



Uso de alterações geométricas em juntas adesivas tubulares para melhoria da resistência ao impacto

AMARO FILIPE MARQUES VIEIRA DA SILVA

setembro de 2020

USO DE ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS EM JUNTAS ADESIVAS TUBULARES PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Amaro Filipe Marques Vieira da Silva

1150719

2020

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



USO DE ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS EM JUNTAS ADESIVAS TUBULARES PARA MELHORIA DA RESISTÊNCIA AO IMPACTO

Amaro Filipe Marques Vieira da Silva

1150719

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

A definir

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Especial agradecimento ao meu orientador Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela oportunidade de desenvolver a presente dissertação, pela disponibilidade que teve para apoiar e ajudar ao longo do último ano.

À minha família, em especial aos meus pais pela compreensão nos momentos mais difíceis e pelo apoio prestado ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto pelos conhecimentos transmitidos por todos os docentes que fizeram parte da minha vida académica nos últimos 5 anos. A todos os visados, muito obrigado.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas tubulares; Adesivo estrutural; Método de elementos finitos; Modelos de dano coesivo; Análise de tensões; Previsão de resistência; Impacto; Alterações geométricas.

RESUMO

A constante evolução da indústria e a necessidade de se utilizar novos tipos de materiais fazem com que as ligações adesivas sejam cada vez mais aplicadas. A possibilidade de unir uma vasta gama de materiais dissimilares, elevada resistência à fadiga, facilidade e elevada cadência de produção ou a distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada são algumas das vantagens das ligações adesivas em relação às ligações convencionais. Relativamente às juntas adesivas tubulares, a sua utilização tem crescido também bastante, apesar de os estudos desenvolvidos neste tipo de juntas serem muito escassos, principalmente na área do impacto. Assim sendo, é de primordial importância conseguir prever e potenciar este tipo de juntas para poder resistir a estes esforços pontuais.

Neste trabalho será estudada a resistência ao impacto de juntas adesivas tubulares em aderentes de alumínio na liga AW6082-T651. Para esse efeito, será considerada a alteração dos parâmetros geométricos principais e a alteração da geometria das juntas. Os parâmetros geométricos principais são o comprimento de sobreposição e a alteração da espessura do tubo exterior. A alteração da geometria da junta será testada através da adição de chanfros interiores e exteriores nos aderentes, e a adição de filete de adesivo nas extremidades da sobreposição. Para poder avaliar as alterações implementadas às juntas, serão utilizados três adesivos de propriedades distintas. O adesivo AV138 de elevada rigidez, o adesivo DP8005 de elevada ductilidade e o adesivo XNR6852 E-2 de elevada tenacidade. Pela análise conseguiu-se retirar as distribuições das tensões de corte e arrancamento que se instalam na camada adesiva, para os adesivos citados. A previsão da resistência das juntas tubulares foi realizada por modelos de dano coesivo. Depois de retirados os resultados será feita a análise dos mesmos, de forma a averiguar quais as geometrias de junta ótimas em função do adesivo aplicado. No final do estudo concluiu-se que o adesivo XNR6852 E-2 foi o que conseguiu melhores resultados, tendo sido a adição de um filete de adesivo a 15° a alteração de geometria da junta que maximizou a resistência da junta adesiva tubular ao impacto. Por outro lado, a técnica de modelos de dano coesivo foi validada para a previsão da resistência de juntas adesivas tubulares ao impacto.

KEYWORDS

Tubular adhesive joints; Structural adhesive; Finite element method; Cohesive zone models; Stress analysis; Strength prediction; Impact; Geometrical modifications.

ABSTRACT

The constant evolution of the industry and the need to use new types of materials mean that adhesive bonds are increasingly applied. The possibility of joining a wide range of dissimilar materials, high resistance to fatigue, ease and high cadence of production or the more uniform distribution of stresses over the total of the bonded area are some of the advantages of adhesive bonds over conventional bonds. Regarding tubular adhesive joints, their use has also grown considerably, although studies on this type of joint are very scarce, especially in the impact area. Therefore, it is of extreme importance to be able to predict and enhance this type of joints to be able to resist these specific efforts.

In this work, the impact resistance of tubular adhesive joints on aluminum adhesives in the AW6082-T651 alloy will be studied. For this purpose, the alteration of the main geometric parameters and the alteration of the joint geometry will be considered. The main geometric parameters are the overlap length and the change in the thickness of the outer tube. The change in the geometry of the joint will be tested through the addition of internal and external chamfers in the adherents, and the addition of an adhesive fillet at the ends of the overlap. To evaluate the changes implemented in the joints, three adhesives with different properties will be used. The high rigidity AV138 adhesive, the high ductility DP8005 adhesive and the high tenacity XNR6852 E-2 adhesive. Through the analysis it was possible to determinate the distribution of the cutting and lifting stresses that are installed in the adhesive layer, for the aforementioned adhesives. The resistance prediction of tubular joints was performed using cohesive damage models. After removing the results, their analysis will be carried out, to ascertain which are the optimal joint geometries depending on the adhesive applied. At the end of the study it was concluded that the XNR6852 E-2 adhesive was the one that achieved the best results, with the addition of a 15 ° adhesive fillet that maximized the resistance of the tubular adhesive joint to impact. On the other hand, the cohesive damage model technique was validated to predict the resistance of tubular adhesive joints to impact.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
COH2D4	<i>4-node two-dimensional cohesive element</i>
CPE4R	<i>4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration</i>
CSTRESS	<i>Contact pressure and frictional shear stresses</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FRP	<i>Fibre-reinforced plastic</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
LE	<i>Logarithmic strain components</i>
MDC	Modelo de dano coesivo
MEF	Método de elementos finitos
MEFX	Método de elementos finitos estendido
PE	<i>Plastic strain components</i>
PEEQ	<i>Equivalent plastic strain</i>
S	<i>All stress components</i>
SDEG	<i>Scalar stiffness degradation variable</i>
TAST	<i>Tapered Double Cantilever Beam</i>
U	<i>Translations and rotations</i>
V	<i>All velocity components</i>

Lista de símbolos

b	Largura do aderente
C	Diâmetro do substrato interior
E	Módulo de elasticidade
E_{abs}	Energia absorvida no impacto
G	Módulo de elasticidade transversal
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
L_0	Comprimento de sobreposição
l_{ASI}	Comprimento chanfro extremidade direita
l_{ASO}	Comprimento chanfro extremidade esquerda
M	Momento fletor
M_t	Momento torsor
P	Carga aplicada
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima
t_a	Espessura do adesivo
t_n	Tensão coesiva à tração
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
t_{si}	Espessura do aderente interior
t_{so}	Espessura do aderente exterior
$\Delta P_{m\acute{a}x}$	Aumento percentual da carga máxima
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade

σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de arrancamento
τ_{med}	Tensão de corte média
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
α	Ângulo de chanfro exterior
α_{si}	Ângulo do chanfro (aderente exterior)
α_{so}	Ângulo do chanfro (aderente interior)
δ	Deslocamento
$\delta_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo
ε_f	Deformação de rotura à tração

Lista de Unidades

J	Joule
kg	Quilograma
m/s	Metro por segundo
mm	Milímetro
Nm	Newton metro

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Distribuição de tensões para diferentes tipos de ligação [4]	8
Figura 2 – Materiais utilizados na cauda <i>Boeing777</i> [5].....	9
Figura 3 Utilização de adesivos para colagem dos componentes assinalados [5].....	10
Figura 4 - Modos de carregamento em juntas adesivas [8]	11
Figura 5- Modos de rotura classificados pela norma ASTM D 5573 [4]	12
Figura 6- Possíveis configurações de junta [3]	13
Figura 7 – Configurações possíveis de juntas tubulares [5].....	14
Figura 8 – Modelo 2D axissimétrico da junta a estudar [12].....	14
Figura 9 - Resultados obtidos para cada um dos parâmetros estudados.....	16
Figura 10 - (a)-Junta tubular com manga em aço sujeita a carga axial (b)-Malha modelada pelo MEF. (Adaptado de [16]).....	17
Figura 11- Parâmetros geométricos e malha modelada pelo MEF (adaptado de [17])	18
Figura 12 – Capacidade de transmissão do momento torsor em função do ângulo de empilhamento [18]	18
Figura 13 – Capacidade de resistência ao momento torsor em função da carga aplicada e respetivo modo de rotura [17].....	19
Figura 14- Junta testada e bloco de alumínio para controlar o L_0 [20]	20
Figura 15 – Resistencia à torção em função de L_0 [20].....	20
Figura 16 - Carregamentos cíclicos comuns em fadiga [22]	22
Figura 17 - Efeito da rugosidade superficial no tempo de vida à fadiga [26]	23
Figura 18- Efeito da folga na ligação sobre a resistência à fadiga [26].....	23
Figura 19 - Efeito da temperatura sobre a resistência à fadiga [26]	24
Figura 20 - Modos de rotura [1]	25
Figura 21 – Representação da geometria da estrutura tipo A (a) e tipo B (b) [36]	26
Figura 22 - Condições do ensaio de impacto (adaptado de [36]).....	27
Figura 23 - Malha de EF das estruturas A e B [36].....	27
Figura 24 – (a) - Evolução da taxa de compressão ao longo do impacto para a estrutura tipo A e (b) – Evolução da taxa de compressão ao longo do impacto para a estrutura do tipo B [36]	27
Figura 25 -Efeito do L_0 na resistência da junta [39].....	28
Figura 26 - Efeito do L_0 na resistência para adesivos dúcteis e frágeis [5]	29
Figura 27 - Distribuição de tensões em adesivos de diferentes espessuras [40]	30

Figura 28 – Carga de rotura em função de t_a , resultados de vários autores [40].....	31
Figura 29 – Carga na falha vs. M (Resultados do MEF) [43]	31
Figura 30 - Diferentes filetes de adesivo para JSS (adaptado de [44])	32
Figura 31 -Diferentes configurações de juntas em chanfro [5]	33
Figura 32 - Distribuição das tensões de corte para diferentes juntas com chanfro exterior (adaptado de [3, 5]).....	34
Figura 33 - a)Geometria da JSS ensaiada; b) Geometria da junta ondulada ensaiada [46].....	35
Figura 34 – (a): Resultado do ensaio de tração para junta do tipo A e (b): Resultado do ensaio de tração para junta do tipo B [46]	35
Figura 35 – Geometria da junta ensaiada, carga e condições fronteira aplicadas [47].....	36
Figura 36 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura com espessura nula: (a) - aproximação local; b) Modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua [59].....	38
Figura 37 - Geometria da JSS de validação [77].....	45
Figura 38 - Controlo de malha no modelo de validação [77]	48
Figura 39 - Pormenor da malha do modelo na zona do adesivo [77].....	48
Figura 40 - Condições de fronteira [78].....	48
Figura 41 - Curva P - δ numérica e respetiva linha de tendência do adesivo RTV106 [77]	49
Figura 42 - Comparação dos resultados obtidos com valores de referência para o adesivo RTV106 [77]	49
Figura 43 - Curva P - δ numérica do adesivo AV138 [77]	50
Figura 44 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo AV138 [77]	50
Figura 45 - Curva P - δ numérica do adesivo DP8005 [77]	51
Figura 46 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo DP8005 [77]	51
Figura 47 - Curva P - δ numérica do adesivo XNR6852 E-2 [77].....	52
Figura 48 - Comparação do resultado obtido com valores de referência com o adesivo XNR6852 E-2 [77]	52
Figura 49 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [87]	54
Figura 50 – Criação dos materiais do modelo	56
Figura 51 - Desenho 2D da junta tubular	57
Figura 52 - Tempo de análise do modelo	58
Figura 53 - Configuração das variáveis a retirar do modelo.....	58
Figura 54 – Escolha de variáveis para processamento dos dados.....	58
Figura 55 – Condições fronteira aplicadas ao modelo	59
Figura 56 - Aplicação de velocidade à massa	59

Figura 57 - Detalhe da malha na zona da junta adesiva ($L_0=20$ mm)	60
Figura 58 – Lei triangular do modelo de MDC.....	61
Figura 59 - Geometria do modelo para teste de L_0	62
Figura 60 - Pormenor da malha na junta adesiva na zona da ligação	63
Figura 61 - Pormenor da malha na camada adesiva e sentido do eixo X	63
Figura 62-Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0	64
Figura 63 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0	65
Figura 64 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de L_0	66
Figura 65 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de L_0	66
Figura 66 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	67
Figura 67 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	68
Figura 68 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de L_0	69
Figura 69 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada L_0 com o adesivo AV138	69
Figura 70 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de L_0	70
Figura 71 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada L_0 com o adesivo DP8005.....	71
Figura 72 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	72
Figura 73 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada L_0 com o adesivo XNR6852 E-2	72
Figura 74 -Geometria do modelo para teste de t_{so}	74
Figura 75 - Pormenor da malha na junta adesiva ($t_{so}=3$ mm)	74
Figura 76 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de t_{so}	75
Figura 77 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de t_{so}	76
Figura 78 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de t_{so}	77
Figura 79 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de t_{so}	77
Figura 80 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{so}	78
Figura 81 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{so}	78
Figura 82 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de t_{so}	79
Figura 83 – $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de t_{so} com o adesivo AV138	80
Figura 84 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de t_{so}	81
Figura 85 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de t_{so} com o adesivo DP8005	81
Figura 86 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{so}	82
Figura 87 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de t_{so} com o adesivo XNR6852 E-2	83
Figura 88 - Geometria do modelo para o estudo de α	84

Figura 89 - Pormenor da malha na junta adesiva ($\alpha=15^\circ$).....	85
Figura 90 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de α	85
Figura 91 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de α	86
Figura 92 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de α	87
Figura 93 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de α	87
Figura 94 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	88
Figura 95 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	89
Figura 96 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de α	89
Figura 97 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de α com o adesivo AV138.....	90
Figura 98 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de α	91
Figura 99 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de α com o adesivo DP8005.....	91
Figura 100 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	93
Figura 101 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de α com o adesivo XNR6852 E-2.....	93
Figura 102 - Geometria do modelo para o estudo de θ	95
Figura 103 - Pormenor da malha na junta adesiva ($\theta=15^\circ$).....	95
Figura 104 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de θ	96
Figura 105 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de θ	96
Figura 106 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de θ	97
Figura 107 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de θ	98
Figura 108 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	98
Figura 109 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	99
Figura 110 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de θ	100
Figura 111 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de θ com o adesivo AV138.....	100
Figura 112 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de θ	101
Figura 113 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de θ com o adesivo DP8005.....	102
Figura 114 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	103
Figura 115 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de θ com o adesivo XNR6852 E-2.....	104
Figura 116 - Geometria do modelo para o estudo de β	106
Figura 117 - Pormenor da malha na junta adesiva ($\beta=15^\circ$).....	106
Figura 118 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de β	107
Figura 119 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de β	107
Figura 120 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de β	108

Figura 121 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de β	109
Figura 122 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	110
Figura 123 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	110
Figura 124 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de β	111
Figura 125 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de β com o adesivo AV138	112
Figura 126 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de β	113
Figura 127 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de β com o adesivo DP8005	113
Figura 128 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	114
Figura 129 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de β com o adesivo XNR6852 E-2	115
Figura 130 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica com o adesivo AV138	117
Figura 131 - $\delta_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica com o adesivo AV138	118
Figura 132 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica com o adesivo DP8005	118
Figura 133 - $\delta_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica com o adesivo DP8005	119
Figura 134 - $P_{m\acute{a}x}$ atingida para cada alteração geométrica com o adesivo XNR6852 E-2	119
Figura 135 - $\delta_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica com o adesivo XNR6852 E-2.....	120

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1-Resumo das juntas adesivas [5].....	8
Tabela 2 -Parâmetros geométricos estudados e resultados obtidos	15
Tabela 3 - Propriedades mecânicas e ensaios para as obter	25
Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos aderentes [78].....	46
Tabela 5 - Propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos usados	46
Tabela 6 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [78].....	47
Tabela 7 - Símbolo correspondente a cada parâmetro geométrico.....	53
Tabela 8 – Propriedades estáticas dos adesivos	55
Tabela 9 – E_{abs} com o adesivo AV138 em função de L_0	70
Tabela 10 – E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de L_0	71
Tabela 11 – E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	73
Tabela 12 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de L_0 e respetivo aumento percentual.....	73
Tabela 13 - E_{abs} com o adesivo AV138 em função de t_{so}	80
Tabela 14 – E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de t_{so}	82
Tabela 15 – E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{so}	83
Tabela 16 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de t_{so} e respetivo aumento percentual.....	84
Tabela 17 - E_{abs} com o adesivo AV138 em função de α	90
Tabela 18 - E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de α	92
Tabela 19 - E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	94
Tabela 20 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de α e respetivo aumento percentual	94
Tabela 21 – E_{abs} com o adesivo AV138 em função de θ	101
Tabela 22 – E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de θ	103
Tabela 23 - E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	104
Tabela 24 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de θ e respetivo aumento percentual	105
Tabela 25 - E_{abs} com o adesivo AV138 em função de β	112
Tabela 26 - E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de β	114
Tabela 27 - E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	115
Tabela 28 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de β e respetivo aumento percentual	116

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização do relatório	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas.....	7
2.1.1	Caracterização e aplicações típicas	8
2.1.1.1	Indústria aeronáutica.....	9
2.1.1.2	Indústria automóvel.....	9
2.1.2	Esforços e possíveis modos de rotura	10
2.1.3	Configurações possíveis de junta	12
2.2	Juntas adesivas tubulares	13
2.2.1	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos estáticos de tração	14
2.2.2	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos estáticos de torção.....	17
2.2.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga	21
2.2.4	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de impacto	24
2.3	Efeitos geométricos em juntas adesivas	28
2.3.1	Comprimento de sobreposição	28
2.3.2	Espessura do adesivo	30
2.3.3	Utilização de filetes de adesivo	32
2.3.4	Utilização de chanfros interiores.....	32
2.3.5	Utilização de chanfros exteriores	33
2.3.6	Outras alterações geométricas	34
2.3.6.1	Juntas onduladas/dobradas.....	34
2.3.6.2	Juntas com rasgo transversal.....	36
2.4	Previsão de resistência de juntas adesivas.....	37

2.4.1	Solicitações estáticas.....	37
2.4.1.1	Modelos analíticos.....	37
2.4.1.2	Métodos numéricos.....	37
2.4.1.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	37
2.4.1.2.2	Mecânica da fratura.....	38
2.4.1.2.3	Modelos de dano coesivo.....	38
2.4.1.2.4	Mecânica do dano.....	39
2.4.1.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	40
2.4.2	Solicitações dinâmicas/impacto.....	40
2.4.2.1	Modelos analíticos.....	40
2.4.2.1.1	Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos.....	40
2.4.2.1.2	Modelo Voigt/Maxwell.....	40
2.4.2.1.3	Modelo Cowper-Symonds.....	41
2.4.2.1.4	Modelo Johnson-Cook.....	41
2.4.2.1.5	Modelos de sobretensão.....	42
2.4.2.1.6	Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação.....	42
3	DESENVOLVIMENTO.....	45
3.1	Validação da técnica numérica com dados experimentais.....	45
3.1.1	Descrição da geometria e materiais.....	45
3.1.2	Modelação por MDC.....	47
3.1.3	Resultados obtidos.....	48
3.1.4	Discussão dos resultados.....	52
3.2	Estudo numérico.....	53
3.2.1	Geometria da junta.....	53
3.2.2	Materiais utilizados.....	53
3.2.2.1	Substratos.....	53
3.2.2.2	Adesivos.....	54
3.2.3	Modelação por MDC.....	55
3.2.3.1	Formulação do modelo.....	60

3.2.4	Estudo dos parâmetros geométricos principais	62
3.2.4.1	Comprimento de sobreposição.....	62
3.2.4.1.1	Distribuições de tensões	63
3.2.4.1.2	Resistência das juntas e energia absorvida.....	68
3.2.4.1.3	Comparação de resultados	73
3.2.4.2	Espessura do aderente exterior.....	74
3.2.4.2.1	Distribuições de tensões	75
3.2.4.2.2	Resistência das juntas e energia absorvida.....	79
3.2.4.2.3	Comparação de resultados	83
3.2.5	Estudo de alterações geométricas	84
3.2.5.1	Chanfro exterior dos aderentes	84
3.2.5.1.1	Distribuições de tensões	85
3.2.5.1.2	Resistência das juntas e energia absorvida.....	89
3.2.5.1.3	Comparação de resultados	94
3.2.5.2	Chanfro interior dos aderentes.....	95
3.2.5.2.1	Distribuições de tensões	95
3.2.5.2.2	Resistência das juntas e energia absorvida.....	99
3.2.5.2.3	Comparação de resultados	104
3.2.5.3	Filete de adesivo	105
3.2.5.3.1	Distribuições de tensões	106
3.2.5.3.2	Resistência das juntas e energia absorvida.....	111
3.2.5.3.3	Comparação de resultados	116
3.2.6	Análise dos resultados obtidos.....	116
4	CONCLUSÕES.....	123
5	REFERÊNCIAS.....	127

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com o evoluir do tempo, cada vez mais é exigido na indústria novos produtos de elevada qualidade e a preços mais competitivos. Os materiais adesivos foram aqueles que mais se desenvolveram nos últimos anos, apesar de já serem aplicados há vários séculos. Apenas no início do século XX se deu o maior desenvolvimento nas ligações adesivas, como consequência das necessidades de melhorar os equipamentos para a primeira e segunda guerra mundiais [1].

As juntas adesivas são, atualmente, um dos melhores tipos de ligação a optar quando se pretende realizar ligações entre componentes estruturais. Ao contrário de outros tipos de ligações possíveis, geralmente mecânicas ou soldadas, as ligações adesivas permitem unir uma vasta gama de materiais dissimilares, obter uma distribuição de tensões mais uniforme, melhor adaptação a superfícies irregulares, fácil execução e automatização, entre outras. Por outro lado, apresentam também alguns inconvenientes, sendo praticamente impossíveis de remover sem danificar os componentes ligados, são mais frágeis aos esforços de arrancamento/clivagem e necessitam da aplicação de temperatura e pressão para que se realize o processo de cura.

Apesar do elevado potencial de aplicação em reservatórios, estruturas treliçadas, estruturas automóveis, entre outros, as juntas adesivas tubulares continuam a ser pouco estudadas, principalmente em situações de impacto que podem surgir pela aplicação de cargas durante o serviço ou por acidentes. De forma a potenciar a utilização deste tipo de juntas em situações de impacto, é necessário prever o seu comportamento quando sujeitas a este tipo de esforço. Normalmente, para alterar a resistência da junta, são introduzidas alterações geométricas desta. As alterações mais comuns são a alteração do comprimento de sobreposição (L_0), espessura dos substratos e a espessura da camada de adesivo (t_a). À medida que o grau de complexidade e o número de componentes de tensão no adesivo e no aderente aumenta, o problema inicial deixa de ter uma solução analítica, pelo que tem de ser resolvido numericamente, por exemplo com recurso ao Método de Elementos Finitos (MEF) [2].

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se efetuar um estudo dinâmico por simulação numérica de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de impacto, considerando três adesivos

com propriedades distintas (Araldite® AV138, 3M® DP8005, Nagase Chemtex® XNR6852 E-2). Inicialmente, serão analisados resultados experimentais de estudos previamente desenvolvidos de juntas adesivas ao impacto de forma a validar a utilização dos Modelos de Dano Coesivo (MDC) para a análise numérica de juntas adesivas tubulares sujeitas ao mesmo tipo de carregamento.

De seguida, iniciam-se os estudos numéricos por MDC para analisar o comportamento de juntas adesivas tubulares em função da alteração dos parâmetros geométricos (L_0 e a espessura do aderente exterior (t_{so})) e de alterações à geometria da junta, pela adição de chanfros nos aderentes e pela adição de filete de adesivo nas extremidades da sobreposição. Assim sendo, serão analisadas as distribuições tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) ao longo da camada adesiva, assim como é realizada a previsão de resistência das juntas através das curvas carga-deslocamento ($P-\delta$) e da energia absorvida no impacto (E_{abs}).

Depois de retirados os dados, serão analisadas quais as alterações geométricas e quais os adesivos que maximizam o desempenho de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de impacto.

1.3 Organização do relatório

De forma a que o trabalho desenvolvido ao longo da dissertação seja corretamente interpretado, será feita uma divisão da mesma em 4 diferentes capítulos.

No capítulo 1 é feito um enquadramento do trabalho, definidos os objetivos a alcançar e explicada a estrutura da dissertação.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica do tema em estudo. Esta iniciar-se-á com uma breve explicação das ligações adesivas no geral, seguida do estudo dos esforços a que podem ser sujeitas e das possíveis configurações de juntas de sobreposição simples (JSS). Depois disso, as juntas adesivas tubulares serão estudadas com maior detalhe, sendo apresentados vários trabalhos desenvolvidos nesta matéria. Naturalmente, os efeitos geométricos são também estudados, sendo discutidas as alterações de resistência espectáveis de obter para cada alteração geométrica.

O terceiro capítulo inicia-se com a validação da técnica numérica, através de dados experimentais de trabalhos já desenvolvidos. Após a validação da técnica numérica, inicia-se o estudo paramétrico numérico, realizado no *software* ABAQUS®. Serão incluídos os resultados da análise das distribuições das tensões e a previsão de resistência para cada alteração geométrica ensaiada nas juntas adesivas tubulares.

No quarto e último capítulo são apresentadas as conclusões do trabalho elaborado. Em função das conclusões obtidas, é dada a sugestão de possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Dado as dificuldades que as ligações aparafusadas, rebitadas ou soldadas apresentam com determinados tipos de materiais, espessuras e geometrias, cada vez mais a aplicação de juntas adesivas tem crescido. Quando comparadas com outros tipos de ligação, as ligações adesivas apresentam diversas vantagens. Destacam-se a sua elevada resistência à fadiga, facilidade e elevada cadência de produção, distribuição mais uniforme das tensões sobre o total da área colada, eliminando a concentração de tensões, e capacidade de unir materiais dissimilares [3].

Apesar das inúmeras vantagens apresentadas, as ligações adesivas também apresentam algumas desvantagens, sendo o principal inconveniente, a necessidade de preparar a superfície a ligar através da limpeza da superfície. É extremamente importante que uma ligação adesiva elimine, ao máximo, as forças de arrancamento e clivagem. Para além disto, outro ponto a ter atenção é o tipo de material utilizado na ligação adesiva. Uma vez que podem ser utilizados materiais poliméricos, é necessário ter em conta que certos materiais poderão ter uma fraca resistência a condições extremas, podendo as suas propriedades mecânicas ser alteradas em função da temperatura e da humidade. Conforme indicado anteriormente, em teoria, a distribuição das cargas e tensões é uniforme sobre a largura da junta, em vez de as concentrar em apenas alguns pontos. Desta forma, a ligação com adesivos é mais resistente à flexão e vibração quando comparado com as ligações por rebites e soldadura. Na Figura 1 está demonstrada a distribuição das tensões nos diferentes tipos de ligações [4].

Genericamente, um adesivo define-se como uma substância capaz de ligar pelo menos duas superfícies de forma resistente e permanente. Para isso, os adesivos devem cumprir com os seguintes requisitos [2]:

- Produzir uma ligação altamente durável;
- Ter uma grande aptidão para a molhagem, ou seja, devem comportar-se como um líquido, de forma a possibilitar o contacto com as superfícies a ligar, aumentando a energia de superfície, melhorando assim a capacidade de adesão;
- Endurecer de forma a resistir a tensões permanentes ou variáveis;
- Formar uma ligação com a superfície através do processo de adesão;
- Preencher orifícios, cavidades e espaços.

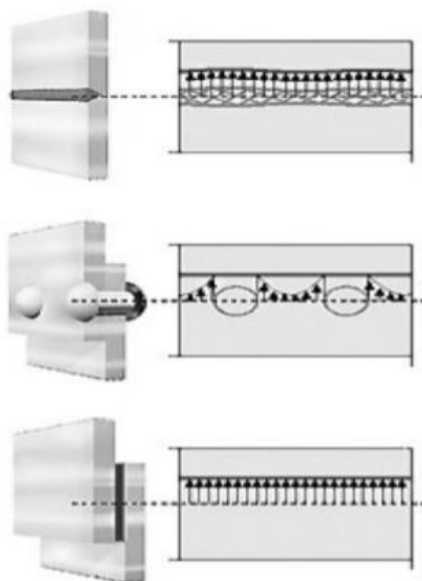


Figura 1 - Distribuição de tensões para diferentes tipos de ligação [4]

A Tabela 1 resume de forma geral, todos os parâmetros relacionados com as juntas adesivas.

Tabela 1-Resumo das juntas adesivas [5]

JUNTAS ADESIVAS	
Tipo de ligação	Frequentemente permanente
União da junta	Sem grandes alterações geométricas dos aderentes
Resistência em função da temperatura	Normalmente perdem resistência com o aumento de temperatura
Preparação da junta	Necessário tratamento de superfície
Tempo de preparação	Pode ser de segundos a horas
Avaliação da junta	Previsão de resistência é complexa e com meios limitados

2.1.1 Caracterização e aplicações típicas

Como foi referido anteriormente, o uso de adesivos está a atravessar um crescimento exponencial, sendo estes utilizados numa vasta quantidade de indústrias, entre as quais se destacam as indústrias automóvel e aeronáutica [6].

2.1.1.1 Indústria aeronáutica

Na indústria aeronáutica, a aplicação de adesivos desenvolveu-se, em grande parte, devido à impossibilidade de ligar alguns materiais por métodos convencionais. Antes do grande desenvolvimento dos adesivos, a maioria das ligações estruturais realizadas nos aviões era feita através de rebites, o que tornava necessário aplicar uma vastíssima quantidade dos mesmos. Dado o elevado número de rebites aplicados, a massa do avião aumentava de forma proporcional. A utilização de adesivos estruturais permitiu reduzir de forma bastante significativa a massa dos aviões, conciliando esta redução de massa com um aumento de resistência mecânica. Para além da redução da massa, outra das grandes vantagens do uso de adesivos, e que é essencial para o funcionamento em segurança de um avião, é a melhoria da resistência à fadiga, reduzindo o risco do aparecimento de fendas por fadiga [5]. A Figura 2 demonstra todos os materiais da cauda do *Boeing777* que são coladas através de adesivos.

