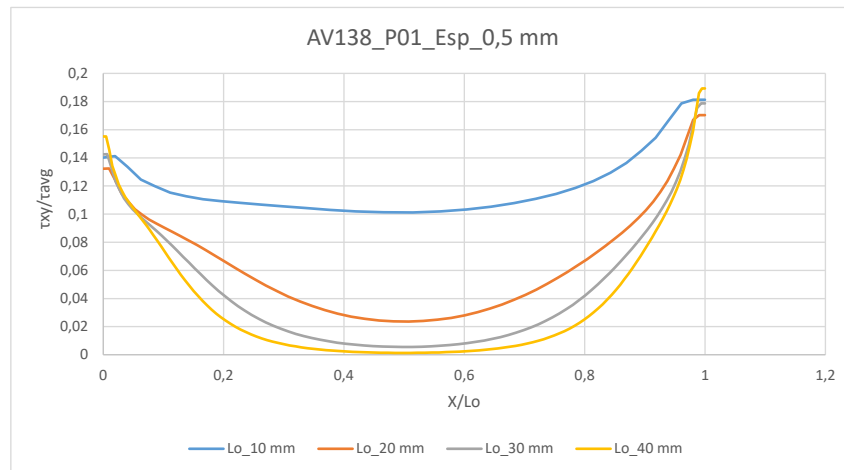


Figura 93 – Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.

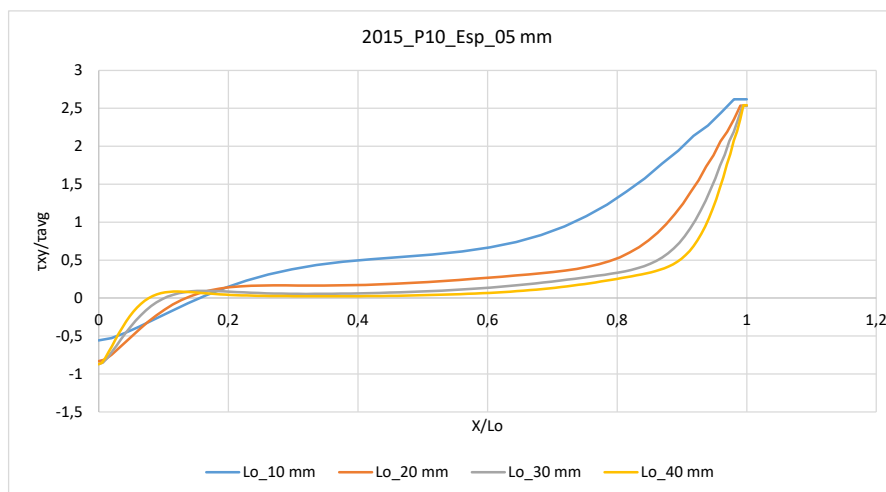


Figura 94 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.

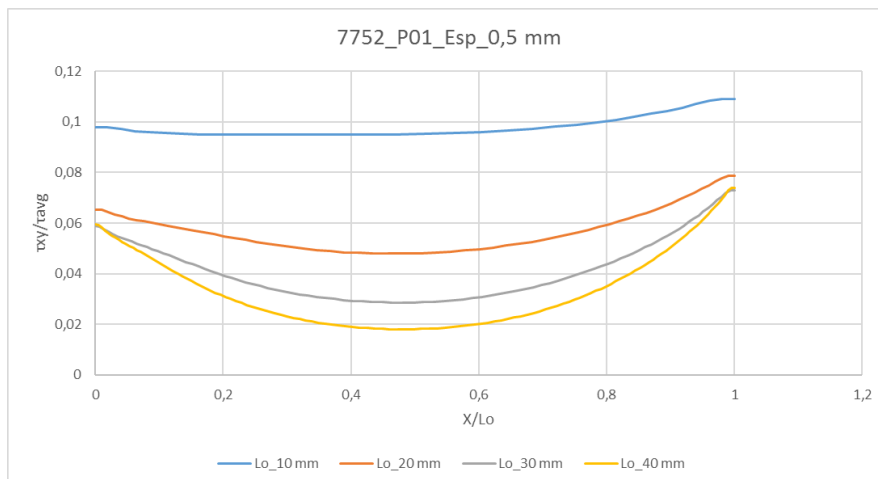


Figura 95 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 0,1 MPa e espessura 0,5 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 93, Figura 94 e Figura 95, correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 0,1 MPa e espessura de 0,5 mm.

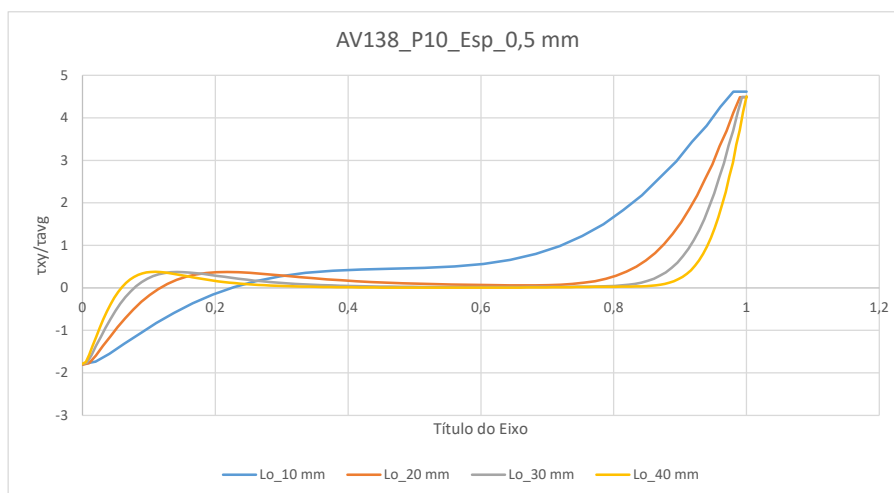


Figura 96 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.

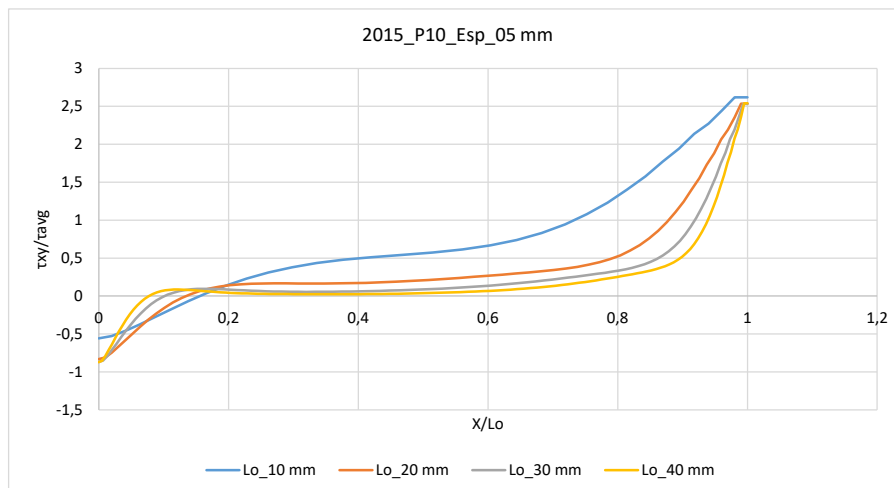


Figura 97 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.

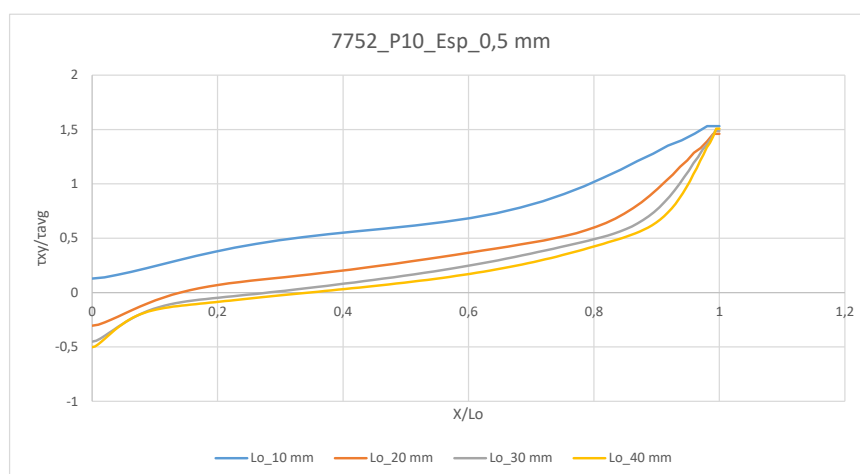


Figura 98 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 10 MPa e espessura 0,5 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 96, Figura 97 e Figura 98 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 10 MPa e espessura de 0,5 mm.

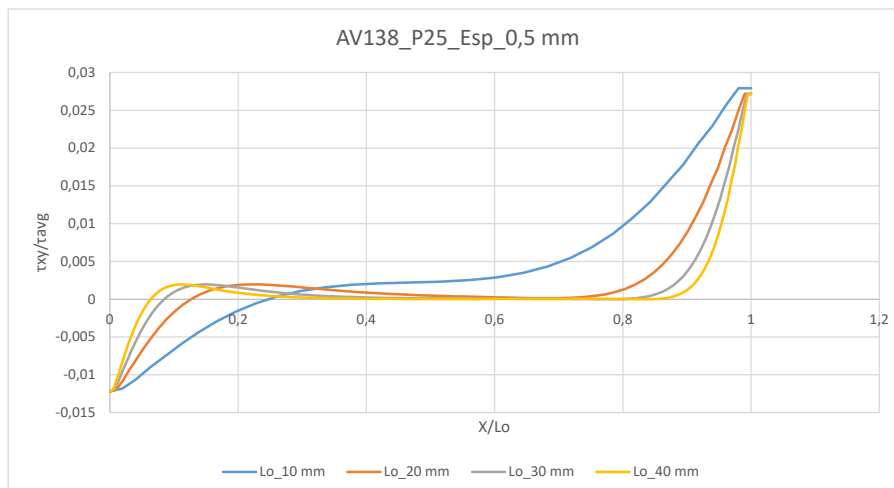


Figura 99 - Tensões de corte adeseivo Araldite® AV138, para pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.

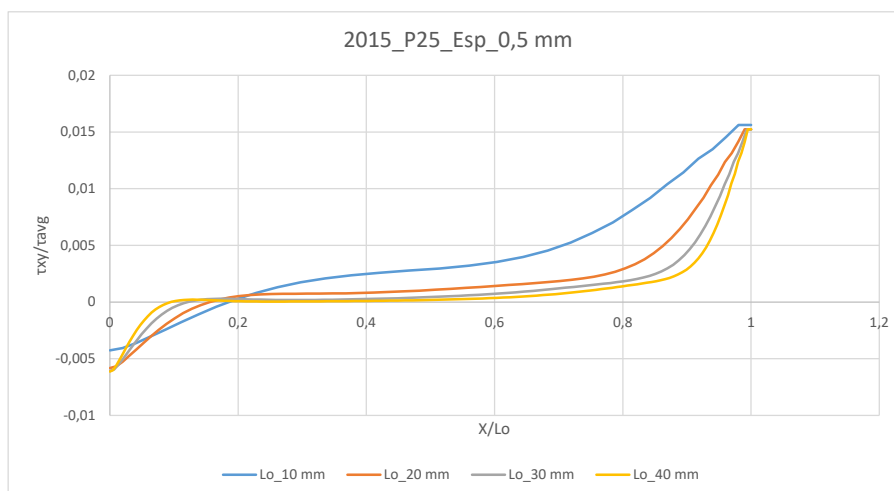


Figura 100 - Tensões de corte adeseivo Araldite® 2015, para pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.

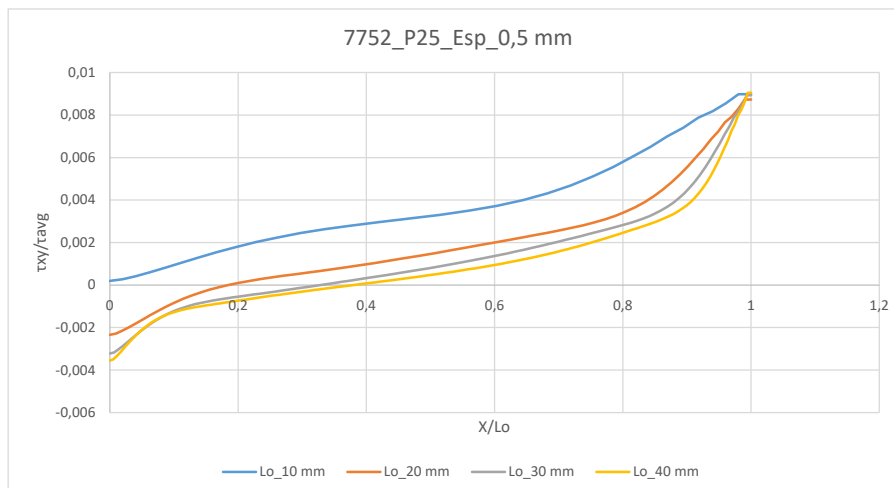


Figura 101 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 25 MPa e espessura 0,5 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 99, Figura 100 e Figura 101 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 25 MPa e espessura de 0,5 mm.

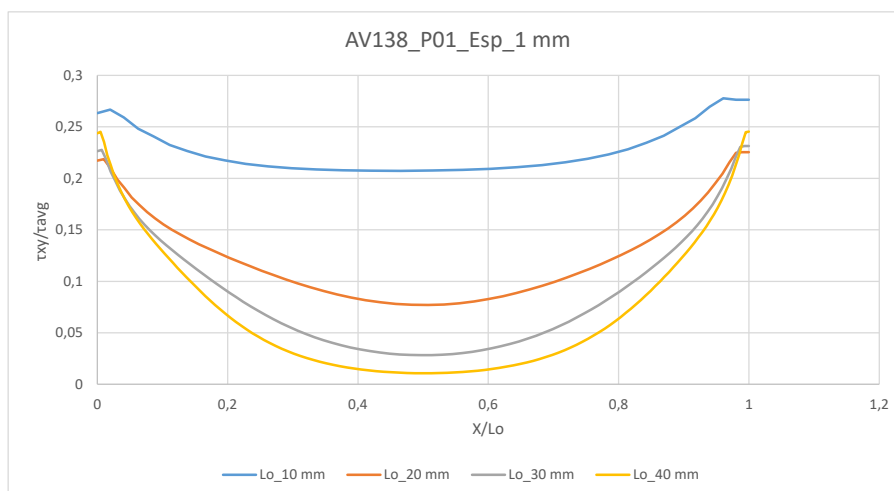


Figura 102 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.

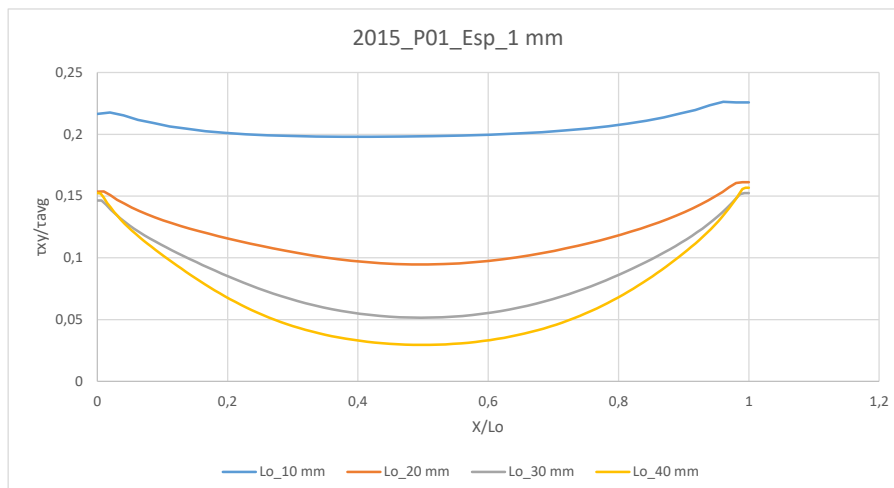


Figura 103 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.

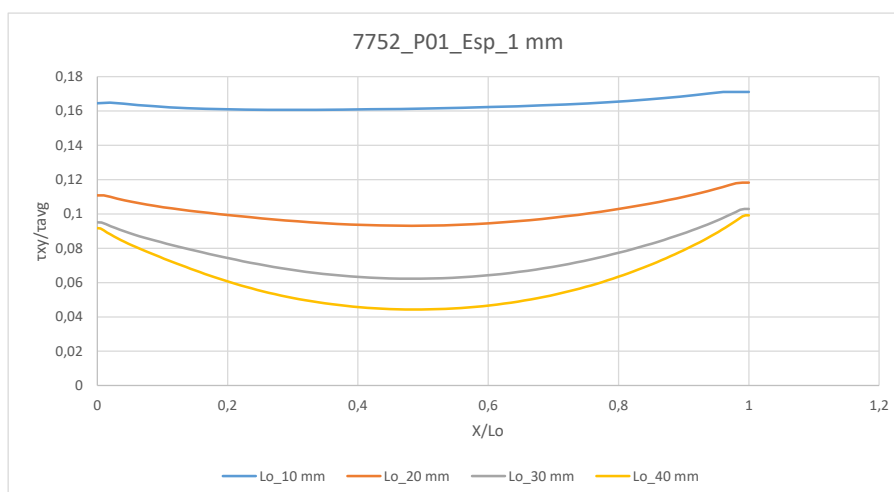


Figura 104 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 0,1 MPa e espessura 1 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 102, Figura 103 e Figura 104 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 0,1 MPa e espessura de 1 mm.

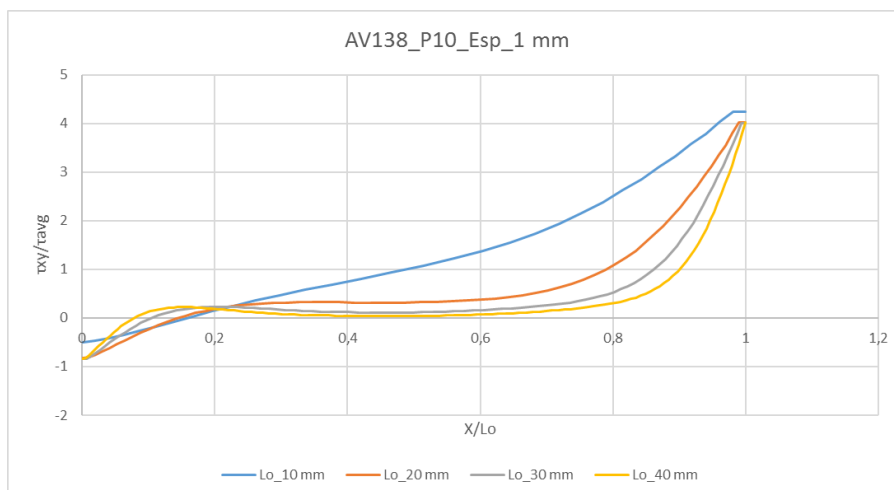


Figura 105 - Tensões de corte adeseivo Araldite® AV138, para pressão 10 MPa e espessura 1 mm.

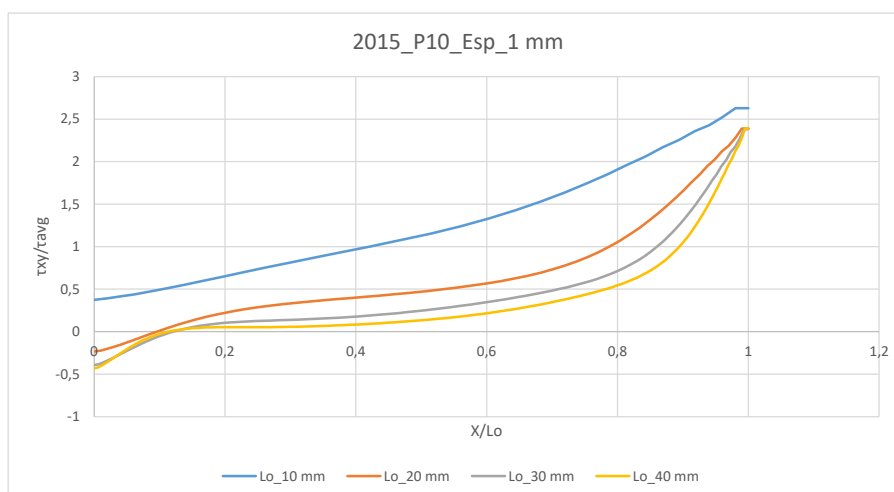


Figura 106 - Tensões de corte adeseivo Araldite® 2015, para pressão 10 MPa e espessura 1 mm.