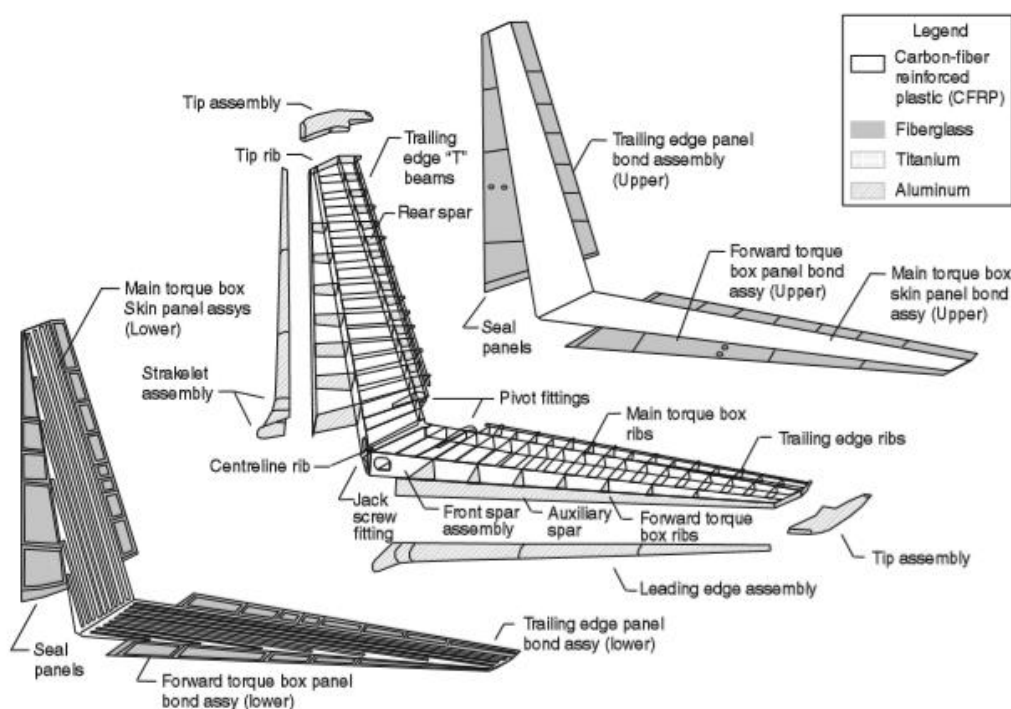


Figura 2 – Materiais utilizados na cauda *Boeing777* [5]

2.1.1.2 Indústria automóvel

De forma a melhorar as estruturas e aumentar a sua eficiência, a redução de peso é fundamental. Para tal, as ligações adesivas começam a ser introduzidas, em sentido contrário aos outros tipos de ligações convencionais que, têm visto a sua utilização reduzir-se [5]. Os adesivos permitem unir uma vasta quantidade de materiais dissimilares, desde partes estruturais da viatura, até aos vidros e componentes

interiores. Para além disso, a elevada capacidade de amortecimento de vibrações, grande resistência à corrosão e facilidade de aplicação, são algumas das muitas vantagens do uso deste tipo de materiais. A Figura 3 apresenta exemplos de aplicações de adesivos num automóvel.

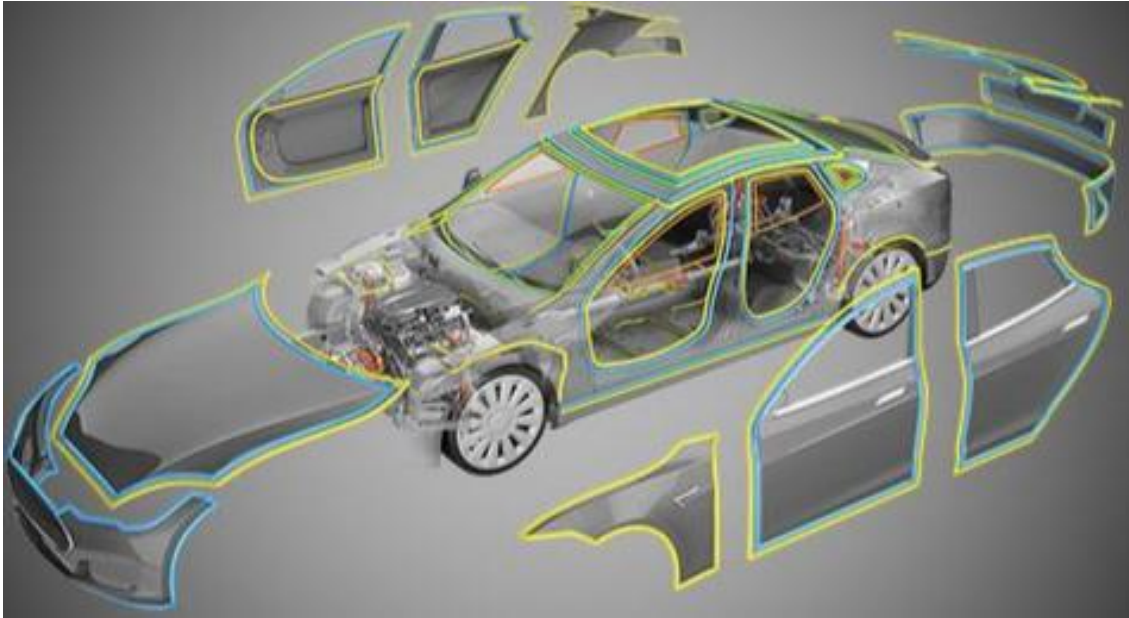


Figura 3 Utilização de adesivos para colagem dos componentes assinalados [5]

2.1.2 Esforços e possíveis modos de rotura

Nas juntas adesivas, e não só, existem diversos modos de carregamento, que introduzem diferentes esforços no adesivo. De modo a poder melhorar a resistência deste tipo de ligações é necessário estudar os esforços aplicados na junta, com vista a otimizar a resistência mecânica da mesma. Assim sendo, na Figura 4 estão exemplificados os seguintes modos de carregamento [3]:

- Tração/Compressão;
- Corte;
- Clivagem;
- Arrancamento.

Tração/Compressão:

Nos esforços de tração a distribuição das tensões normais é, teoricamente, uniforme ao longo do comprimento de colagem. Apesar disto, na prática, esta distribuição de tensões não é uniforme, uma vez que surgem picos de tensão de clivagem ou arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição. Os esforços de compressão desenvolvem-se perpendicularmente ao plano de ligação, comprimindo os substratos, contraíndo o adesivo e induzindo tensões uniformes ao longo de toda a área de sobreposição [7, 8].

Corte:

Este tipo de esforço desenvolve-se quando as forças são paralelas ao plano de ligação, resultando assim no aparecimento de tensões τ_{xy} , levando ao escorregamento entre as superfícies.

Quanto à distribuição de tensões, verifica-se uma maior concentração de tensões nas extremidades da junta do que no centro. Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial dos aderentes ao longo de L_0 , uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente desde uma extremidade até ao lado oposto. Quanto maior o valor de L_0 , maior serão as concentrações de tensões [8, 9].

Clivagem e arrancamento:

Estes são apresentados como os mais severos para as juntas adesivas e têm justificações e efeitos bastante semelhantes. As tensões de clivagem estão associadas à atuação de forças na extremidade de uma junta rígida, que tendem a separar os substratos. As tensões σ_y são muito semelhantes 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 de tração numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação [8, 10].

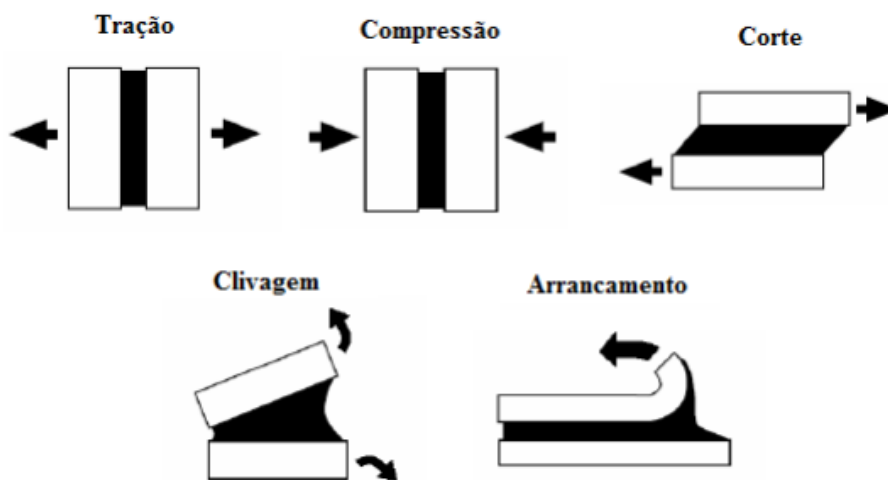


Figura 4 - Modos de carregamento em juntas adesivas [8]

Relativamente aos modos de rotura, estes são classificados pela norma ASTM D 5573 – 99 e estão demonstrados na Figura 5, sendo os mais frequentes [11]:

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva do adesivo;
- Rotura coesiva do aderente;
- Rotura mista.

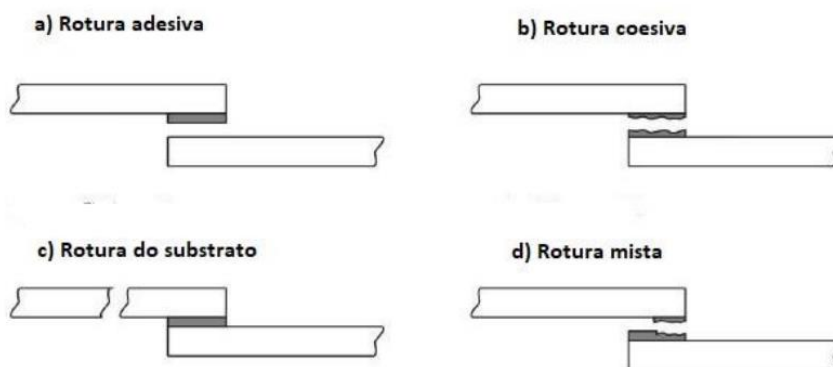


Figura 5- Modos de rotura classificados pela norma ASTM D 5573 [4]

Começando por descrever a rotura coesiva do adesivo, esta surge no interior do adesivo, desenvolvendo-se quando os substratos e a ligação entre o adesivo e o substrato são mais resistentes que o adesivo, como se verifica na Figura 5 [4]. Em seguida, a rotura adesiva não ocorre no adesivo, mas sim na interface (zona de separação entre o adesivo e o substrato) entre o adesivo e um dos aderentes. Ao contrário do que se observa na rotura coesiva, este tipo de rotura está fortemente associado a uma fraca limpeza de da superfície de algum dos aderentes, dado que, o adesivo fica totalmente ligado ao outro aderente [4]. A rotura do substrato, como o próprio nome indica, resulta numa rotura num dos substratos e não no adesivo. Assim sendo, este é o tipo de rotura preferencial, porque evidencia que a junta adesiva foi corretamente projetada, visto que o adesivo aguentou com o carregamento a que foi sujeito. Finalmente, a rotura mista surge quando existe uma rotura adesiva e coesiva simultaneamente em diferentes zonas da junta. Este tipo de rotura está fisicamente associado a uma limpeza de superfície correta em algumas zonas e deficiente noutras [4].

2.1.3 Configurações possíveis de junta

A performance de um adesivo numa junta adesiva está diretamente relacionada com a configuração da junta e com os esforços aplicados. Geralmente, as juntas que criam distribuições de tensões mais uniformes serão mais resistentes a esforços externos. Logo, é mais eficiente submeter esforços de compressão ou de corte, ao contrário dos esforços de arrancamento ou clivagem. Para se projetar uma junta ideal, o adesivo tem de ser solicitado de modo a que se consiga tirar o máximo proveito das suas propriedades. Assim, a solicitação tem de ter a direção mais favorável à junta. Para que seja possível esse proveito, existem vários tipos de geometrias de juntas, umas mais simples e outras mais complexas, que por vezes são difíceis de usar na prática ou são de elevado custo.

Na Figura 6 pode-se observar os tipos de juntas mais utilizados na indústria. As juntas mais utilizadas são as JSS, uma vez que são as que apresentam o maior grau de

simplicidade e baixo custo de fabrico. Contudo, é comum surgirem descentramentos neste tipo de juntas que podem provocar efeitos de flexão. Para anular este problema, costumam-se utilizar juntas de sobreposição dupla (JSD), que ao terem uma geometria bastante mais equilibrada que as JSS, reduzem o momento fletor (M). As juntas com chanfro e as juntas em degrau foram concebidas para reduzir as tensões σ_y [3].

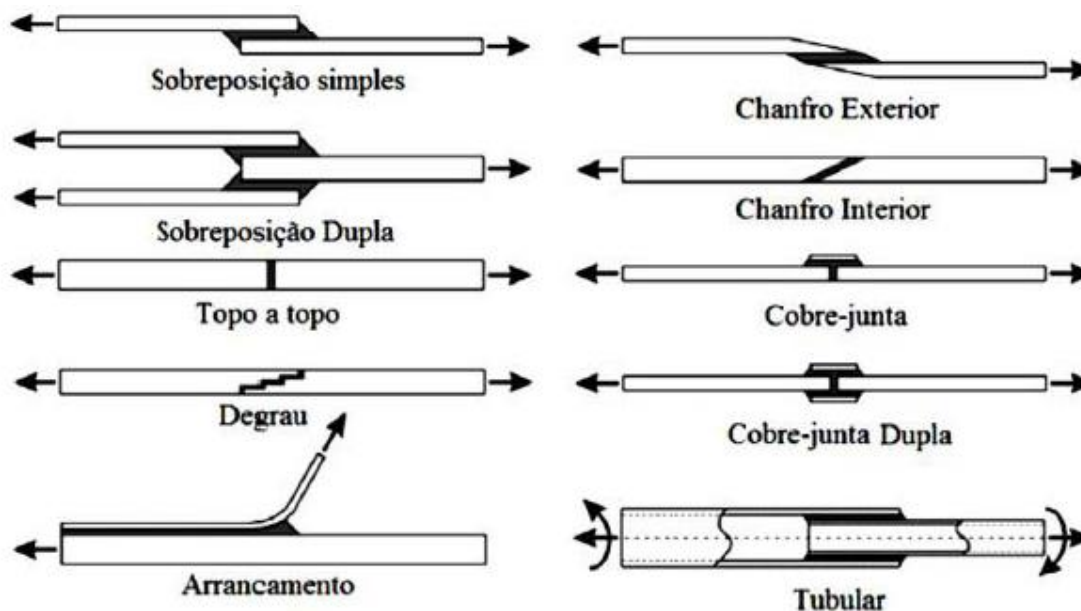


Figura 6- Possíveis configurações de junta [3]

2.2 Juntas adesivas tubulares

A constante evolução da indústria tem levado, cada vez mais, à utilização de tubos desenvolvidos em material compósito ou polímeros. Dessa forma, a junta adesiva tubular tem crescido bastante. As suas excelentes propriedades mecânicas, associadas a uma queda de peso da estrutura, levam a que os fabricantes das indústrias aeronáutica e automóvel considerem cada vez mais este tipo de ligação [12].

Na Figura 7 apresentam-se algumas possíveis configurações para juntas adesivas tubulares [5].

De forma a avaliar este tipo de ligações, começaram a ser realizados vários tipos de estudos. Os primeiros estudos remontam à década de 1950, onde Volkersen [13], Reissner e Lubkin [14] e Hart-Smith [15], foram os primeiros a desenvolver a análise teórica fundamental para as juntas adesivas tubulares.

Geralmente, as cargas a que este tipo de juntas é sujeito são cargas axiais ou de torção, podendo também acontecer as duas em simultâneo. Apesar de serem tubulares, o comportamento destas juntas apresenta algumas semelhanças com as JSS. Em casos de

carregamentos axiais, as extremidades da junta também apresentam uma maior concentração de tensões [12]. No caso da torção, verifica-se o efeito da deformação diferencial, de forma muito semelhante às JSS. Otimizações geométricas podem ser também implementadas neste tipo de juntas, de uma forma idêntica e com os mesmos princípios que as JSS.

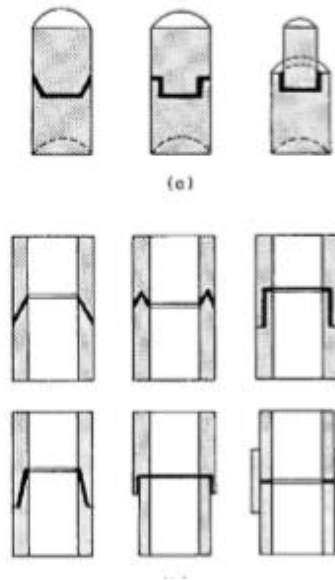


Figura 7 – Configurações possíveis de juntas tubulares [5]

2.2.1 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos estáticos de tração

Para melhor compreender os carregamentos axiais em juntas adesivas tubulares, serão apresentados alguns estudos, de vários autores, os objetivos pretendidos e as conclusões retiradas.

Labbé e Drouet [12], estudaram o efeito de alterações geométricas na distribuição de tensões na junta. A junta tubular será representada em duas dimensões (2D), dado que, a P e a geometria são axissimétricas. Na Figura 8 estão definidos os parâmetros geométricos da junta, P e condições fronteira.

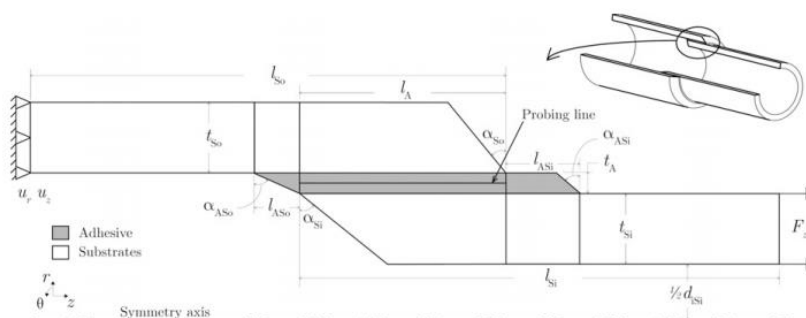


Figura 8 – Modelo 2D axissimétrico da junta a estudar [12]

Dado o elevado número de resultados obtidos pelo estudo, estes serão apresentados sobre a forma de uma tabela. A Tabela 2 está dividida à esquerda pelos parâmetros geométricos testados e à direita os resultados do estudo paramétrico. A Figura 9 demonstra graficamente os resultados obtidos para cada um dos parâmetros testados.

Tabela 2 -Parâmetros geométricos estudados e resultados obtidos

Parâmetro geométrico	Resultados obtidos
Aumento da espessura do aderente interior (t_{si}) e exterior (t_{so}) (A)	<p>Redução das τ_{xy};</p> <p>Aumento da tensão normal na extremidade;</p> <p>Tensão normal praticamente constante na zona central de sobreposição.</p>
Ângulo de chanfro aderente interior (α_{si}) e exterior (α_{so}) (B)	<p>Menos influência na resistência, em comparação com a espessura do substrato;</p> <p>Entre 0° e 45°, distribuição de tensões praticamente constante no adesivo;</p> <p>O aumento destes ângulos resulta num aumento das tensões normais na extremidade do adesivo, no tubo interior.</p>
Comprimento do chanfro extremidade direita (L_{ASi}) e extremidade esquerda (L_{ASO})	<p>Maior comprimento leva a um aumento da concentração de tensões, para comprimentos até 7,5 mm.</p>
Diâmetro do substrato interior (C)	<p>Valor das tensões normais reduz-se com o aumento do diâmetro, como consequência da maior área de colagem.</p>

Na Figura 9 são apresentados graficamente os resultados obtidos pelo estudo. Todos os gráficos apresentam a tensão de corte e a tensão normal (representadas por τ_{rz} e σ_r , respetivamente), em função do parâmetro em estudo, (a), (b) ou (c). Em todos eles são tidos em conta três valores diferentes do parâmetro em análise, sendo os valores das tensões obtidos em função do L_0 normalizado.

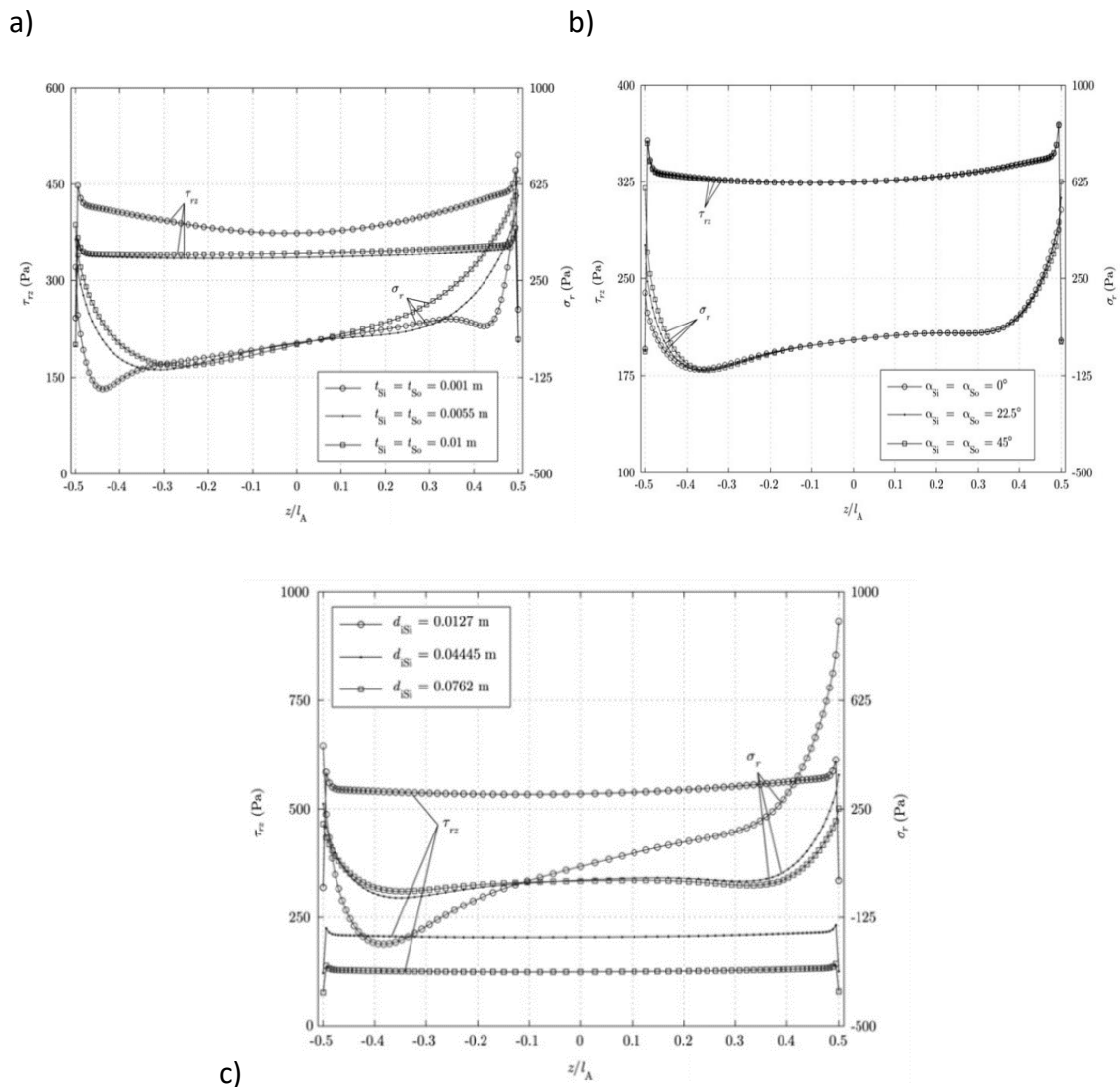


Figura 9 - Resultados obtidos para cada um dos parâmetros estudados

Em função dos resultados obtidos os autores chegaram às seguintes conclusões:

- O estudo paramétrico demonstrou que todos os parâmetros geométricos alterados tiveram influência na distribuição das tensões na junta, com a exceção ao ângulo do chanfro na extremidade do substrato, para um ângulo entre 0° e 45° ;
- A junta mais otimizada deve ter um grande L_0 , baixa t_a e um elevado C .

Qui et al. [16] estudaram juntas em *Fiber reinforced plastic* (FRP) quanto à sua capacidade de resistir a cargas axiais. Para isto, foi desenvolvida uma formulação teórica que foi posteriormente validada através de resultados experimentais que englobam vários aspetos, como o L_0 e a secção da junta. Para além disso, o estudo foi complementado por uma análise numérica por MEF para prever a distribuição das tensões τ_{xy} na camada de adesivo.

Na Figura 10 é apresentada a junta adesiva tubular com manga de aço sujeita a carga axial e a malha modelada pelo MEF.

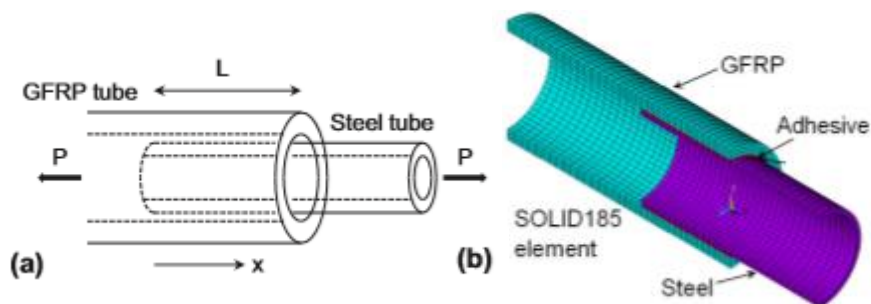


Figura 10 - (a)-Junta tubular com manga em aço sujeita a carga axial (b)-Malha modelada pelo MEF. (Adaptado de [16])

No final do estudo os autores chegaram às seguintes conclusões:

- Obtiveram-se bons resultados para a previsão da resistência da junta ao arrancamento para diferentes aderentes e vários valores de L_0 ;
- A simulação numérica apresentou resultados ligeiramente inferiores aos da formulação teórica para a resistência da junta. Tal facto pode explicar-se, por se ter assumido uma não linearidade do material do aderente e por uma abordagem demasiado conservativa da área de ligação. Apesar disto, a modelação pelo MEF conseguiu apresentar resultados bastante precisos para o modo de rotura da junta;
- Para casos em que não ocorre rotura do aderente, verificou-se a existência de um L_0 efetivo que maximiza a resistência da junta. Este comprimento foi facilmente identificado pela formulação teórica e depois validado pela modelação pelo MEF. Conhecendo a capacidade dos aderentes, a relação entre o L_0 e a resistência máxima da junta pode ser prevista pela formulação teórica ou por MEF.

2.2.2 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos estáticos de torção

Dos vários estudos desenvolvidos para juntas tubulares sujeitas a carregamentos estáticos de torção, grande parte deles, foram desenvolvidos considerando um comportamento linear do adesivo e, no caso de os aderentes serem materiais compósitos, as suas propriedades efetivas foram calculadas de acordo com a teoria clássica dos laminados (TCL), apesar de o aderente não ser uma placa, mas sim um tubo. Desta forma esses estudos não serão retratados.

Oh [17] desenvolveu um estudo que teve como objetivo prever a resistência de juntas adesivas tubulares sujeitas à torção. Foram utilizados tubos em material compósito, tendo sido considerados diferentes ângulos e sequencias de empilhamento. Na Figura 11 está representada a geometria da junta tubular e a malha modelada pelo MEF.

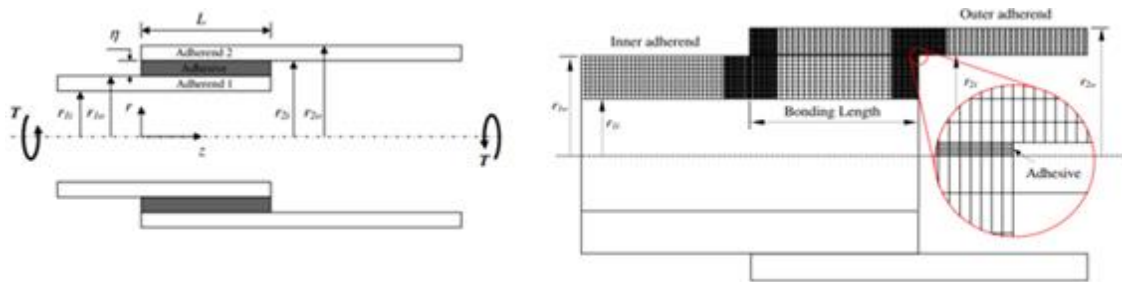


Figura 11- Parâmetros geométricos e malha modelada pelo MEF (adaptado de [17])

Outro aspecto a ter em conta são as tensões residuais térmicas, que resultam dos diferentes coeficientes de expansão térmica do adesivo e do aderente. Assim sendo, neste estudo foram conciliados os comportamentos térmicos e mecânicos das juntas quando submetidas a torção.

Oh [17] teve em consideração os resultados experimentais obtidos num estudo semelhante, desenvolvido por Choi e Lee [18] onde foram utilizadas juntas adesivas de aço-compósito testadas para investigar o efeito da sequência de empilhamento do compósito aderente na capacidade de transmissão do momento torsor (M_t) através da variação do ângulo de empilhamento do aderente compósito exterior a partir de um momento torsor de 5 Nm até 100 Nm e para ângulos de empilhamento até 45° . Deste modo, será demonstrado qual o M_t suportado para cada ângulo. Os resultados obtidos demonstram que, a capacidade de transmissão do M_t das juntas aço-compósito, aumentou até um ângulo de empilhamento de 25° , tendo depois diminuído com o aumento do ângulo de empilhamento, como se verifica na Figura 12.

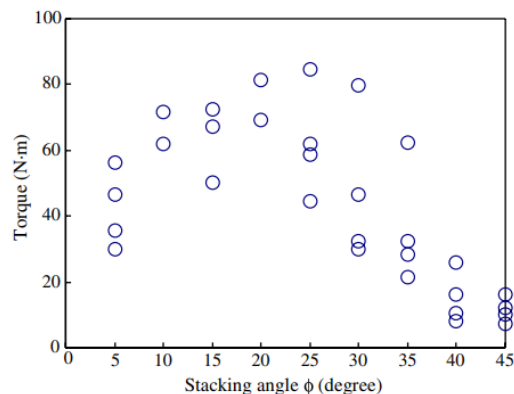


Figura 12 – Capacidade de transmissão do momento torsor em função do ângulo de empilhamento [18]

De notar que, no aderente em compósito, um ângulo de empilhamento de 45° , levou à falha da junta, com o M_t mais baixo, apesar de, esse mesmo ângulo ter a maior rigidez e resistência à torsão. Tais resultados são o oposto do que seria esperado. Previsivelmente, o aumento do ângulo de empilhamento deveria aumentar a resistência à torção e, conseqüentemente, num aumento da capacidade de transmissão da torção.

É neste momento que as tensões térmicas se revelam importantíssimas nesta análise. As elevadas tensões térmicas residuais podem levar à descolagem interfacial, o que provoca a falha inicial da junta antes que o adesivo atinga a sua tensão de cedência ao corte (τ_y).

De forma a estimar a capacidade de transmissão do M_t da junta, os resultados da Figura 12 foram comparados com os resultados numéricos obtidos por Oh [17], considerando três modos de rotura: rotura do aderente, rotura do adesivo e rotura interfacial entre o aderente e o adesivo. A Figura 13 apresenta a capacidade prevista de transmissão do M_t imposto em relação ao ângulo de empilhamento e modo de rotura verificado.

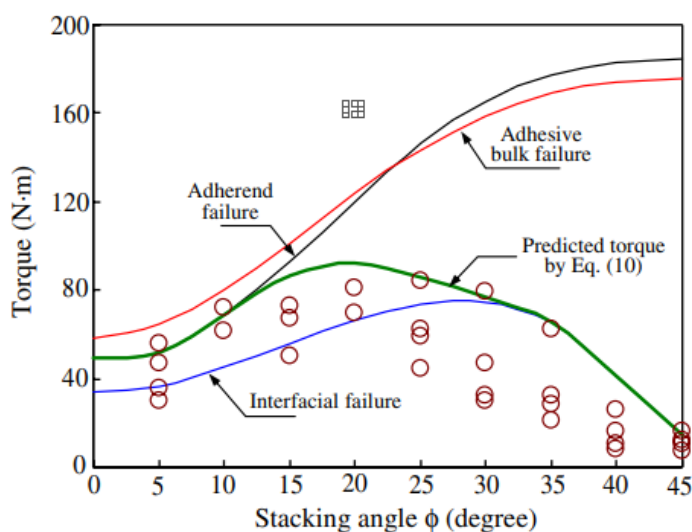


Figura 13 – Capacidade de resistência ao momento torsor em função da carga aplicada e respetivo modo de rotura [17]

O modo de rotura no aderente pode explicar os dados experimentais obtidos para um ângulo de empilhamento de 10° . A falha interfacial surge aproximadamente acima dos 30° . Para um ângulo superior, verifica-se uma queda abrupta na resistência interfacial da junta, em resultado das tensões residuais térmicas explicadas anteriormente. Tal facto não se verificou num mesmo estudo para juntas com aderentes em aço, onde para uma t_a de 0,1 mm, as tensões residuais não tiveram qualquer influencia [19].