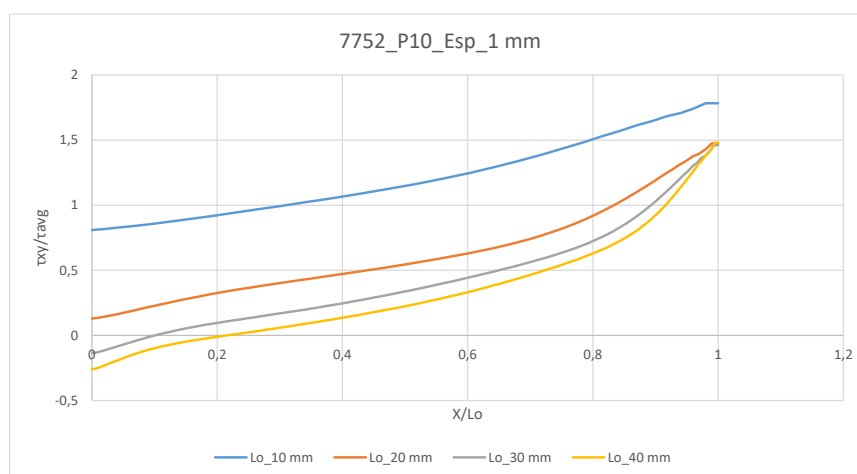


Figura 107 - Tensões de corte adeseivo SikaForce® 7752, para pressão 10 MPa e espessura 1 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 105, Figura 106 e Figura 107 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 10 MPa e espessura de 1 mm.

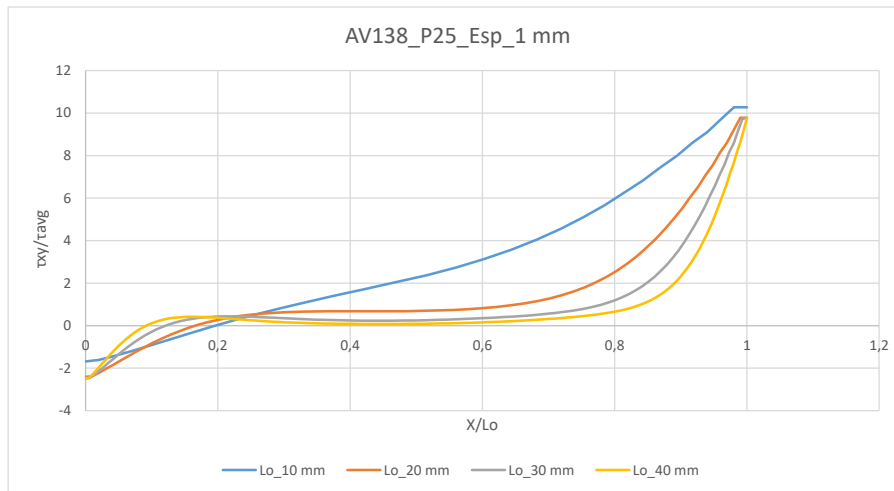


Figura 108 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 25 MPa e espessura 1 mm.

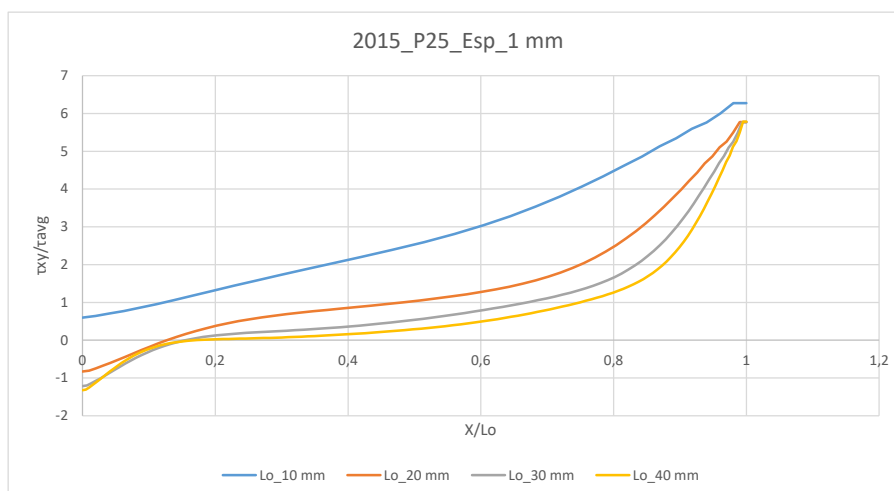


Figura 109 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 25 MPa e espessura 1 mm.

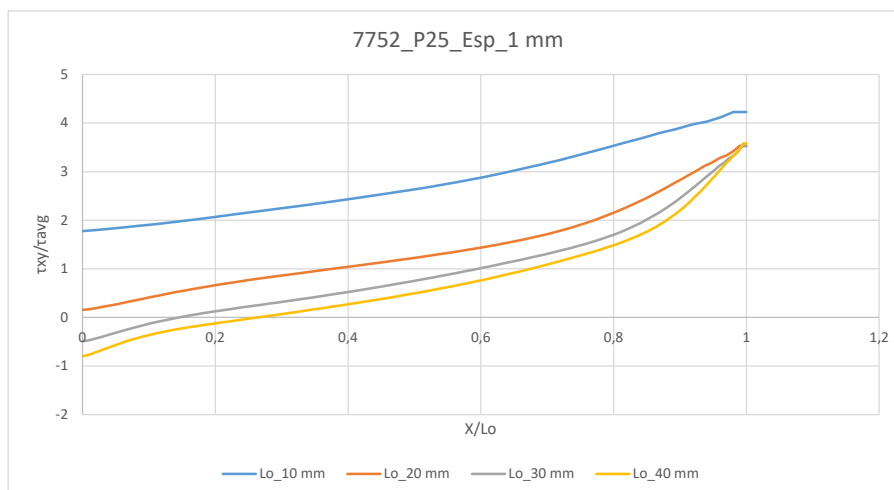


Figura 110 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 25 MPa e espessura 1 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 108, Figura 109 e Figura 110 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 25 MPa e espessura de 1 mm.

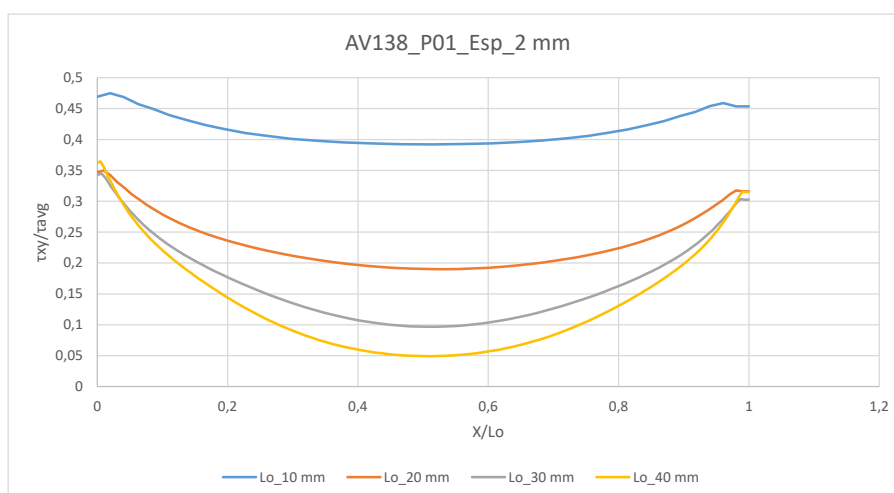


Figura 111 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.

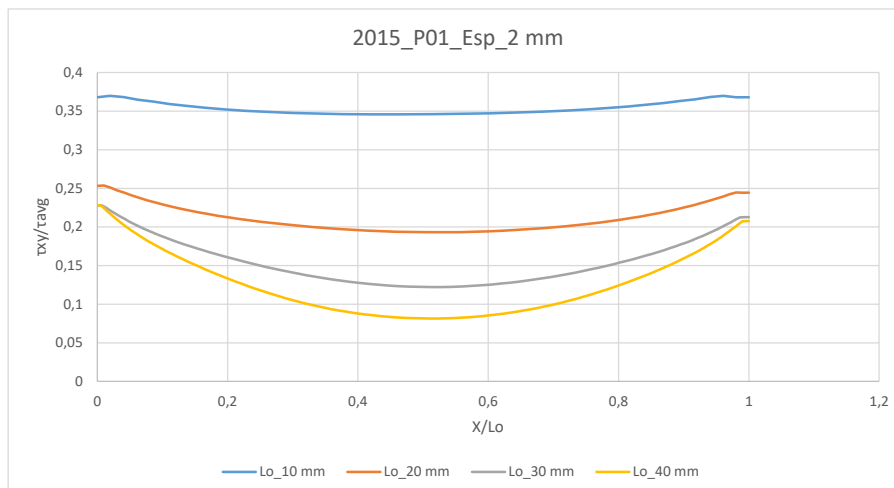


Figura 112 - Tensões de corte adeseivo Araldite® 2015, para pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.

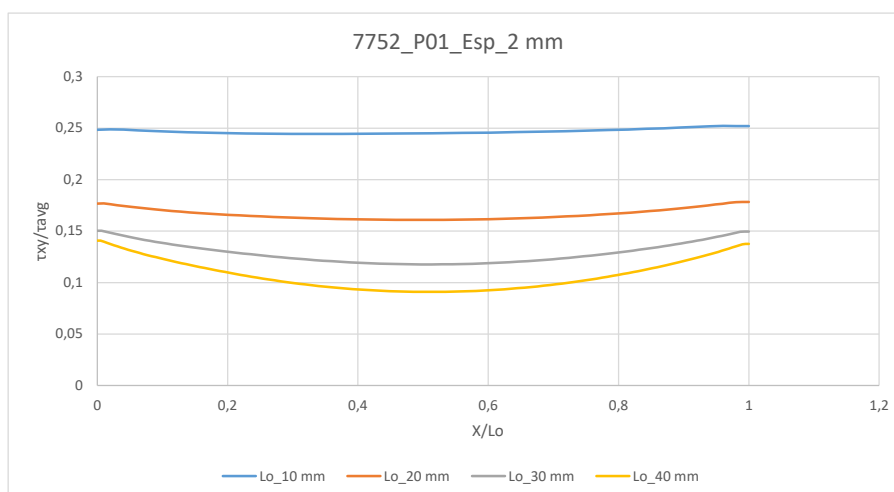


Figura 113 - Tensões de corte adeseivo SikaForce® 7752, para pressão 0,1 MPa e espessura 2 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 111, Figura 112 e Figura 113 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 0,1 MPa e espessura de 2 mm.

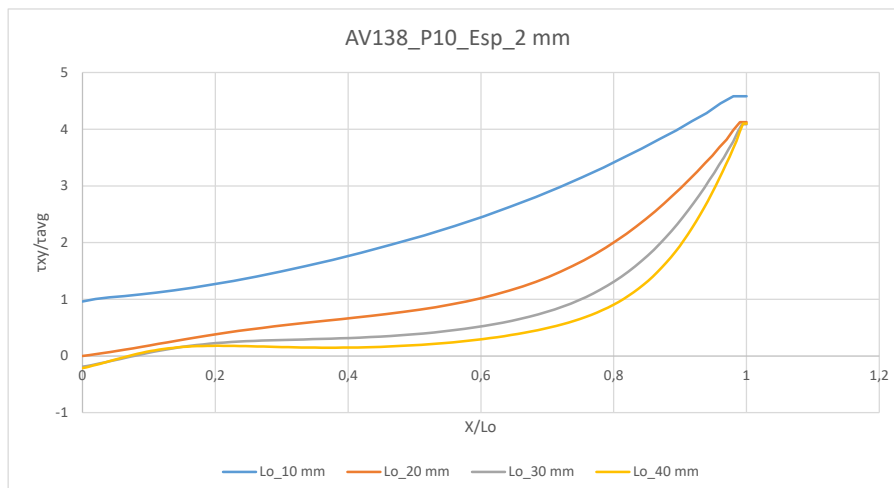


Figura 114 - Tensões de corte adeseivo Araldite® AV138, para pressão 10 MPa e espessura 2 mm.

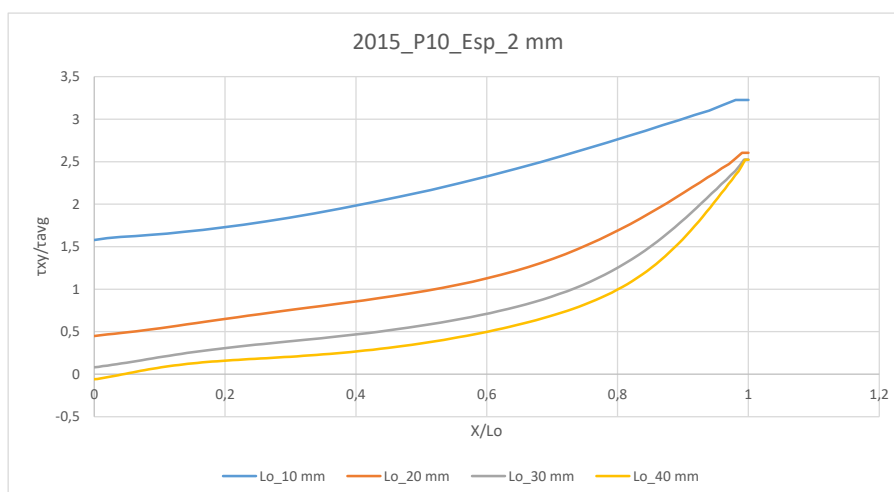


Figura 115 - Tensões de corte adeseivo Araldite® 2015, para pressão 10 MPa e espessura 2 mm.

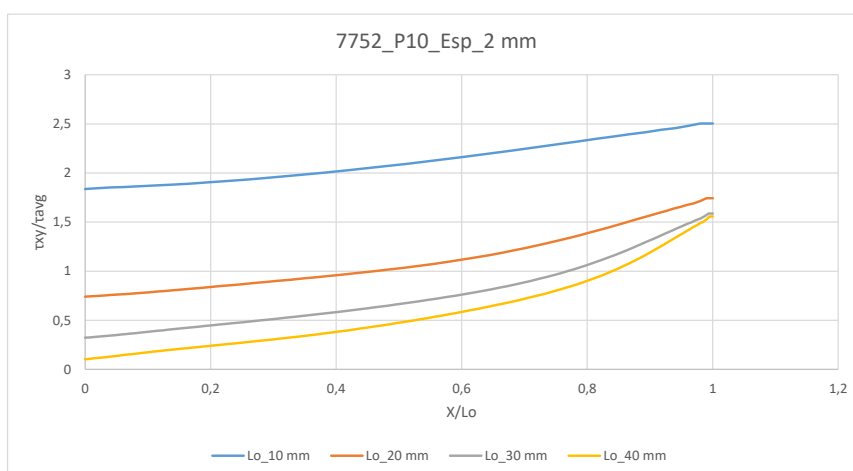


Figura 116 - Tensões de corte adeseivo SikaForce® 7752, para pressão 10 MPa e espessura 2 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 114, Figura 115 e Figura 116 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 10 MPa e espessura de 2 mm.

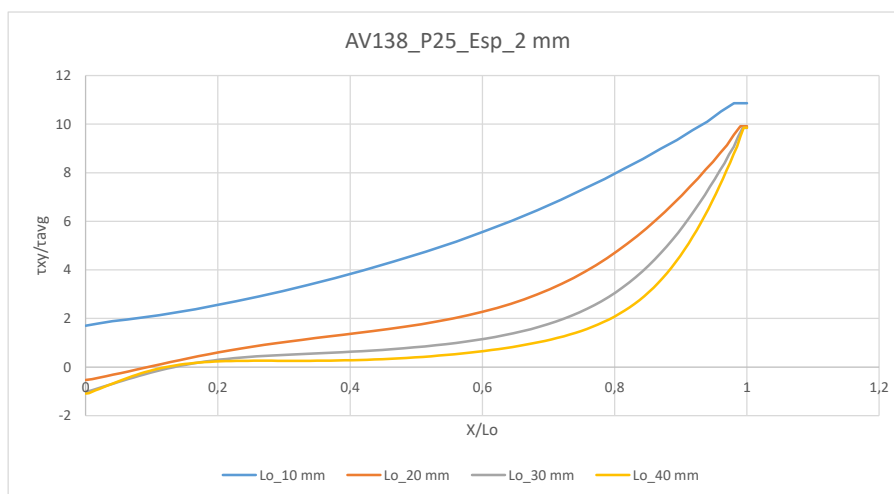


Figura 117 - Tensões de corte adesivo Araldite® AV138, para pressão 25 MPa e espessura 2 mm.

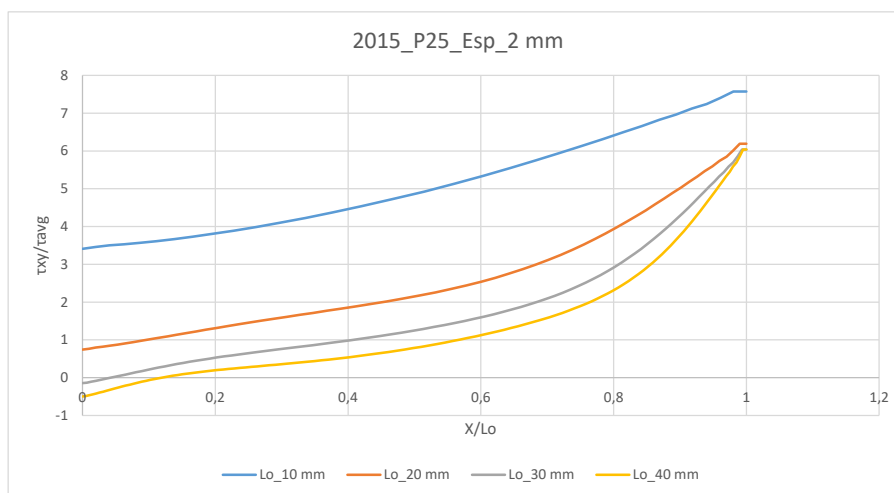


Figura 118 - Tensões de corte adesivo Araldite® 2015, para pressão 25 MPa e espessura 2 mm.

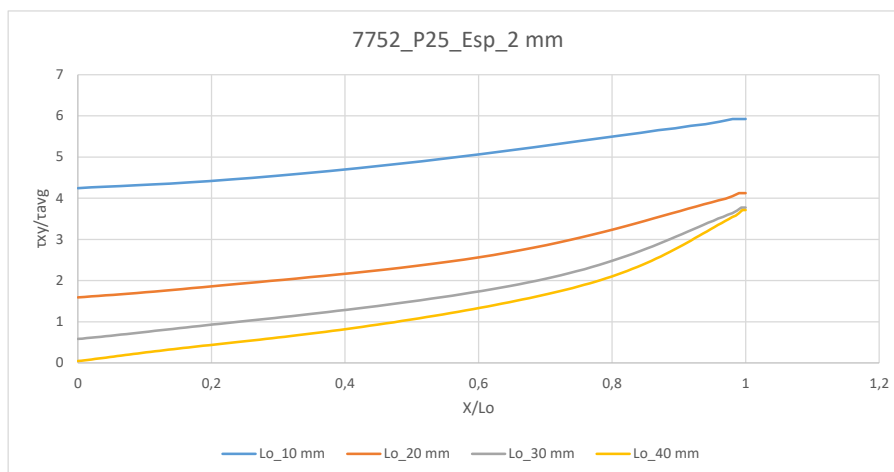


Figura 119 - Tensões de corte adesivo SikaForce® 7752, para pressão 25 MPa e espessura 2 mm.

Os gráficos apresentados na Figura 117, Figura 118 e Figura 119 correspondem aos três tipos de adesivos em estudo, para os diferentes valores de L_0 e para o valor de pressão 25 MPa e espessura de 2 mm.

Tal como verificado nas tensões de arrancamento, o adesivo Araldite® AV138 é o que possui gradientes de tensão τ_{xy} , mais elevados. Esta situação é possível observar nos gráficos apresentados.

O valor máximo τ_{xy}/τ_{avg} observado foi para o adesivo Araldite® AV138. Este adesivo é o mais frágil dos três, de tal forma que se geram picos de concentração de tensões τ_{xy} nas extremidades da junta. Assim as tensões são mais distribuídas pelas extremidades do adesivo, enquanto que a zona central não interfere significativamente no comportamento da junta.

O valor de rigidez que o adesivo Araldite® AV138 pode condicionar a resistência da junta e conduzir a uma rotura prematura da mesma. O mesmo se pode verificar para o adesivo Araldite® 2015. Contudo, este adesivo apresenta uma rigidez inferior quando comparado com Araldite® AV138 e como tal, os picos apresentam valores inferiores, tal como foi referido na análise das tensões de arrancamento.

O adesivo SikaForce® 7752, demonstrou ser o menos resistente uma vez que os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} são muito baixos, quando comparado com os outros adesivos em estudo. Contudo estes resultados já eram os esperados, pois trata-se de um adesivo extremamente flexível.

Na Tabela 22, Tabela 23 e Tabela 24 encontram-se apresentados os valores máximos absolutos das tensões de corte, para os casos em estudo. Estes valores encontram-se separados em três tabelas de acordo com a pressão.

Tabela 22 - Valores máximos de tensão de corte absoluto para pressão 0,1 MPa.

L_0/t	AV138				2015				7752		
	0,5	1	2	t	0,5	1	2	t	0,5	1	2
10	0,181	0,278	0,475		0,140	0,226	0,370		0,109	0,171	0,252
20	0,170	0,226	0,350		0,113	0,161	0,254		0,079	0,118	0,178
30	0,179	0,231	0,345		0,114	0,153	0,228		0,073	0,103	0,150
40	0,189	0,245	0,365		0,120	0,157	0,228		0,074	0,099	0,141

Tabela 23 - Valores máximos de tensão de corte absoluto para pressão 10 MPa.

L_0/t	AV138				2015				7752		
	0,5	1	2	t	0,5	1	2	t	0,5	1	2
10	4,617	4,242	4,584		2,619	2,628	3,227		1,531	1,784	2,504
20	4,488	4,016	4,125		2,534	2,390	2,604		1,461	1,476	1,743
30	4,491	4,010	4,090		2,533	2,381	2,525		1,488	1,462	1,587
40	0,189	4,024	4,101		2,539	2,390	2,522		1,508	1,482	1,557

Tabela 24 - Valores máximos de tensão de corte absoluto para pressão 25 MPa.

L_0/t	AV138				2015				7752		
	0,5	1	2	t	0,5	1	2	t	0,5	1	2
10	0,028	10,271	10,863		0,016	6,274	7,572		0,009	4,228	5,927
20	0,027	9,782	9,918		0,015	5,776	6,192		0,009	3,534	4,123
30	0,027	9,756	9,849		0,015	5,768	6,040		0,009	3,524	3,773
40	0,027	9,770	9,858		0,015	5,784	6,042		0,009	3,580	3,715

3.2.4 Estudo da variável de dano

Neste capítulo é abordado o estudo da variável de dano. Através do uso da variável SDEG no *software* ABAQUS®, é possível analisar a evolução da propagação do dano ao longo do adesivo nas juntas tubulares. Com este estudo é possível compreender a degradação do adesivo nas diversas fases de carregamento, através do MDC implementados na técnica de MEF.

A variável SDEG tem um valor zero no início do dano e um valor de 1, quando ocorre perda total da resistência do material. Para valores de zero o adesivo encontra-se na zona elástica, enquanto para valores entre 0 e 1 o adesivo encontra-se na zona plástica, ou seja. Quando este valor é 0, não ocorre dano. Quando este atinge o valor 1, ocorre rotura completa.

Nesta dissertação será apresentada a variável de dano SDEG no instante em que as juntas atingem o valor de $P_{m\acute{a}x}$. Contudo, esta variável tem como objetivo avaliar a propagação do dano e explicar as variações de resistência obtidas numericamente ou experimentalmente.

No decorrer deste capítulo serão apresentadas tabelas com os valores de dano máximo (SDEG), para $P_{m\acute{a}x}$ de cada condição analisada.

3.2.4.1 Araldite® AV138

Na Figura 120, Figura 121, Figura 122 e na Tabela 25 encontra-se a análise do SDEG, nas juntas tubulares com Araldite® AV138, no momento de $P_{m\acute{a}x}$. Com uma análise visual dos modelos é possível perceber que o dano é iniciado nas extremidades do adesivo, zona que corresponde aos picos de tensão σ_y e τ_{xy} .

Os gráficos apresentados encontram-se divididos por adesivo e pela condição de pressão interior. É importante referir que nestes gráficos foram retiradas as condições em que os resultados são retas, com o valor de 0 ou 1.

Neste caso consegue-se constatar uma variação abrupta nas extremidades da sobreposição. Como se trata de um adesivo frágil, a rotura do adesivo nas extremidades ocorre com alguma facilidade, levando a uma rotura da junta. A sua falta de capacidade de distribuir tensões causa que o dano se localize maioritariamente nas extremidades.

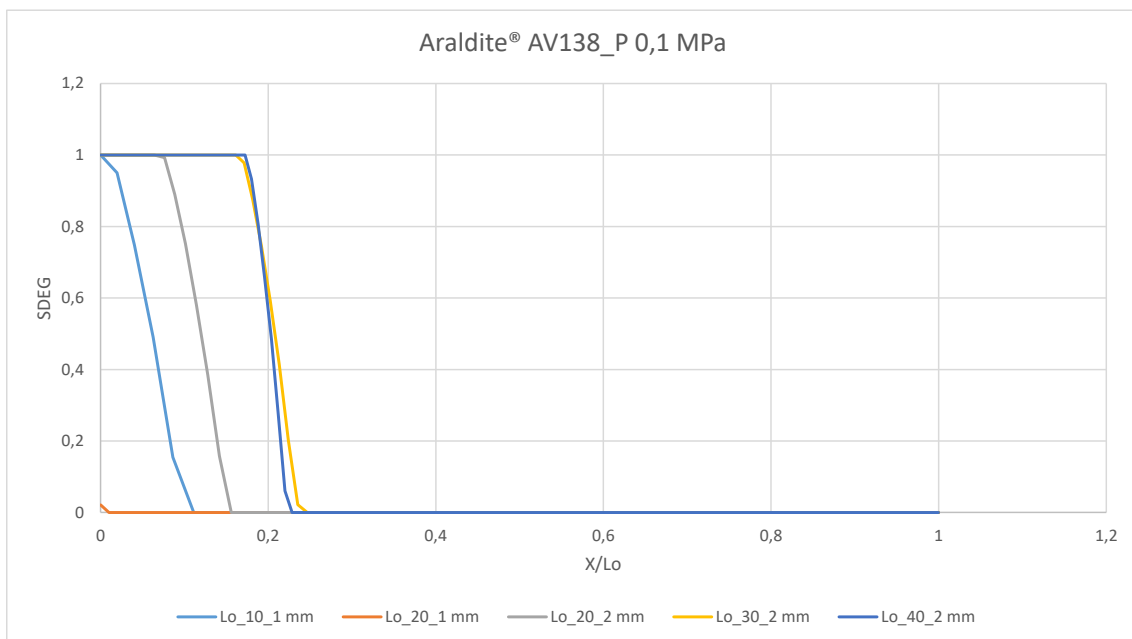


Figura 120 – SDEG para Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa.

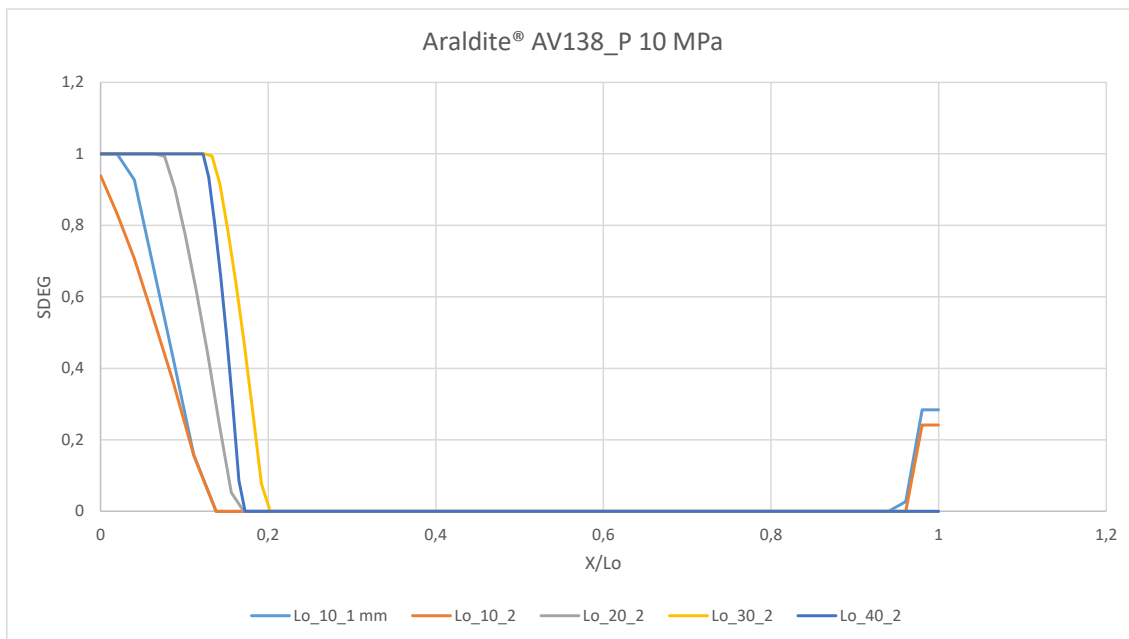


Figura 121 - SDEG para Araldite® AV138, pressão 10 MPa.

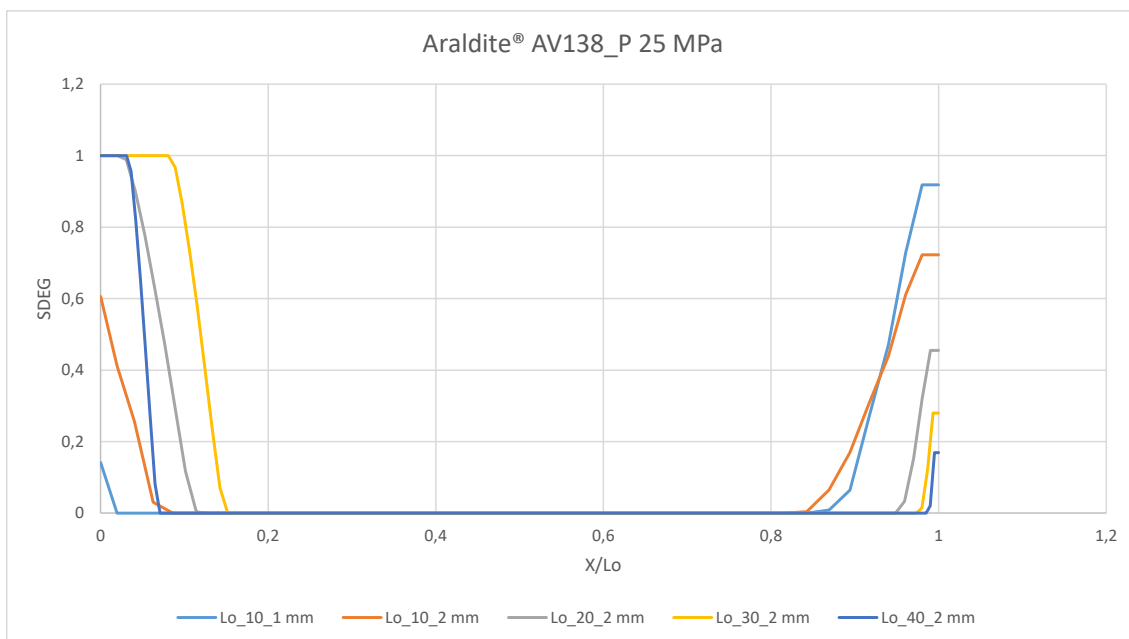


Figura 122 - SDEG para Araldite® AV138, pressão 25 MPa.

Tabela 25 – Valores máximos de SDEG para Araldite® AV138

P 0,1 MPa			P 10 MPa			P 25 MPa					
L_0/t	0,5	1	2	L_0/t	0,5	1	2	L_0/t	0,5	1	2
10	0	1	1	10	0	1	0,939	10	0	0,919	0,723
20	0	0,021	1	20	0	0	1	20	0	0	1
30	0	0	1	30	0	0	1	30	0	0	1
40	0	0	1	40	0	0	1	40	0	0	1

3.2.4.2 Araldite® 2015

No que diz respeito ao adesivo Araldite® 2015, são apresentadas simulações da evolução do dano no instante em que as juntas atingem $P_{máx}$ (Figura 123, Figura 124, Figura 125 e Tabela 26). É possível verificar, através dos gráficos e da tabela, que o Araldite® 2015 apresenta um comportamento diferente do que o Araldite® AV138.

Com a análise do SDEG é possível verificar várias diferenças. Neste adesivo não é notória uma mudança abrupta entre elementos danificados e os que ainda não sofreram degradação. Para além disso, é possível verificar que ambas as extremidades apresentam dano, mas o valor de SDEG é inferior, quando comparado com o adesivo anterior. O adesivo Araldite® 2015 também cobre uma área maior da junta, ao contrário do adesivo Araldite® AV138, que apenas apresenta plastificação na extremidade, devido à sua maior ductilidade.

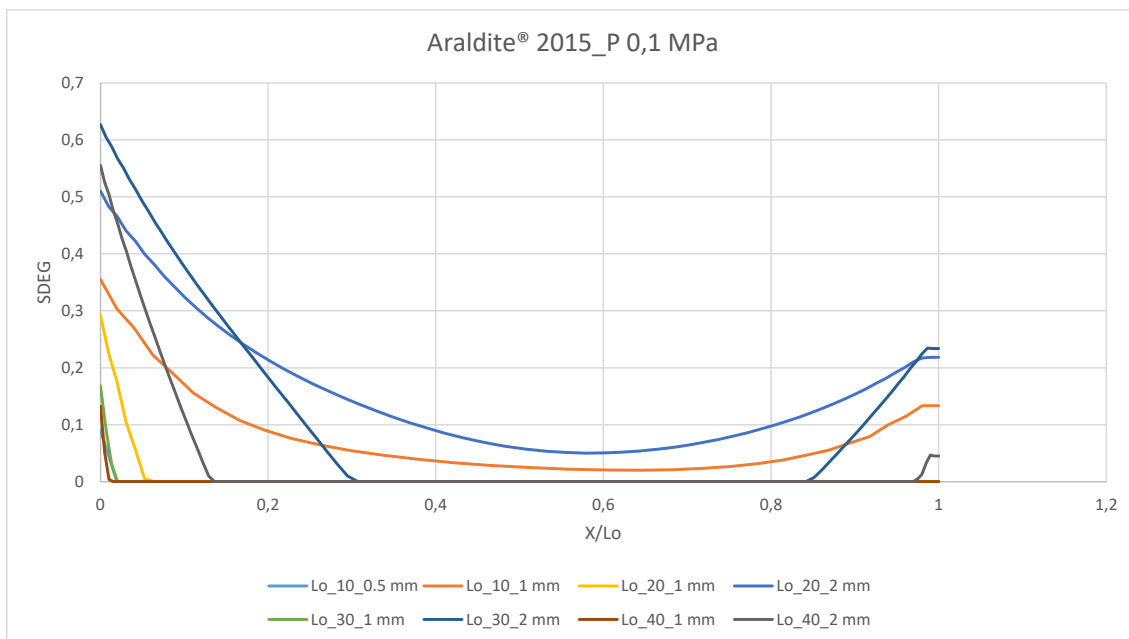


Figura 123 - SDEG para Araldite® 2015, pressão 0,1 MPa.

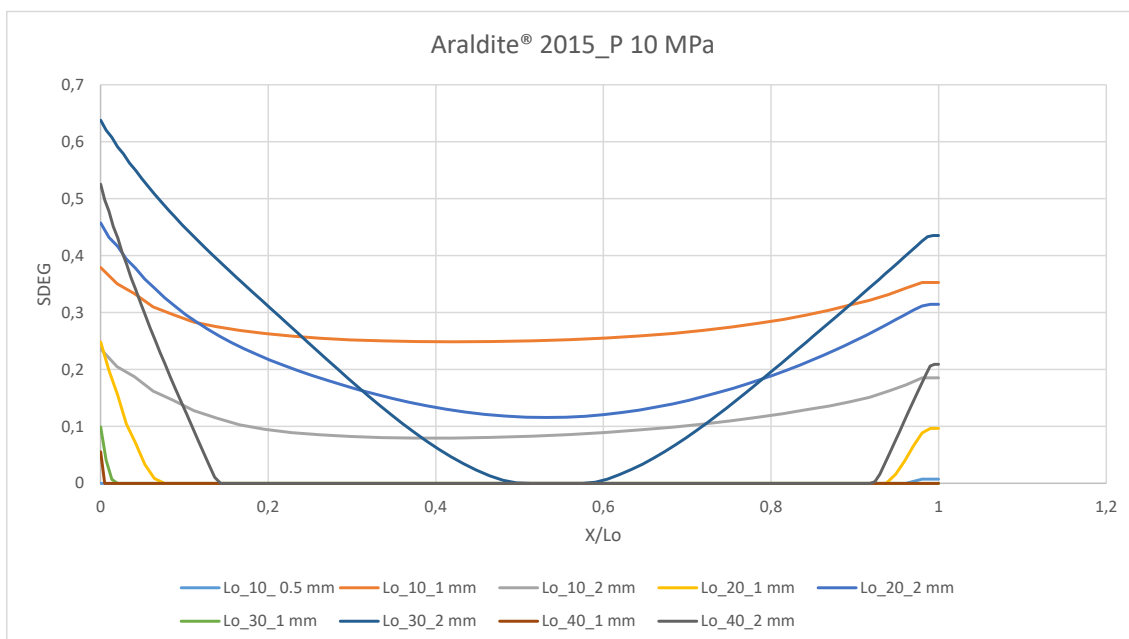


Figura 124 - SDEG para Araldite® 2015, pressão 10 MPa.

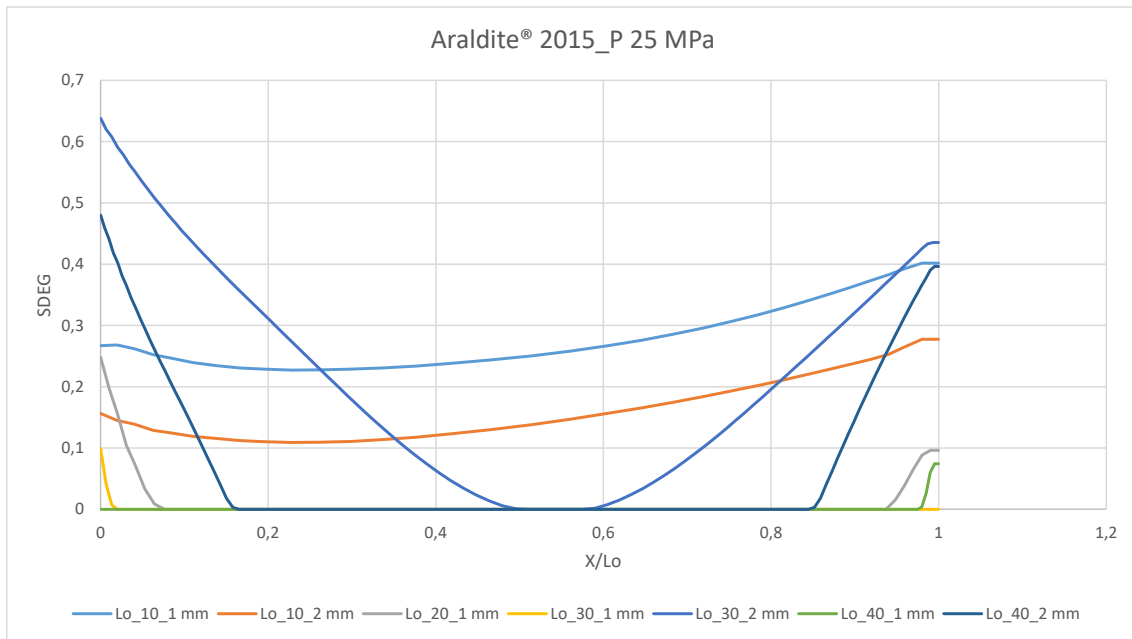


Figura 125 - SDEG para Araldite® 2015, pressão 25 MPa.

Tabela 26 - Valores máximos de SDEG para Araldite® 2015

L_0/t	P 0,1 MPa			P 10 MPa			P 25 MPa				
	0,5	1	2	L_0/t	0,5	1	2	L_0/t	0,5	1	2
10	0,091	0,355	1	10	0,007	0,379	0,236	10	0	0,402	0,278
20	0	0,292	0,511	20	0	0,248	0,458	20	0	0,268	0
30	0	0,169	0,627	30	0	0,099	0,638	30	0	0,116	0,547
40	0	0,133	0,555	40	0	0,055	0,525	40	0	0,075	0,480

3.2.4.3 SikaForce® 7752

No que diz respeito ao adesivo SikaForce® 7752, são apresentadas simulações da evolução do dano no instante em que as juntas atingem $P_{m\acute{a}x}$ (Figura 126, Figura 127, Figura 128 e Tabela 27). É possível verificar, através dos gráficos e da tabela, que a variável de dano não ocorre conforme o esperado para um adesivo extremamente dúctil, para o instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$.