Em suma, os resultados obtidos permitem concluir que:

- As tensões residuais térmicas devem ser tidas em conta, no projeto de uma junta adesiva;
- A rotura no adesivo ou no aderente ocorre para baixos ângulos de empilhamento, onde a influência das tensões residuais é reduzida;
- Para ângulos de empilhamento elevados a rotura desenvolve-se na interface, dadas as elevadas tensões residuais térmicas.

O próximo estudo desenvolvido por Hosseinzadeh e Taheri [20], apresenta um modelo numérico de juntas adesivas tubulares com aderentes compósitos/metálicos, sujeitas à torção. Foi considerada resposta não linear, tanto material como geométrica.

Na Figura 15 é apresentada a geometria da junta ensaiada e a geometria dos substratos.

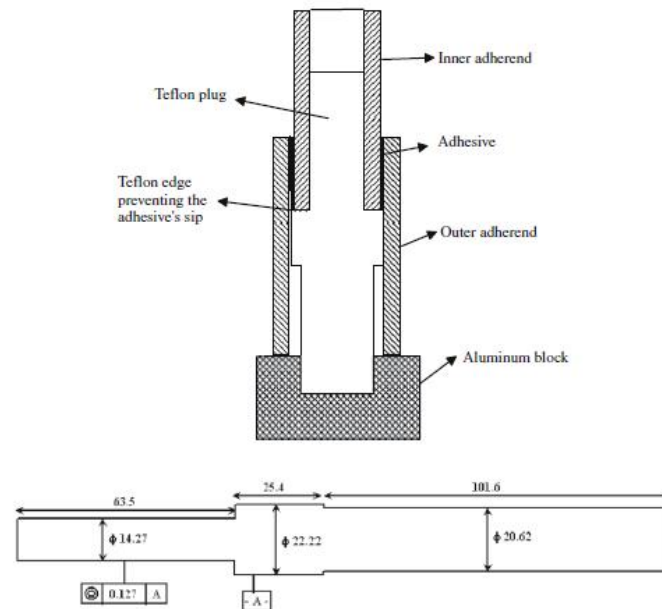


Figura 14- Junta testada e bloco de alumínio para controlar o L_0 [20]

Testaram-se juntas com 5 L_0 diferentes: 12,7 mm, 19,05 mm, 25,4 mm, 38,1 mm, e 50,8 mm. Quanto às dimensões do aderente, foram usados aderentes com 20,62 mm e 25,4 mm de C . Assim sendo, foi testada a influência de L_0 na capacidade de transmissão de M_t da junta.

A Figura 15 compila os valores experimentais e numéricos retirados do estudo, e os valores obtidos em estudos anteriores sobre a mesma temática. Para além disso, também se testou a influência de juntas com e sem tratamento de superfície.

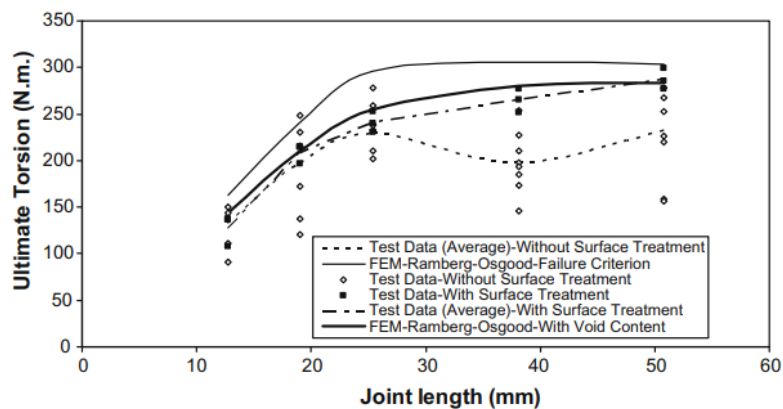


Figura 15 – Resistência à torção em função de L_0 [20]

Os resultados experimentais mostram que a capacidade de resistência à torção aumentou praticamente de forma linear para os L_0 de 12,7 mm até 25,4 mm, tendo de seguida mantendo-se quase constante para maiores L_0 . Esta tendência de linearidade surge em resultado do aumento das concentrações de tensões que será tanto maior quanto maior for o L_0 . Ultrapassando este valor de L_0 , o denominado comprimento efetivo demonstrado num estudo de Cheraghi e Taheri [21], a distribuição do adesivo na zona de sobreposição é cada vez menos homogênea e com grande probabilidade de aparecimento de vazios, bolhas de ar ou fendas no adesivo.

Em suma, os resultados experimentais e numéricos deste estudo permitiram chegar às seguintes conclusões:

- A capacidade de resistência à torção das juntas compósito/alumínio aumentou de forma diretamente proporcional ao aumento do L_0 , estabilizando quando é atingido o comprimento efetivo;
- O aumento da resistência da junta fica limitado a partir de um determinado valor de L_0 , em consequência do aumento das concentrações das tensões τ_{xy} e das anomalias de fabrico, principalmente a existência de vazios;
- Juntas com preparação de superfície são extremamente importantes na validação dos dados experimentais, uma vez que, os dados simulados pelo MEF são recriados tendo em conta juntas ideais, com preparação de superfície perfeita.

2.2.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

Em engenharia, o fenómeno de fadiga é definido como sendo o dano e rotura de materiais, quando são sujeitos a carregamentos cíclicos. Existem vários tipos de fadiga, onde se destacam, a fadiga mecânica, por contacto/fricção e por corrosão.

A fadiga dá-se quando existe um crescimento e propagação de fendas resultantes de carregamentos cíclicos. A Figura 16 apresenta carregamentos cíclicos comuns, tais como:

- Carregamento de amplitude constante (a);
- Carregamento de amplitude variável definido por blocos de amplitude constante (b);
- Carregamento aleatório (c).

Dada a probabilidade da ocorrência de rotura por fadiga quando são aplicados carregamentos abaixo do valor necessário para levar à rotura em situações estáticas, torna-se muito importante conseguir prever a evolução da fadiga de um componente de forma a poder antecipar a sua rotura.

Nas juntas adesivas tubulares, o fenómeno de fadiga pode surgir associado a diversos fatores externos. Carregamento axial, torção, flexão e ainda pressão interna são os carregamentos mais frequentes.

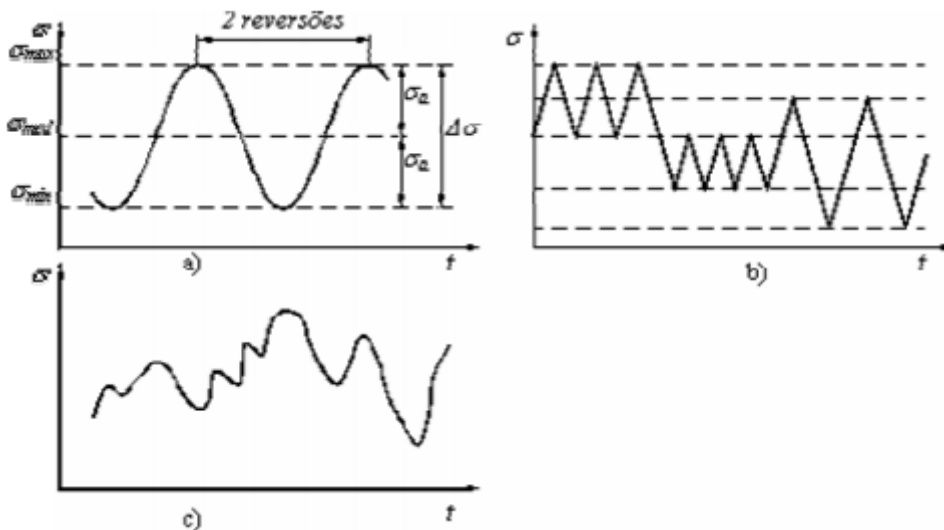


Figura 16 - Carregamentos cíclicos comuns em fadiga [22]

De forma a compreender melhor o fenómeno de fadiga, serão apresentados vários estudos realizados por diferentes autores e as conclusões a que estes chegaram.

Para a resistência à fadiga de uma junta adesiva, a rugosidade da sua superfície é defendida por vários autores como sendo um dos parâmetros mais importantes de controlar [23]. No entanto, quando sujeita a carregamentos cíclicos, as tensões atuantes na junta são altamente dependentes, não só da rugosidade da sua superfície, mas também da espessura do adesivo (t_a). Segundo Sekercioglu T[24] o aumento de t_a e da sua rugosidade superficial, leva a uma diminuição das tensões τ_{xy} na junta.

Lee e Kim [25] desenvolveram vários ensaios em condições de fadiga para juntas adesivas tubulares, determinando uma diminuição da resistência à fadiga para uma rugosidade acima de $2,5 \mu\text{m}$. Para além da rugosidade superficial, os autores verificaram que a t_a também tem grande influência no comportamento à fadiga. Os resultados experimentais, validados pelo MEF, demonstraram que à medida que a t_a diminui, a resistência à fadiga aumenta.

Canyurt [26] idealizou um estudo numa área ainda muito pouco explorada, a resistência à fadiga sobre carregamentos multiaxiais com aplicação de um carregamento axial e de torção, em simultâneo. Neste estudo foram recolhidos dados experimentais de vários artigos semelhantes [27, 28], valores experimentais retirados no próprio estudo e ainda valores obtidos pelo modelo de previsão de resistência à fadiga desenvolvido, GAFSEM [22].

Começando pela rugosidade superficial (Figura 17), verifica-se um aumento no tempo de vida à fadiga para valores de rugosidade até cerca de 2 μm , havendo depois uma redução muito gradual do número de ciclos com o aumento da rugosidade. Tal facto justifica-se com a maior facilidade de início e propagação de fendas, em superfícies mais rugosas.

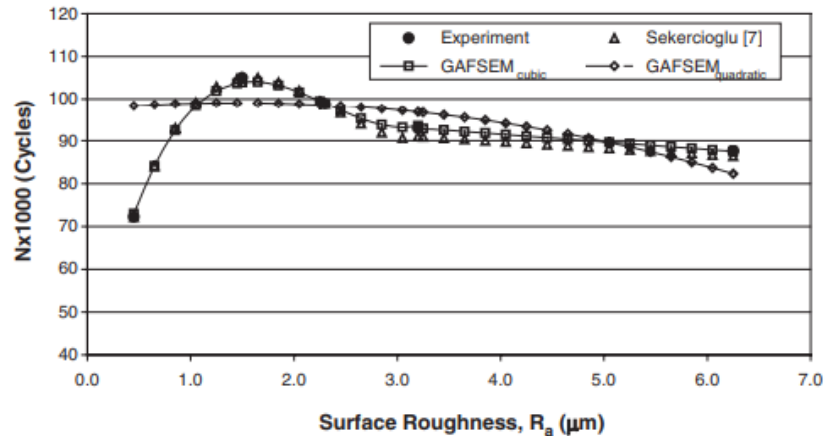


Figura 17 - Efeito da rugosidade superficial no tempo de vida à fadiga [26]

Outro dos parâmetros estudados foi a folga na ligação da junta (Figura 18). Neste parâmetro, o aumento da folga resultou numa abrupta diminuição da resistência à fadiga de uma forma quase proporcional.

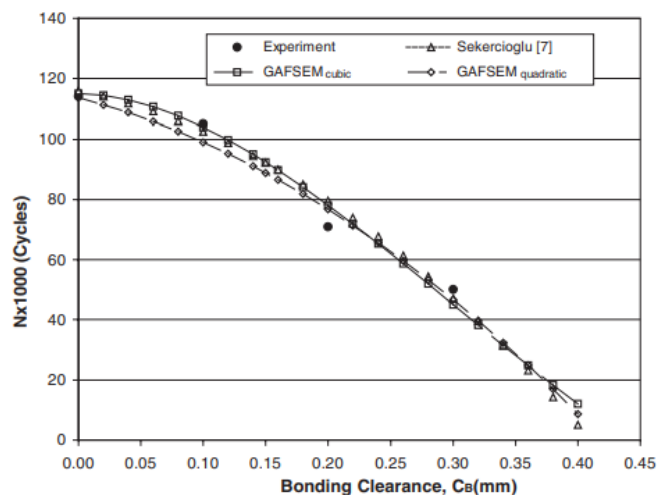


Figura 18- Efeito da folga na ligação sobre a resistência à fadiga [26]

Finalmente, o efeito da temperatura foi bastante semelhante ao verificado anteriormente, resultando também numa diminuição da resistência à fadiga de forma proporcional, conforme a Figura 19.

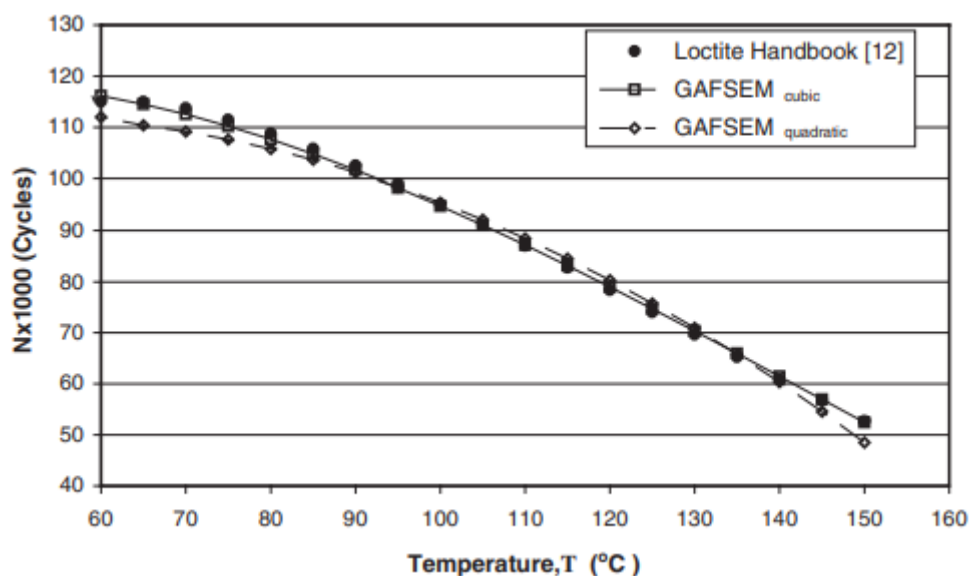


Figura 19 - Efeito da temperatura sobre a resistência à fadiga [26]

O último estudo apresentado foi desenvolvido por Knox et al. [29] que teve como objetivo prever o comportamento de uma junta adesiva tubular em tubos de material compósito quando sujeita a ciclos de carregamentos axiais e de flexão. Para além disso, consideram-se a presença de defeitos axissimétricos e foi efetuada a comparação entre os resultados experimentais e os resultados obtidos pelo MEF.

Assim sendo, conclui-se que:

- Defeitos axissimétricos não tem grande influência na junta. Mesmo quando sujeita a longos ciclos de carregamento, a junta consegue manter grande parte da sua resistência original;
- As elevadas temperaturas, acima dos 90°C, reduzem a resistência à fadiga da junta, quando sujeita a carregamentos de tração e flexão;
- Carregamentos axiais em juntas tubulares fabricadas por enrolamento filamentar afetam mais a resistência à fadiga do que os carregamentos cíclicos devido à pressão interna;
- O modelo GAFSEM pode ser utilizado de forma eficiente para prever a resistência à fadiga de juntas adesivas tubulares, desde que os aderentes sejam de aço, bronze ou alumínio;
- Os resultados do modelo GAFSEM podem ser comparados com os resultados experimentais. Como se verificou pela Figura 19, Figura 18 e Figura 17, ambos seguem tendências muito semelhantes.

2.2.4 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de impacto

Com o aumento da aplicação de juntas adesivas na indústria, é cada vez mais exigido um elevado desempenho mecânico e resistência. Na indústria automóvel e aeronáutica, os

equipamentos são cada vez mais resistentes e seguros, sendo de primordial importância que estes tenham elevada resistência ao impacto e durante longos períodos de utilização. Outro dos exemplos é a indústria da defesa, principalmente nos coletes balísticos e capacetes, que devem resistir a impactos alta velocidade [30].

Em suma, compreender o comportamento dos adesivos sujeitos ao impacto é extremamente importante para melhorar o seu desempenho e aplicabilidade. Neste capítulo, será feita uma pequena introdução ao impacto nos adesivos, seguido de alguns estudos desenvolvidos nesta área. De referir que se revelou muito difícil, uma vez que não existem muitos estudos a juntas adesivas tubulares sujeitas ao impacto.

Quando se projetam juntas adesivas sujeitas a condições de impacto, é necessário ter em conta algumas propriedades do adesivo. As mais importantes são a rigidez à tração e ao corte, e a tenacidade à fratura. Na Figura 20 são apresentados os diferentes modos de rotura existentes para os diferentes ensaios de caracterização à fratura.

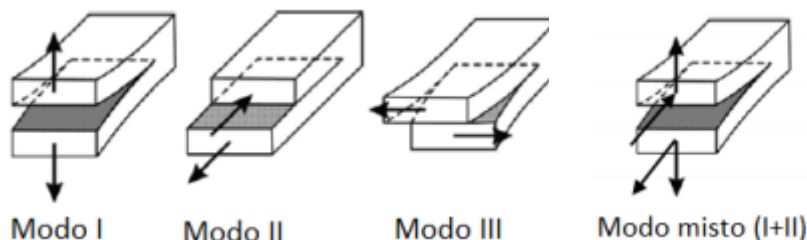


Figura 20 - Modos de rotura [1]

De forma a determinar as propriedades do material que são dependentes da taxa de deformação é necessário realizar testes de tração e corte a elevadas taxas de deformação. Para além disso, é necessário determinar as propriedades mais relevantes para as solicitações ao impacto, para uma determinada taxa de deformação. Com a obtenção destas propriedades, é possível combiná-las num modelo numérico do adesivo. As propriedades relevantes e respetivos testes estão resumidos na Tabela 3.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas e ensaios para as obter

Propriedades medidas	Testes para determinação das propriedades
Resistência à tração e rigidez	Ensaio à tração [31]
Rigidez e resistência ao corte	TAST, Torsion, ARCAN [31-33]
Tenacidade à fratura (Modo I)	DCB, ATDCB, SENB, CT [34]
Tenacidade à fratura (Modo II)	ENF [35]

Em adição às propriedades referenciadas anteriormente, é importante ter em conta as propriedades do aderente, a preparação de superfícies, geometria da junta, entre outros fatores.

Relativamente aos testes de impacto, estes são normalmente divididos em três grupos, em função da velocidade do teste. No teste a baixa velocidade, a velocidade de impacto não é superior a 5 m/s. A velocidade média, o impacto dá-se a uma velocidade entre 5 e 10 m/s. A alta velocidade ocorre quando o impacto se dá entre 10 e 100m/s.

Como já foi demonstrado por vários estudos, os adesivos são conhecidos por serem dependestes da sua deformação, na medida em que as suas propriedades se alteram quando estes são sujeitos a elevadas taxas de deformação. Assim sendo, de forma a quantificar este mesmo efeito, foram realizadas várias experiências para determinar as propriedades dos adesivos a altas taxas de deformação, com especial atenção àquelas que estão intrinsecamente ligadas ao impacto, como as propriedades à tração, corte e fratura.

Num estudo de Yamashita et al. [36], dois tipos de estruturas tubulares foram comprimidas axialmente, sob condições de impacto. Este estudo foi desenvolvido para a indústria dos transportes para melhorar a resistência ao impacto de tubos de secção quadrada, melhorando assim a segurança dos ocupantes do veículo [37].

Foram comparadas duas estruturas tubulares, a estrutura do tipo A e tipo B. Ambas as estruturas são em alumínio e estão representadas na Figura 21.

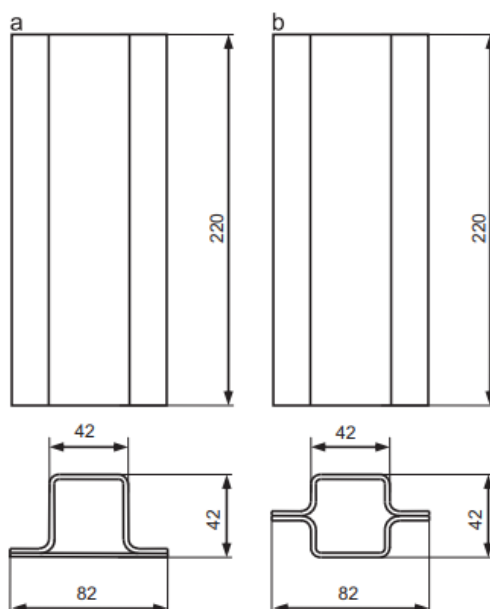


Figura 21 – Representação da geometria da estrutura tipo A (a) e tipo B (b) [36]

O impacto foi realizado através de um equipamento com um martelo de 29 kg que atingiu as peças a cerca de 10m/s, conforme a Figura 22.

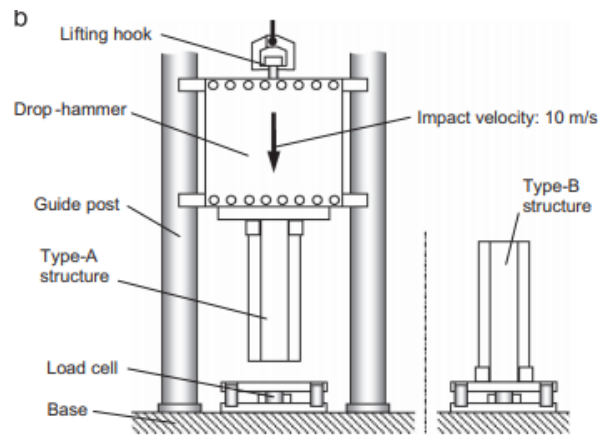


Figura 22 - Condições do ensaio de impacto (adaptado de [36])

Para além da análise experimental, foram desenvolvidos modelos numéricos das estruturas A e B. A Figura 23 representa a malha modelada pelo MEF para ambas as estruturas.

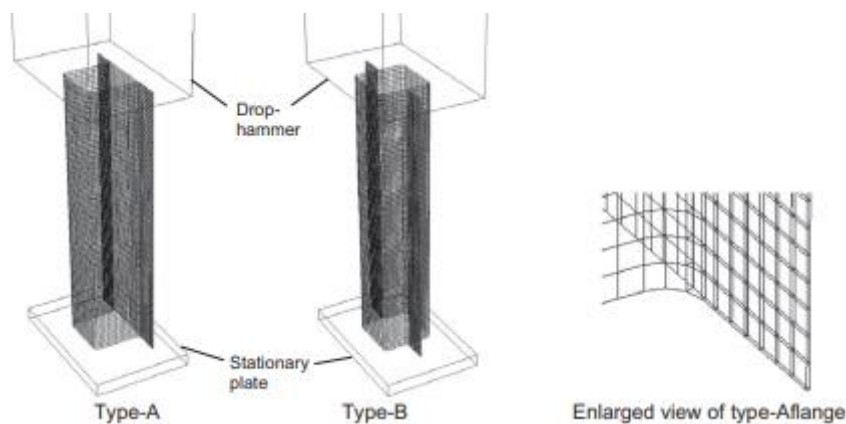


Figura 23 - Malha de EF das estruturas A e B [36]

Depois de realizados os ensaios, estes foram comparados com os valores obtidos numericamente. A Figura 24 compara os valores da tensão de compressão, verificada experimentalmente e computacionalmente para as estruturas.

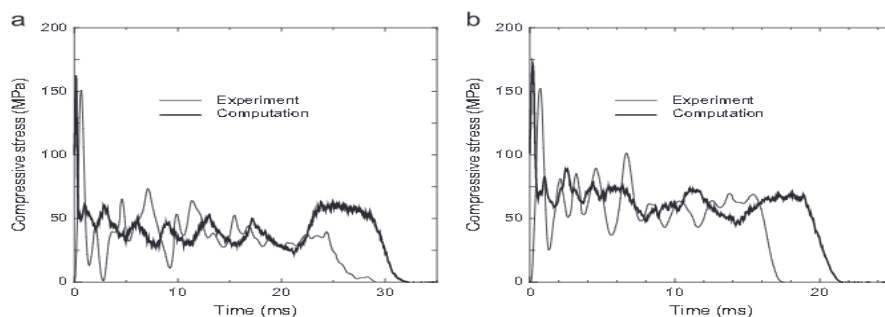


Figura 24 – (a) - Evolução da taxa de compressão ao longo do impacto para a estrutura tipo A e (b) – Evolução da taxa de compressão ao longo do impacto para a estrutura do tipo B [36]

No final do estudo, os autores concluíram o seguinte:

- A resistência ao impacto foi superior na estrutura B, em resultado dos 4 cantos arredondados na zona da junta, ao contrário da junta A que tinha apenas 2;
- Durante o impacto, a junta da estrutura B resistiu melhor à separação do aderente ao adesivo;
- Apesar da modelação numérica ser simples, a deformação e resistência ao impacto foram semelhantes aos determinados experimentalmente;
- O efeito das propriedades mecânicas do adesivo na separação deste do aderente foi simulado com sucesso. A separação do adesivo foi também prevista quando a resistência do adesivo é reduzida.

2.3 Efeitos geométricos em juntas adesivas

Numa junta adesiva, são vários os fatores que influenciam a sua resistência. Para além das alterações geométricas da junta, vários fatores podem ser alterados de forma a modificar o desempenho da junta, entre os quais:

- As propriedades mecânicas do adesivo e do substrato;
- Zonas de concentração de tensões;
- Preparação das superfícies.

2.3.1 Comprimento de sobreposição

De acordo com vários estudos, verifica-se que, normalmente, o aumento do valor de L_0 resulta num aumento de resistência da junta. Esse aumento de resistência dá-se até um determinado valor de L_0 . Ultrapassando este valor de L_0 , verifica-se apenas um aumento do peso da ligação [38], como se pode constatar na Figura 25.

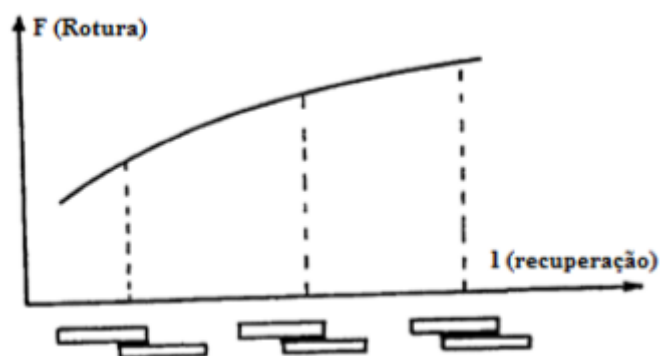


Figura 25 -Efeito do L_0 na resistência da junta [39]

Ao contrário do L_0 , o aumento do valor da largura (b), resulta num aumento diretamente proporcional da resistência da junta. Assim sendo, caso a área de colagem seja a mesma,

é preferível aumentar o valor de b em detrimento de L_0 . Para além disso, também o substrato e o tipo de adesivos aplicados influenciam a resistência da junta, dado que, os adesivos podem ser de elevada rigidez, ser dúcteis ou frágeis, ter uma elevada tenacidade, entre outros. Sendo assim, é necessário conciliar todos estes fatores referidos anteriormente para que a ligação seja o mais eficaz possível.

Quando se utiliza um adesivo dúctil, a resistência da junta é proporcional ao aumento do valor de L_0 , até um ponto em que a resistência começa a aumentar de forma mais gradual. Tal facto deve-se à capacidade que um adesivo dúctil tem de se deformar plasticamente e de redistribuir as tensões.

No caso de o adesivo ser frágil e o substrato elástico, a resistência da junta não é proporcional a L_0 . Apesar de esta também aumentar, não atinge valores de resistência tão elevados como acontece com adesivos de maior rigidez. Este comportamento é facilmente justificado, dado as concentrações de tensões nas extremidades das juntas. Por maior que seja o valor de L_0 , a distribuição de tensões continuará inalterada [5]. Na Figura 26 encontra-se a variação da força de rotura com o aumento de L_0 em adesivos dúcteis e frágeis.

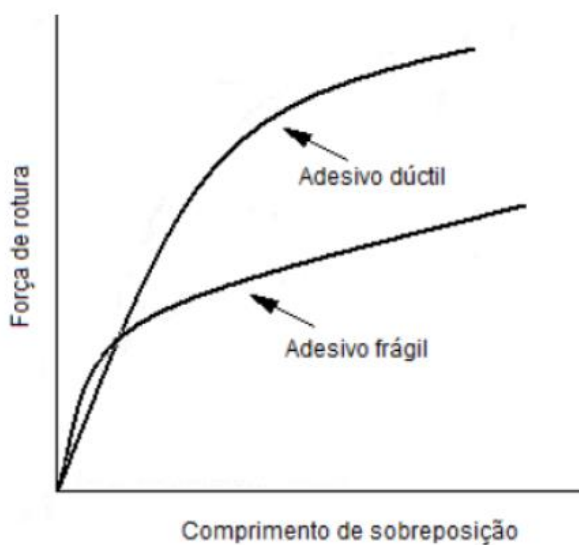


Figura 26 - Efeito do L_0 na resistência para adesivos dúcteis e frágeis [5]

Os adesivos com elevada ductilidade e flexibilidade geralmente têm uma resistência baixa. No entanto, quando usados numa junta, a sua capacidade para distribuir uniformemente as tensões ao longo da área de sobreposição (baixa rigidez) e para deformar plasticamente pode resultar numa resistência do conjunto muito superior quando comparados com adesivos mais resistentes e rígidos.

O ideal seria ter um adesivo com boa resistência mecânica, dúctil e flexível. Contudo, estas três características são difíceis de combinar num adesivo. Por isso, são normalmente escolhidos adesivos dúcteis.

2.3.2 Espessura do adesivo

À semelhança do L_0 , a t_a é um dos principais efeitos geométricos utilizados de forma a alterar a distribuição de tensões e resistência da junta. A maioria dos fabricantes aconselha, para adesivos estruturais, de forma a maximizar a resistência da junta, uma camada fina de adesivo (0,1 a 0,2 mm). Contrariamente ao que é defendido pela maioria dos fabricantes, alguns estudos publicados de Volkersen [13], Goland e Reissner [40] preveem o aumento da resistência com o aumento de t_a , pelo que não existe um intervalo de valores consensual.

Para valores inferiores a 0,1 mm, a grande causa da queda de resistência da junta, advém de uma colagem deficiente. Já para valores de espessura superiores a cerca de 0,2 mm, os fatores são:

- Aumento do risco de defeitos na junta;
- A plastificação das camadas de adesivos dúcteis ocorre com maior facilidade em juntas com valores de t_a mais elevados, o que leva à mais rápida propagação de fenda e conseqüente redução da resistência da junta;
- As propriedades coesivas da camada de adesivo, nomeadamente a resistência, atingem o valor máximo para um t_a de 0,1 ou 0,2 mm e diminuem gradualmente com o aumento de t_a ;
- Aumento do M (dependendo da t_a e da espessura do substrato), traduzindo-se numa diminuição da resistência da junta devido ao aumento das tensões σ_y .