Com os dados obtidos das análises, verifica-se que o valor de SDEG para os elementos não danificados é de 0 no interior da área de sobreposição. Na extremidade o valor de SDEG apresenta uma subida abrupta.

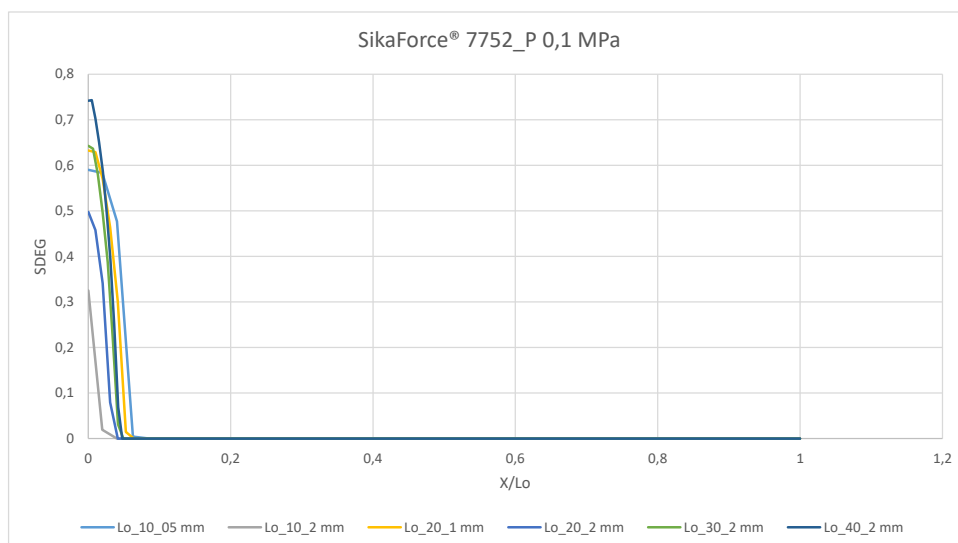


Figura 126 - SDEG para SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa.

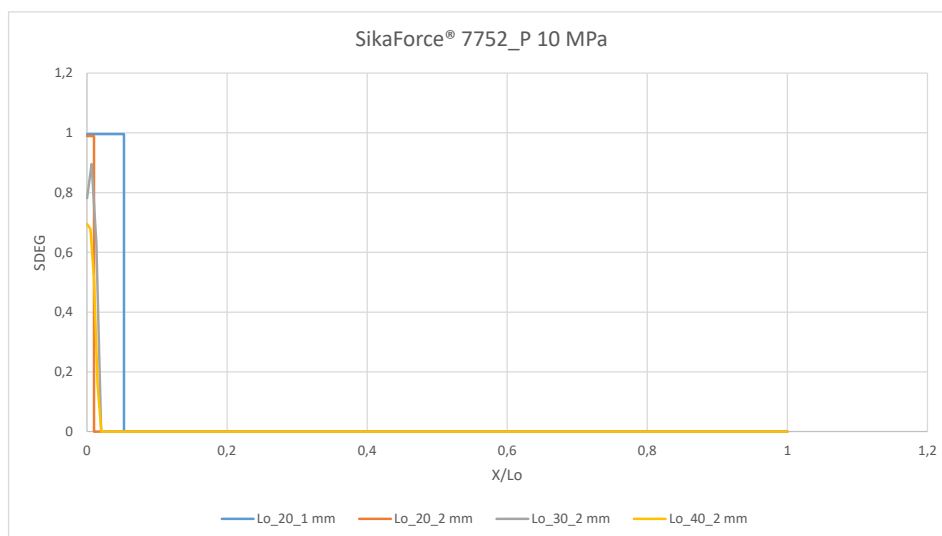


Figura 127 - SDEG para SikaForce® 7752, pressão 10 MPa.

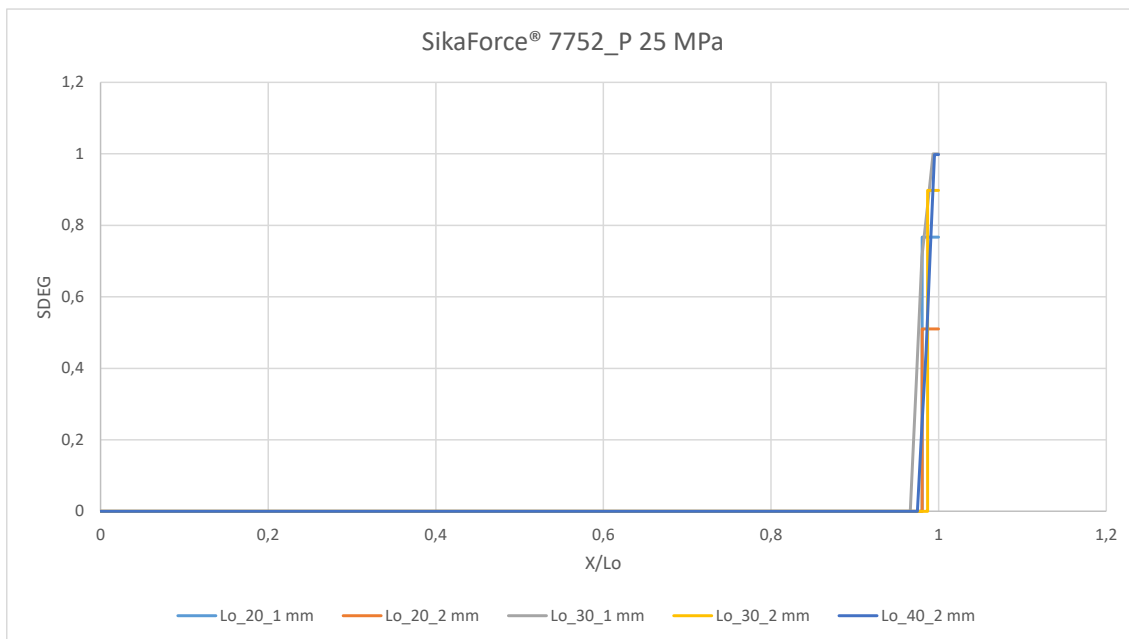


Figura 128 - SDEG para SikaForce® 7752, pressão 25 MPa.

Tabela 27 - Valores máximos de SDEG para SikaForce® 7752

<i>P</i> 0,1 MPa			<i>P</i> 10 MPa			<i>P</i> 25 MPa					
<i>L_o/t</i>	0,5	1	2	<i>L_o/t</i>	0,5	1	2	<i>L_o/t</i>	0,5	1	2
10	0,591	0,997	0,325	10	0,996	0,996	0,996	10	0	0,996	0,996
20	0	0,6327	0,498	20	0	0,996	0,989	20	0	0,767	0,511
30	0	0,111	0,643	30	0	0	0,896	30	0	1	0,898
40	0	0	0,744	40	0	0	0,695	40	0	0	0,998

3.2.5 Previsão da resistência

3.2.5.1 Comprimento de sobreposição

Neste capítulo é abordada a resistência das juntas tubulares, quando submetidas aos seguintes parâmetros: comprimento de sobreposição, espessura dos substratos, pressões, e os três tipos de adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752). Assim, serão geradas as curvas $P-\delta$, para os adesivos em estudo e para as condições impostas. Será também efetuada uma previsão de $P_{\text{máx}}$ pelos MDC, para todas as juntas tubulares em estudo. Nas figuras seguintes serão apresentadas as curvas $P-\delta$ das juntas tubulares ligadas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, para as condições impostas.

- Araldite® AV138, pressão 0,1 MPa;

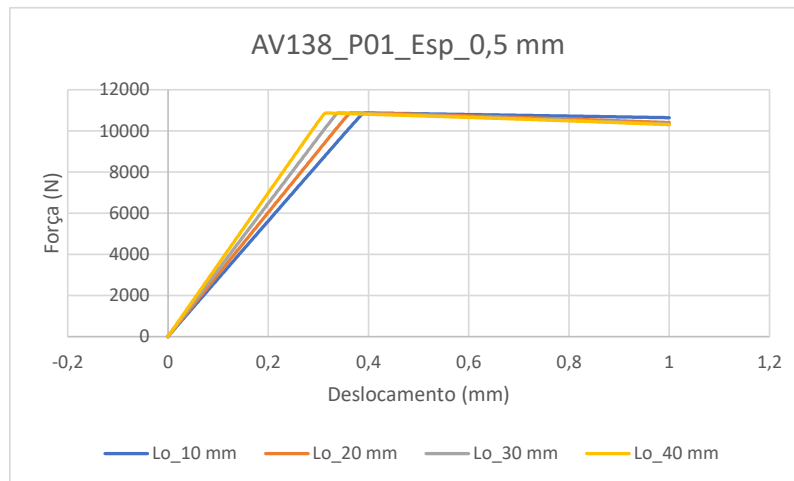


Figura 129 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® AV138, para espessura 0,5 mm e pressão 0,1 MPa.

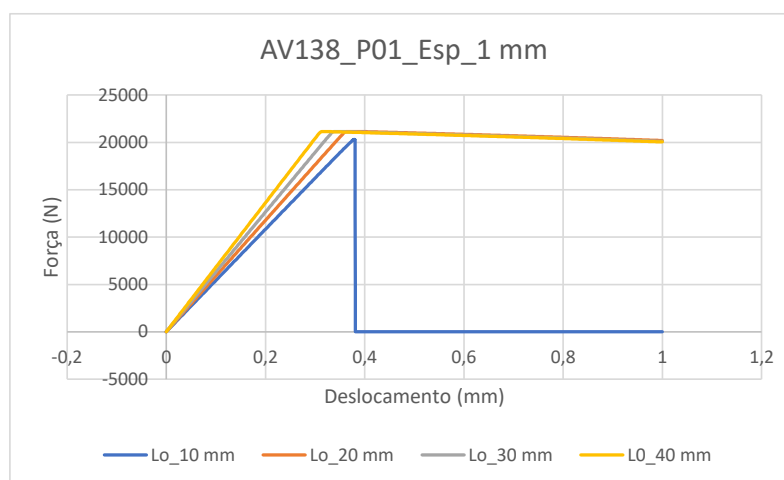


Figura 130 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 0,1 MPa.

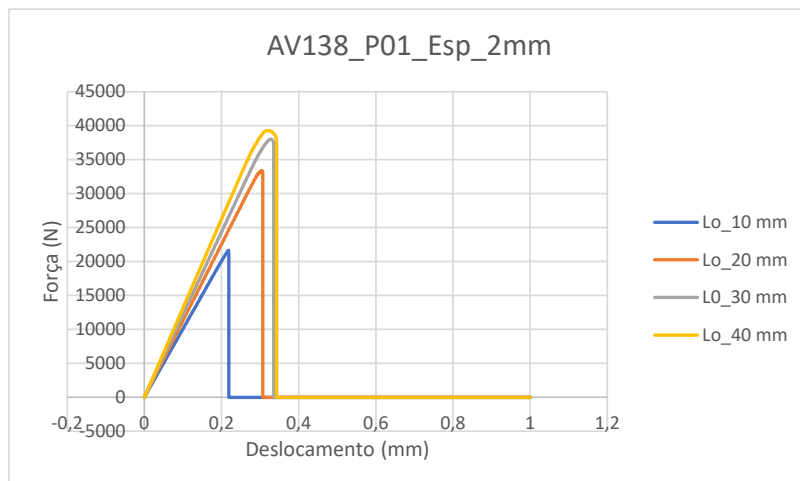


Figura 131 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 0,1 MPa.

- Araldite® AV138, pressão 10 MPa;

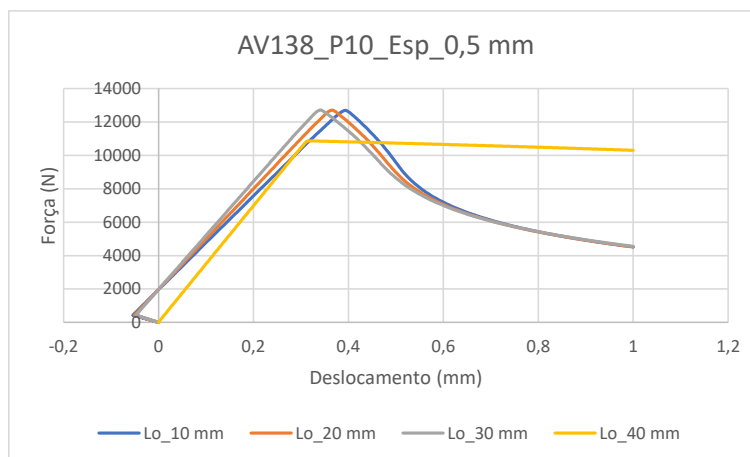


Figura 132 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® AV138, para espessura 0,5 mm e pressão 10 MPa.

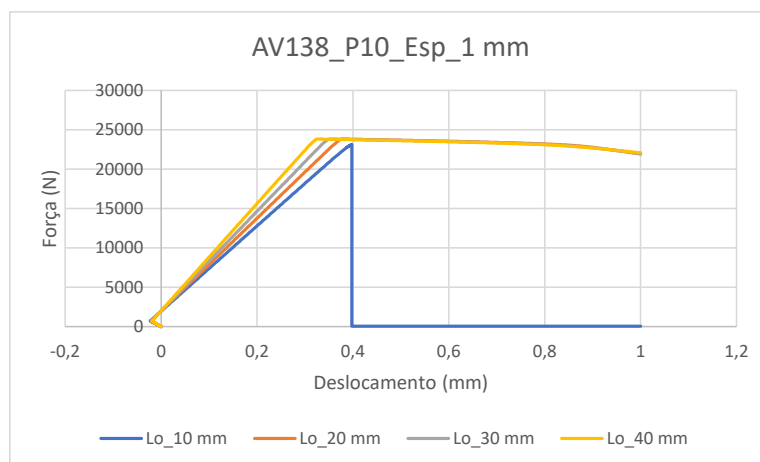


Figura 133 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 10 MPa.

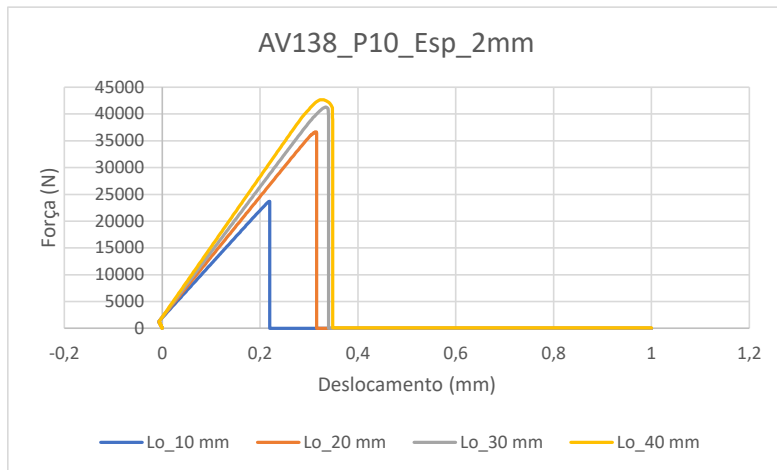


Figura 134 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 2 mm e pressão 10 MPa.

- Araldite® AV138, pressão 25 MPa;

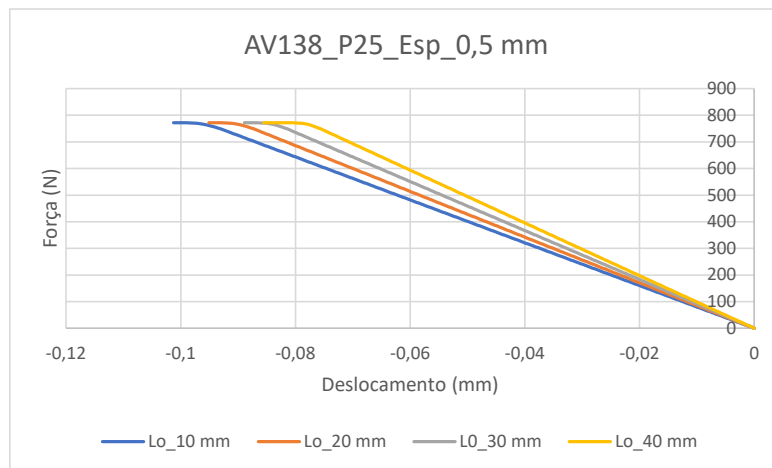


Figura 135 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 0.5 mm e pressão 25 MPa.

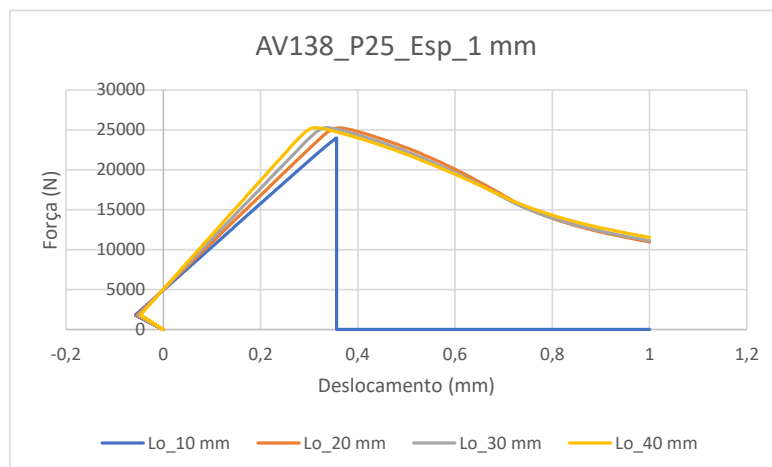


Figura 136 - Curvas P - δ da Araldite® AV138, para espessura 1 mm e pressão 25 MPa.

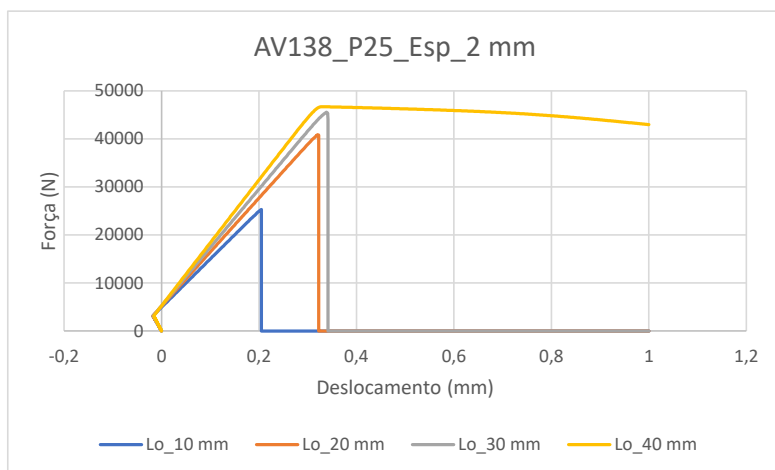


Figura 137 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® AV138, para espessura 2 mm e pressão 25 MPa.

- Araldite® 2015, pressão 0,1 MPa;

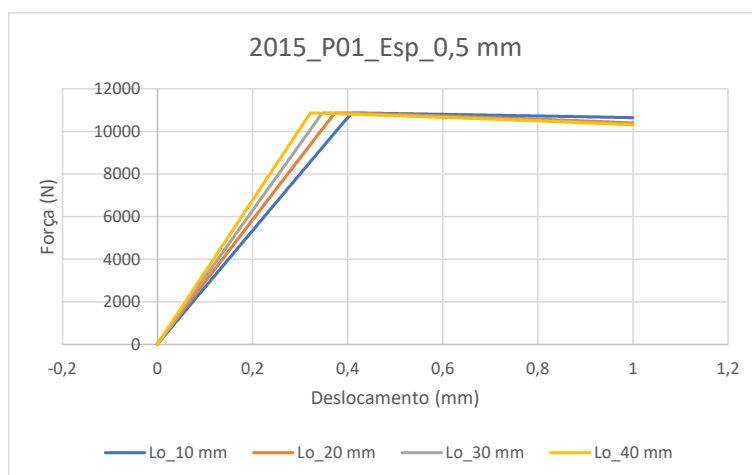


Figura 138 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 0.5 mm e pressão 0.1 MPa.

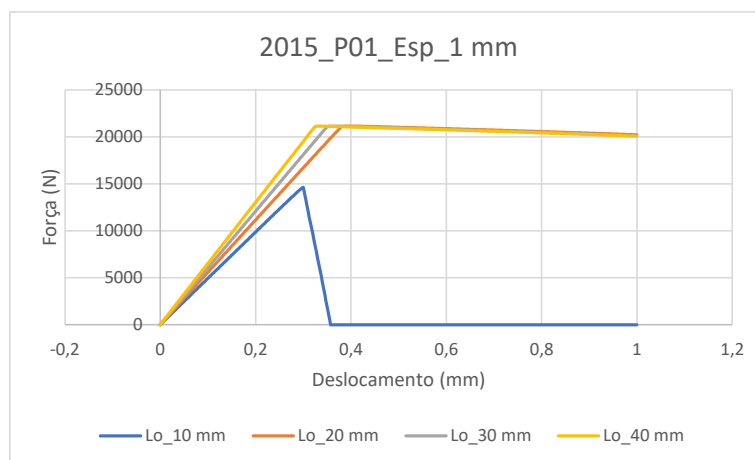


Figura 139 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 1 mm e pressão 0.1 MPa.

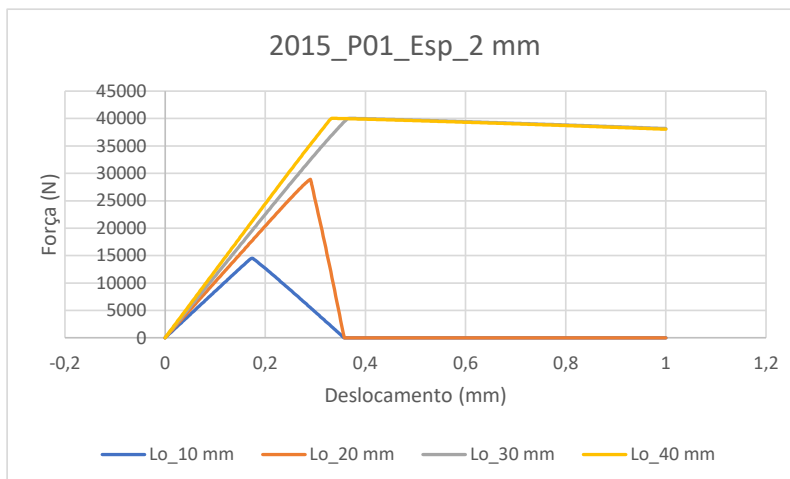


Figura 140 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 2 mm e pressão 0,1 MPa.

- Araldite® 2015, pressão 10 MPa;

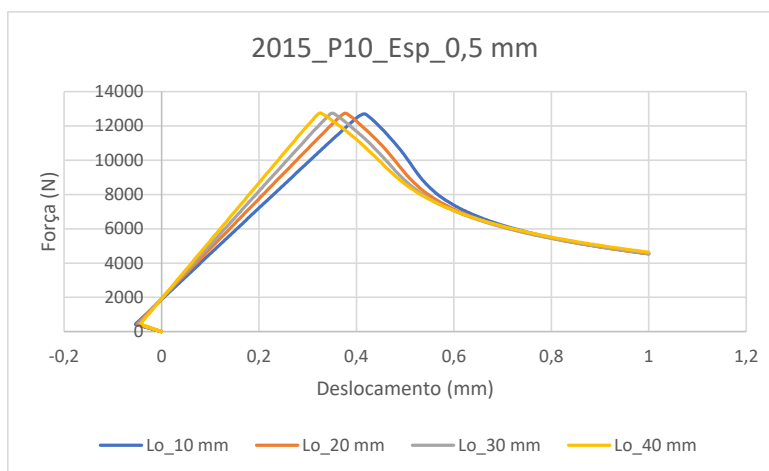


Figura 141 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 0.5 mm e pressão 10 MPa.

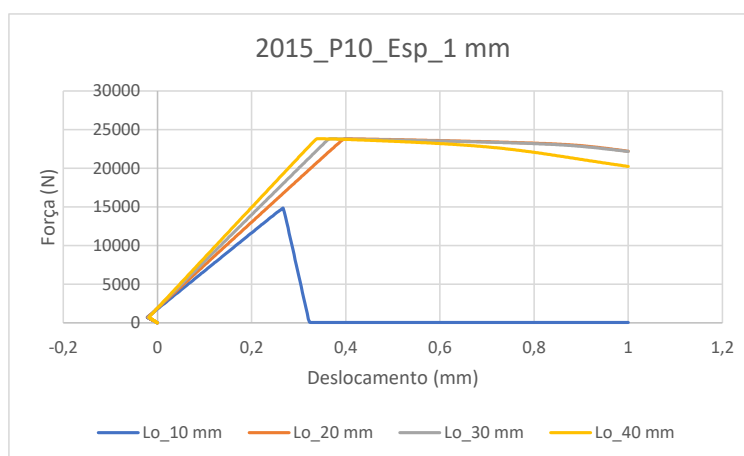


Figura 142 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 1 mm e pressão 10 MPa.

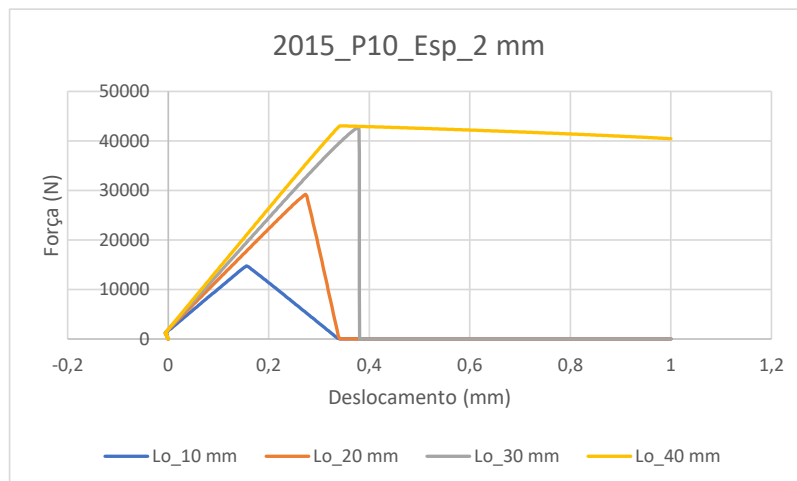


Figura 143 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 2 mm e pressão 10 MPa.

- Araldite® 2015, pressão 25 MPa;

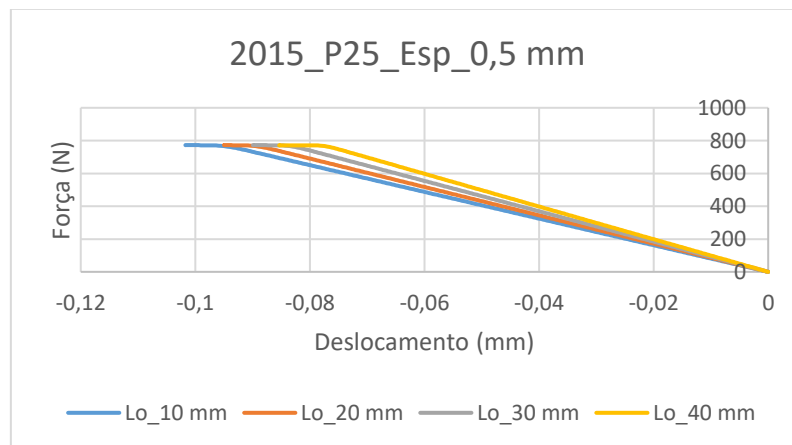


Figura 144 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 0,5 mm e pressão 25 MPa.

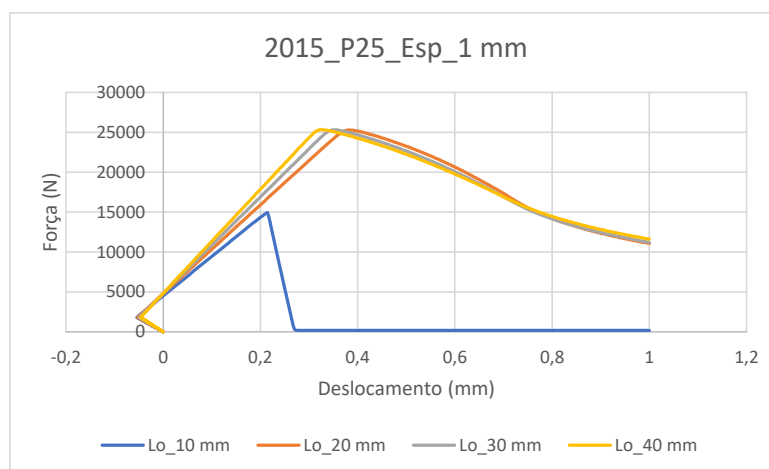


Figura 145 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 1 mm e pressão 25 MPa.

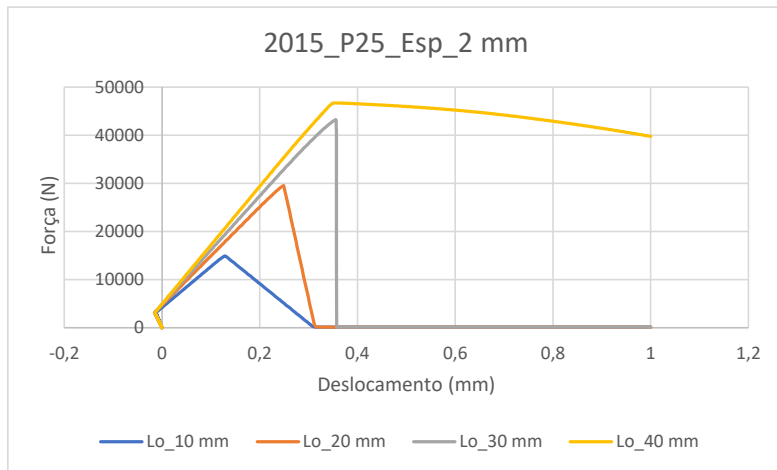


Figura 146 - Curvas $P-\delta$ da Araldite® 2015, para espessura 2 mm e pressão 25 MPa.

- SikaForce® 7752, pressão 0,1 MPa;

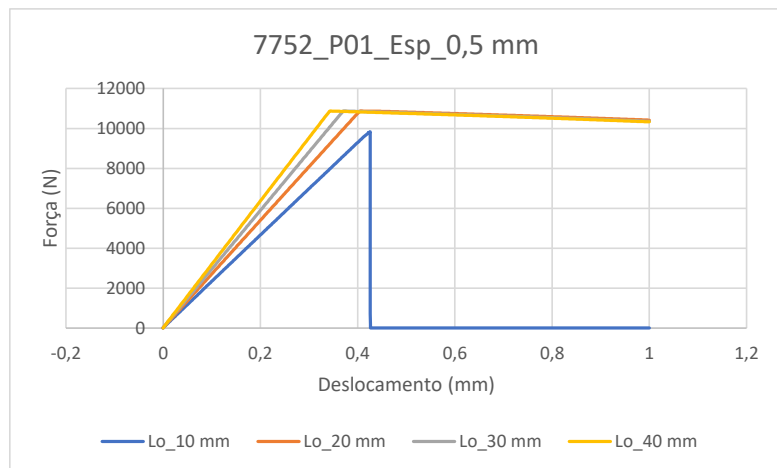


Figura 147 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 0,5 mm e pressão 0,1 MPa.

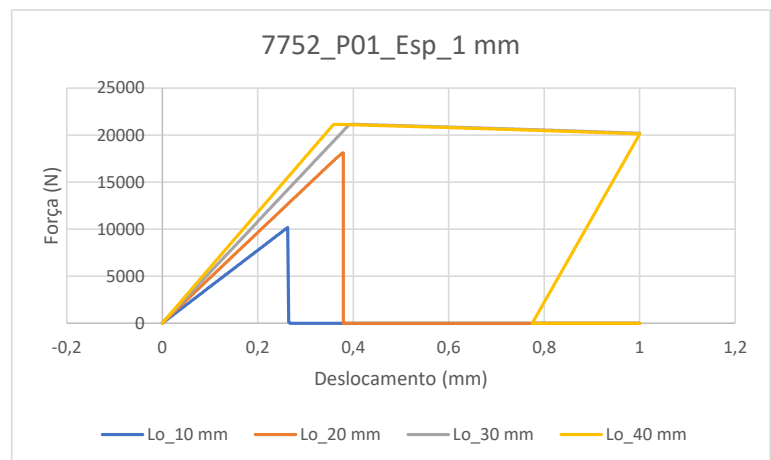


Figura 148 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 1 mm e pressão 0,1 MPa.

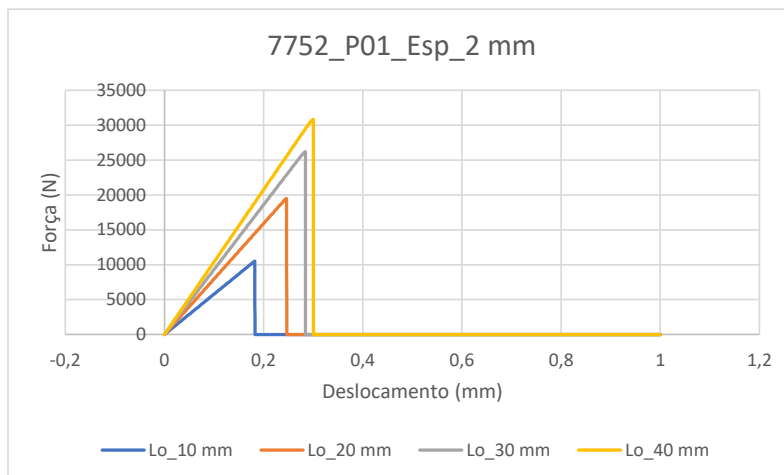


Figura 149 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 2 mm e pressão 0,1 MPa.

- SikaForce® 7752, pressão 10 MPa;

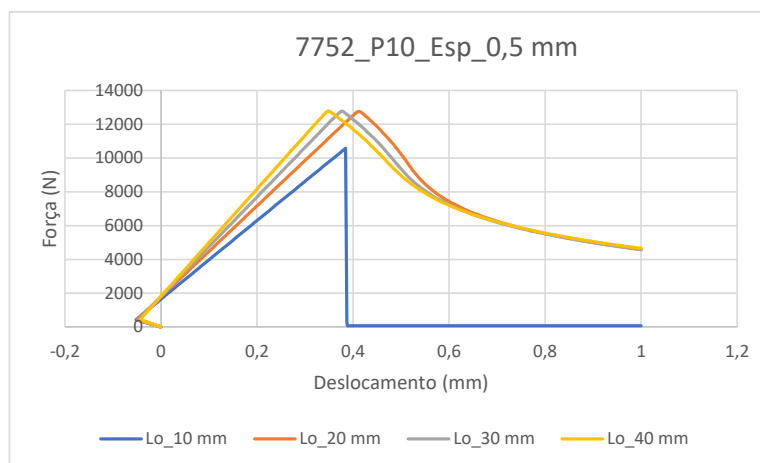


Figura 150 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 0,5 mm e pressão 10 MPa

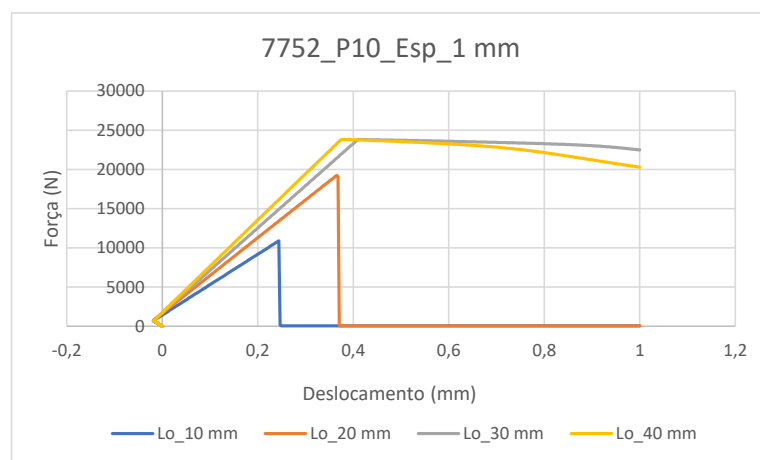


Figura 151 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 1 mm e pressão 10 MPa

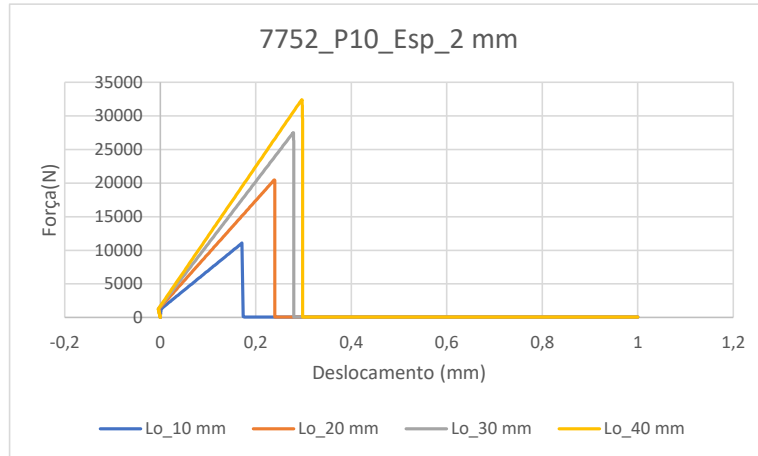


Figura 152 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 2 mm e pressão 10 MPa

- SikaForce® 7752, pressão 25 MPa;

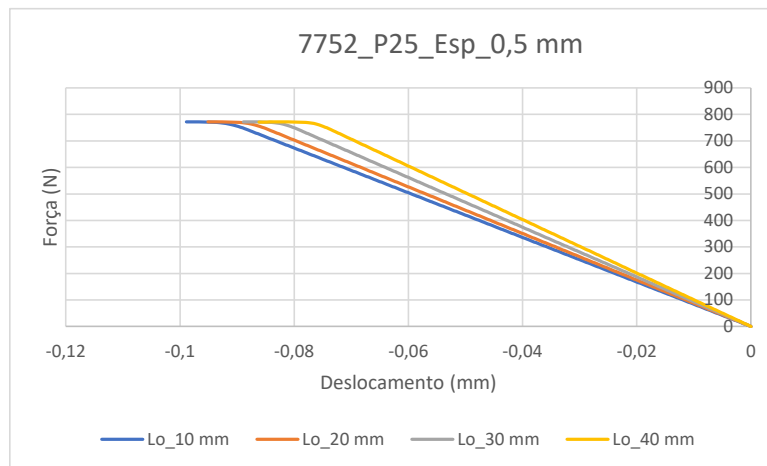


Figura 153 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 0,5 mm e pressão 25 MPa

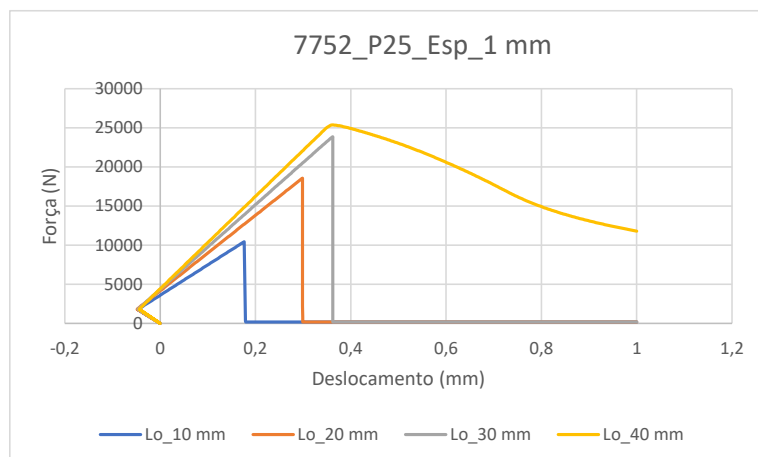


Figura 154 - Curvas $P-\delta$ da SikaForce® 7752, para espessura 1 mm e pressão 25 MPa

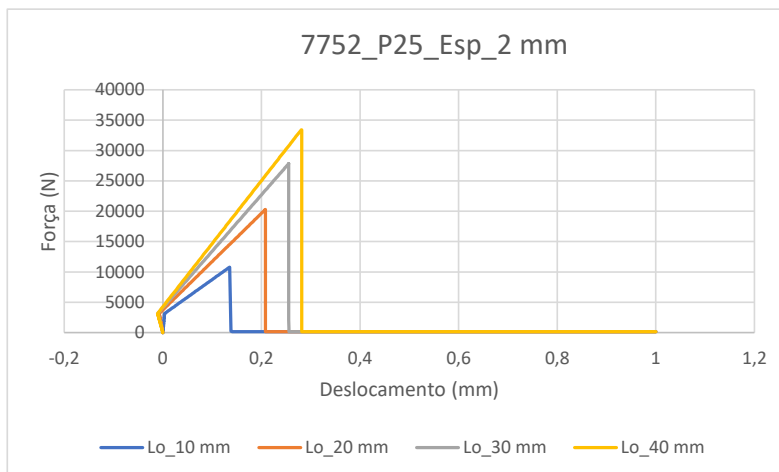


Figura 155 - Curvas P - δ da SikaForce® 7752, para espessura 2 mm e pressão 25 MPa

Nos gráficos apresentados encontram-se as curvas P - δ obtidas através da análise numérica por MDC no ABAQUS em função do comprimento de sobreposição, espessura e pressão interior para os três adesivos em estudo. Com esta avaliação é possível aferir a resistência mecânica das juntas adesivas tubulares para o caso em estudo e verificar o seu comportamento em função da variação gradual de L_o , espessura e pressão interior.