Para além do que foi referido, verifica-se que existe uma maior concentração de tensões nas extremidades da junta quando a camada adesiva é de menor espessura, contrastando com uma camada adesiva mais espessa, em que a distribuição de tensões é mais uniforme (Figura 27). Gleich et al. [41] defendem que o aumento da espessura condiciona a resistência da junta, mas por motivos diferentes. Os autores, através do uso do MEF, observaram que existe um aumento das tensões τ_{xy} e σ_y na interface e na zona de sobreposição da junta com o aumento de t_a . Por outro lado, Adams e Peppiatt [42] afirmam que, com o aumento de t_a , a probabilidade de ocorrerem defeitos internos como porosidades e microfissuras aumenta significativamente (Figura 28).

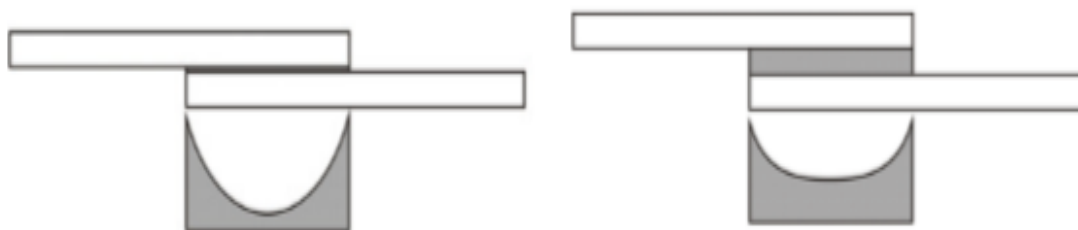


Figura 27 - Distribuição de tensões em adesivos de diferentes espessuras [40]

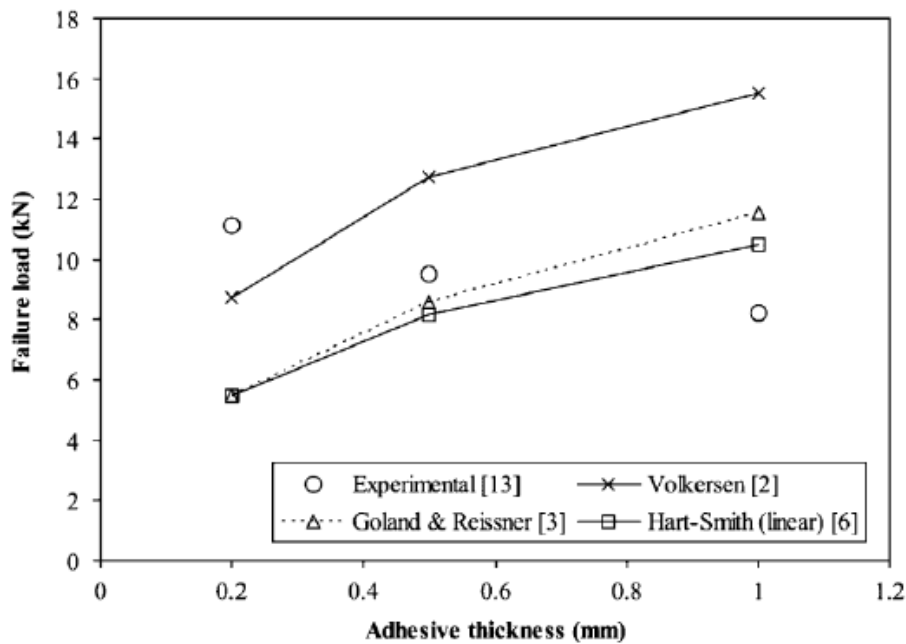


Figura 28 – Carga de rotura em função de t_a , resultados de vários autores [40].

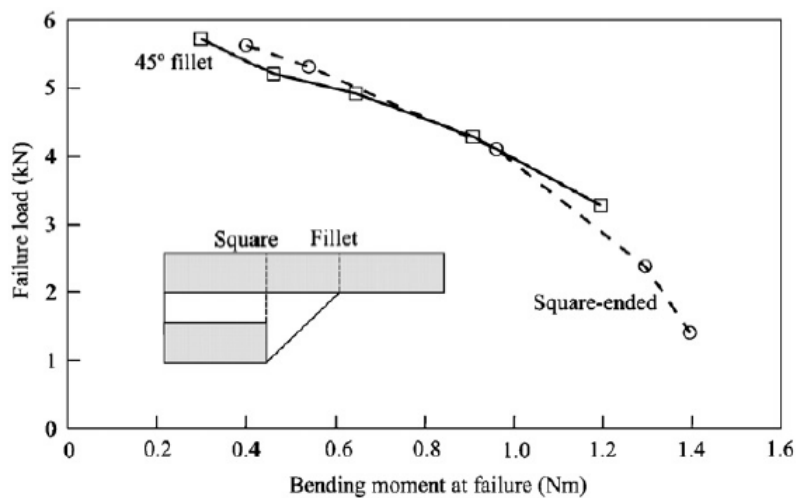


Figura 29 – Carga na falha vs. M (Resultados do MEF) [43]

Não só a t_a , mas também a espessura do aderente pode influenciar a resistência da junta. Maioritariamente, nas JSS, como referido acima, regista-se a deflexão transversa dos aderentes (Figura 29) provocada pela existência de um M devido ao desalinhamento da carga. De forma a eliminar este M , é necessário variar, na quantidade necessária, o valor de t_a e da espessura do aderente

Aumentando a espessura dos aderentes, verifica-se um aumento da rigidez, aumentando a secção resistente e, conseqüentemente, a melhoria da resistência da junta.

2.3.3 Utilização de filetes de adesivo

Dentro de todas as alterações passíveis de realizar a uma junta adesiva, os filetes de adesivo são a alteração mais prática de utilizar e com melhor relação entre a facilidade de produção e resultados de resistência. Em análise computacional, grande parte das vezes, as juntas são simuladas como se a sua extremidade fosse quadrada. Apesar disso, na prática, após colar os substratos ao adesivo, permanece um excesso na extremidade da ligação (Figura 30).

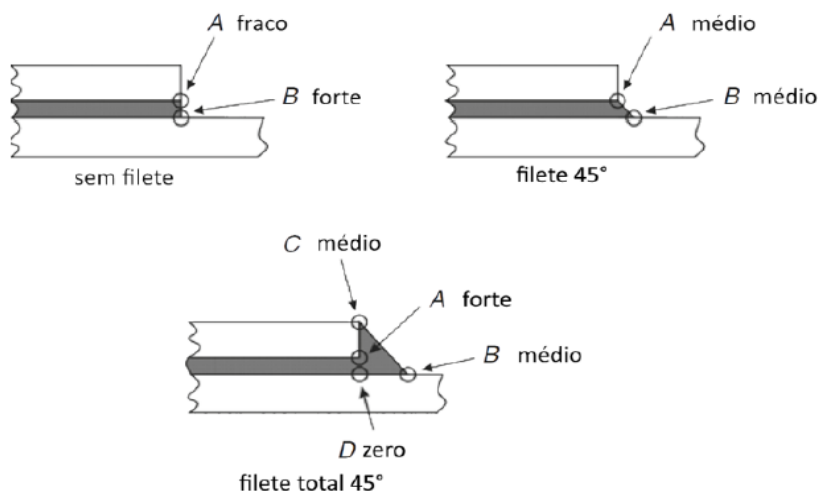


Figura 30 - Diferentes filetes de adesivo para JSS (adaptado de [44])

O filete formado é de primordial importância, principalmente porque permite uma redistribuição de tensões, reduzindo as concentrações de tensões nas extremidades da junta. Esta diminuição de tensões nas extremidades reduz a possibilidade de ocorrência de arrancamento e clivagem, que como já foi várias vezes referido, são os esforços mais suscetíveis de induzir fendas em juntas adesivas.

Segundo Adams [45], o uso de filetes de adesivo reduz, no substrato e na camada de adesivo, a concentração de tensões em pelo menos 50%.

2.3.4 Utilização de chanfros interiores

As juntas de chanfro interior são bastante utilizadas, em resultado da sua simplicidade de produção. Na Figura 31 encontram-se várias configurações possíveis para juntas de chanfro interior e as suas características.

Começando pela junta de chanfro simples, ou topo a topo simples, a sua única vantagem é a simplicidade de fabrico, sendo que é o tipo de junta mais fácil de aplicar. Quanto às desvantagens, a que salta mais à vista é o facto de as juntas com chanfro interior apenas poderem resistir a esforços axiais, sendo extremamente frágeis em situações de

esforços de flexão (clivagem). Da mesma forma, a sua eficácia é muito diminuta, em resultado das concentrações de tensões σ_y e τ_{xy} nas extremidades.

As juntas *scarf* ou de chanfro interior diminuem os gradientes de esforço ao longo do adesivo, devido ao aumento da área de colagem. Apesar disso, os esforços de flexão continuam a ter de ser evitados neste tipo de junta. A sua produção é mais complicada e o tempo de fabrico mais elevado, encarecendo a junta.

As duas últimas configurações, junta de chanfro duplo e junta de chanfro em língua, tal como a de chanfro simples, conseguem melhorar ainda mais a distribuição de tensões. Ainda assim, a dificuldade de produção, tempo de fabrico elevado e, em materiais compósitos, a possibilidade de a maquinagem danificar as fibras, tornam este tipo de juntas menos praticável.

Não só por estes motivos, a técnica *scarf* é mais popular para a ligação de compósitos de fibra reforçada. Esta técnica tem a vantagem de ser mais fácil de realizar comparativamente com os restantes se for considerada a fabricação por empilhamento manual de camadas. No entanto, requer uma otimização do design devido à concentração de tensões nos cantos dos degraus, que afeta negativamente o desempenho da junta [5].

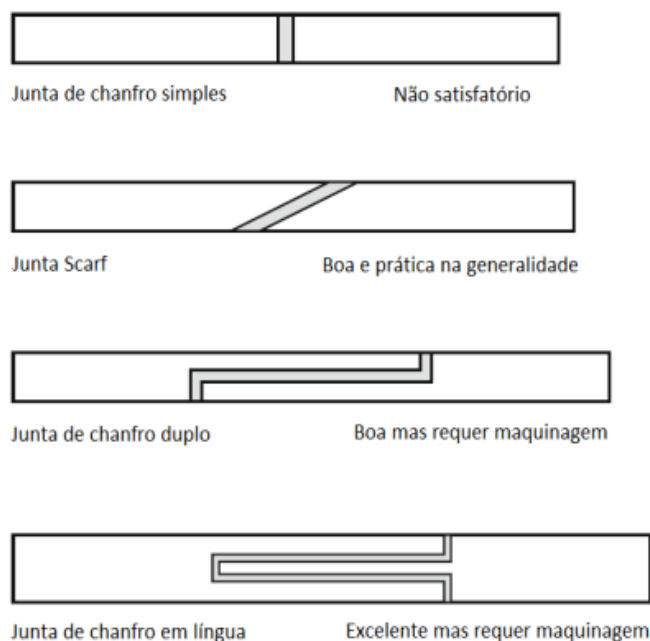


Figura 31 -Diferentes configurações de juntas em chanfro [5]

2.3.5 Utilização de chanfros exteriores

Como já foi demonstrado anteriormente, os chanfros exteriores são conseguidos alterando a geometria do substrato. Esta alteração permite reduzir a rigidez nas

extremidades da sobreposição, conseguindo assim diminuir as concentrações de tensão e deformações nessa zona. Na Figura 32 são comparadas as distribuições de tensões τ_{xy} para três JSS, ao longo de L_0 . A primeira (A), sem chanfro exterior, a segunda (B), com chanfro exterior e a terceira (C) também com chanfro exterior, mas com um ângulo de chanfro superior ao da segunda. Como se verifica, a utilização do chanfro exterior permite diminuir não só a variabilidade de tensão ao longo de L_0 , mas também reduzir drasticamente o valor dos picos das tensões τ_{xy} nas extremidades da camada adesiva [3].

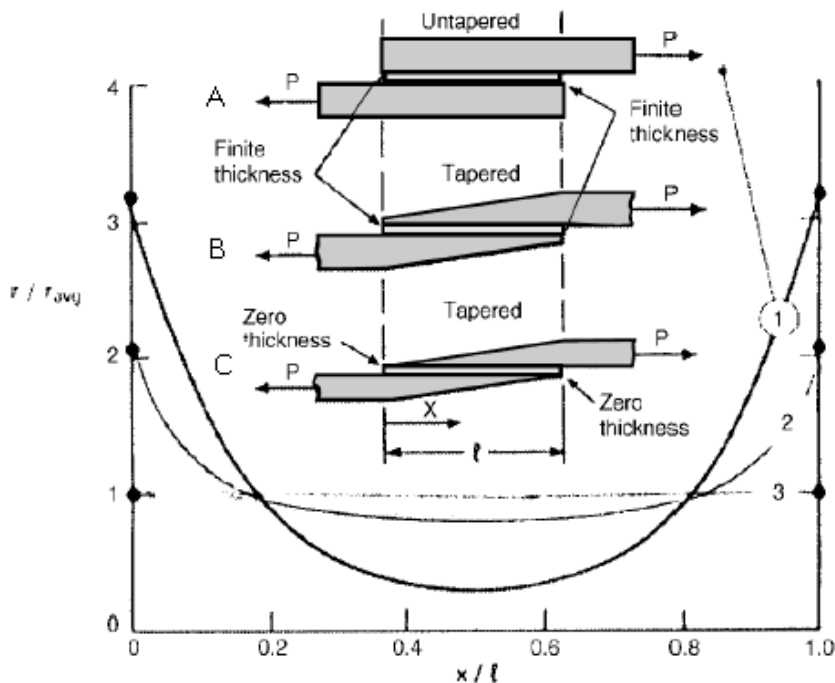


Figura 32 - Distribuição das tensões de corte para diferentes juntas com chanfro exterior (adaptado de [3, 5])

2.3.6 Outras alterações geométricas

2.3.6.1 Juntas onduladas/dobradas

Como demonstrado em diversos estudos na literatura [5], numa JSS, as cargas resultam em excentricidade. Esta excentricidade traduz-se numa concentração de tensões nas extremidades do adesivo. Para além disso, este fenómeno dará origem a um M que leva ao aparecimento dos esforços de arrancamento/clivagem. Este tipo de esforços são normalmente os mais críticos, associados a grande parte do início de rotura em juntas adesivas. De forma a reduzir este efeito, Kishore e Prasad [46] desenvolveram uma nova junta ondulada/dobrada em aderentes compósitos, capaz de aumentar a carga suportada pela junta quando comparada com as tradicionais JSS. A Figura 33 apresenta as geometrias de ambas as juntas testadas.

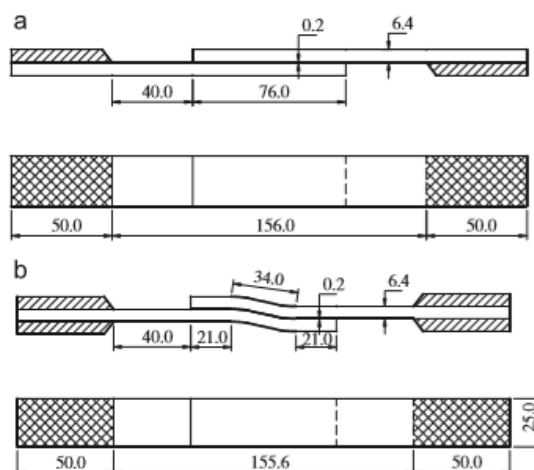


Figura 33 - a) Geometria da JSS ensaiada; b) Geometria da junta ondulada ensaiada [46]

De forma a estudar a influência deste tipo de juntas, foi idealizado um ensaio de tração e de seguida, apresentados de forma gráfica os valores de deslocamento em função da carga para as JSS e as juntas onduladas ensaiadas (Figura 34).

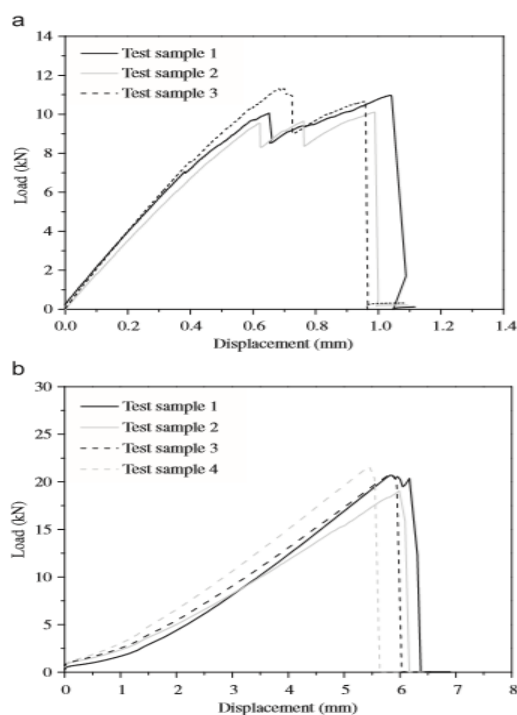


Figura 34 – (a): Resultado do ensaio de tração para junta do tipo A e (b): Resultado do ensaio de tração para junta do tipo B [46]

Facilmente se consegue observar o aumento de cerca de 90% na carga para as juntas onduladas em relação às JSS, justificando assim a necessidade de eliminar a excentricidade de forma a aumentar a resistência das juntas. Para além da carga atingida, também o deslocamento de rotura foi bastante superior para as juntas

onduladas, tendo crescido, em média, cerca de 490% em relação ao deslocamento de rotura das JSS ensaiadas.

Em suma, o autor conclui que o uso de juntas onduladas permitiu eliminar a excentricidade, mantendo a carga a atuar no plano, evitando assim que a junta dobrasse.

2.3.6.2 Juntas com rasgo transversal

Yan et al. [47], através do uso do MEF, estudou qual seria a influência da realização de um rasgo transversal nos aderentes, tendo em consideração o comprimento e a largura do rasgo. Para além disso, foi também estudado o efeito do módulo de elasticidade (E) do adesivo, tendo verificado a influência destes fatores na distribuição de tensões no adesivo e nos aderentes. Na Figura 35 está representada a geometria da junta testada, as condições fronteira e cargas aplicadas.

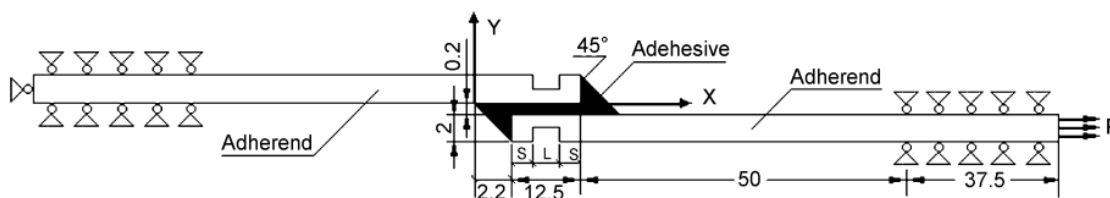


Figura 35 – Geometria da junta ensaiada, carga e condições fronteira aplicadas [47]

O estudo demonstrou que os picos de tensões diminuíram bastante com a presença do rasgo no aderente, tendo o valor das tensões diminuído de forma significativa no local do rasgo, sendo cada vez menores quanto maiores as dimensões do rasgo. Relativamente a E , verificou-se que o seu aumento resulta num aumento dos valores máximos de tensão.

O autor conclui que, para adesivos de baixo E , a realização de rasgos transversais nos aderentes não influencia o pico de tensões na junta. Em contrapartida, nos adesivos de elevado E os rasgos transversais são vantajosos, permitindo reduzir os picos de tensões.

2.4 Previsão de resistência de juntas adesivas

2.4.1 Solicitações estáticas

2.4.1.1 Modelos analíticos

Este tipo de modelos surge no início do estudo de estruturas com juntas adesivas e a forma de previsão baseava-se em técnicas analíticas. Através dos primeiros estudos de Volkersen [13] e Goland e Reissner [42] conseguiu-se simplificar muito a análise das juntas adesivas através de uma abordagem denominada de “*closed-form stress analysis*”. Através de simplificações à geometria da estrutura, carga e condições fronteira, conseguia-se obter de forma mais eficiente o estado da deformação e tensão da junta. Todos estes pressupostos levam a uma rápida análise da junta adesiva, o que torna interessante utilizar modelos analíticos numa fase inicial de dimensionamento de juntas adesivas, de forma a ter uma primeira aproximação [48].

Contudo, estes modelos têm sido substituídos pelos modelos numéricos que simulam de melhor forma a realidade, com aproximações mais precisas [49].

2.4.1.2 Métodos numéricos

2.4.1.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Na mecânica dos meios contínuos, os critérios de tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância da extremidade da zona de ligação e tensão ou deformação média sobre uma região ou análise de estado limite, retirados do MEF, são utilizados em conjunto com um critério de rotura para estimar a resistência das juntas adesivas. Esta estimativa é conseguida quando os valores dos critérios referidos atingem os valores máximos admissíveis dos materiais em estudo. Esta é uma técnica bastante versátil, permitindo analisar estruturas com ou sem dano inicial sob um carregamento arbitrário [50, 51].

Adams [52] introduziu o critério da tensão principal máxima para prever a resistência de uma junta adesiva. Neste critério, todas as tensões principais que não sejam a máxima são desprezadas, mesmo que estas não sejam nulas. Em adição, como consequência da singularidade de tensões nas extremidades da camada adesiva, a malha deve encontrar-se nestes locais, necessitando assim de se ter uma malha de tamanho considerável.

Apesar disso, o critério da tensão principal máxima revela-se particularmente eficaz em juntas com adesivos frágeis.

Deste modo, para conseguir diminuir a dependência da malha dos critérios com as singularidades, vários autores recorreram aos critérios da tensão ou deformação pontual a uma dada distância da singularidade. Zhao [53] propôs o critério da tensão principal média,

em que a espessura do adesivo é usada como a distância sobre a qual é calculada a média da tensão principal máxima, que é depois comparada com a resistência do material. No entanto, Charalambides et al. [54] verificaram, em JSD, que a tensão máxima ocorre num ponto localizado fora da zona característica. Whitney e Nuismer [55] desenvolveram os critérios da tensão ou deformação média sobre uma determinada zona.

2.4.1.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica da fratura surge como uma necessidade de analisar estruturas que não são contínuas, isto é, estruturas em que o material apresente alguma irregularidade, cantos ou fendas. Nos locais onde existam defeitos, surgem zonas com concentração de tensões e diferentes campos de deformação. Desta forma, estas zonas não são passíveis de ser analisadas pela mecânica dos meios contínuos. Para estes casos, a mecânica da fratura estuda estes defeitos de forma a perceber se podem levar à rotura da junta [3].

2.4.1.2.3 Modelos de dano coesivo

Como já foi referido, a mecânica da fratura está relacionada com a propagação da fenda e não com a sua formação. Desta forma, os MDC foram desenvolvidos para conseguir prever a iniciação e comportamento de uma fenda, conseguindo colmatar as lacunas da mecânica dos meios contínuos e da mecânica da fratura. Barenblatt [56] e Dugdale [57] desenvolveram os MDC, introduzindo o conceito de zona coesiva para descrever situações de dano sob condições estáticas de carregamento na zona coesiva do processo à frente da ponta da fenda. Para utilizar os MDC é necessário estimar as leis de separação por tração ou leis de tração, com vista a modelar uma interface ou uma região finita que englobe o percurso da fenda [58].

Uma vez que estas leis se estabelecem entre pares homólogos dos elementos coesivos, são consideradas duas aproximações para a sua modelação. A aproximação local (a) e a aproximação contínua (b) representadas na Figura 36 [59].

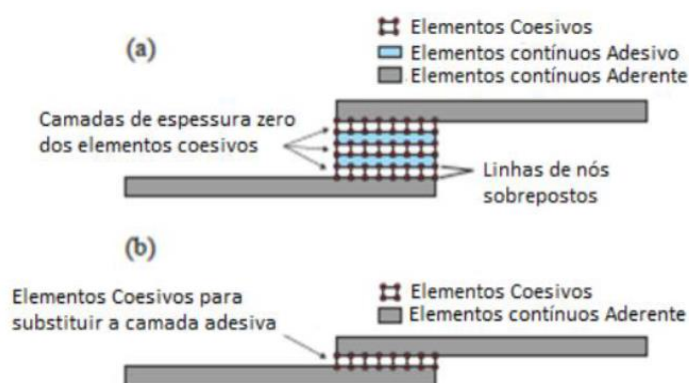


Figura 36 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura com espessura nula: (a) - aproximação local; b) Modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua [59]

Na aproximação local, as leis coesivas são utilizadas para simular uma interface. Deste modo, os nós dos elementos sólidos são sobrepostos para poder representar uma espessura nula.

No caso da aproximação contínua, as leis são utilizadas para simular a presença de material entre dois materiais que não se contactam, como os aderentes e a camada de adesivo. Neste caso, todo o adesivo é representado por uma linha de elementos coesivos. Em resultado disso, não é possível quantificar os efeitos ao longo de t_a e as concentrações de tensões na interface, sendo apenas possível verificar as tensões na direção perpendicular à espessura [60].

Para prever a resistência dos materiais, as leis coesivas triangulares e trapezoidais são as mais utilizadas.

Em suma, os MDC são um excelente complemento ao MEF, permitindo simular não só a propagação de fenda, mas também o início da mesma [61]. Ao contrário da mecânica da fratura, os MDC não necessitam da presença inicial de uma fenda [62], conciliando também a inclusão de múltiplas possibilidades de falha em várias zonas ou interfaces dos materiais em análise.

2.4.1.2.4 Mecânica do dano

As metodologias da mecânica do dano dividem-se em dois tipos. As técnicas dos MDC e técnicas alternativas aos MDC. Como os MDC foram abordados anteriormente, o foco irá recair nas técnicas alternativas. Nestas, considera-se um parâmetro de dano para modificar a resposta constitutiva de materiais através da redução da resistência ou da rigidez, como por exemplo, em ligações adesivas com reduzida t_a [63], delaminação de compósitos ou rotura da matriz ([64]), de modo a representar o dano imposto ao material durante a aplicação de carga.

Com o intuito de modelar o dano antes da iniciação e propagação da fenda, as variáveis de dano devem ser usadas numa lei de evolução de dano. De acordo com Voyiadjis e Kattan [65], estas variáveis podem ser classificadas das seguintes formas:

- Variáveis que introduzem dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de dano;
- Variáveis relacionadas com a definição física de um tipo de dano específico, como as porosidades ou áreas relativas de micro cavidades.

Khoramishad et al. [63] concluíram que, comparando com os MDC, as metodologias da mecânica do dano não diferenciam entre a iniciação e a propagação das fendas. Não obstante, estes são ainda assim um bom método de previsão.

Na maioria das vezes, as fendas seguem um trajeto aleatório e difícil de prever. Nestes casos, as utilizações das técnicas de mecânica do dano devem ser priorizadas em relação aos MDC uma vez que, para estes, é necessário conhecer-se o percurso da fenda [66].

2.4.1.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

Como referido nos capítulos anteriores, os MDC, apesar de não necessitarem que exista uma fissura no modelo, precisam de conhecer o seu percurso, o que os torna vulneráveis nos casos em que não se conheça à priori o percurso da mesma [67]. É aqui que o método de elementos finitos estendido (MEFX) complementa o tradicional MEF, tendo sido apresentado pela primeira vez por Belytschko e Black [68]. Ao contrário dos MDC, o MEFX não necessita que seja conhecido o percurso de propagação da fissura. Isto deve-se ao facto que a malha não precisa de coincidir geometricamente nestes defeitos.

O MEFX baseia-se no conceito de partição de unidade e pode ser complementado ao MEF pela introdução das funções de enriquecimento local para os deslocamentos de nós nas proximidades da fenda de modo a permitir a sua propagação e separação de ambas as faces da fenda [69]. À medida que a fenda se desenvolve, a extremidade desta altera continuamente a sua posição e orientação em função das condições de aplicação de carga e geometria da estrutura, simultaneamente com a criação de funções de enriquecimento para os nós de malha de MEF em volta do percurso/extremidade da fenda.

2.4.2 Solicitações dinâmicas/impacto

2.4.2.1 Modelos analíticos

2.4.2.1.1 Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos

Como comprovado em inúmeros estudos, os materiais poliméricos, onde se incluem a maioria dos adesivos, são dependentes da taxa de deformação, como referido no capítulo 2.2.4. Esta dependência é justificada pelo comportamento viscoelástico e viscoplástico inerente aos materiais poliméricos., podendo ser representada por vários modelos constitutivos [70].

2.4.2.1.2 Modelo Voigt/Maxwell

Os modelos de Voigt/Maxwell, são de natureza viscoelástica e reproduzem a deformação elástica de um adesivo em função do tempo, quando solicitado a situações de impacto. No modelo de Voigt/Maxwell é utilizada a soma das tensões em elementos do tipo mola e amortecedor de forma a modelar o comportamento do adesivo. Para utilizar os parâmetros deste modelo é necessário determiná-los por ensaios experimentais [70].

Sato e Ikegami [33] desenvolveram um estudo sobre as propriedades viscoelásticas de um adesivo estrutural epóxico curado, tentando determinar a propagação de ondas de impacto e concentração de tensões destas através de modelo de Voigt de três e cinco elementos. Foram ensaiadas JSS com chanfro interior e chanfro exterior. Os autores chegaram às seguintes conclusões:

- Os ensaios experimentais validaram a deformação obtida analiticamente, validando assim o modelo de voigt;
- O modelo com cinco elementos conseguiu descrever o comportamento do adesivo a elevadas taxas de deformação e ainda a utilização deste modelo para otimizar a geometria das juntas.

Khan et al. [71] seguiram uma abordagem semelhante à indicada anteriormente. Estes utilizaram um modelo diferencial baseado na combinação de elementos de mola e amortecedor lineares e não lineares com variações de comportamento normais em polímeros em função da taxa de deformação e da temperatura. Este modelo apresentou uma elevada concordância com os resultados num grande intervalo de taxa de deformação e temperatura. Iwamoto et al. [72] utilizaram esta mesma modelação para previsão do comportamento à deformação por compressão e sensibilidade à taxa de deformação. Os autores foram capazes de expressar com sucesso as características básicas das curvas experimentais de adesivos estruturais, como a porção elástica linear e os estágios de deformação.

2.4.2.1.3 Modelo Cowper-Symonds

Este é um dos modelos mais aplicados para simular a dependência de um determinado material à taxa de deformação, formulando um modelo elasto-plástico com endurecimento dependente da taxa de deformação [73], de acordo com as formulações descritas por Ludwik [74].

Goglio et al. [75] estudaram pelo modelo Cowper-Symonds, a influência da taxa de deformação na resistência máxima à rotura e compressão num adesivo epóxico. Averiguou-se que, para taxas de deformação elevadas, os resultados foram validados, ao contrário das taxas mais baixas onde não se obteve a mesma validação.

2.4.2.1.4 Modelo Johnson-Cook

Este é um modelo semelhante ao modelo de Voigt/Maxwell e Cowper-Symonds, apenas com a particularidade de este ser um modelo visco-plástico. Apesar disso, todos eles preveem a dependência de determinado material à taxa de deformação.

Alguns autores, como Morin et al. [105] e Goglio et al [75] utilizaram este modelo para prever a dependência do material à taxa de deformação, tendo concluído que, para altas taxas de deformação, este não é tão preciso como o modelo de Cowper-Symonds.

2.4.2.1.5 Modelos de sobretensão

Nos modelos de sobretensão, a dependência da taxa de deformação é obtida através de um aumento da tensão para além da superfície de cedência, sem qualquer dependência da taxa de deformação durante a aplicação da carga, seguido de um relaxamento [70].