Após analisar as curvas P - δ deste caso em estudo, verifica-se que as curvas do adesivo Araldite® AV138 apresentam um comportamento linear até $L_o=20$ mm, como é observado na Figura 130, Figura 131 e Figura 134. A partir de $L_o=30$ mm, verifica-se a plasticidade dos substratos, ainda que reduzida em alguns dos casos, conforme se exemplifica na Figura 129, Figura 132, Figura 133, Figura 136 e Figura 137, devido à rigidez elevada deste adesivo.

No que diz respeito ao adesivo Araldite® 2015, este apresentou um comportamento linear até $L_o=20$ mm. A partir de $L_o=30$ mm os tubos começaram a deformar-se plasticamente, devido às forças atingidas serem mais elevadas. Este adesivo apresenta alguma ductilidade e resistência inferior ao Araldite® AV138, contudo apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ próximos do adesivo Araldite® AV138, como mostra na Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30. Nos gráficos correspondentes ao adesivo Araldite® 2015, para as condições impostas, é possível verificar que não é possível aferir o valor de $\delta_{m\acute{a}x}$ para $L_o=40$ mm, a partir da leitura do gráfico, uma vez que ocorre estricção nestes modelos, (Figura 156). Assim sendo, não é possível verificar o seu comportamento até á rotura.

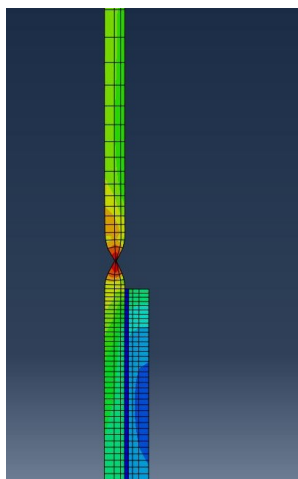


Figura 156 - Provete com adesivo Araldite® 2015 a sofrer estricção.

A estricção ocorre no tubo interior porque apesar de ambos possuírem a mesma espessura, já que este possui um diâmetro menor para que seja possível inserir dentro do tubo exterior. É de referir uma secção transversal mais reduzida resulta uma maior concentração de cargas.

No que diz respeito ao adesivo SikaForce 7752, tal como se verificou experimentalmente, este adesivo é o que apresenta menor resistência mecânica, uma vez que os valores de $P_{máx}$ são os mais reduzidos dos três adesivos. As suas curvas $P-\delta$ apresentam-se lineares até à sua rotura, como se pode observar na Figura 152 e Figura 155.

Na Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30 pode-se verificar que os valores de $P_{máx}$ revelam um crescimento do mesmo em função de L_o , o que nos indica o comportamento esperado.

O adesivo Araldite® AV138, como já foi referido, é o que apresenta valores de $P_{máx}$ mais elevados, sendo este comportamento consequência da sua resistência elevada.

O adesivo Araldite® 2015 é o que apresenta valores de resistência superior a partir de $L_o = 20$ mm. A ductilidade que este adesivo possui, permite que este seja submetido a cargas mais elevadas, o que resulta numa plastificação elevada. Provavelmente estes valores terão tendência para diminuir com valores de L_o mais elevados.

O adesivo SikaForce® 7752 é o que apresenta ser menos resistente, uma vez que as juntas atingem a rotura de uma forma mais prematura, quando comparados com os outros adesivos em estudo.

Para se conseguir obter uma melhor perspetiva da evolução de $P_{máx}$ em relação a L_o , da Figura 157 até à Figura 165 apresenta-se a evolução deste parâmetro.

.

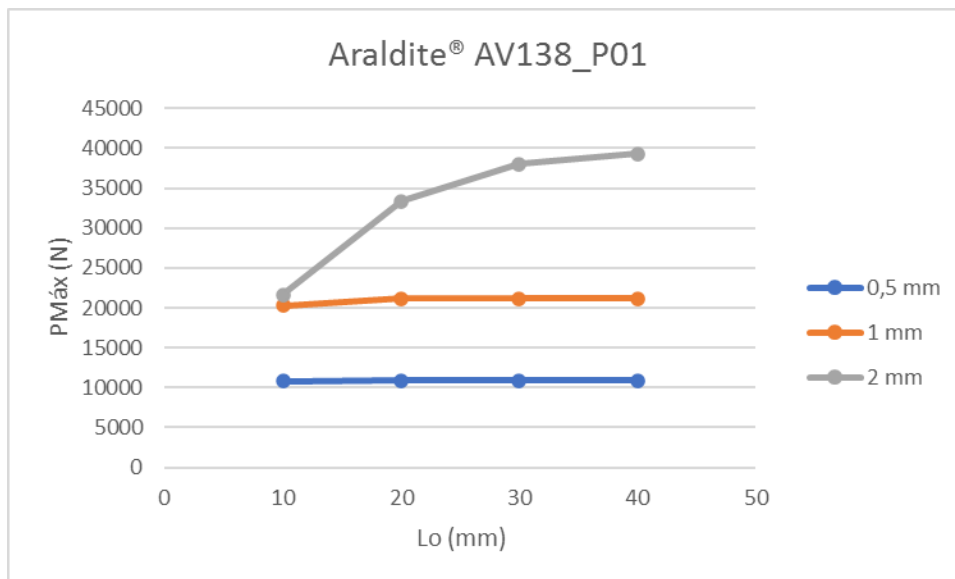


Figura 157 – Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para Araldite® AV138 à pressão 0,1 MPa.

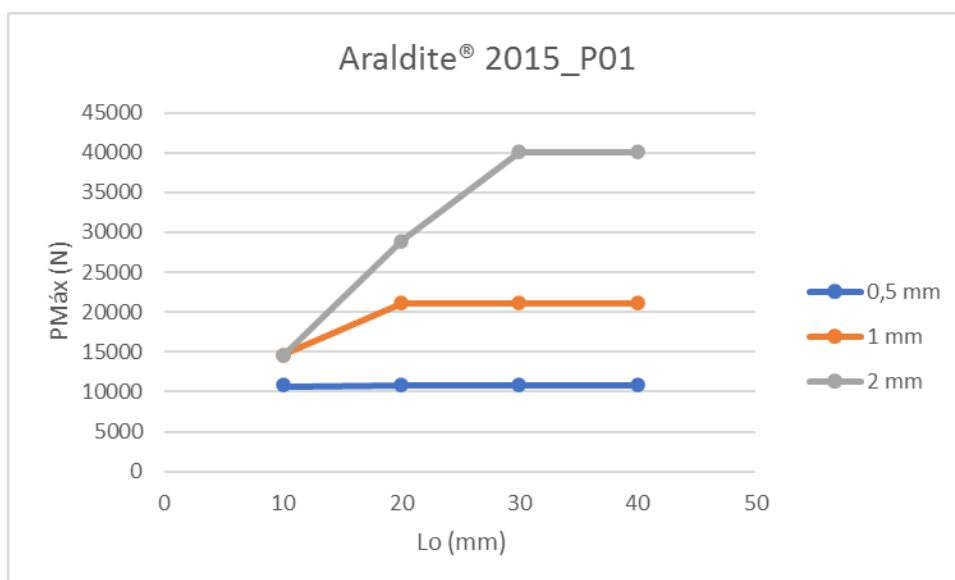


Figura 158 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para Araldite® 2015 à pressão 0,1 MPa.

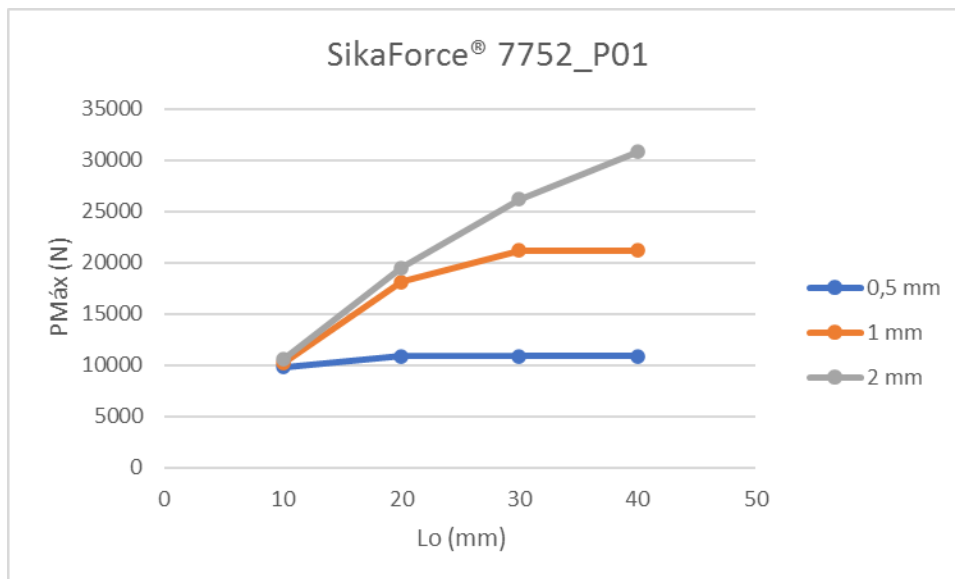


Figura 159 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para SikaForce® 7752 à pressão 0,1 MPa.

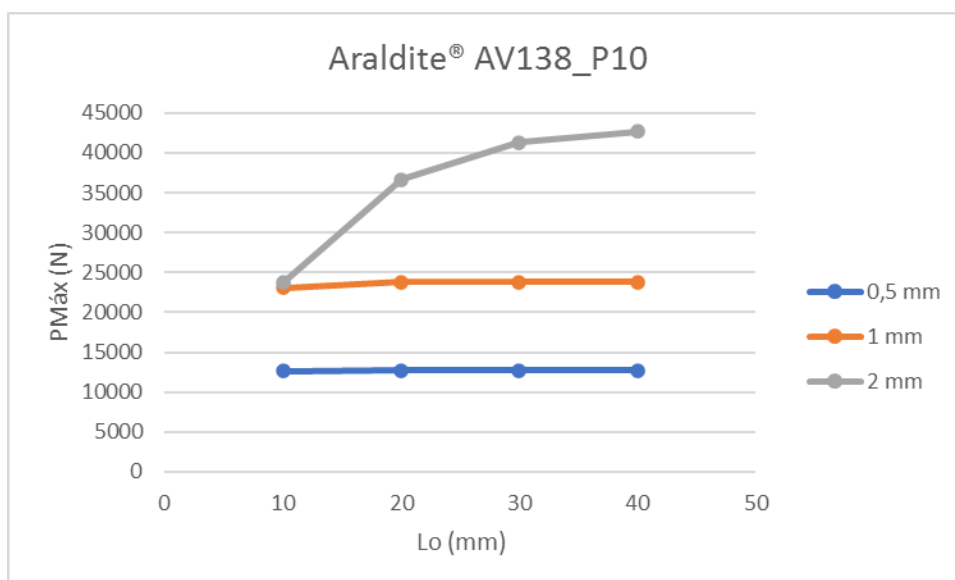


Figura 160 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para Araldite® AV138 à pressão 10 MPa.

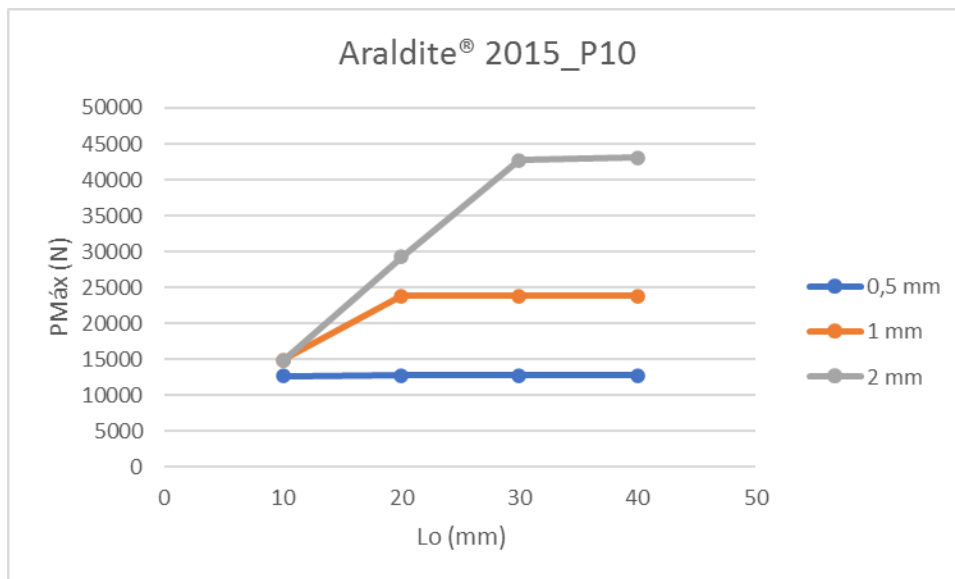


Figura 161 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para Araldite® 2015 à pressão 10 MPa.

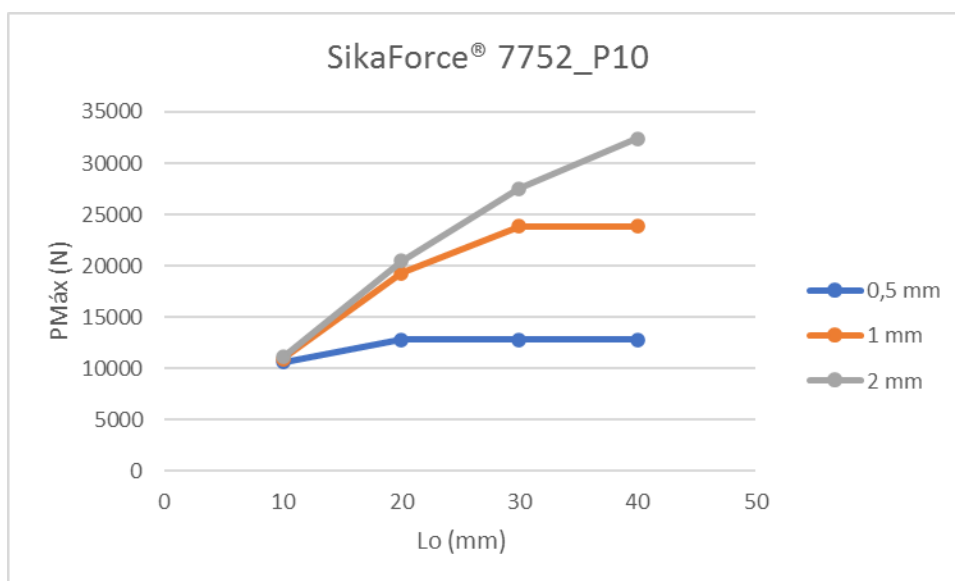


Figura 162 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para SikaForce® 7752 à pressão 10 MPa.

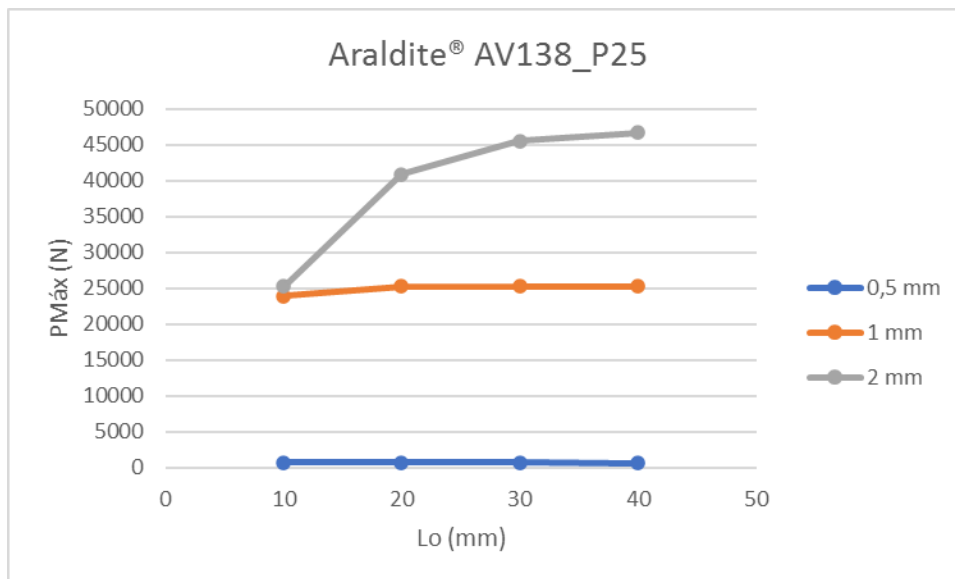


Figura 163 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para Araldite® AV138 à pressão 25 MPa.

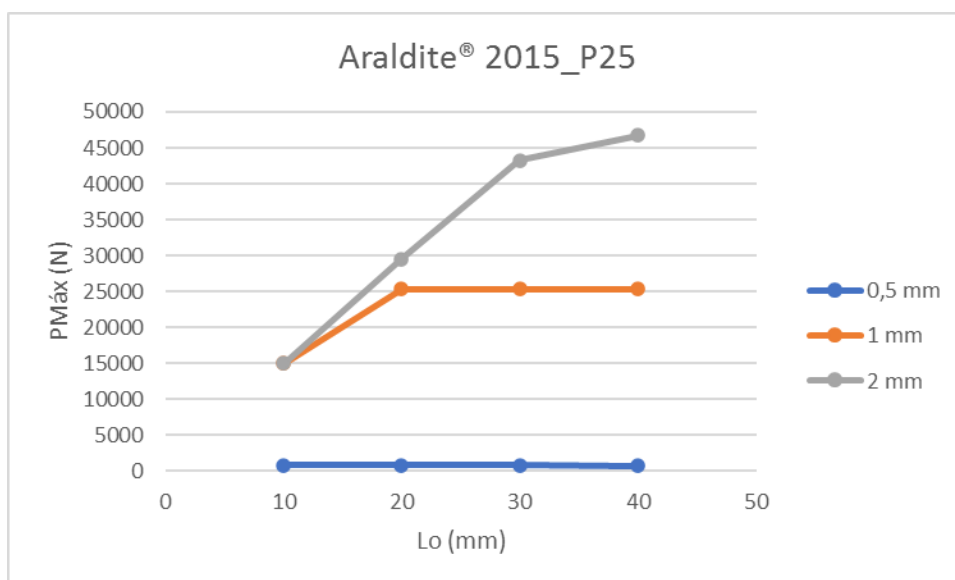


Figura 164 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para Araldite® 2015 à pressão 25 MPa.

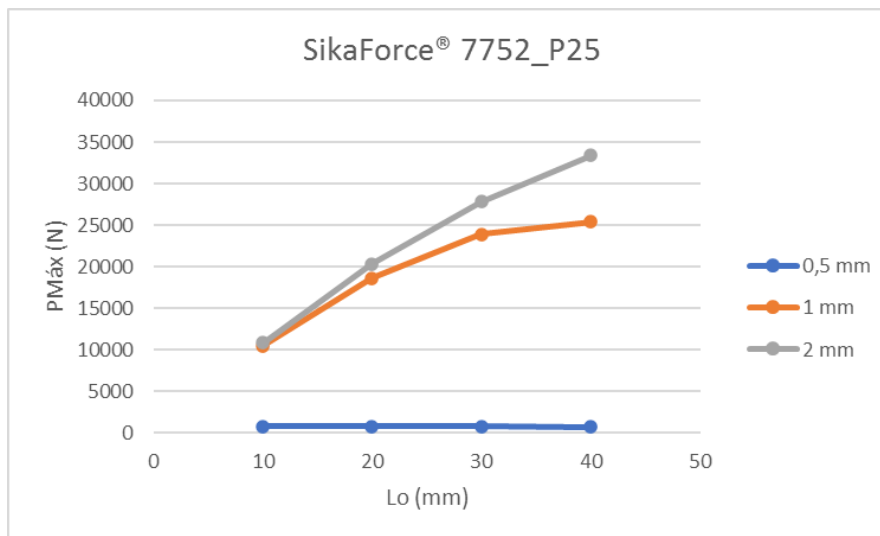


Figura 165 - Evolução de $P_{máx}$ em relação L_o , para SikaForce® 7752 à pressão 25 MPa.

Tabela 28 - Valores de $P_{máx}$ em kN, para pressão 0,1 MPa.

AV138			2015			7752					
L_o/t	0,5	1	2	L_o/t	0,5	1	2	L_o/t	0,5	1	2
10	10,87	20,31	21,65	10,87	14,62	14,51	9,83	10,17	10,52		
20	10,87	21,15	33,34	10,87	21,15	28,90	10,87	18,11	19,47		
30	10,87	21,14	37,99	10,87	21,15	40,05	10,87	21,15	26,16		
40	10,87	21,15	39,27	10,87	21,15	40,04	10,87	21,153	30,79		

Tabela 29 - Valores de $P_{máx}$ em KN, para pressão 10 MPa.

AV138			2015			7752					
L_o/t	0,5	1	2	L_o/t	0,5	1	2	L_o/t	0,5	1	2
10	12,69	23,10	23,69	12,69	14,85	14,79	10,58	10,89	11,08		
20	12,71	23,82	36,68	12,74	23,82	29,23	12,76	19,26	20,45		
30	12,71	23,82	41,28	12,75	23,82	42,76	12,78	23,83	27,51		
40	12,71	23,82	42,68	12,75	23,82	43,051	12,78	23,83	32,39		

Tabela 30 - Valores de $P_{máx}$ em KN, para pressão 25 MPa.

AV138			2015			7752					
L_o/t	0,5	1	2	L_o/t	0,5	1	2	L_o/t	0,5	1	2
10	0,77	23,98	25,28	0,77	14,95	14,96	0,77	10,46	10,80		
20	0,77	25,26	40,85	0,77	25,29	29,54	0,77	18,58	20,30		
30	0,77	25,27	45,56	0,77	25,33	43,24	0,77	23,86	27,84		
40	0,77	25,27	46,70	0,77	25,33	46,71	0,77	25,37	33,42		

3.2.5.2 Espessura dos aderentes

No que diz respeito à espessura dos aderentes, este parâmetro varia em três espessuras diferentes, 0,5 mm, 1 mm e 2 mm.

Neste parâmetro é notório o aumento do valor de $P_{máx}$ à medida que o valor da espessura aumenta. Esta observação é possível ser verificada na Tabela 28, Tabela 29 e Tabela 30, as quais já foram apresentadas no subcapítulo anterior.

O Adesivo Araldite® AV138 apresenta alguma linearidade até à rotura nas amostras e com valores de $P_{máx}$ elevados, à semelhança do Araldite® 2015. Para as amostras mais finas, ou seja, espessura 0,5 mm e 1 mm, ocorre plastificação do aderente interior, uma vez que este atinge a zona plástica facilmente. Este comportamento leva a um aumento do deslocamento.

O Araldite® 2015 apresenta um aumento de $P_{máx}$, com o aumento da espessura. Com as respetivas curvas $P-\delta$, é possível observar que este adesivo apresenta uma deformação plástica. Esta deformação ocorre por este adesivo ser um adesivo do tipo dúctil. Os valores aproximam-se com o da Araldite® AV138, como já foi referido.

Quanto ao SikaForce® 7752, é este o adesivo que apresenta os valores mais reduzidos de $P_{máx}$, e a mudança de parâmetro em estudo confirma novamente o que foi dito anteriormente.

3.2.5.3 Pressão interior

No que diz respeito ao parâmetro da pressão interior, esta assume os valores de 0,1 MPa, 10 MPa e 25 MPa. De uma forma geral, este parâmetro apresenta os mesmos resultados que os outros, ou seja, com o aumento da pressão os valores de $P_{máx}$ aumentam com o L_o . Contudo, ocorre uma situação para pressão de 25 MPa, em que esta tendência não ocorre. Na Tabela 30 é possível ver que, para a espessura de 0,5 mm, nos três adesivos, os valores de $P_{máx}$ são baixos. Esta situação deve-se ao substrato interior atingir a rotura no primeiro *step* da análise, assim a junta só é submetida à pressão interior e não sendo submetida à análise de tração, daí apresentarem estes valores baixos.

3.2.6 Previsão da energia dissipada

Neste capítulo será analisada a energia dissipada, estudando a influência dos adesivos utilizados com os parâmetros L_o , t e pressão interior na junta tubular. Este valor de energia dissipada é obtido através da área diretamente abaixo da curva $P-\delta$.

De seguida são apresentados gráficos que mostram o comportamento da energia dissipada em função de L_o e da espessura do substrato. Efetuada uma análise aos casos

apresentados, consegue-se visualizar uma influência de L_0 , sendo possível afirmar que existe um aumento de energia dissipada em função de L_0 .

O adesivo Araldite® AV138 apresenta uma baixa energia dissipada, para a espessura mais elevada, como se poderá verificar na Figura 166, Figura 169 e Figura 172. A observação efetuada é justificada pela rotura prematura do adesivo, devido à sua elevada rigidez, e ao facto de possuir uma reduzida capacidade de deformação plástica.

Neste capítulo foi identificado o adesivo com maior valor de energia dissipada, sendo esse o adesivo Araldite® 2015 (Figura 167, Figura 170 e Figura 173). Este adesivo apresenta uma capacidade elevada de deformação plástica, permitindo que este suporte uma maior energia associada ao seu processo de alongamento. Apesar de este adesivo ter valores superiores, quando comparados com os outros adesivos, apresenta uma diferença reduzida quando comparado com a Araldite® AV138.

No que diz respeito ao adesivo SikaForce® 7752, este é o que apresenta os valores mais baixos de energia dissipada, como é possível verificar na Figura 168, Figura 171 e Figura 174. Contudo, este adesivo apresenta valores de energia semelhantes, quando se mantêm todos os parâmetros constantes e variando apenas L_0 .

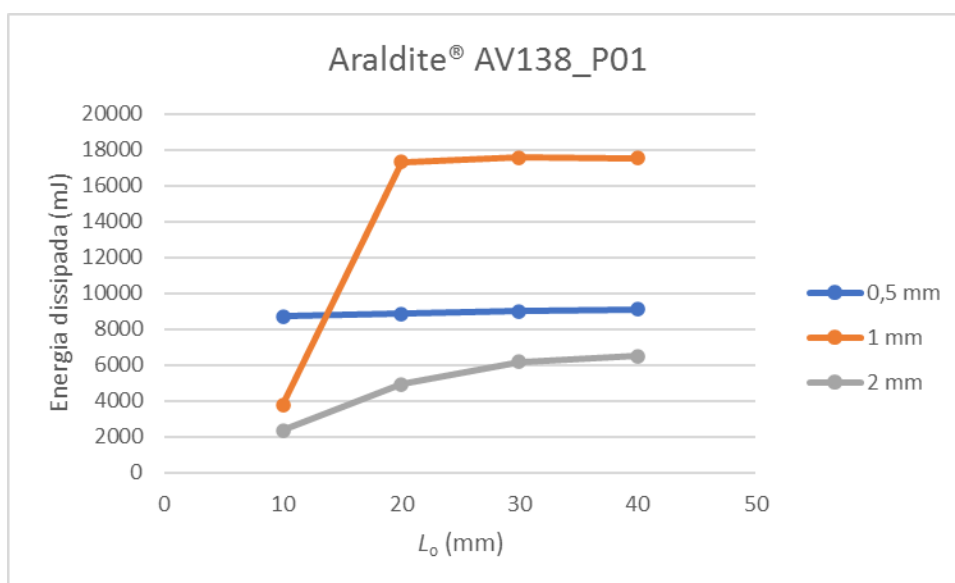


Figura 166 – Energia dissipada no adesivo Araldite® AV138 para pressão 0,1 MPa.

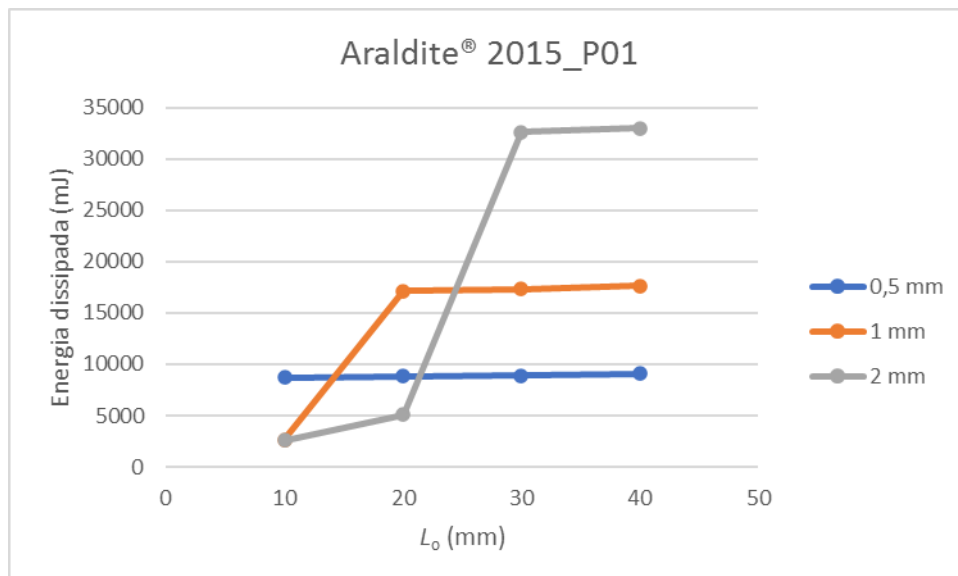


Figura 167 - Energia dissipada no adesivo Araldite® 2015 para pressão 0,1 MPa.

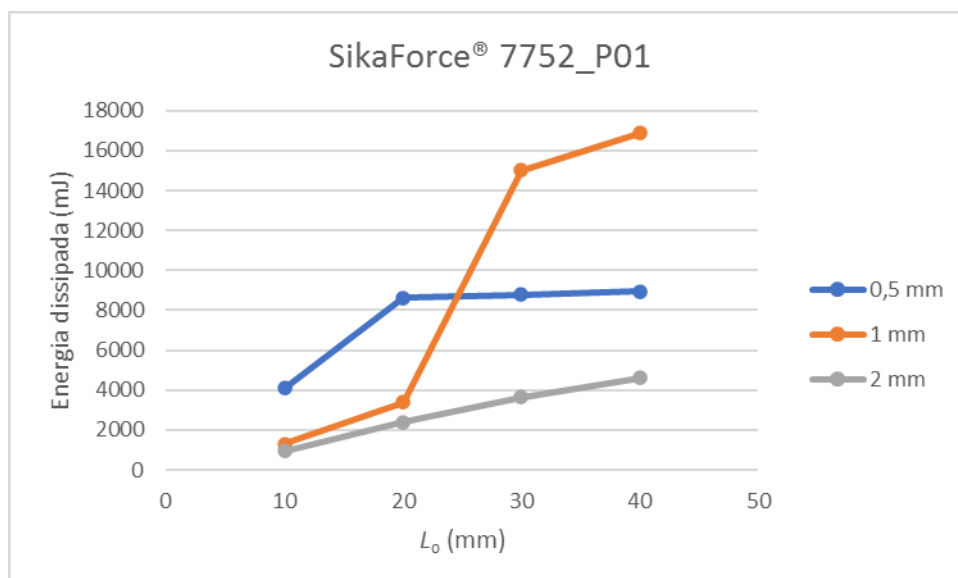


Figura 168 - Energia dissipada no adesivo SikaForce® 7752 para pressão 0,1 MPa.

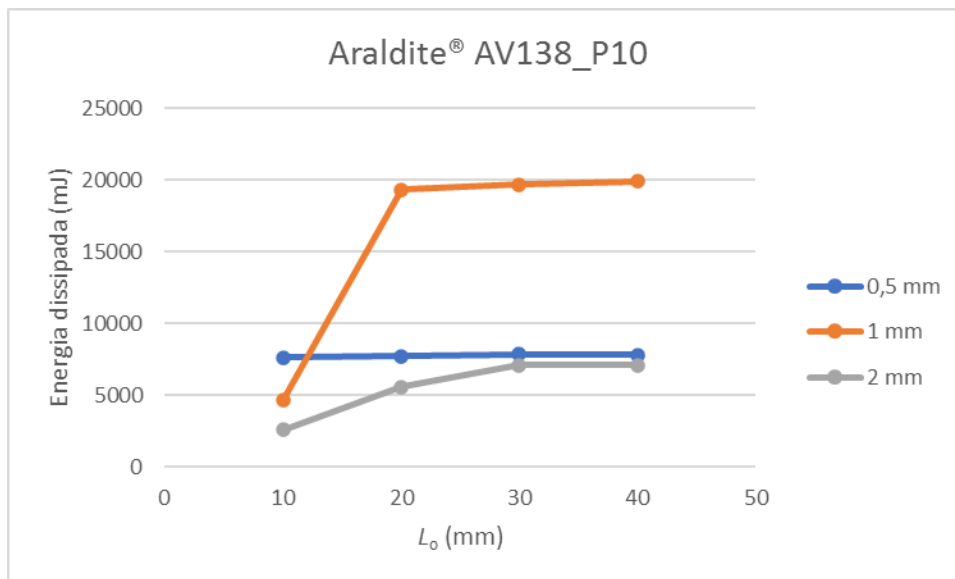


Figura 169 - Energia dissipada no adesivo Araldite® AV138 para pressão 10 MPa.

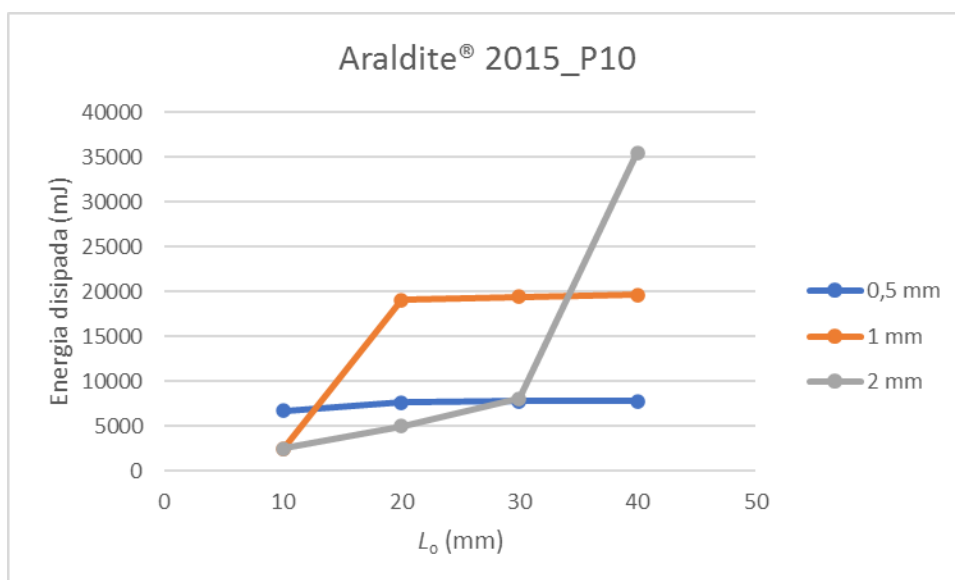


Figura 170 - Energia dissipada no adesivo Araldite® 2015 para pressão 10 MPa.

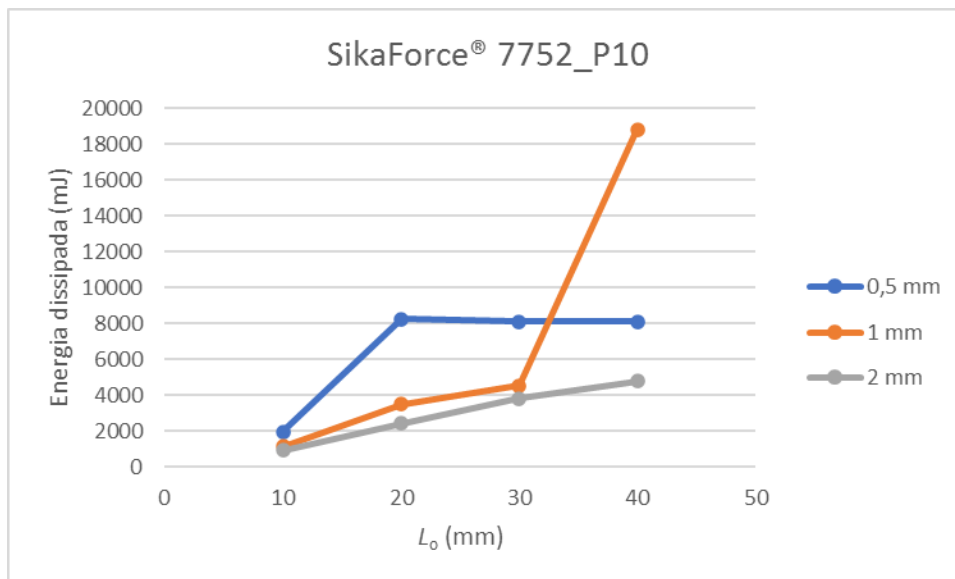


Figura 171 - Energia dissipada no adesivo SikaForce® 7752 para pressão 10 MPa.

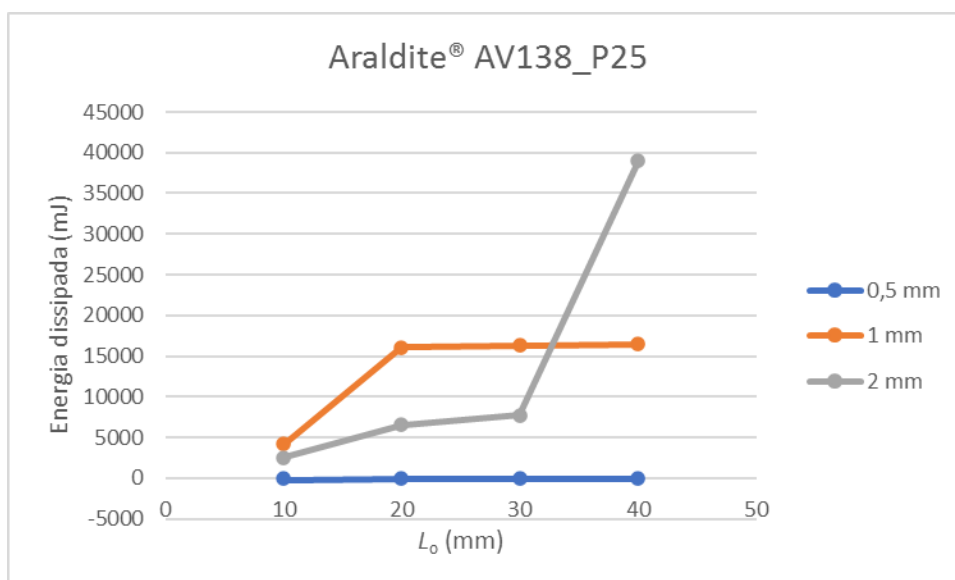


Figura 172 - Energia dissipada no adesivo Araldite® AV138 para pressão 25 MPa.

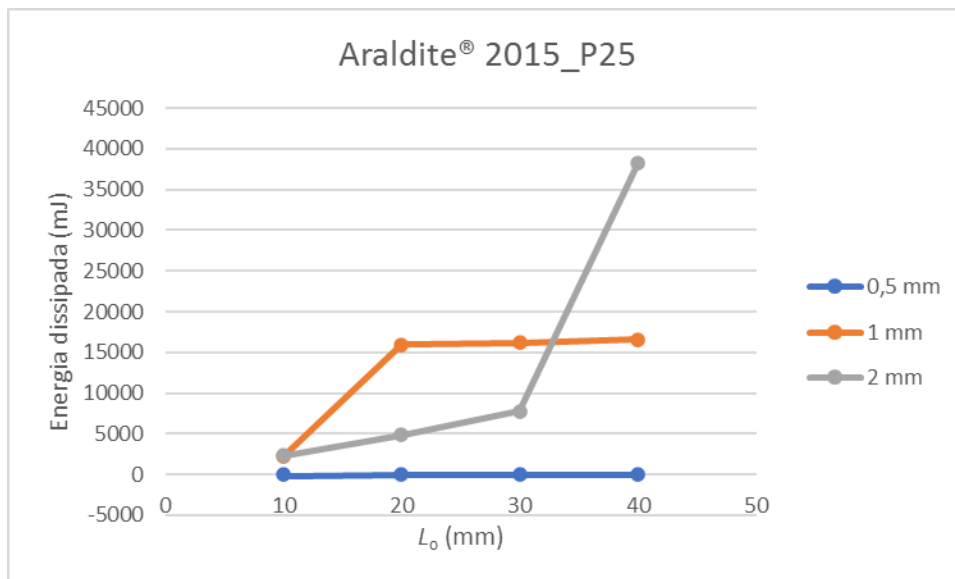


Figura 173 - Energia dissipada no adesivo Araldite® 2015 para pressão 25 MPa.