2.4.2.1.6 Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação

Em 1995, Crocombe [76] desenvolveu um modelo de previsão da dependência da taxa de deformação, tendo utilizado para a modelação as curvas de fluência e as curvas isocrónicas de tensão-deformação. Para a presente dissertação é necessário averiguar se este modelo é fiável em casos de deformação em rampa, típico de cargas de impacto. Para estes casos, o autor concluiu que as curvas de fluência não eram apropriadas, uma vez que estas necessitavam de várias aproximações para alcançar uma solução precisa. Contudo, a solução baseada nas curvas isócronas de tensão-deformação, derivada de resultados experimentais [70], revelou-se eficaz para a configuração e material da junta em estudo. Caso seja alterado algum destes parâmetros, é necessário voltar a validar o modelo.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação da técnica numérica com dados experimentais

No presente capítulo será desenvolvido um estudo para efetuar a validação da técnica numérica usada com dados experimentais no trabalho de Valente [77].

Inicialmente será feita uma descrição pormenorizada dos materiais utilizados, nomeadamente os substratos e os adesivos. De seguida, serão comparados resultados obtidos de forma numérica e os resultados experimentais, de modo a validar a utilização das técnicas dos MDC para o estudo paramétrico de juntas adesivas tubulares.

3.1.1 Descrição da geometria e materiais

No trabalho de da Silva [78], os ensaios experimentais foram realizados a JSS fabricadas segundo as normas ASTM D1002 [79] e ISO 4587 [80]. De forma a verificar a validade do modelo numérico utilizado no seu trabalho, Valente [77] utilizou uma geometria de junta idêntica à utilizada por da Silva [78]. Ambos os autores consideraram uma JSS com dois aderentes da mesma dimensão e com um $L_0=25$ mm. O adesivo terá uma espessura de 0,2 mm, conforme a Figura 37.

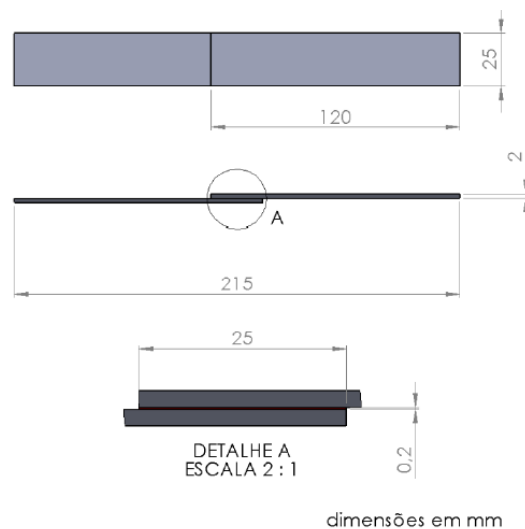


Figura 37 - Geometria da JSS de validação [77]

De seguida, será feita uma breve descrição de todos os materiais envolvidos. Começando pelos aderentes, ambos foram fabricados no aço DIN 55 Si7, material de elevada resistência, de modo a que a deformação plástica destes não aconteça ao longo

do ensaio. Desta forma, as propriedades plásticas dos aderentes não foram consideradas. Todas as propriedades encontram-se na Tabela 4.

Para os adesivos foram escolhidos dois com elevada rigidez e dois com elevada ductilidade. As propriedades mecânicas para condições de ensaio estático foram obtidas recorrendo a diversas metodologias de ensaio. Através de ensaios de tração determinaram-se os valores de E , tensão coesiva à tração (t_n) e através de ensaios de corte (TAST) os valores de tensão coesiva ao corte (t_s). Com ensaios DCB foi determinada a energia de fratura à tração (G_{IC}) e com ensaios ENF a energia de fratura ao corte (G_{IIC}). Para além destas propriedades, a densidade (ρ) e o coeficiente de poisson (ν), encontram-se resumidas na Tabela 5.

Como se trata do caso de um estudo ao impacto, serão necessárias as propriedades em função da velocidade de ensaio. Estas foram determinadas no trabalho de da Silva [78] e podem ser consultadas na Tabela 6.

Tabela 4 - Propriedades mecânicas dos aderentes [78]

Aderente	DIN 55 Si7
E [GPa]	210
σ_y [MPa]	1078
σ_f [MPa]	1600
ϵ_f [%]	6
ν	0,3
ρ [g/cm ³]	7,8

Tabela 5 - Propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos usados

Adesivo	RTV106 [81]	DP8005 [82, 83]	AV138 [84]	XNR6852 E-2 [78]
E [MPa]	1,6	590	4890	1742
G [MPa]	0,86	159	1560	645,2
t_n [MPa]	2,3	6,3	41,0	42,9
t_s [MPa]	1,97	8,4	30,2	28,7
G_{IC} [N/mm ²]	2,73	1,1	0,35	-
G_{IIC} [N/mm ²]	5	6	4,91	18
ρ [g/cm ³]	1,07	1,06	1,7	1,5
ν	-	0,3 a	0,35 b	0,4 c

^a valor estimado; ^b valor do fabricante; ^c valor típico para adesivos epóxicos

Tabela 6 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [78]

Adesivo	Velocidade (mm/min)	t_n [MPa]	t_s [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
RTV106	1	2,3	1,97	2,73	5
	100	-	-	-	-
	105000	-	-	-	-
DP8005	1	6,3	8,4	1,1	6
	100	13	17,4	-	-
	105000	27,5	36,7	1,1	6
AV138	1	41	30,2	0,35	4,9
	100	49,1	36,2	-	-
	105000	70,2 (30) *	51,7 (22,1) *	0,35	4,9 (0,6) *
XNR6852 E-2	1	42,9	28,7	1,68	18
	100	46	33,6	-	-
	105000	53,7	45,8	1,68	18

* entre parêntesis valores estimados

3.1.2 Modelação por MDC

No seu trabalho, Valente [77] desenvolveu todo o estudo numérico com recurso ao *software* Abaqus® [85]. O modelo da junta foi desenvolvido em 2D e tem uma geometria idêntica à da Figura 37.

Para o seu estudo foram retirados alguns parâmetros do *software*, começando pelo parâmetro RF que regista a força de reação aplicada em cada instante, em combinação com o parâmetro U, que regista o deslocamento. Depois disso foi possível retirar as curvas carga-deslocamento ($P-\delta$).

No desenvolvimento da malha foram utilizados dois tipos de elementos. Para a camada adesiva utilizou-se um controlo da malha do tipo *sweep* (a amarelo na Figura 38) e elementos do tipo *4-node two-dimensional cohesive element* (COH2D4). À exceção da zona adesiva, todo o corpo terá um controlo da malha do tipo estruturado (a verde na Figura 38) e elementos do tipo *4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration* (CPE4R).



Figura 38 - Controlo de malha no modelo de validação [77]

A malha foi construída através de elementos quadriláteros de 0,2 mm, igual à t_a . Conforme se verifica na Figura 39, a malha é mais refinada nas proximidades do adesivo de forma a se conseguirem resultados mais fidedignos.

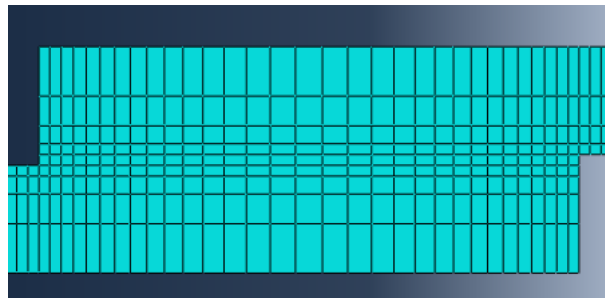


Figura 39 - Pormenor da malha do modelo na zona do adesivo [77]

Quanto às condições fronteira, foi considerado um encastramento no aderente interior e uma restrição de movimento em Y no aderente exterior, de acordo com a Figura 40.

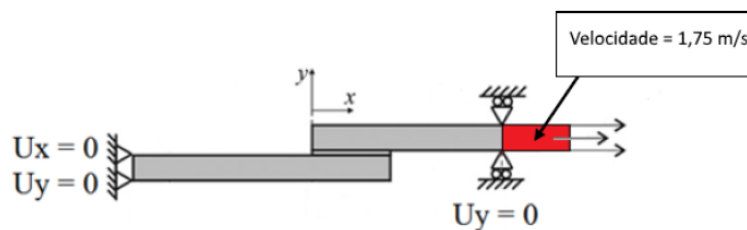


Figura 40 - Condições de fronteira [78]

Para testar a junta ao impacto, foi criada uma secção (zona a vermelho) à qual foi atribuído um *field output* do tipo *velocity* de 1,75 m/s (Figura 40). A velocidade foi calculada a partir da energia que se queria impor à massa. O método de cálculo será explicado mais à frente.

3.1.3 Resultados obtidos

Para validar o modelo numérico, os resultados de impacto obtidos por da Silva [78] serão considerados como resultados de referência. Inicialmente, proceder-se-á à análise da curva $P-\delta$ com o uso do adesivo RTV106.

Conforme apresentado na Figura 41, para este adesivo o resultado numérico teve uma grande variação de carga. Como se verifica, a curva do resultado obtido é muito díspar à curva de referência numérica. Contudo, com a aplicação de uma linha de tendência móvel de período 31, o perfil das curvas fica bastante idêntico à curva de referência numérica. Quanto ao máximo deslocamento observado, este é idêntico em ambos os casos e também coincide com o deslocamento da referência numérica assim como o deslocamento correspondente à carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$).

Em relação ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido para cada caso, todos os resultados numéricos registaram valores bastante abaixo da média dos resultados experimentais, como se verifica na Figura 42.

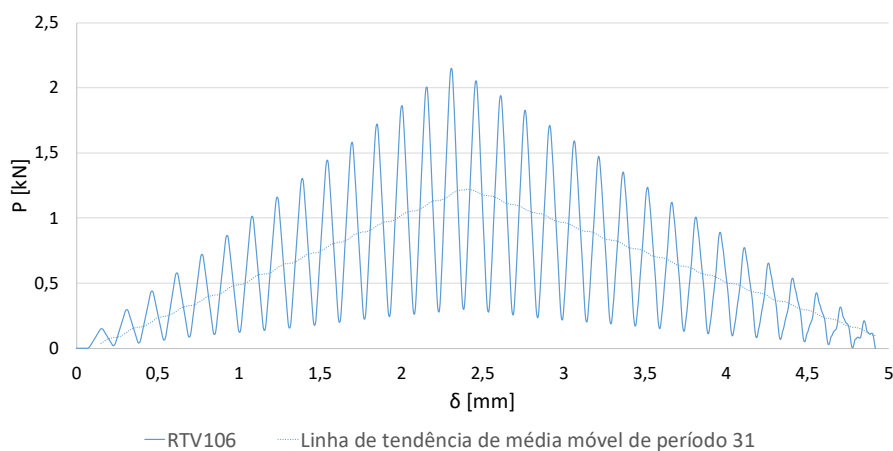


Figura 41 - Curva P - δ numérica e respectiva linha de tendência do adesivo RTV106 [77]

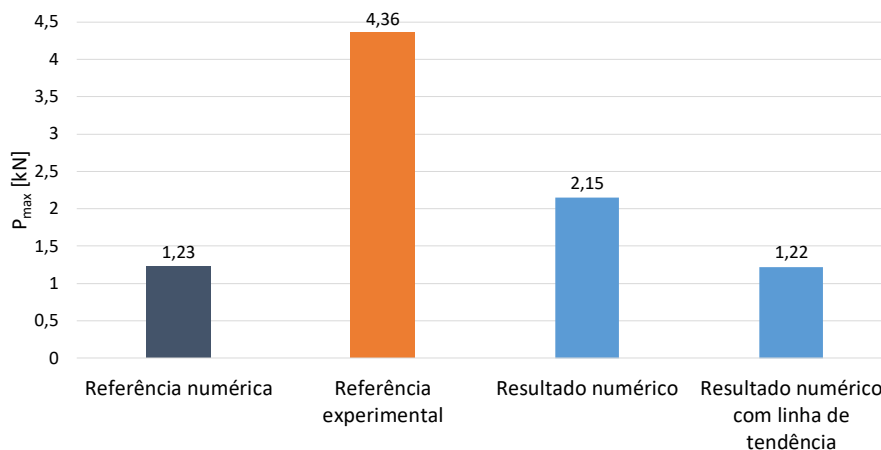


Figura 42 - Comparação dos resultados obtidos com valores de referência para o adesivo RTV106 [77]

De seguida os resultados obtidos com o adesivo AV138. Nos primeiros resultados obtidos, verificou-se uma grande diferença para as curvas referentes à referência numérica e do resultado numérico. Assim sendo, as propriedades de referência utilizadas, mais concretamente o valor de t_n foi arbitrado e o valor de t_s foi ajustado para

cumprir a mesma proporção dos valores obtidos experimentalmente para velocidade de ensaio mais reduzida. Em adição, o valor de G_{IIC} foi também reduzido para aproximar ao valor de G_{IC} . Na Figura 43 é representada a curva $P-\delta$ com o adesivo AV138.

Depois de revistos os valores das propriedades referidas acima, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido no resultado numérico foi 6% menor do que o valor obtido na referência numérica e teve uma diferença de cerca de 16% para a referência experimental. Em suma, as alterações introduzidas resultaram numa maior aproximação do modelo numérico às referências experimentais (Figura 44).

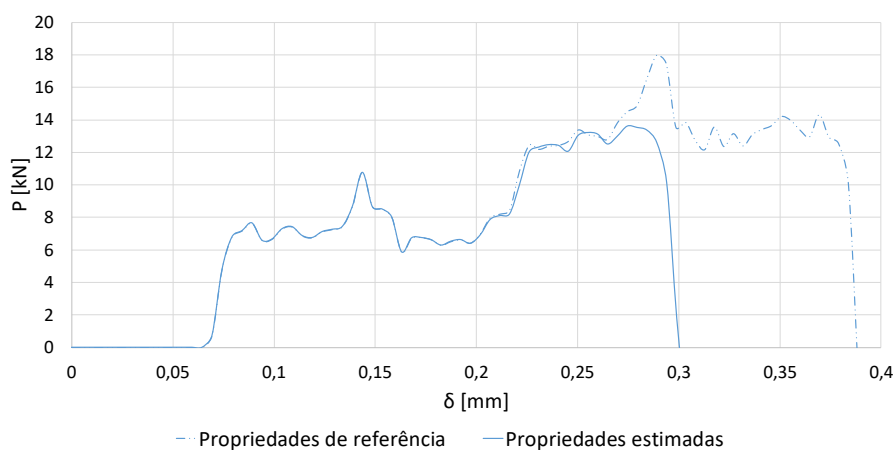


Figura 43 - Curva $P-\delta$ numérica do adesivo AV138 [77]

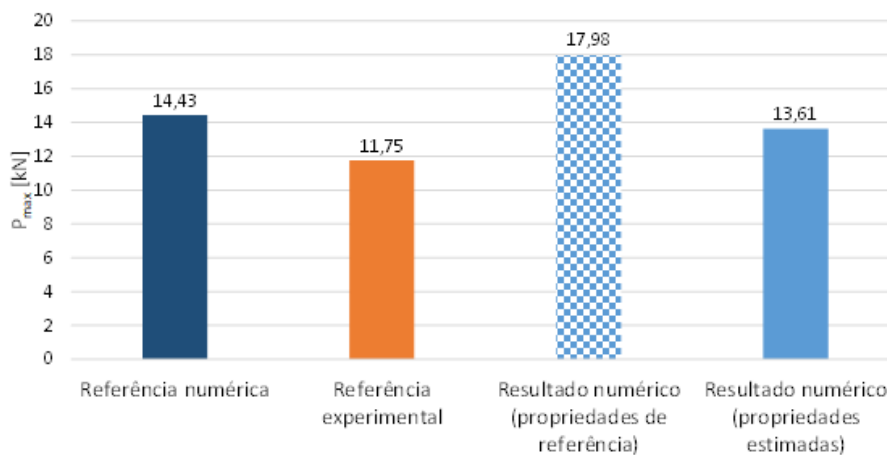


Figura 44 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo AV138 [77]

Para o adesivo DP8005 verificou-se uma curva $P-\delta$ semelhante ao perfil de referência [78] (Figura 45). A principal disparidade está no deslocamento máximo obtido que, apesar de estar em linha com o gráfico da referência numérica, apresenta valores bastante inferiores ao deslocamento obtido na referência experimental.

Quanto à $P_{m\acute{a}x}$, o resultado numérico teve um valor muito semelhante ao da referência numérica, apenas variando cerca de 1%. Contudo, o valor obtido experimentalmente ficou 15% abaixo destes, conforme se ilustra na Figura 46.

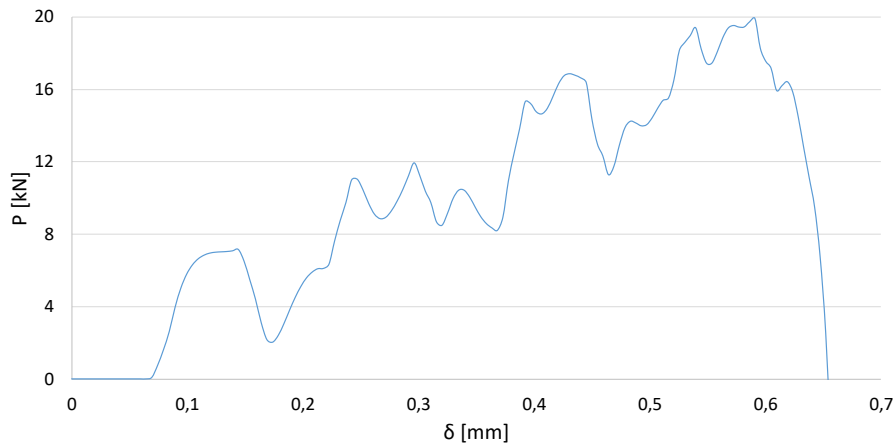
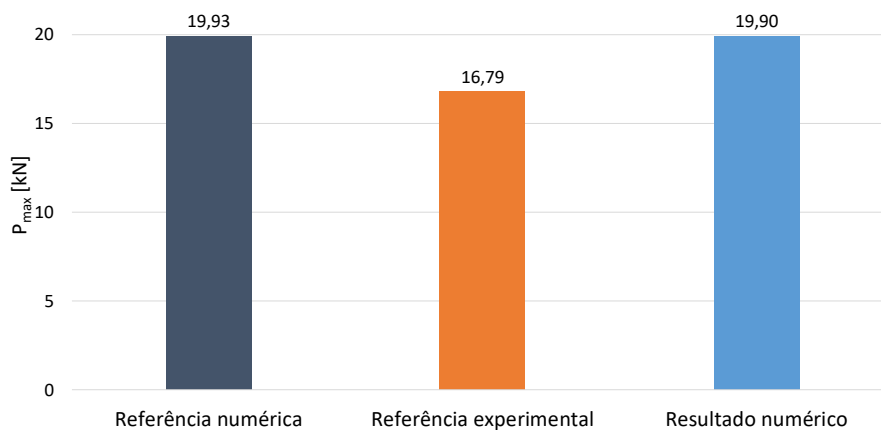
Figura 45 - Curva P- δ numérica do adesivo DP8005 [77]

Figura 46 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo DP8005 [77]

Finalmente, para o adesivo XNR6852 E-2, a curva P - δ teve um comportamento semelhante ao que se verificou no adesivo DP8005 (Figura 47). O deslocamento correspondente à P_{\max} e o deslocamento máximo foram semelhantes ao da referência numérica [78]. Também de forma semelhante ao adesivo anterior, o deslocamento máximo e deslocamento para a P_{\max} registrados na referência experimental foram bastante superiores. Para a P_{\max} verificou-se uma diferença de 5% do resultado numérico ao resultado da referência numérica e um aumento de 51% em relação à referência experimental (Figura 48).

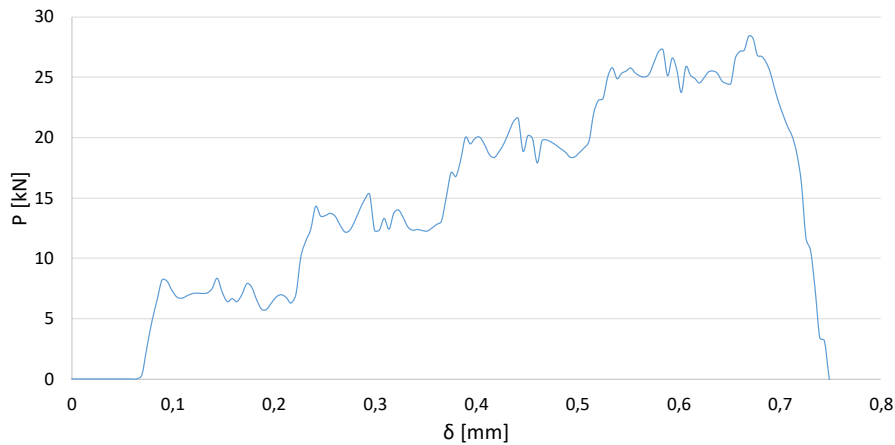


Figura 47 - Curva P - δ numérica do adesivo XNR6852 E-2 [77]

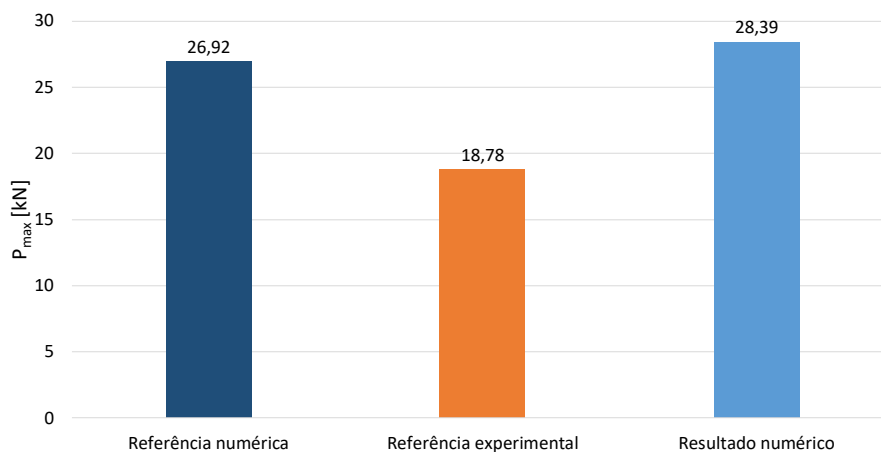


Figura 48 - Comparação do resultado obtido com valores de referência com o adesivo XNR6852 E-2 [77]

3.1.4 Discussão dos resultados

Em função dos resultados obtidos, o modelo de validação com o adesivo RTV106 não vai ser considerado. Apesar de, com a utilização de uma linha de tendência, a referência numérica ter ficado mais próxima, os valores numéricos foram muito distintos dos da referência experimental. A disparidade entre resultados advém do facto de apenas se terem considerado as propriedades do adesivo para casos estáticos (Tabela 5).

Para o adesivo AV138, numa fase inicial, não se conseguiram replicar os resultados da referência numérica. De forma a obter resultados mais aproximados daqueles que foram obtidos por da Silva [78], o valor de algumas propriedades foi ajustado. Devido aos resultados obtidos com os valores de referência a uma velocidade de impacto de 1,75 m/s, conclui-se que as extrapolações dos valores obtidos para esta velocidade não são válidas para este adesivo. Utilizando as propriedades estimadas o modelo já foi validado (Tabela 6).

De seguida, com o adesivo DP8005 verificou-se que a $P_{m\acute{a}x}$ obtida para o resultado numérico foi cerca de 19% superior à obtida pela referência experimental. Tal facto pode dever-se à impossibilidade de replicar experimentalmente as condições do ensaio numérico. Em adição, a existência de folgas e deformação elástica dos componentes do equipamento de ensaio e ainda a precisão da célula de carga, podem influenciar tanto a $P_{m\acute{a}x}$ como o deslocamento obtido, de maneira a que a deformação experimental seja superior à obtida pelo modelo numérico.

Finalmente, para o adesivo XNR6852 E-2, obteve-se a maior proximidade aos resultados da referência numérica. Quanto à diferença no valor de $P_{m\acute{a}x}$, esta resulta dos fatores enunciados anteriormente.

3.2 Estudo numérico

3.2.1 Geometria da junta

Conforme indicado no título do presente trabalho, será estudada a influência das alterações geométricas numa junta adesiva tubular solicitada ao impacto. Para cada uma das geometrias estudadas, todas terão como referência um valor de L_0 de 10 mm. Os desenhos das juntas serão apresentados nos próximos capítulos. Cada um dos parâmetros geométricos a alterar será indicado na geometria pelos símbolos na Tabela 7.

Tabela 7 - Símbolo correspondente a cada parâmetro geométrico

Parâmetro geométrico	Símbolo
Comprimento de sobreposição	L_0 (mm)
Espessura de aderente exterior	t_{so} (mm)
Filete de adesivo	β (°)
Chanfro interior do aderente	θ (°)
Chanfro exterior do aderente	α (°)

3.2.2 Materiais utilizados

3.2.2.1 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. As boas propriedades mecânicas e vasto campo de aplicabilidade em situações estruturais, foram fatores preponderantes à sua escolha. Num outro trabalho [60] foram obtidas as seguintes propriedades da liga:

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

As curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [60], estão presentes na Figura 49. Para além disso, está representada também a aproximação numérica usada nos MDC e MEFX [86].

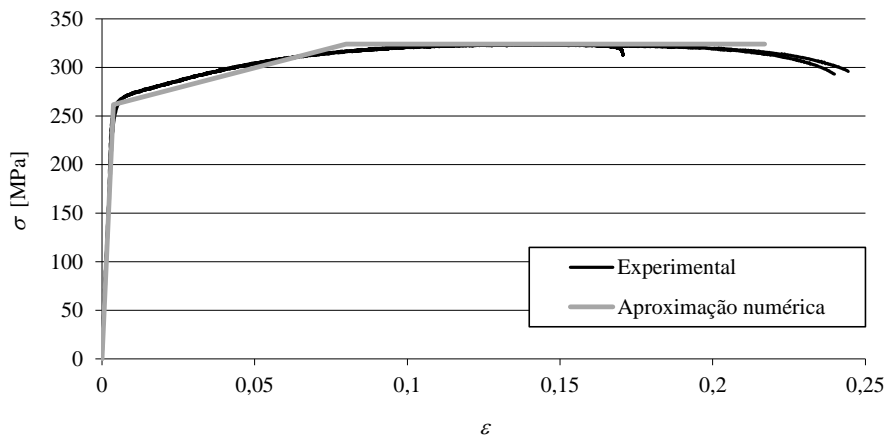


Figura 49 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [87]

3.2.2.2 Adesivos

As propriedades de adesivos usadas neste trabalho numérico são as propriedades em função da velocidade de impacto (Tabela 6) utilizadas por da Silva [78] no seu trabalho experimental. Para isso foram selecionados três adesivos com propriedades distintas, sendo que dois dos adesivos têm uma elevada ductilidade enquanto os dois restantes são adesivos de elevada rigidez.

O adesivo estrutural Araldite® AV138 é um adesivo de elevada resistência, apesar de ter um comportamento frágil, sendo adequado para ligar diferentes tipos de materiais, tais como compósitos, metais e polímeros [88]. Este adesivo de base epóxico, termoendurecível, é composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998. Este adesivo apresenta-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis [35].

De seguida, será utilizado um adesivo acrílico estrutural bi-componente e dúctil, 3M® DP8005. É um adesivo de cura muito rápida, atingindo boa resistência mecânica em poucos minutos. O objetivo deste adesivo é substituir ligações mecânicas tais como parafusos e rebites. Devido ao facto de ser possível utilizar este adesivo em polímeros com baixa energia de superfície é também indicado para evitar tratamentos de superfície ou ataques químicos que seriam necessários na utilização de outros adesivos.

Tem integrado na sua constituição esferas de vidro com um diâmetro de 0,2 mm de modo a controlar a t_a [89].

Por último, é também utilizado neste trabalho o adesivo epóxico híbrido XNR6852 E-2 produzido pela Nagase Chemtex®. Trata-se de um protótipo de formulação do adesivo XNR6852, aqui na sua terceira formulação. Destina-se em especial à indústria automóvel para ligação entre componentes CFRP ou para ligar CFRP a ligas metálicas, assim como à indústria aeroespacial para aplicação em fibras metálicas. Devido às necessidades específicas destas indústrias, este adesivo está formulado de modo a potenciar a tenacidade para que seja capaz de absorver grandes quantidades de energia quando solicitado ao impacto, mantendo uma elevada resistência e rigidez. Possui boa resistência ao arrancamento [56].

Na Tabela 8 encontram-se as propriedades mecânicas para condições de ensaio estático. Foram utilizadas diversas metodologias de ensaio para determinar as propriedades dos adesivos utilizados. Os valores de E e t_n^0 foram determinados experimentalmente através de ensaios de tração e G e t_s^0 através de ensaios TAST. As energias de fratura G_{IC} e G_{IIC} foram determinadas através de ensaios DCB e ENF, respetivamente.

Tabela 8 – Propriedades estáticas dos adesivos

Adesivo	DP8005 [82, 83]	AV138 [84]	XNR6852 E-2 [78]
E [MPa]	590	4890	1742
G [MPa]	159	1560	645,2
t_n^0 [MPa]	6,3	41,0	42,9
t_s^0 [MPa]	8,4	30,2	28,7
G_{IC} [N/mm ²]	1,1	0,35	-
G_{IIC} [N/mm ²]	6	4,91	18
ρ [g/cm ³]	1,06	1,7	1,5
ν	0,3 ^a	0,35 ^b	0,4 ^c

^a valor estimado [44]; ^b valor do fabricante; ^c valor típico para adesivos epóxicos [90]

3.2.3 Modelação por MDC

Toda a análise numérica desenvolvida nesta dissertação é baseada no MEF e foi desenvolvida através do *software* ABAQUS versão 6.17 (Dassault Systems). Conforme indicado no capítulo de validação da técnica numérica, a utilização deste *software* justifica-se pela sua vasta aplicabilidade neste tipo de estudos, em particular na área dos

adesivos. Assim como qualquer outro software de elementos finitos, o ABAQUS divide-se nas fases de pré processamento, obtenção da solução e pós processamento. Começando pelo pré processamento, este divide-se nos seguintes módulos:

- *Part*;
- *Property*;
- *Assembly*;
- *Step*;
- *Load*;
- *Mesh*.

1º Módulo – Part

Neste módulo é feito o desenho da junta tubular. Começa-se por desenhar o provete como um componente único e depois efetua-se a sua divisão em partições de forma a distinguir o adesivo dos aderentes, de acordo com a Figura 50.

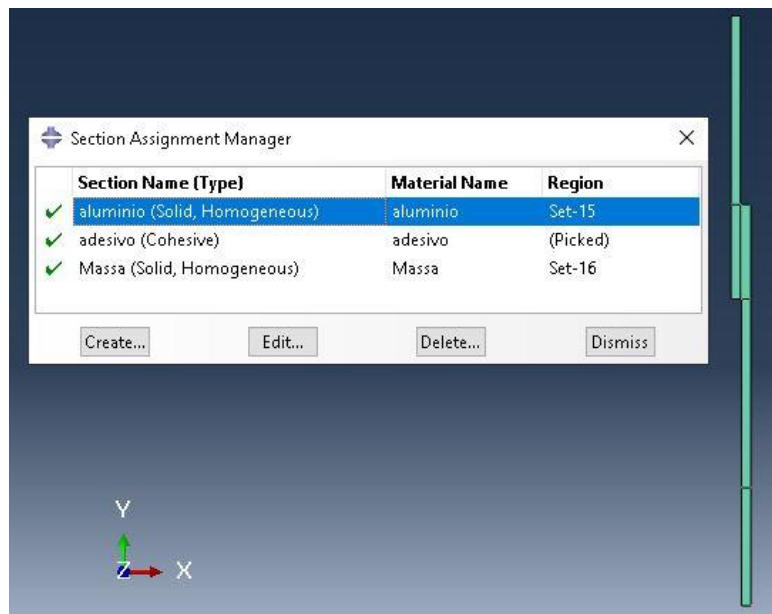


Figura 50 – Criação dos materiais do modelo

A junta descrita será uma junta tubular com um L_0 de 20 mm. Será feita uma análise 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 adesiva. Assim sendo, é necessário colocar um eixo de revolução que vai ditar o diâmetro da junta adesiva tubular.

De forma a estudar a junta ao impacto, será simulado um impacto de uma massa com 25 mm de comprimento e com a mesma t_{so} (Figura 51).

As condições fronteira e carregamentos a aplicar serão descritos mais à frente.

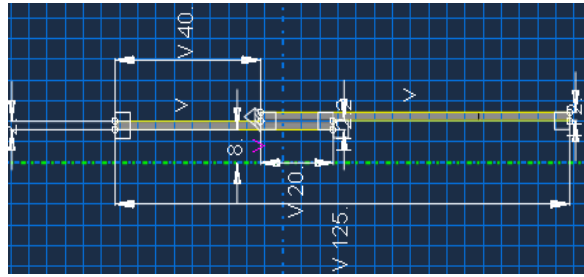


Figura 51 - Desenho 2D da junta tubular

2º Módulo - *Property*

Neste módulo são atribuídas as propriedades mecânicas às partições adesivo e aderente. São criados os materiais e definidas as respectivas secções correspondentes. O aderente (alumínio) será modelado considerando a rigidez do material e a sua plasticidade, de forma a averiguar se este cede primeiro que a camada adesiva. Quanto ao adesivo será modelado pela aproximação contínua, através de uma linha de elementos coesivos e uma lei de tração-separação triangular, incluindo a rigidez, a ρ e a propagação de dano *Quads Damage*. A massa será criada com comportamento elástico e ρ . De forma a não interferir com a rigidez da junta, vai ser considerado um E muito elevado (5e5 MPa) e um valor típico para ν de 0,3. A ρ será calculada em função da energia cinética a aplicar ao modelo. Depois de algumas tentativas, o valor que garante a separação dos aderentes será de 40 J. Este valor advém da ρ da massa. Assumindo uma velocidade de 1,75m/s é possível retirar a massa e, de seguida, após o cálculo do volume, determinar a ρ que a massa deve ter para que esta forneça a energia de 40 J. A massa, o volume e a ρ são calculados da seguinte forma:

$$U = \frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow 40 = \frac{1}{2}m \cdot 1,75^2 \Leftrightarrow m = 26,12kg$$

$$V = ((\pi \cdot 12,2^2) - (\pi \cdot 10,2^2)) \cdot 25 = 3518,58 \text{ mm}^3$$

$$\rho = \frac{m}{V} = 0,007423 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3}$$

3º Módulo – *Assembly*

Apesar de existirem várias partições no modelo, este é apenas constituído por um componente não sendo necessária qualquer ação neste módulo.

4º Módulo – *Step*

No presente módulo são indicados os parâmetros de computação da simulação. A primeira fase será criar um *step* do tipo *Dynamic/Explicit*. Todos os modelos desenvolvidos têm um tempo de ensaio de 5 ms (Figura 52). Os *field outputs* foram configurados de modo a que a evolução temporal em representação gráfica seja feita em períodos de 50 μ s (Figura 53). Já no campo *history outputs* foi feito o registo do

deslocamento vertical (U2) e das forças de reação verticais (RF2) a cada 10 incrementos (Figura 54). Para desenvolver as análises pretendidas, é ainda necessário retirar os parâmetros CSTRESS, SDEG, LE, PE, PEEQ, S e V (*contact pressure and frictional shear stresses, Scalar stiffness degradation variable, logarithmic strain components, plastic strain components, equivalent plastic strain, all stress components e all velocity components*, respetivamente).

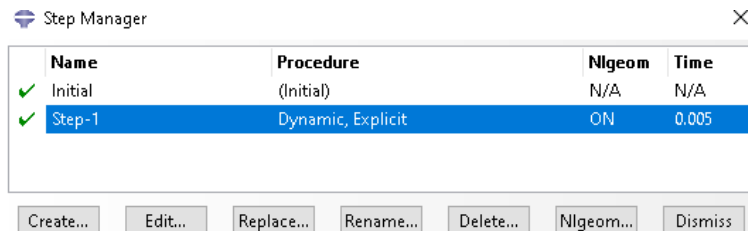


Figura 52 - Tempo de análise do modelo

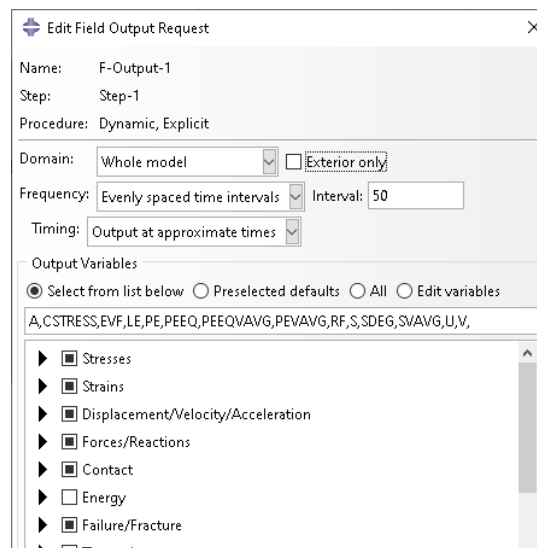


Figura 53 - Configuração das variáveis a retirar do modelo

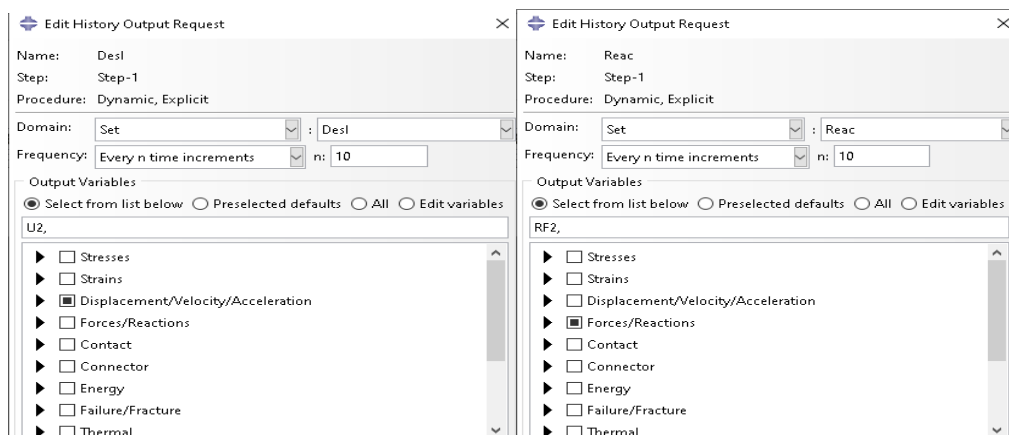


Figura 54 – Escolha de variáveis para processamento dos dados

5º Módulo – Load

Neste módulo, são colocadas em primeiro lugar as condições fronteira. A primeira condição a aplicar foi o encastramento do aderente interior na aresta assinalada, de forma a impedir a translação nos eixos X e Y e a rotação em torno do eixo Z. Em seguida será proibida a translação da outra extremidade do corpo, segundo o eixo de X, de forma a que após a colisão da massa o corpo apenas se desloca na direção de Y, reproduzindo de forma mais real possível as condições do ensaio experimental. As duas condições fronteira aplicadas estão representadas na Figura 55.

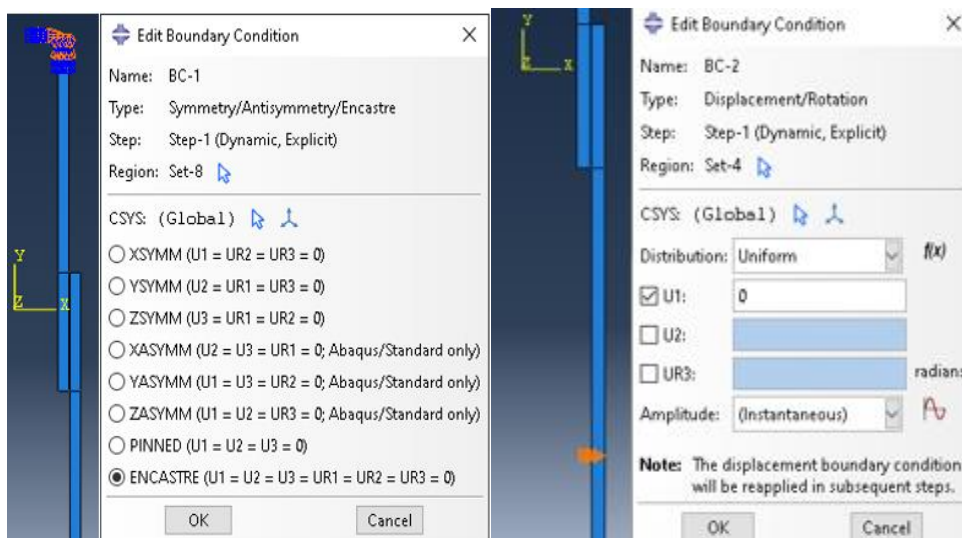


Figura 55 – Condições fronteira aplicadas ao modelo

Após aplicar as condições de fronteira, será aplicada um *Predefined Field* do tipo *Velocity*, para simular o impacto da massa já referida com o corpo a uma velocidade de 1,75 m/s (Figura 56).

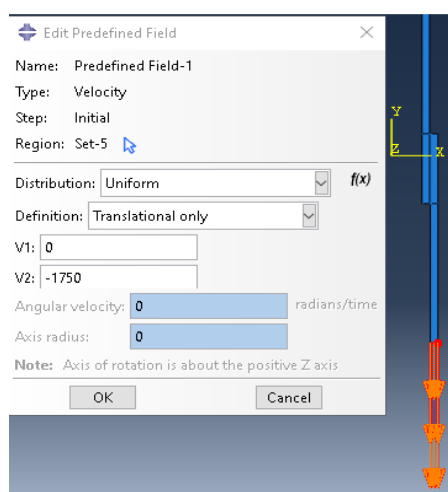


Figura 56 - Aplicação de velocidade à massa

6º Módulo – *Mesh*

No módulo *Mesh* inicia-se a discretização da geometria em elementos finitos. Naturalmente, as zonas que serão mais solicitadas e com interesse para o estudo deverão apresentar um maior refinamento da malha. Desta forma, a malha será mais refinada nas proximidades da camada adesiva e menos refinada quanto mais afastado desta (Figura 57).

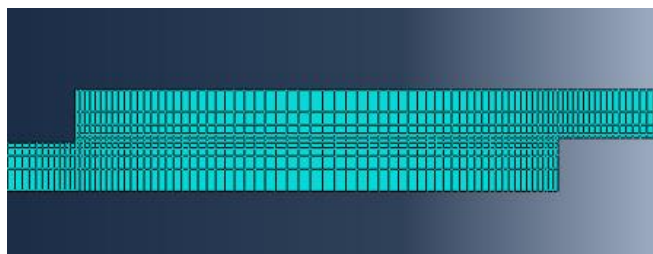


Figura 57 - Detalhe da malha na zona da junta adesiva ($L_0=20$ mm)

7º Módulo – *Job*

A fase de obtenção da solução é iniciada na simulação da junta no módulo *Job*. Deve ser inserida a capacidade computacional pretendida para a simulação. No comando *Monitor* pode verificar-se a evolução da simulação ao longo dos incrementos temporais definidos anteriormente no módulo *step*. Após o término da simulação, carregando no campo *Results*, são apresentados os resultados da mesma.

8º Módulo – *Visualization*

O pós-processamento efetua-se no módulo *Visualization*. Aqui observa-se a junta adesiva após a sua rotura. No caso do presente trabalho serão extrapolados os resultados para retirar a curva $P-\delta$, começando por retirar as reações obtidas no encastramento definido e fazendo o seu somatório, seguido do deslocamento na extremidade do corpo.

3.2.3.1 *Formulação do modelo*

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [83]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [91], linear parabólico [92], exponencial [93], polinomial [94] e trapezoidal [95]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [96]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 58, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

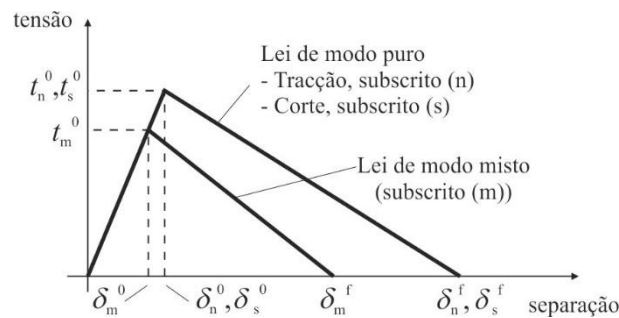


Figura 58 – Lei triangular do modelo de MDC

Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tração e corte [97]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação e de uma deformação de corte que são determinados recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} , a qual relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

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

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [98]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

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

Onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [97]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensão, expresso pela seguinte expressão:

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

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [99]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 58), pela igualdade da equação 3, a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 58) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

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

3.2.4 Estudo dos parâmetros geométricos principais

3.2.4.1 Comprimento de sobreposição

Começando pelo estudo do efeito de L_0 a partir dos MDC do Abaqus®, será estudada a resistência para juntas com 10 mm, 15 mm e 20 mm de L_0 , para os três adesivos indicados. Através da análise numérica será averiguado se existe alguma melhoria de resistência das juntas fazendo alterar o valor de L_0 . Para isso serão analisadas as distribuições das tensões τ_{xy} e σ_y que se instalam para os três adesivos. Na Figura 59 é apresentado o desenho da junta adesiva tubular, onde apenas se irá variar o valor de L_0 .

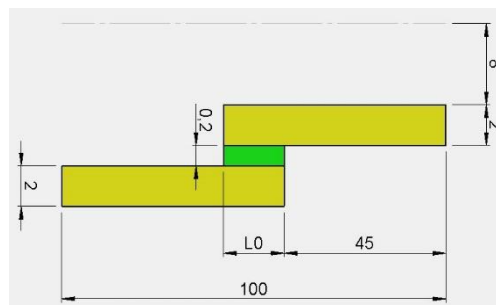


Figura 59 - Geometria do modelo para teste de L_0

Para o modelo com $L_0=10$ mm, pode observar-se a malha utilizada na Figura 60. Para todas as dimensões de L_0 , a malha é semelhante, constituída apenas por elementos quadriláteros (Figura 60). Para a zona do adesivo (representado a verde) serão atribuídos elementos *sweep* do tipo COH2D4. Já para os aderentes (representados a amarelo) foram atribuídos elementos estruturados CPE4R (Figura 59). De forma a melhorar a precisão dos resultados, a malha foi mais refinada nas proximidades da camada adesiva.

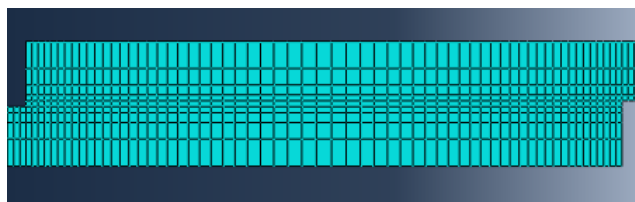


Figura 60 - Pormenor da malha na junta adesiva na zona da ligação

Todas as condições do ensaio, como as condições de energia, fronteira, tipos de elementos, entre outros, serão as descritas no capítulo 3.2.3. Para além disso, o MDC descrito anteriormente é utilizado ao longo de toda a dissertação.

3.2.4.1.1 Distribuições de tensões

De forma a analisar as tensões ao longo do adesivo, foi necessário reformular os modelos numéricos desenvolvidos de acordo com o capítulo 3.2.3. Inicialmente, foi necessário alterar as propriedades do adesivo, colocando-o como elástico com o respetivo E , ν e ρ . Depois, foi alterada a partição correspondente ao adesivo de coesiva para sólida/homogénea. Na formulação da malha, os elementos da camada adesiva e restante modelo deverão ser todos iguais. Quanto ao refinamento, a malha foi 10 vezes mais refinada em todo o modelo. Na secção do adesivo foram colocados 10 elementos na direção da espessura desta (Figura 61).

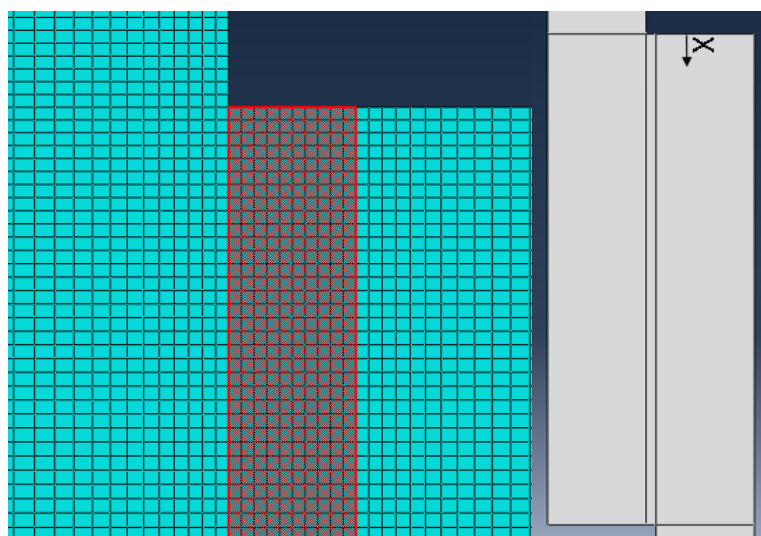


Figura 61 - Pormenor da malha na camada adesiva e sentido do eixo X

Para todos os modelos corridos as tensões foram retiradas a um *step time* de 0,0001 s.

De modo a que se consiga comparar a distribuição de tensões para juntas com L_0 distintos, nos gráficos das distribuições de tensões o eixo horizontal representa o comprimento normalizado, dado pelo quociente entre o valor da coordenada X (Figura 61) e L_0 . Relativamente ao eixo vertical, tanto para as tensões τ_{xy} , como para as tensões

σ_y , estas advêm do quociente entre o valor da tensão efetiva sobre a tensão de corte média (τ_{med}) obtida para o valor de L_0 correspondente.

A distribuição das tensões τ_{xy} para os vários valores de L_0 testados para o adesivo AV138 está representada na Figura 62. As zonas de concentração de tensões verificam-se em ambas as extremidades (esquerda e direita), sendo que existe em ambas um maior valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} para um $L_0=20$ mm, 29,2% superior ao pico verificado para $L_0=15$ mm e 65,7 % superior ao pico de $L_0=10$ mm. Conforme seria espectável, o aumento de L_0 aumenta também a rigidez global da junta, aumentando assim a concentração de tensões [5]. Para além disso, verifica-se que não existe simetria na distribuição das tensões τ_{xy} , tendo a extremidade de cima na Figura 62 (correspondente à esquerda no gráfico) uma maior tensão τ_{xy} devido à maior deformação axial que se verifica, dada a menor área de secção do aderente inferior. O facto de se tratar de um caso dinâmico pode também ter influência, uma vez que provoca o comportamento instável das curvas devido às ondas de tensão de impacto [100].

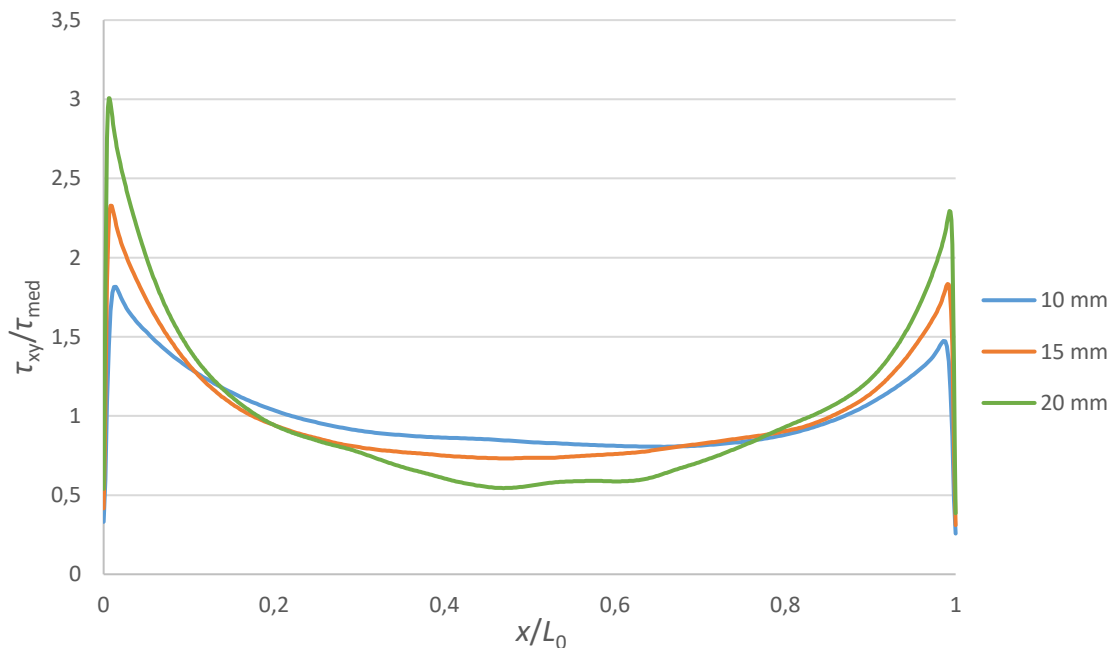


Figura 62-Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0

As tensões σ_y para o adesivo AV138 são apresentadas na Figura 63. À semelhança das tensões τ_{xy} , também se verifica um aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 . O aumento de L_0 aumenta a rigidez da junta adesiva, o que leva a um aumento da capacidade de absorção de energia no impacto e, conseqüentemente, num aumento das tensões instaladas. Para além disso, o aumento de L_0 traduz-se num aumento da concentração e gradientes de tensões nas extremidades, em função das tensões de tração resultantes da curvatura ou da deformação transversal da junta, com o valor máximo de σ_y/τ_{med} para $L_0=20$ mm a ser 65,7% superior ao valor máximo de σ_y/τ_{med} para

$L_0=10\text{mm}$ e 29,2% superior para $L_0=15\text{ mm}$. Apesar de se tratar de um caso dinâmico, a distribuição das tensões na zona central é uniforme e praticamente nula para todos os valores de L_0 , continuando a verificar-se a assimetria registada para as tensões τ_{xy} devido à diferença de áreas dos aderentes.

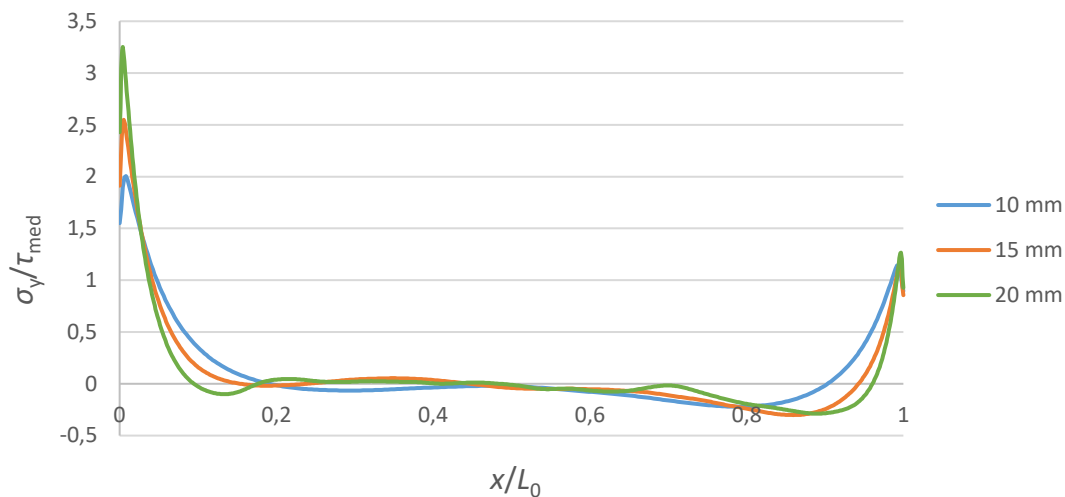


Figura 63 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0

As tensões τ_{xy} para os vários valores de L_0 com o adesivo DP8005 estão representadas na Figura 64. Para o adesivo DP8005 verifica-se novamente um melhor desempenho (menor concentração de tensões) para o menor valor de L_0 e o pior para o maior valor. As extremidades da camada adesiva apresentam concentrações de tensões que são maiores, quanto maior o valor de L_0 . Neste caso, para o valor de 10 mm e 15 mm de L_0 não existe uma grande diferença, tanto na magnitude das tensões na extremidade, como na distribuição da mesma na zona central. A semelhança nas distribuições de tensões para os dois valores de L_0 resulta da deformação diferencial dos aderentes devido à variação da deformação longitudinal destes ao longo da camada adesiva, originando picos de deslizamento nas duas extremidades da junta adesiva.

Novamente, da mesma forma que se verificou para o adesivo AV138, a distribuição de tensões é assimétrica dada a diferente área dos dois tubos. Comparando com o adesivo AV138, os picos de tensões registados são menores para todos os valores de L_0 , derivado da menor rigidez do adesivo DP8005. Também em função da menor rigidez do adesivo, as distribuições das tensões τ_{xy} ao longo da camada adesiva, para todos os valores de L_0 , foram mais uniformes do que as registadas com o adesivo AV138.

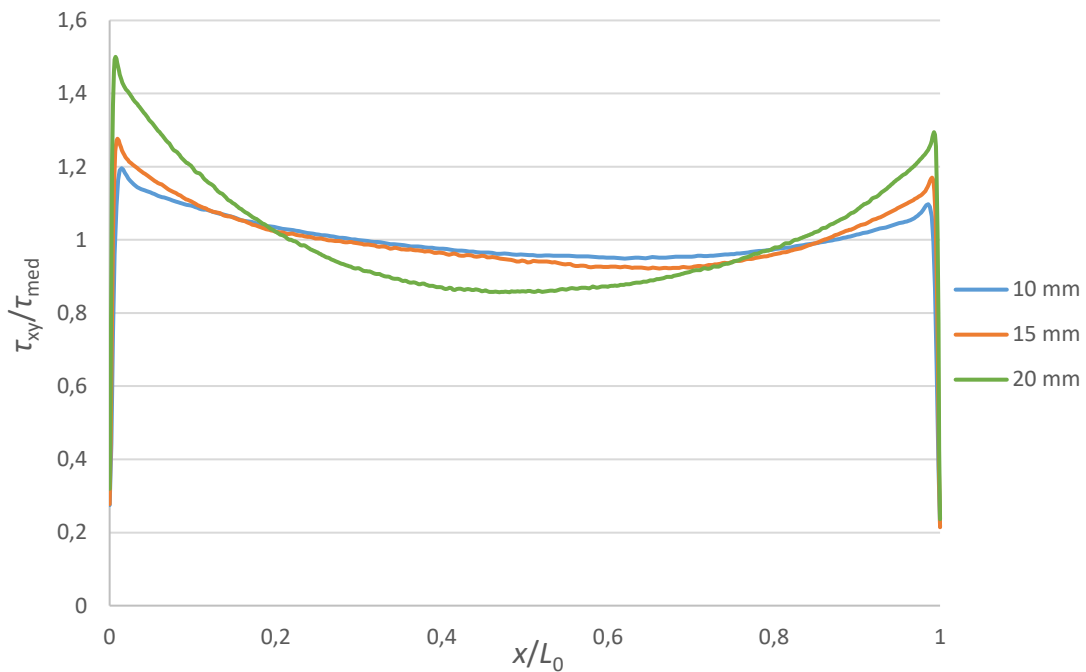


Figura 64 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de L_0

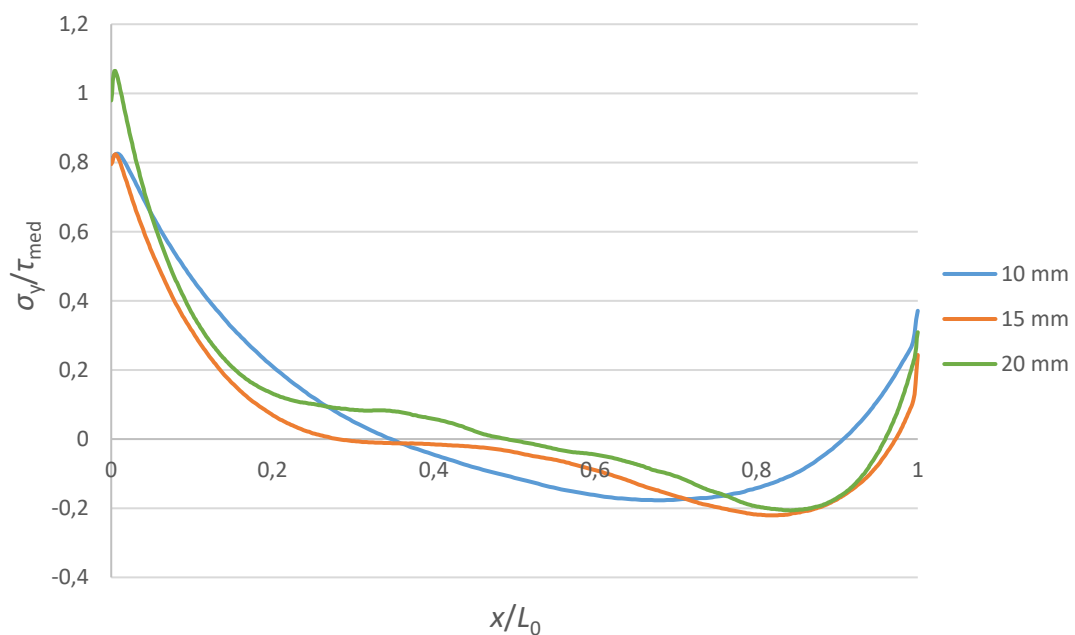


Figura 65 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de L_0

Na Figura 65 está representada a distribuição das tensões σ_y para todos os valores de L_0 com o adesivo DP8005. A maior tensão σ_y verifica-se na extremidade da esquerda para um valor de $L_0=20$ mm e é tanto maior quanto maior o valor de L_0 . O aumento de L_0 aumenta a área adesiva da junta, aumentando a rigidez da mesma e a sua capacidade para absorver mais energia. Todos estes fatores contribuem para uma natural tendência crescente dos picos de tensão. Para $L_0=15$ mm e $L_0=10$ mm os valores máximos de σ_y/τ_{med} foram praticamente iguais, sendo apenas 0,2% superior para $L_0=15$ mm. Com $L_0=20$ mm

a diferença foi de 28,9% para $L_0=15$ mm. A distribuição das tensões na zona central não foi tão uniforme como para o adesivo AV138, com a evidencia de tensões de tração e compressão para todos os L_0 ensaiados. Em relação à magnitude das tensões, esta foi naturalmente inferior à observada para o adesivo AV138, já que o adesivo DP8005 tem uma rigidez bastante inferior.

A distribuição das tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 é apresentada na Figura 66. Da mesma forma que se verificou para os adesivos anteriores, a junta com menor L_0 foi a que teve melhor desempenho. A junta com maior L_0 foi a que teve maiores picos de tensão e, conseqüentemente, o pior desempenho. A junta com 15 mm de L_0 obteve picos de tensão de magnitude intermédia, tendo um valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} 17,6% superior ao da junta com $L_0=10$ mm e 19,2% inferior ao valor máximo para $L_0=20$ mm. Para além de ser a junta com menor concentração de tensões nas extremidades, a junta de $L_0=10$ mm é a que apresenta uma distribuição das tensões mais uniforme na zona central. Mais uma vez, verifica-se uma assimetria na distribuição das tensões principalmente devido à diferente área dos dois tubos.