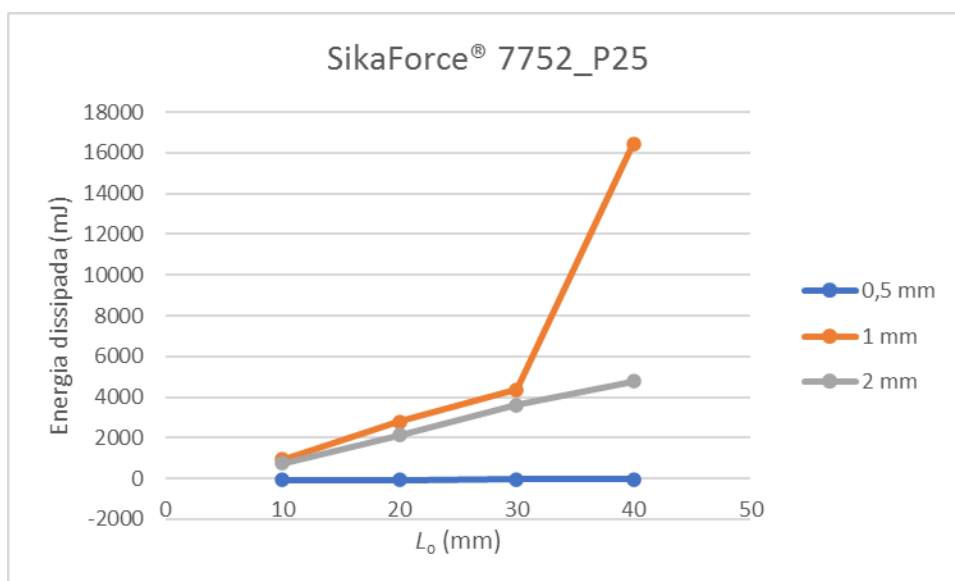


Figura 174 - Energia dissipada no adesivo SikaForce® 7752 para pressão 25 MPa.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como principais objetivos realizar um estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares, e submeter as mesmas a esforços de tração e de pressão interior. Desta forma serão criadas juntas adesivas tubulares, com tubos de alumínio e ligadas com três adesivos distintos e diferentes geometrias. Será realizada uma análise detalhada das tensões de arrancamento e corte, variável de dano, energia dissipada e da resistência por modelação de MDC de juntas tubulares analisadas no programa ABAQUS®, de forma a analisar o comportamento deste tipo de juntas.

Numa primeira etapa, foi realizada uma validação dos dados numéricos a partir de dados obtidos experimentalmente. Deste modo, o trabalho realizado por um colega [106] serviu de validação para o método que foi aplicado nesta dissertação. O trabalho realizado pelo colega apresenta as mesmas condições de análise que esta dissertação, com exceção que nesta análise é utilizado mais um parâmetro, a pressão interior.

Com esta dissertação pode-se concluir que, para valores de L_o elevados, as tensões σ_y e as tensões τ_{xy} apresentam valores de pico mais elevados. No caso das tensões σ_y , o aumento de L_o traduz-se um aumento da rigidez global da junta, levando a ocorrer concentração de tensões mais elevadas para $X/L_o=0$ e $X/L_o=1$. Quanto às tensões τ_{xy} , valores inferiores de L_o , limitam a taxa de deformação diferencial dos aderentes ao longo da sobreposição, o que permite uma distribuição mais uniforme das tensões. Com estas análises é possível verificar que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta maiores picos de σ_y/τ_{avg} e de τ_{xy}/τ_{avg} , uma vez que apresenta o maior valor de E . Este adesivo é um adesivo com elevada rigidez, levando as tensões a serem distribuídas pelas extremidades do adesivo. Com estes valores, o adesivo Araldite® AV138 condiciona a resistência da junta, podendo levar a uma rotura prematura da junta. O mesmo pode ser verificado no adesivo Araldite® 2015, contudo este apresenta uma rigidez inferior quando comparado com a Araldite® AV138. O adesivo SikaForce® 7752 demonstrou ser o menos resistente.

Em relação à variável de dano (SDEG) quando ocorre um valor zero no início do dano e um valor de 1, quando ocorre perda total da resistência do material, para valores de zero o adesivo encontra-se na zona elástica, enquanto que para valores entre 0 e 1, o adesivo encontra-se na zona plástica, ou seja, quando este valor é 0, não ocorre dano. Quando este atinge o valor 1, ocorre rotura completa. Assim sendo, a Araldite® AV138 apresenta variações abruptas nas extremidades de sobreposição e, como se trata de um adesivo frágil, a rotura nas extremidades ocorre com facilidade. Comprova-se

novamente a teoria das tensões estarem concentradas na extremidade do adesivo, tornando esta uma zona de risco.

A Araldite® 2015 não apresenta mudanças abruptas entre os elementos danificados e os que ainda não sofreram degradação. De facto, pode ser verificado que as extremidades apresentam dano, contudo os valores de SDEG são inferiores à Araldite® AV138. Este aspeto mostra que este adesivo poderá ser uma das melhores opções, para futuras aplicações.

O SikaForce® 7752 apresenta uma subida abrupta na extremidade, o que leva a concluir que, para além de não ser o esperado, não será um tipo de adesivo com melhor comportamento para este tipo de aplicações.

As curvas P - δ obtidas através da análise numérica por MDC no ABAQUS® em função do comprimento de sobreposição, espessura e pressão interior para os três adesivos em estudo, revelam que o adesivo Araldite® AV138 apresenta os valores de $P_{máx}$ mais elevados, sendo este comportamento consequência da sua resistência. O adesivo SikaForce® 7752 é o que apresenta ser menos resistente.

A energia dissipada aumenta em função de L_o . O adesivo Araldite® AV138 apresenta uma baixa energia dissipada, para a espessura mais elevada, sendo Araldite® 2015 o que apresenta maior valor de energia dissipada, devido à capacidade elevada de deformação plástica. O adesivo SikaForce® 7752 é o que apresenta os valores mais baixos de energia dissipada.

Em função do exposto, considera-se que a melhor solução é optar por usar o adesivo Araldite® 2015, com uma espessura de 2 mm e um comprimento de sobreposição de 40 mm. Esta opção passa pelo adesivo escolhido apresentar elevada energia dissipada, o que mostra que aguenta cargas elevadas. A Araldite® 2015, como é um adesivo dúctil apresenta mais plasticidade. Este adesivo apresenta valores altos de $P_{máx}$, podendo não ser o melhor dos três, mas muito próximo.

Como sugestão de trabalhos futuros apresentam-se as seguintes propostas:

- Validar os resultados numéricos para as condições impostas com ensaios experimentais;
- Validação de juntas tubulares com variações geométricas;
- Estudo numérico de juntas tubulares com curvatura.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media.
2. 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.
3. Nunes, S.L.S., Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla, in Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto 2015: Porto, Portugal.
4. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdão, Holanda: Elsevier.
5. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
6. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Morais, e A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005.
7. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova-Iorque, EUA: McGraw-Hill.
8. Plascore. 2019; Available from: <https://www.plascore.com/wp-content/uploads/2017/03/composite-panel.jpg>.
9. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto, Portugal: Publindústria.
10. da SILVA, F.J.G., *Tecnologia da soldadura* 2014, Porto, Portugal: Publindústria. 432.
11. Löbel, T., D. Holzhüter, M. Sinapius, C.J.I.J.o.A. Hühne, e Adhesives, *A hybrid bondline concept for bonded composite joints*. 2016. **68**: p. 229-238.
12. Louro, A., I. Vicente, D. Santos, L. Máimo, J. Amorim, e R. Carvalho, *Adesivos estruturais na construção de aviões*. 2010, Porto: Projecto FEUP.
13. Mays, G.C. e A.R. Hutchinson, *Adhesives in civil engineering*. 2005: Cambridge University Press.
14. Markatos, D., K. Tserpes, E. Rau, S. Markus, B. Ehrhart, e S.J.C.P.B.E. Pantelakis, *The effects of manufacturing-induced and in-service related bonding quality reduction on the mode-I fracture toughness of composite bonded joints for aeronautical use*. 2013. **45**(1): p. 556-564.
15. Brandão, A., C. Oliveira, F. Beleza, J. Pinto, J. Couto, R. Mendes, e V. Correia, *Adesivos em Automóveis—Que adesivos se utilizam em automóveis e qual a sua função?* Universidade do Porto—Faculdade de Engenharia, Porto, 2010.

16. Santos, A.F., *Avaliação do comportamento mecânico de um adesivo estrutural epóxi utilizado na indústria automobilística*. 2005, Universidade de São Paulo: São Paulo, Brasil.
17. Ydenius, A., *Integration of car and road infrastructure design: crash severity and occupant injury risk evaluations in frontal real-world crashes*. 2010: Institutionen för klinisk neurovetenskap/Department of Clinical Neuroscience.
18. MURAD, D., *Global adhesives and sealants state of the union*. J The ChemQuest Group, abril, 2007.
19. COGNARD, P., *Building & Construction Adhesives-Part I*. J General Information Rules. Adhesives Sealants 2003.
20. Vasconcelos Loureiro, A.M., S. Borschiver, e P.L.d.A. Coutinho, *Tendências Tecnológicas de Adesivos e Selantes Aplicados na Construção Civil*. J Journal of technology management innovation 2009. **4**(2): p. 115-129.
21. Kinloch, A.J., *Adhesion and adhesives: science and technology*. 2012: Springer Science & Business Media.
22. Scott, N., *Linha de Adesivos Estruturais Crystic Crestomer® e Guia de Aplicação*. N.S.E.Q. Ltd, 2016.
23. Teixeira, L.M.B.S., *Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais*. 2000, Instituto Superior Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
24. TECNOLÓGICA, C.F.D.E. e C.S. DA FONSECA, *EFEITO DO ADESIVO E DO COMPRIMENTO DE SOBREPOSIÇÃO EM JUNTAS COLADAS*. 2015.
25. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal
26. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2005.
27. Pereira, A.B. e A.B. de Moraes, *Influência das tensoes de bordo na resistência de juntas coladas de sobreposição*. Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecánica, 2004. **8**(3): p. 69-79.
28. Pereira, A.B., *Fractura de juntas coladas*. 2002, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de Aveiro.
29. Vallée, T., J.R. Correia, e T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles–Part II: Strength prediction*. J Composites Science Technology 2006. **66**(13): p. 1915-1930.
30. Vallée, T., J.R. Correia, T.J.C.S. Keller, e Technology, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*. 2006. **66**(13): p. 1903-1914.
31. Gonçalves, J.P.M., *Contribuições para a análise numérica e experimental do comportamento de juntas de sobreposição simples*. 2000, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
32. Gonçalves, J.P.M., M. De Moura, e P.M.S.T. Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**: p. 357-365.
33. Gauthier, M.M., *Engineered materials handbook*. Vol. 1. 1995: ASM International.

34. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2014, Norwich, EUA: William Andrew.
35. Volkersen, O.J.L.s., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. 1938. **15**: p. 41-47.
36. Adams, R. e N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. J Journal of strain analysis., 1974. **9**(3): p. 185-196.
37. 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.
38. Sosa, J.C., N.J.C.S. Karapurath, e Technology, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. 2012. **72**(7): p. 788-791.
39. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W.C. Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*. 1997, Amestardão, Alemanha Springer.
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 - J REINF PLAST COMPOSITE, 2007. **26**: p. 183-201.
41. Griffith, A.A., VI. *The phenomena of rupture and flow in solids*. J Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
42. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. 1959(2).
43. Hutchinson, J.W., *Singular behaviour at the end of a tensile crack in a hardening material*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(1): p. 13-31.
44. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. 1968.
45. Fernlund, G. e J. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method*. J International journal of adhesion adhesives, 1991. **11**(4): p. 213-220.
46. Fernlund, G. e J. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 2: Experimental study*. J International journal of adhesion adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
47. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics Mechanics 1959. **23**(3): p. 622-636.
48. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics Physics of Solids 1960. **8**(2): p. 100-104.
49. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
50. da Silva L.F.M., C.R.D.S.G., *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*. Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints. 2012, Berlim, Alemanha: Springer.
51. 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*. J International Journal of Solids Structures 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.

52. Turon, A., J. Costa, P. Camanho, e C. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: applied science manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
53. Kafkalidis, M. e M. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids Structures 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
54. Yang, Q. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. J International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
55. Banea, M., L.d. Silva, e R. Campilho, *Effect of temperature on tensile strength and mode I fracture toughness of a high temperature epoxy adhesive*. Journal of adhesion science technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
56. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. J International journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
57. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. J International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
58. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. J International Journal of Solids Structures 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
59. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
60. Pinto, A.M.G., A. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M. De Moura, e A.J.T.J.o.A. Baptista, *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. 2009. **85**(6): p. 351-376.
61. Liljedahl, C., A. Crocombe, M. Wahab, e I. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International journal of fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
62. De Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques, e P. De Castro, *Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures., 2000. **50**(2): p. 151-157.
63. Campilho, R., M. De Moura, e J. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
64. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. J International Journal of Solids Structures 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
65. De Moura, M., R. Campilho, e J. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. J International Journal of Solids Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
66. Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based adhesive—an experimental study*. J The Journal of Adhesion., 2010. **86**(8): p. 816-835.

67. Lee, M.J., T.M. Cho, W.S. Kim, B.C. Lee, e J.J. Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. J International Journal of Adhesion Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
68. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. J International Journal of Solids Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
69. Pandya, K. e J. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. J Polymer Engineering Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
70. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. J Experimental Mechanics., 1992. **32**(4): p. 296-303.
71. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, A. Pinto, J. Morais, e J. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. J Composites Part B: Engineering., 2009. **40**(2): p. 149-157.
72. Campilho, R., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. J International Journal of Adhesion Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
73. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. J International Journal of Fracture., 2010. **165**(2): p. 149-162.
74. Standard, A., *D3433-99: Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*, ASTM International, West Conshohocken, PA. 2012.
75. Gustafson, P.A. e A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. J International Journal of Solids Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
76. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. J Engineering Fracture Mechanics., 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
77. Blackman, B., A. Brunner, e J. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. J Engineering Fracture Mechanics., 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
78. Daudeville, L. e P. Ladev ze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures., 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
79. Khoramishad, H., A. Crocombe, K. Katnam, e I.J.I.J.o.f. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
80. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. 2012: Springer Science & Business Media.
81. Wahab, M.A., I. Ashcroft, A. Crocombe, e S. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. J Journal of adhesion science technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
82. 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*. J Journal of Adhesion Science Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.

83. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. J Engineering Fracture Mechanics-, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
84. Hua, Y., A. Crocombe, M. Wahab, e I. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. J International Journal of Adhesion Adhesives-2008. **28**(6): p. 302-313.
85. Chen, Z., R. Adams, e L.F. Da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. J Engineering Fracture Mechanics., 2011. **78**(6): p. 990-1007.
86. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: John Wiley & Sons.
87. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. J International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
88. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. J International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
89. Systèmes, D., *ABAQUS 6.13 Theory Guide*. J Vélizy-Villacoublay, France., 2013.
90. Campilho, R., M. Banea, F. Chaves, e L. Da Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. J Computational Materials Science., 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
91. Hosseinzadeh, R., K. Shahin, e F. Taheri, *A simple approach for characterizing the performance of metallic tubular adhesively-bonded joints under torsion loading*. J Journal of Adhesion Science Technology 2007. **21**(16): p. 1613-1631.
92. Adams, R. e N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints*. J The Journal of Adhesion., 1977. **9**(1): p. 1-18.
93. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997, Amestardão, Alemanha: Springer Science & Business Media.
94. Labbé, S. e J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. J International Journal of Adhesion Adhesives 2012. **33**: p. 26-35.
95. 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*. J The Journal of Adhesion., 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
96. 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.
97. Qiu, C., P. Feng, Y. Yang, L. Zhu, e Y. Bai, *Joint capacity of bonded sleeve connections for tubular fibre reinforced polymer members*. J Composite Structures, 2017. **163**: p. 267-279.
98. Maudlin, P., S. Wright, U. Kocks, e M. Sahota, *An application of multisurface plasticity theory: yield surfaces of textured materials*. J Acta materialia, 1996. **44**(10): p. 4027-4032.

99. Mendelson, A.J.K., Malabar, FL, *Plasticity: Theory and Applications (reprint edition)*. 1983: p. 164.
100. Hosseinzadeh, R., N. Cheraghi, e F. Taheri, *An engineering approach for design and analysis of metallic pipe joints under torsion by the finite element method*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2006. **41**(6): p. 443-452.
101. Esmaeel, R.A. e F. Taheri, *Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion*. J Composite Structures, 2011. **93**(7): p. 1765-1774.
102. Xu, W. e G. Li, *Finite difference three-dimensional solution of stresses in adhesively bonded composite tubular joint subjected to torsion*. J International Journal of Adhesion Adhesives 2010. **30**(4): p. 191-199.
103. Hipol, P.J., *Analysis and optimization of a tubular lap joint subjected to torsion*. J Journal of composite materials, 1984. **18**(4): p. 298-311.
104. Knox, E., M. Cowling, e S. Hashim, *Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes*. J International journal of fatigue, 2000. **22**(6): p. 513-519.
105. Reedy, E. e T.R. Guess, *Composite-to-metal tubular lap joints: strength and fatigue resistance*. J International Journal of Fracture, 1993. **63**(4): p. 351-367.
106. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
107. Dorn, L. e W. Liu, *The stress state and failure properties of adhesive-bonded plastic/metal joints*. J International Journal of Adhesion Adhesives 1993. **13**(1): p. 21-31.
108. 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.
109. 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, Portugal.
110. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
111. 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.
112. 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.
113. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
114. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.

115. Chen, X., *Numerical study of stable tearing crack growth events using the cohesive zone model approach*. 2013.
116. Jousset, P. e M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. *J Engineering Fracture Mechanics*-, 2014. **132**: p. 48-69.
117. Pocius, A.V., *Adhesion and adhesives technology: an introduction*. 2012: Carl Hanser Verlag GmbH Co KG.
118. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. *J International Journal of Solids Structures* 2004. **41**(2): p. 413-434.
119. Leffler, K., K.S. Alfredsson, e U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. *J International Journal of Solids Structures* 2007. **44**(2): p. 530-545.
120. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. *J Engineering Fracture Mechanics*-, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
121. Campilho, R., A. Pinto, M.D. Banea, R. Silva, L.F.J.J.o.A.S. da Silva, e Technology, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
122. De Moura, M., J. Gonçalves, J. Chousal, R.J.I.J.o.a. Campilho, e Adhesives, *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. 2008. **28**(8): p. 419-426.
123. Marques, E. e L.F.J.T.J.o.A. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. 2008. **84**(11): p. 915-934.
124. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014.
125. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. 2016.
126. Taib, A.A., R. Boukhili, S. Achiou, S. Gordon, e H. Boukehili, *Bonded joints with composite adherends. Part I. Effect of specimen configuration, adhesive thickness, spew fillet and adherend stiffness on fracture*. *J International Journal of Adhesion Adhesives* 2006. **26**(4): p. 226-236.
127. 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*. *J Composites science technology* 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
128. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, J.J.I.J.o.A. Domingues, e Adhesives, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. 2009. **29**(2): p. 195-205.
129. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009.
130. Reis, P., F. Antunes, e J.J.C.s. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. 2005. **67**(1): p. 125-133.
131. Luo, Q. e L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. *J International Journal of Solids Structures* 2007. **44**(7-8): p. 2349-2370.
132. Vable, M. e J.R. Maddi, *Boundary element analysis of adhesively bonded joints*. *J International journal of adhesion adhesives* 2006. **26**(3): p. 133-144.

133. Grant, L., R.D. Adams, e L.F. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. J International journal of adhesion adhesives 2009. **29**(4): p. 405-413.
134. Campilho, R.D., M. De Moura, J.J.C.S. Domingues, e Technology, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
135. Davis, M. e D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. J International journal of adhesion adhesives 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
136. Campilho, R., M. De Moura, J. Domingues, J.J.J.o.A.S. Morais, e Technology, *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. 2008. **22**(13): p. 1565-1591.
137. Shishesaz, M. e N. Bavi, *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. J Journal of Adhesion Science Technology 2013. **27**(11): p. 1197-1225.
138. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal shear joints*. 1999.
139. Yang, Q. e B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. J International Journal of Fracture, 2005. **133**(2): p. 107-137.