Equiparando com os adesivos AV138 e DP8005, a magnitude das tensões τ_{xy} neste adesivo tomou valores intermédios, sendo que o adesivo DP8005 teve os menores picos de tensão nas extremidades das juntas e uma distribuição mais uniforme das tensões τ_{xy} . O valor de E é o responsável pelos comportamentos observados em cada um dos adesivos.

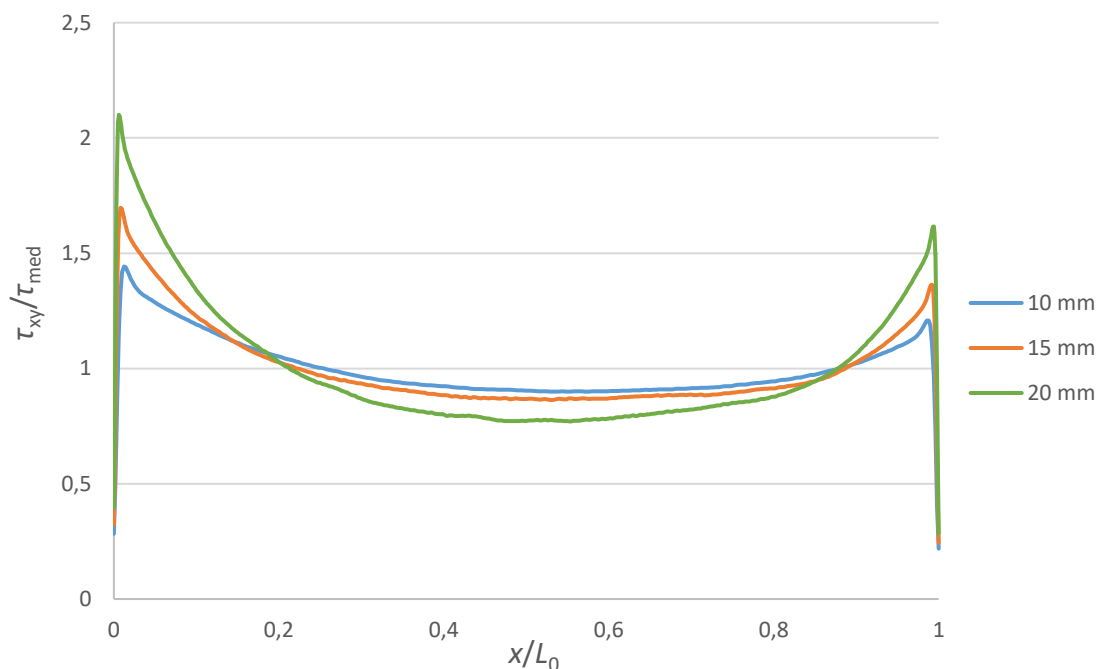


Figura 66 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

Na Figura 67 são apresentadas as tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2. Tal como nos restantes adesivos, as juntas de maior L_0 são as que apresentam maiores concentrações de tensões nas extremidades e as que têm pior desempenho. A junta com $L_0=20$ mm destaca-se das restantes, com um valor máximo de σ_y/τ_{med} 22,1% superior à junta com $L_0=15$ mm e 50,3% superior à junta com $L_0=10$ mm. Voltou-se a verificar a assimetria na distribuição de tensões σ_y por causa das diferentes áreas dos tubos. A distribuição das tensões foi mais uniforme para $L_0=10$ mm, tendo-se tornado cada vez menos uniforme com o aumento de L_0 , uma vez que existe uma taxa de deformação superior entre os tubos interior e exterior na zona da ligação. A rigidez de valor intermédio do adesivo XNR6852 E-2 faz com que, também as tensões σ_y , assumam um valor intermédio em relação aos adesivos AV138 e DP8005.

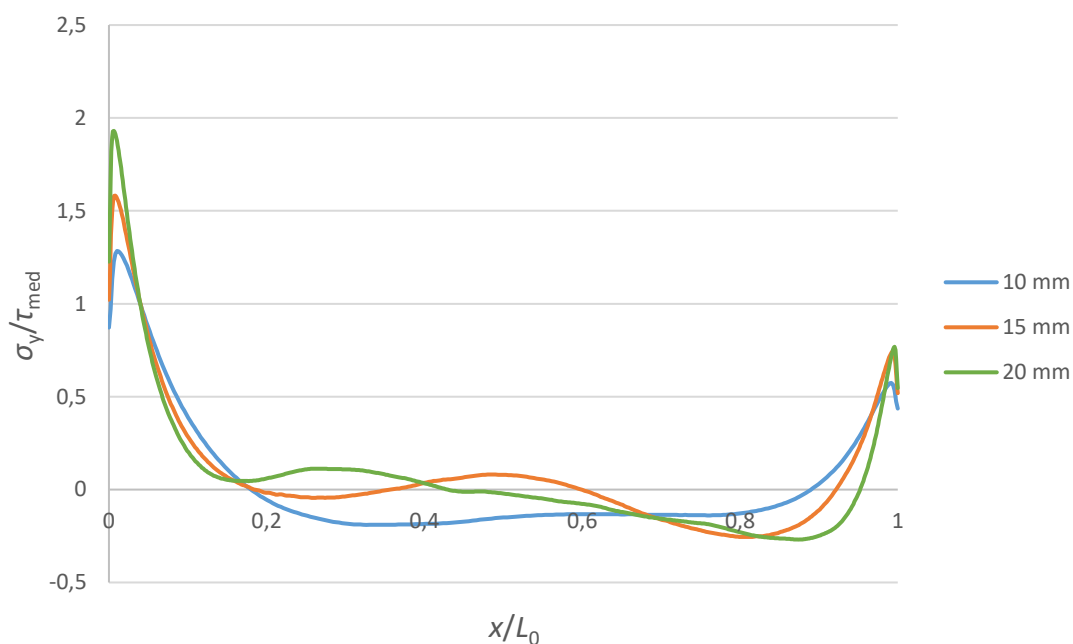


Figura 67 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

3.2.4.1.2 Resistência das juntas e energia absorvida

Para avaliar a resistência das juntas, na Figura 68 são apresentadas as curvas $P-\delta$ para todos os L_0 testados, começando pelo adesivo AV138. Facilmente se verifica que, com o aumento de L_0 , aumenta também a $P_{m\acute{a}x}$ atingida e o deslocamento de rotura. De forma a compreender melhor o efeito do aumento de L_0 na resistência da junta, na Figura 69 apresenta-se a $P_{m\acute{a}x}$ registada para cada um dos valores de L_0 . Conforme seria de esperar, e de acordo com o que foi referenciado no capítulo 2.3.1, o aumento de L_0 traduz-se num aumento da área de adesivo, resultando num aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e de deslocamento de rotura. Contudo, à medida que o valor de L_0 é aumentado, começam a surgir concentrações de tensões τ_{xy} que resultam num aumento cada vez mais gradual e menos significativo de $P_{m\acute{a}x}$. Através da Figura 69 é perceptível que o crescimento do valor de

$P_{\text{máx}}$ não é linear e que, à medida que L_0 aumenta, o declive da reta fica cada vez menor, como se constata comparando o declive da reta de $L_0=10$ mm para $L_0=15$ mm com o declive que existe de $L_0=15$ mm para $L_0=20$ mm.

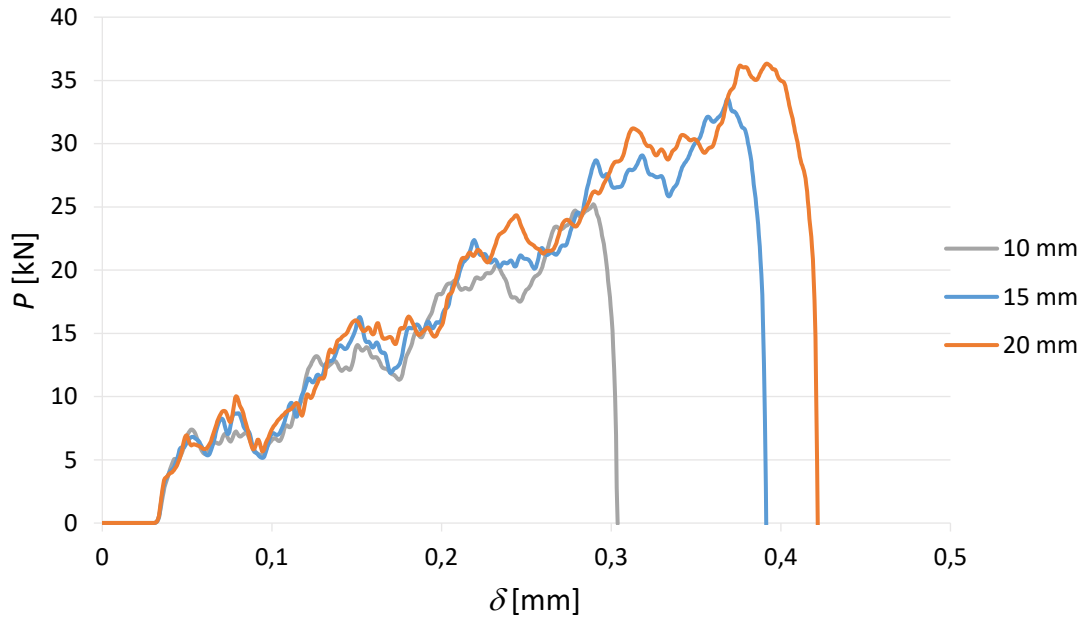


Figura 68 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de L_0

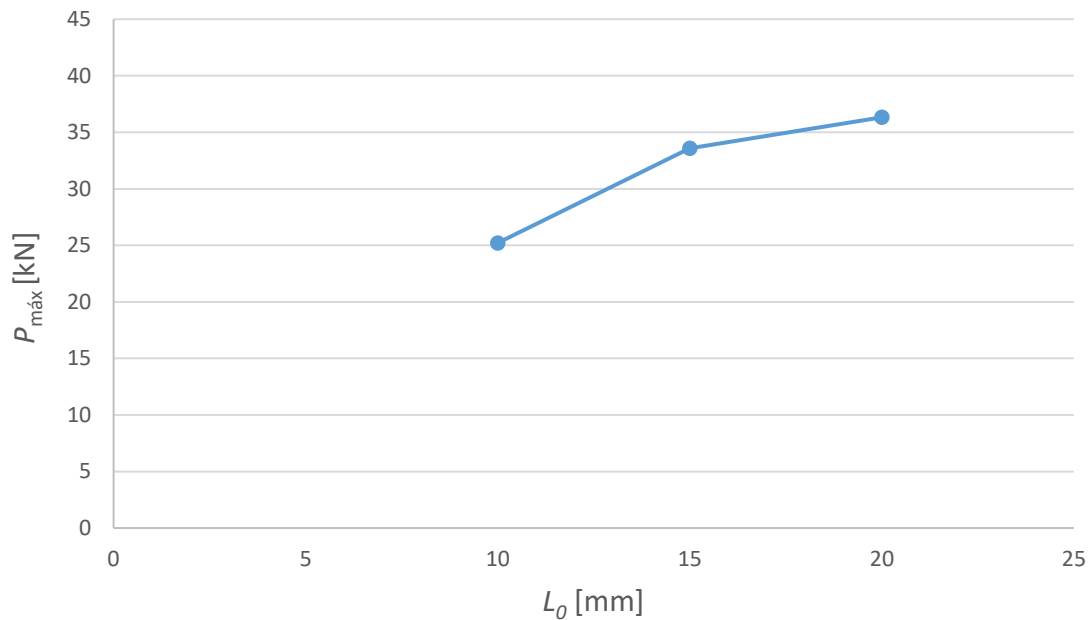


Figura 69 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para cada L_0 com o adesivo AV138

A E_{abs} teve um comportamento semelhante ao valor de $P_{\text{máx}}$ obtido. O crescimento de energia foi mais elevado da junta com $L_0=10$ mm para 15 mm (+73,5%) do que da junta

de 15 mm para 20 mm de L_0 (+35,1%). Este aumento de E_{abs} deve-se ao aumento das áreas das curvas $P-\delta$. À medida que o valor de L_0 é aumentado, a E_{abs} começará a crescer cada vez menos até atingir um patamar (Tabela 9).

Tabela 9 – E_{abs} com o adesivo AV138 em função de L_0

L_0 [mm]	E_{abs} [J]	Diferença
10	3,74	-
15	6,49	+73,5%
20	7,79	+108,6%

O próximo adesivo a testar foi o adesivo DP8005. As curvas $P-\delta$ para todos os valores de L_0 ensaiados estão representadas na Figura 70. À semelhança do que se verificou para o adesivo AV138, o deslocamento de rotura e o $P_{m\acute{a}x}$ são superiores para valores de L_0 maiores. Tal como no anterior adesivo, o aumento do deslocamento de rotura associado a um maior valor de L_0 não segue uma tendência linear. Para a junta com 20 mm de L_0 deu-se a plastificação do aderente interior, sendo atingidos os 40 kN correspondentes ao limite elástico do alumínio que se deformou plasticamente, permitindo aumentar o valor de $P_{m\acute{a}x}$.

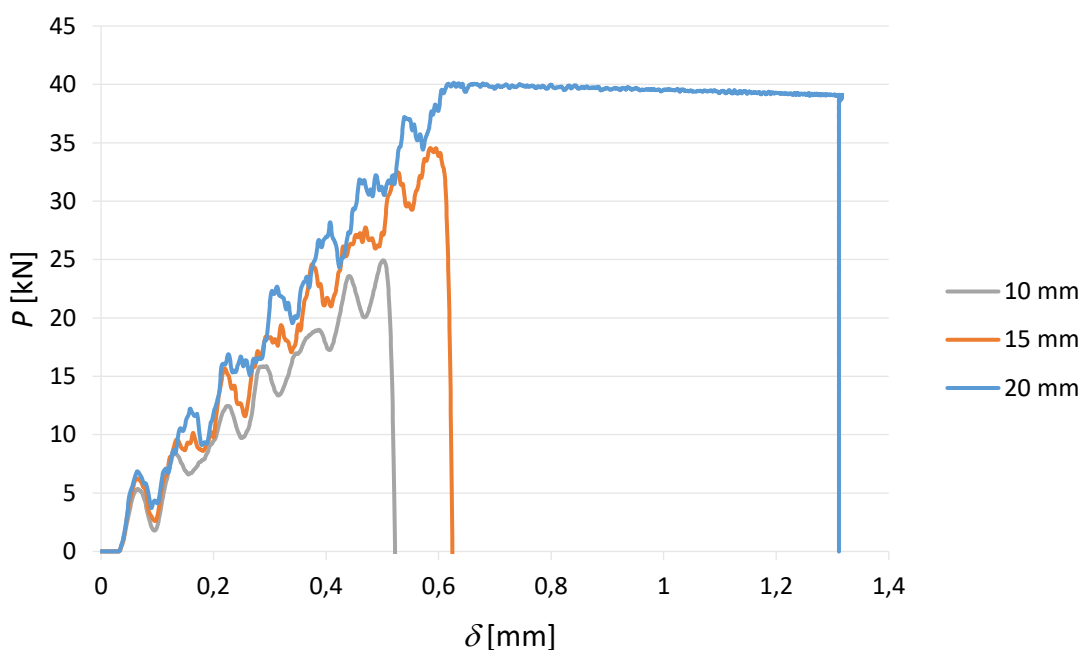


Figura 70 - Curvas $P-\delta$ com o adesivo DP8005 em função de L_0

Na Figura 71 é apresentado um gráfico com as $P_{m\acute{a}x}$ registadas para cada L_0 . Tal como aconteceu para o adesivo AV138, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ não é linear e vai diminuindo cada vez mais à medida que o valor de L_0 aumenta, até um ponto em que o aumento de L_0

deixa de aumentar a resistência da junta, como consequência da cada vez maior concentração de tensões. A junta com $L_0=20$ mm foi a mais resistente, com um $P_{m\acute{a}x}$ 60,9% acima da junta de referência ($L_0=10$ mm).

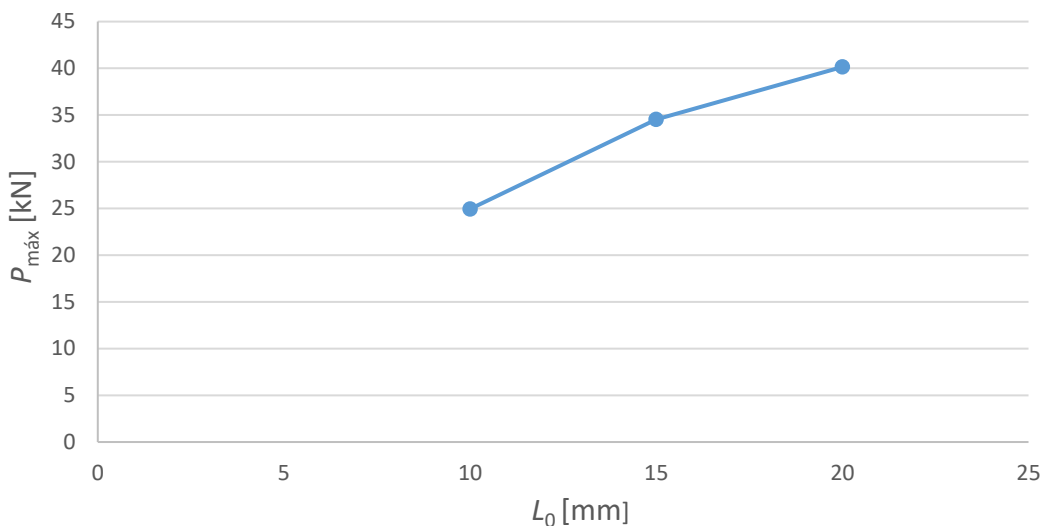


Figura 71 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada L_0 com o adesivo DP8005

Quanto à E_{abs} para o adesivo DP8005 a tendência, como seria de esperar, foi semelhante à verificada para o adesivo AV138, ainda que no adesivo DP8005 os valores de E_{abs} foram mais elevados, dado a sua maior flexibilidade que permite uma maior deformação plástica. O facto de o aderente ter plastificado e entrado em rotura primeiro que o adesivo para $L_0=20$ mm explica o destacado aumento percentual de E_{abs} relativamente à junta com $L_0=10$ mm. A junta com $L_0=15$ mm teve uma E_{abs} de +71,9% do que a junta de referência, e uma variação percentual muito semelhante, mas ligeiramente abaixo à que se verificou no adesivo AV138.

Tabela 10 – E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de L_0

L_0 [mm]	E_{abs} [J]	Diferença
10	6,35	-
15	10,92	+71,9%
20	39,66	+524,5%

As curvas $P-\delta$ para cada valor de L_0 ensaiado com o adesivo XNR6852 E-2 são apresentadas na Figura 72. Apenas a junta $L_0=10$ mm sofreu rotura na camada adesiva registando um deslocamento na rotura de 0,8 mm. Nas restantes juntas, foi ultrapassado o limite elástico do alumínio, tendo o aderente interior deformado plasticamente. Deste modo, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ atingido para $L_0=15$ mm e $L_0=20$ mm foi de aproximadamente 40 kN. O deslocamento de rotura foi bastante semelhante para $L_0=15$

mm e $L_0=20$ mm, sendo superiores aos deslocamentos de rotura atingidos para os restantes adesivos. Comparando com a junta de $L_0=10$ mm, a junta de 15 mm de L_0 atingiu um deslocamento de rotura 51,9% superior e a junta com 20 mm de L_0 um deslocamento de rotura 56,3% superior.

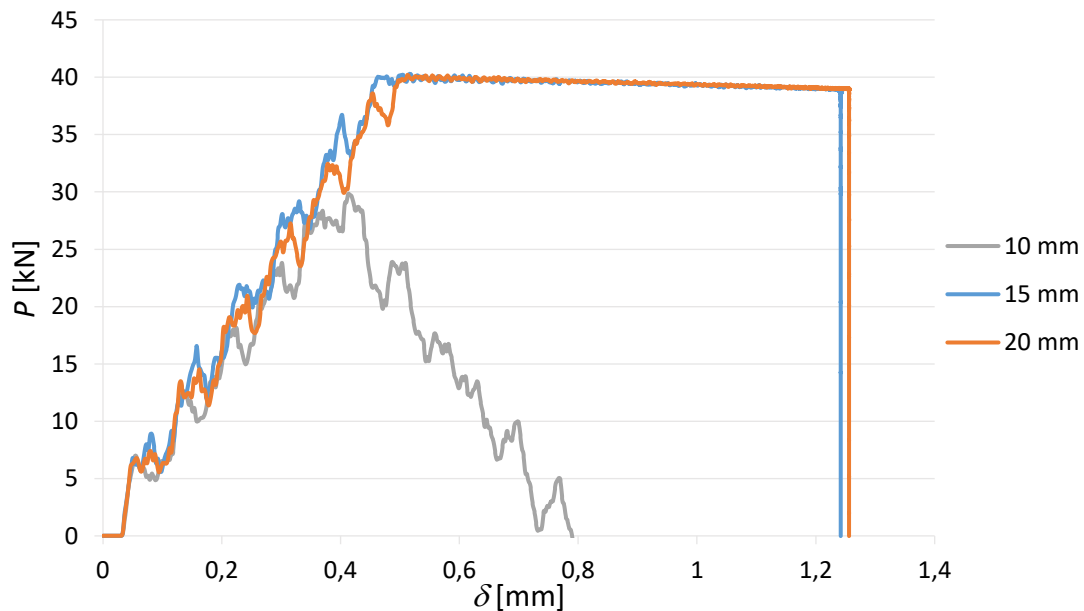


Figura 72 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

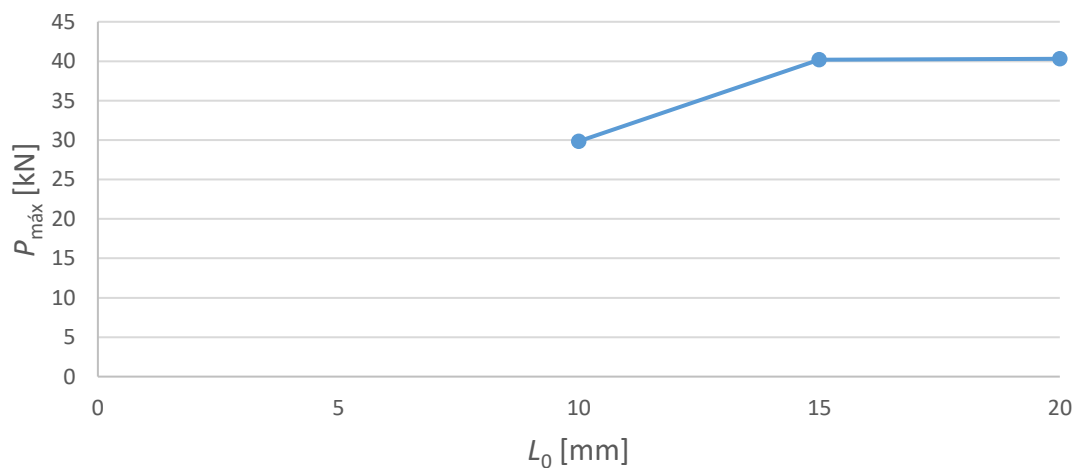


Figura 73 - Valores de $P_{máx}$ para cada L_0 com o adesivo XNR6852 E-2

A evolução gráfica dos valores de $P_{máx}$ atingidos em função de L_0 com o adesivo XNR6852 E-2 é apresentada na Figura 73. Conforme foi visualmente perceptível nas curvas P - δ (Figura 72), o valor de $P_{máx}$ para $L_0=15$ mm e $L_0=20$ mm foi praticamente igual, atingido valores da ordem dos 40 kN, devido à plastificação do aderente interior. O crescimento percentual de $P_{máx}$ de $L_0=10$ mm para $L_0=15$ mm foi de 34,7%, o mais reduzido dos três

adesivos ensaiados, devido ao facto de o adesivo XNR6852 E-2 ter atingido o maior $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas com $L_0=15$ mm e $L_0=20$ mm.

Finalmente, a E_{abs} e respetiva diferença percentual para a junta com $L_0=10$ mm é apresentada na Tabela 11. A maior $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento de rotura para as juntas com L_0 de 15 mm e 20 mm, traduzem-se numa maior área das curvas $P-\delta$, comparando com a curva de $L_0=10$ mm, daí que exista uma elevada E_{abs} . A elevada sobreposição das curvas $P-\delta$, faz com que a E_{abs} seja muito próxima, sendo a diferença percentual para a junta com $L_0=10$ mm muito semelhante e igual a 249,8% para a junta com $L_0=15$ mm e 250,6% para a junta com $L_0=20$ mm.

Tabela 11 – E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

L_0 [mm]	E_{abs} [J]	Diferença
10	11,37	-
15	39,78	+249,8%
20	39,87	+250,6%

3.2.4.1.3 Comparação de resultados

De maneira a comparar melhor a resistência de cada um dos adesivos ensaiados com a variação de L_0 , na Tabela 12 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e a respetiva diferença percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $L_0=10$ mm. Os adesivos seguiram todos a mesma tendência de crescimento, mas com diferentes taxas de crescimento.

Tabela 12 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de L_0 e respetivo aumento percentual

L_0 [mm]	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
10	25,21	-	24,94	-	29,85	-
15	33,56	+33,12	34,54	+38,49	40,21	+34,71
20	36,32	+44,07	40,15	+60,95	40,31	+35,04

A fragilidade do adesivo AV138 resulta num crescimento mais gradual e com valores de $P_{m\acute{a}x}$ menores.

O adesivo DP8005 atingiu valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores do que o adesivo anterior e com a maior taxa de crescimento, devido a este permitir que os aderentes se deformem plasticamente.

O adesivo tenaz XNR6852 E-2 foi o que claramente atingiu os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$. O facto de o aderente interior se ter deformado plasticamente para $L_0=15$ mm e $L_0=20$ mm permitiu elevar os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos. Apesar das reduzidas $\Delta P_{m\acute{a}x}$, o adesivo XNR6852 E-2 foi o que mais beneficiou do aumento de L_0 .

3.2.4.2 Espessura do aderente exterior

No presente capítulo, será estudada a influencia da variação de t_{s0} através dos MDC do Abaqus®. Os valores de t_{s0} a utilizar serão de 1 mm, 2 mm, 3 mm e 4 mm, todos com um L_0 de 10 mm.

Através da análise numérica será averiguado se existe alguma melhoria de resistência das juntas fazendo alterar o valor de t_{s0} . Para isso serão analisadas as distribuições das tensões τ_{xy} e σ_y , que se instalam para os três adesivos. Na Figura 59 é apresentado o desenho da junta adesiva tubular, onde apenas se irá variar o valor de t_{s0} .

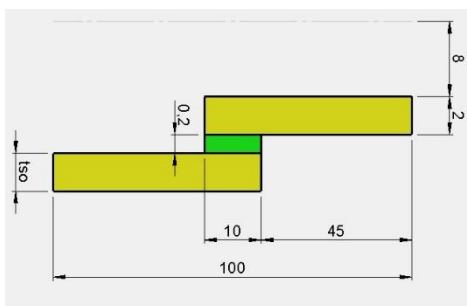


Figura 74 -Geometria do modelo para teste de t_{s0}

Para o modelo com 3 mm de t_{s0} , pode observar-se a malha utilizada na Figura 75. A malha é semelhante para todas as dimensões de t_{s0} , constituída apenas por elementos quadriláteros (Figura 75). Para a zona do adesivo serão atribuídos elementos *sweep* do tipo COH2D4. Já para os aderentes (representados a amarelo) foram atribuídos elementos estruturados CPE4R (Figura 75). Nas proximidades da camada adesiva a malha foi mais refinada, visto que esta será a zona de maior interesse para o estudo.

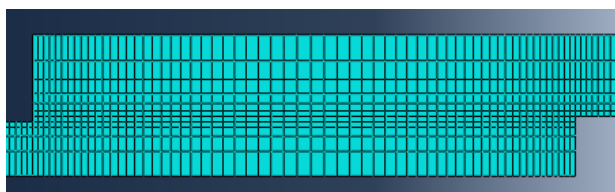


Figura 75 - Pormenor da malha na junta adesiva ($t_{s0}=3$ mm)

Todas as condições dos ensaios, como as condições de energia, fronteira, tipos de elementos, entre outros, serão as mesmas que foram descritas no capítulo 3.2.3.

3.2.4.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 76 estão representadas as distribuições das tensões τ_{xy} para todos os valores de t_{so} ensaiados com o adesivo AV138. A espessura de 4 mm foi a que registou maior pico de tensão na extremidade esquerda, apesar de na extremidade da direita o aderente com 1 mm ter atingido uma tensão de magnitude semelhante. Este fenómeno deve-se ao aumento do efeito de deformação diferencial do tubo exterior. Na extremidade contrária ($x/L_0=0$) acontece o oposto, com o aumento de t_{so} a aumentar os picos de tensões τ_{xy} . Quanto à magnitude de τ_{xy}/τ_{med} , o aumento de rigidez do adesivo resulta num aumento dos valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} . A distribuição da tensão ao longo da camada adesiva não foi uniforme para todos os valores de t_{so} . Na análise dos resultados obtidos com os restantes adesivos ensaiados serão comparados os valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} em cada adesivo.

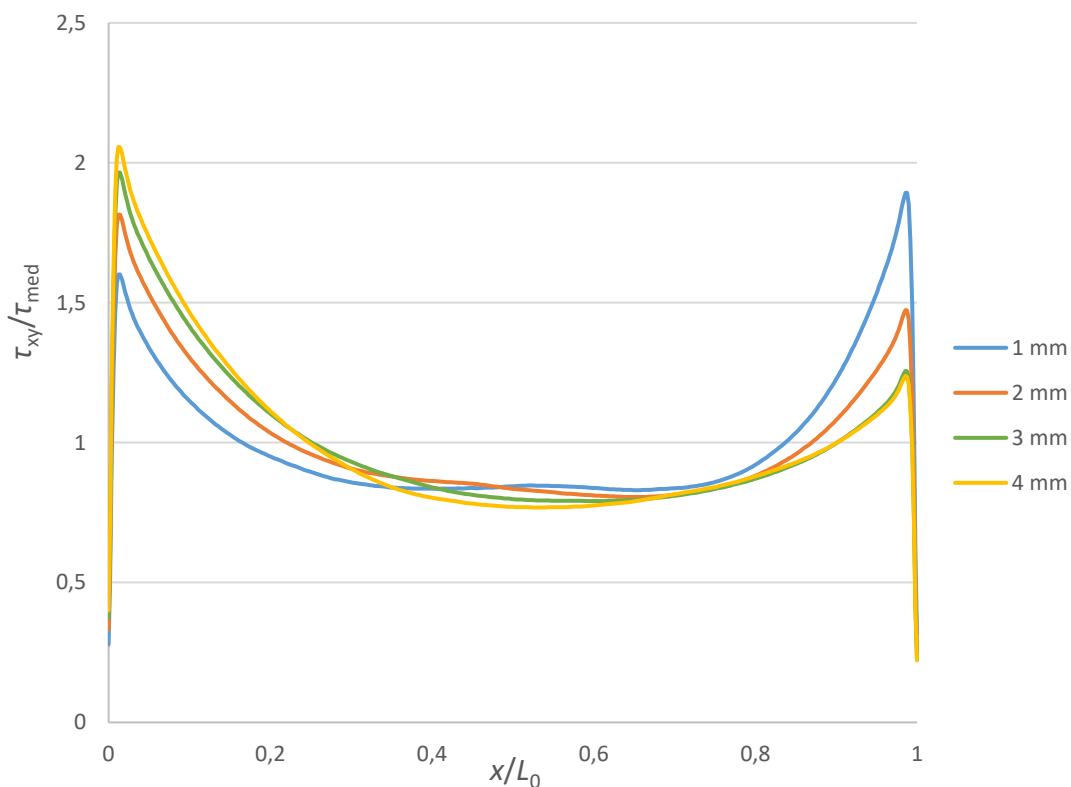


Figura 76 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de t_{so}

A Figura 77 apresenta as tensões σ_y com o adesivo AV138. Os picos de concentração das tensões σ_y mais elevados dão-se na extremidade em que $x/L_0=0$ e são tanto maiores quanto maior o valor de t_{so} . Os tubos com maiores diferenças de espessuras terão, normalmente, maiores diferenças de rigidez. Tal facto faz com que o tubo de menor rigidez apresente uma deformação transversal elevada. Como consequência disso, a deformação que o adesivo tem de suportar será superior, levando a que os picos de

concentrações de tensões σ_y sejam superiores. Na extremidade contrária ($x/L_0=1$) a maior área do aderente exterior reduz os picos das concentrações das tensões σ_y .

Na zona central da ligação as tensões tiveram magnitudes reduzidas e uma distribuição uniforme, apesar de haver alternância entre compressão e arrancamento, à exceção do aderente com t_{so} de 1 mm que registou apenas compressão.

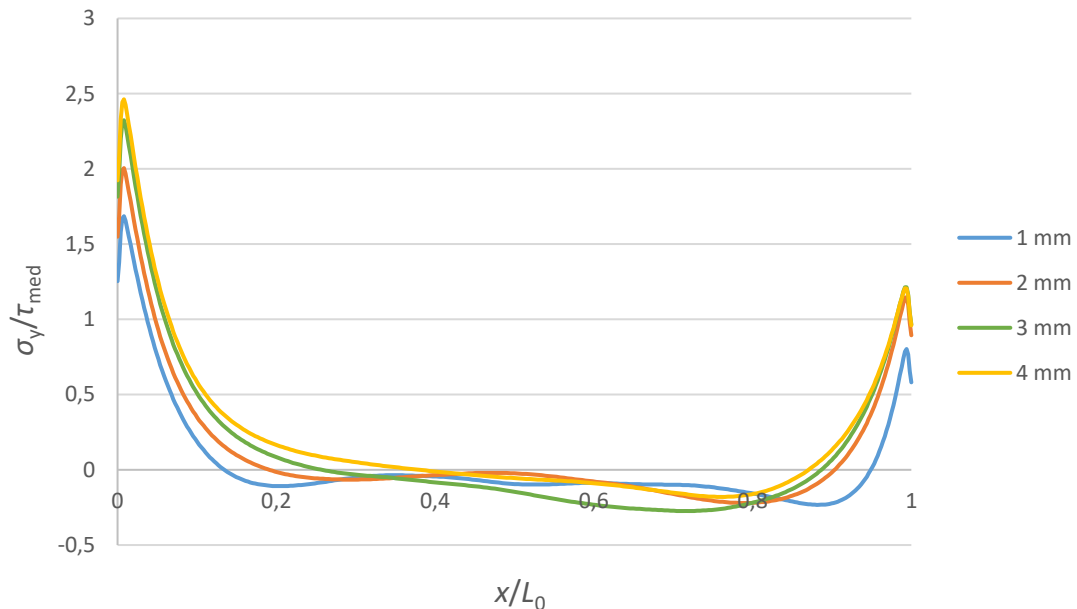


Figura 77 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de t_{so}

Na Figura 78 são apresentadas as tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005. Facilmente se verifica que a distribuição é bastante mais uniforme e com picos de concentração de tensões τ_{xy} com menores magnitudes, dada a menor rigidez do adesivo DP8005. Verifica-se uma tendência crescente dos valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} em $x/L_0=0$ com a diminuição de t_{so} . O aumento da deformação diferencial para os tubos exteriores de menor rigidez justifica os maiores picos de tensão que surgem. No extremo oposto ($x/L_0=1$) os valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} são mais reduzidos, devido à maior área do tubo exterior. Em comparação com o adesivo AV138, a distribuição da tensão é bastante mais uniforme para todas as juntas, dada a menor rigidez do adesivo DP8005. Também os valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} foram inferiores.

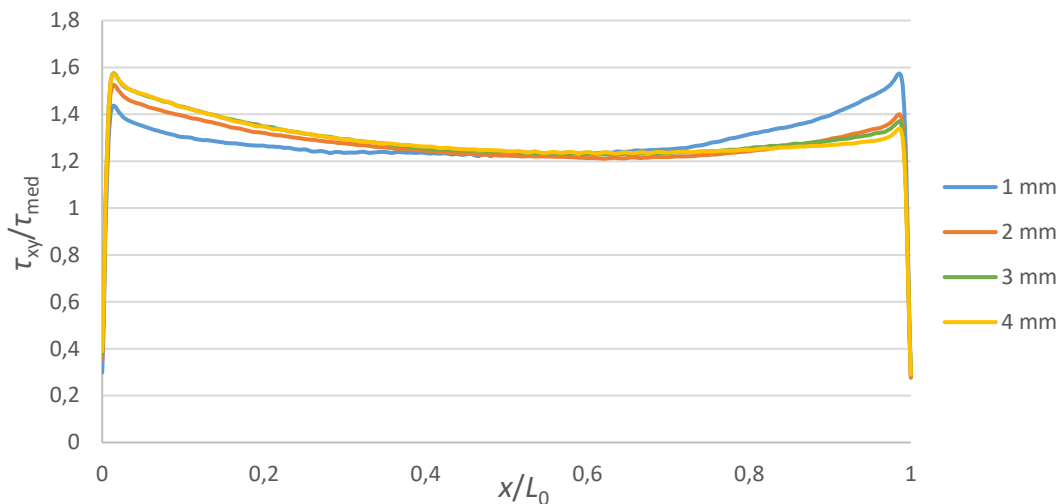


Figura 78 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de t_{s0}

As distribuições das tensões σ_y em função de t_{s0} com o adesivo DP8005 são apresentadas na Figura 79. Em ambas as extremidades se verifica que as espessuras de 3 mm e 4 mm obtiveram picos de tensão de valor semelhante, acima das juntas com $t_{s0}=2$ mm e $t_{s0}=1$ mm, respetivamente. A diferença da rigidez entre os tubos interior e exterior na extremidade da ligação esquerda ($x/L_0=0$) faz com que os valores dos picos de concentração de tensões σ_y sejam mais elevados do que na extremidade oposta ($x/L_0=1$). A distribuição das tensões na zona central não foi uniforme, em particular para a junta com $t_{s0}=1$ mm. Em comparação com o adesivo AV138, a menor rigidez do adesivo DP8005 traduz-se em tensões σ_y de valor mais reduzido.

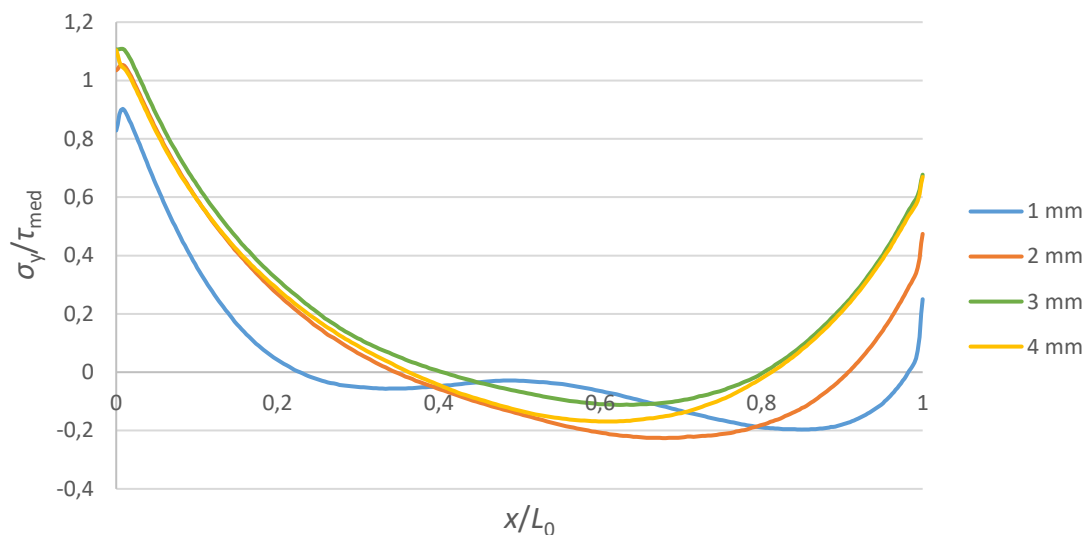


Figura 79 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de t_{s0}

Finalmente, a distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 é apresentada na Figura 80. A junta tubular com $t_{s0}=4$ mm foi a que teve pior desempenho com o maior

pico de tensão, tendo um valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} 3,4% superior à junta com $t_{s0}=2$ mm e 0,6% superior à junta com $t_{s0}=3$ mm. Este fenómeno repete-se tal como tinha acontecido para os restantes adesivos ensaiados, sendo a justificação igual à referida anteriormente. Quanto à magnitude das tensões τ_{xy} , o adesivo XNR6852 E-2 teve tensões de magnitude ligeiramente acima das registadas pelo adesivo DP8005. Em contrapartida, a distribuição na zona central não foi tão uniforme quanto a registada pelo adesivo DP8005, uma vez que o adesivo XNR6852 E-2 é mais rígido.

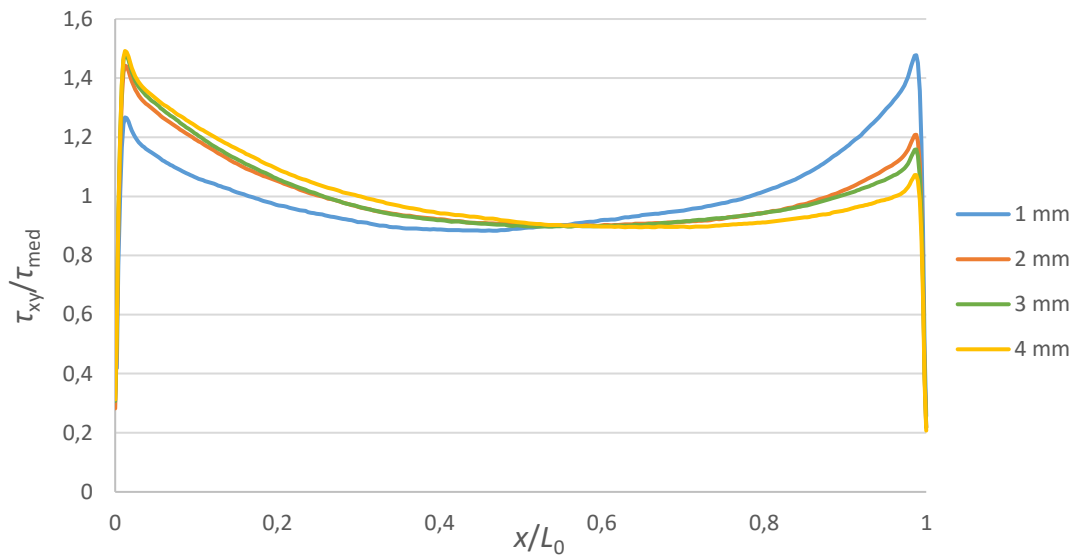


Figura 80 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{s0}

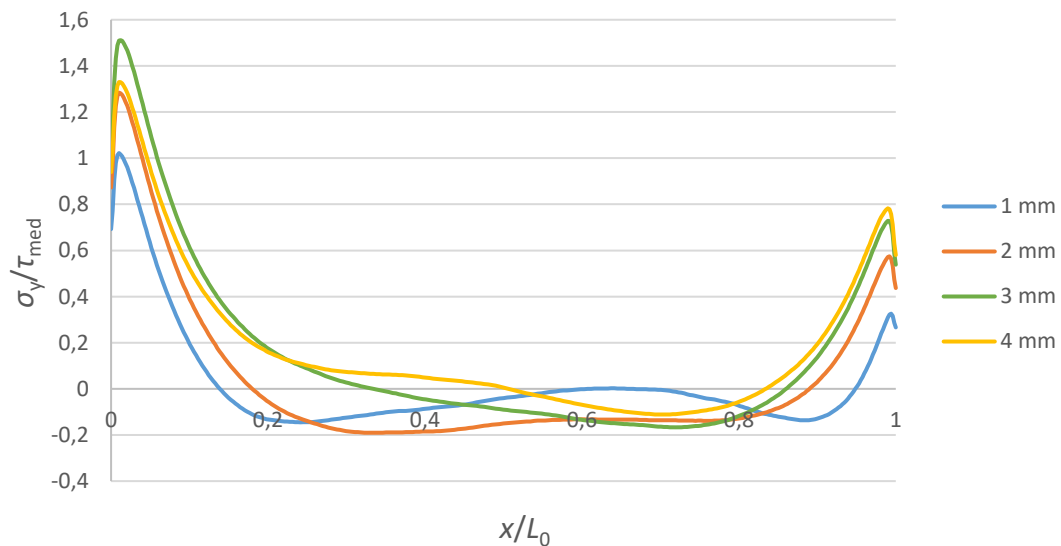


Figura 81 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{s0}

As tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 são apresentadas na Figura 81. Ao contrário dos restantes adesivos ensaiados, a junta com $t_{s0}=3$ mm teve o maior pico de

concentração de tensões σ_y . As maiores concentrações de tensões σ_y voltam a verificar-se na extremidade da esquerda ($x/L_0=0$) pelos mesmos motivos indicados para os adesivos já analisados. A distribuição de tensões na zona central foi bastante irregular, estando os aderentes com 1 mm, 2 mm e 3 mm maioritariamente em compressão. As magnitudes das tensões σ_y tiveram valores intermédios em comparação com o adesivo AV138, que teve as maiores tensões, e o adesivo DP8005 com as menores tensões. A rigidez do adesivo justifica os valores intermédios de tensão em relação aos restantes adesivos ensaiados.

3.2.4.2.2 Resistência das juntas e energia absorvida

Na Figura 82 estão representadas as curvas $P-\delta$ com todos os valores de t_{SO} ensaiados com o adesivo AV138.

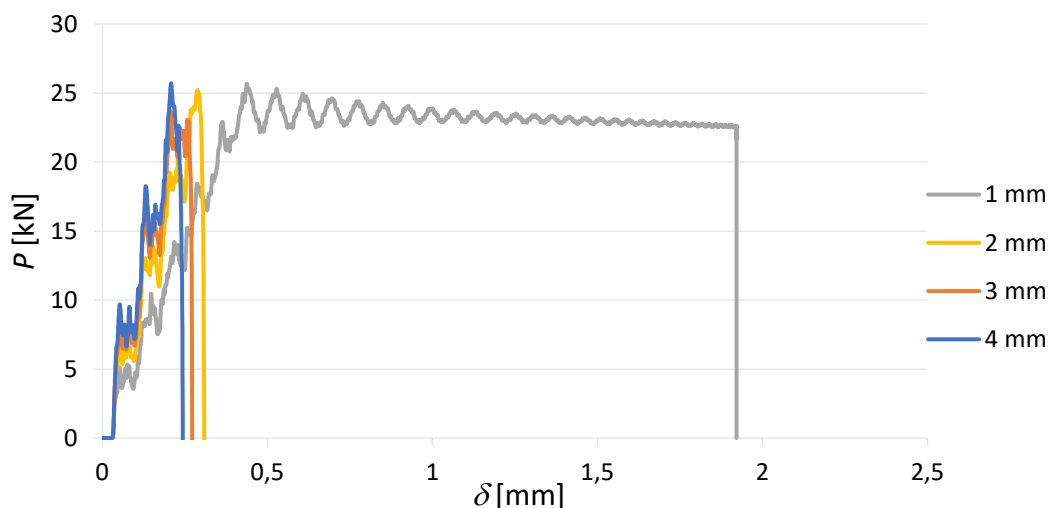


Figura 82 - Curvas $P-\delta$ com o adesivo AV138 em função de t_{SO}

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ registados para cada t_{SO} ensaiado com o adesivo AV138 são apresentados na Figura 83. Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são idênticos para todos os valores de t_{SO} , tendo o aderente com $t_{SO}=4$ mm atingido o maior valor de $P_{m\acute{a}x}$, devido à sua maior rigidez (Figura 82). Destaca-se uma pequena quebra de $P_{m\acute{a}x}$ para $t_{SO}=3$ mm em virtude do pico de concentrações de tensões σ_y que foi praticamente igual ao maior pico registado para $t_{SO}=4$ mm (Figura 77). Por outro lado, o deslocamento de rotura foi mais reduzido para as juntas com maior t_{SO} . A junta com t_{SO} de 1 mm teve um deslocamento claramente superior, dado que foi a única junta que atingiu o limite elástico do alumínio, tendo a rotura no adesivo acontecido depois de haver deformação plástica no aderente interior de alumínio (Figura 82).

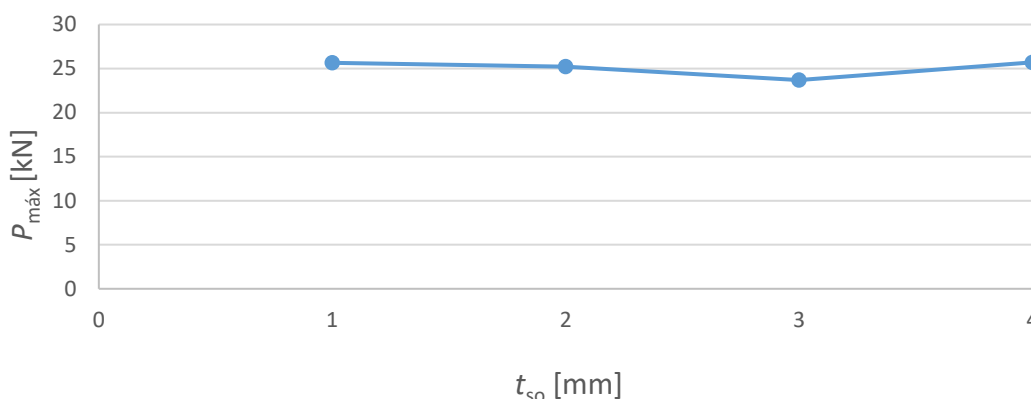


Figura 83 – $P_{máx}$ para cada valor de t_{so} com o adesivo AV138

A E_{abs} no impacto para cada um dos valores de t_{so} e a respetiva diferença percentual para o aderente com t_{so} de 2 mm é apresentada na Tabela 13. Como foi indicado anteriormente, as juntas com melhor desempenho foram as juntas com menor valor de t_{so} , que conseguiram absorver mais energia, conforme o prova claramente a variação percentual de E_{abs} da junta com $t_{so}=2$ mm para a junta com $t_{so}=1$ mm (+966,6%). A plastificação do aderente interior para $t_{so}=1$ mm justifica este enorme aumento da E_{abs} . Com o aumento de t_{so} deu-se uma diminuição da E_{abs} , já que, com um maior volume de material nos aderentes maior será a transferência da energia do impacto para a junta adesiva. A junta com $t_{so}=4$ mm foi claramente a junta que absorveu menos energia ao absorver aproximadamente -20,2% que a junta de referência ($t_{so}=2$ mm).

Tabela 13 - E_{abs} com o adesivo AV138 em função de t_{so}

t_{so} [mm]	E_{abs} [J]	Diferença
1	39,89	+966,6%
2	3,74	-
3	3,42	-8,5%
4	2,98	-20,2%

As curvas $P-\delta$ com o adesivo DP8005 são apresentadas na Figura 84. Como se pode constatar, o deslocamento máximo obtido registou-se na junta com $t_{so}=1$ mm, seguido da junta de $t_{so}=3$ mm, depois da de $t_{so}=2$ mm e finalmente da de $t_{so}=4$ mm. Assim sendo, o deslocamento será tanto maior quanto menor for o valor de t_{so} , como também sucedeu para o adesivo AV138. O aumento de t_{so} traduz-se num aumento da rigidez global da ligação, o que justifica o aumento de $P_{máx}$ atingido e os menores deslocamentos da camada adesiva (Figura 84 e Figura 85). A quebra de $P_{máx}$ que aconteceu no adesivo AV138 para $t_{so}=3$ mm (Figura 83) voltou a acontecer no adesivo DP8005, em função dos maiores picos de concentrações de tensões σ_y para esta junta (Figura 79).

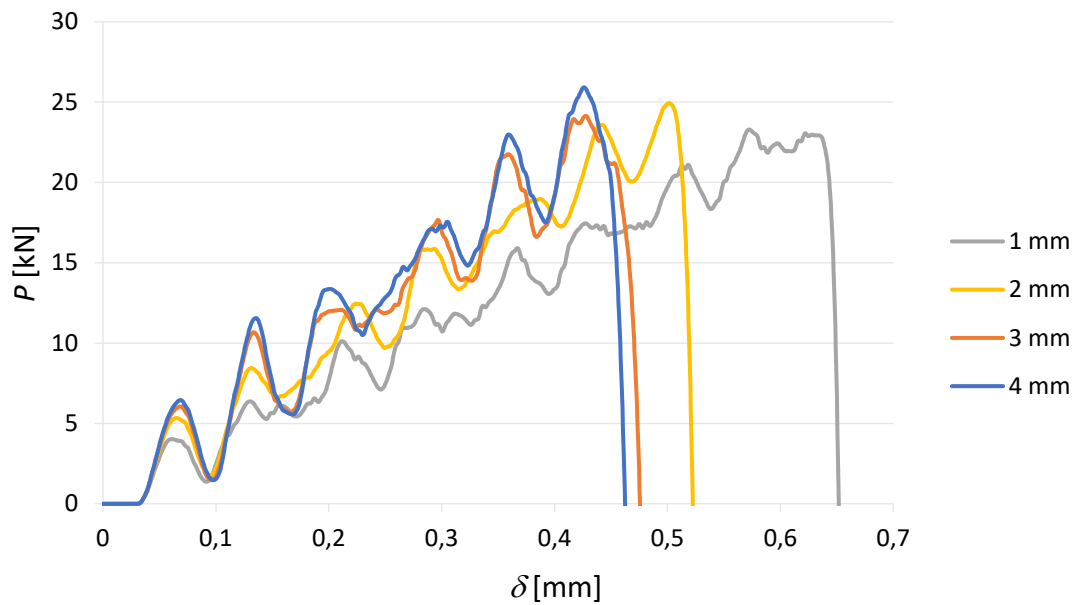


Figura 84 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de t_{so}

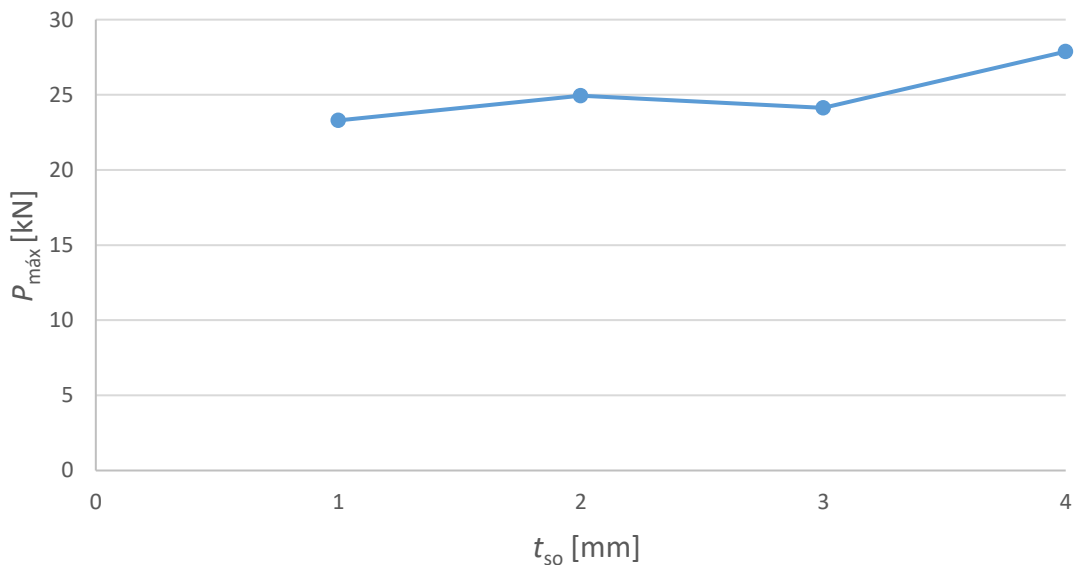


Figura 85 - $P_{máx}$ para cada valor de t_{so} com o adesivo DP8005

Da mesma forma que no adesivo AV138, também para o adesivo DP8005 as juntas com menor valor de t_{so} foram as que absorveram mais energia e, como consequência, as que tiveram melhor desempenho (Tabela 14). Apesar de a variação percentual de E_{abs} não ter sido tão elevada como no adesivo AV138, obteve-se um aumento de aproximadamente 24% de E_{abs} da junta com $t_{so}=1$ mm, em relação à junta de referência ($t_{so}=2$ mm). Para as juntas com 3 mm e 4 mm de t_{so} a diferença de E_{abs} não foi muito significativa (-12% e -19%, respetivamente), porque o aumento na carga suportada é

acompanhado por um decréscimo do deslocamento. Tal facto, traduz-se num decréscimo das áreas das curvas $P-\delta$ com o aumento de t_{so} .

Tabela 14 – E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de t_{so}

t_{so} [mm]	E_{abs} [J]	Diferença
1	7,87	+23,9%
2	6,35	-
3	5,61	-11,6%
4	5,13	-19,2%

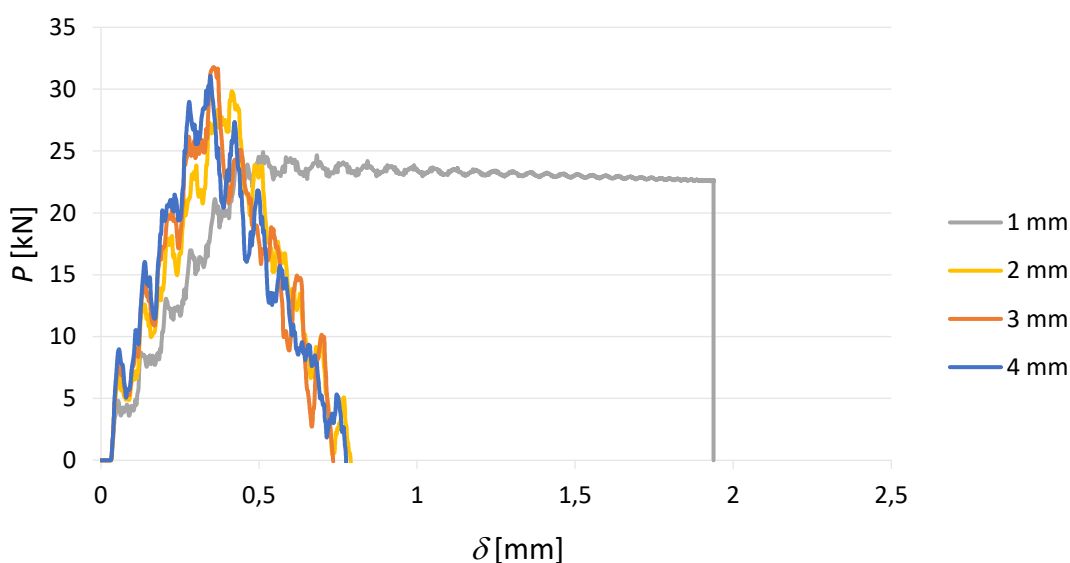


Figura 86 - Curvas $P-\delta$ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{so}

Na Figura 86 são apresentadas as curvas $P-\delta$ com o adesivo XNR6852 E-2. Novamente se regista um deslocamento de rotura máximo para o aderente com $t_{so}=1$ mm, visto que este foi o único em que os tubos de alumínio se deformaram plasticamente. Contudo, para $t_{so}=4$ mm, $t_{so}=3$ mm e $t_{so}=2$ mm, o deslocamento de rotura foi idêntico e cerca de 59% inferior ao deslocamento de rotura para a junta com $t_{so}=1$ mm. A $P_{máx}$ mais elevada foi registada para $t_{so}=3$ mm mas foi muito semelhante às de 4 mm e 2 mm. Naturalmente, a $P_{máx}$ atingida para a junta com $t_{so}=1$ mm foi a mais reduzida devido à menor rigidez global da ligação (Figura 87). Comparando com o adesivo AV138 e DP8005, o adesivo XNR6852 E-2 obteve, para todos os valores de t_{so} , maiores deslocamentos e $P_{máx}$ registados. Este fenómeno pode dever-se à maior tenacidade do adesivo XNR6852 E-2.

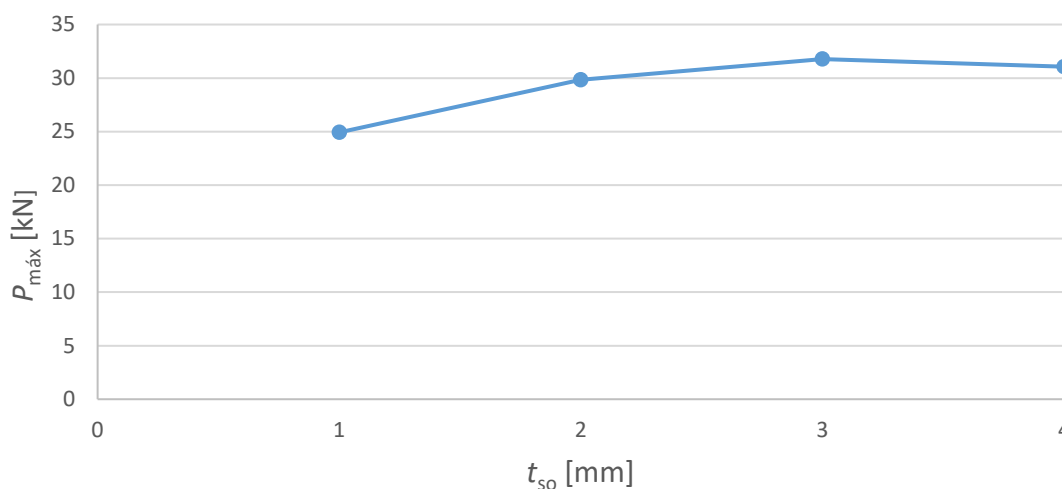


Figura 87 - $P_{máx}$ para cada valor de t_{so} com o adesivo XNR6852 E-2

Para o adesivo XNR6852 E-2 a E_{abs} foi muito semelhante para todas as juntas, à exceção da junta com $t_{so}=1$ mm que se superiorizou absorvendo aproximadamente mais 251% de E_{abs} que a junta de referência ($t_{so}=2$ mm), devido à maior área da curva $P-\delta$ para esta junta. Para valores de t_{so} superiores, a variação percentual de E_{abs} em relação à junta de referência foi praticamente nula com variações de -0,5% para $t_{so}=3$ mm e -0,1% para $t_{so}=4$ mm (Tabela 15). A elevada sobreposição das curvas $P-\delta$ e a consequente semelhança nos valores de $P_{máx}$ e deslocamento de rotura justificam a variação de E_{abs} ser praticamente nula para as juntas com $t_{so}=3$ mm e $t_{so}=4$ mm (Figura 86).

Tabela 15 – E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_{so}

t_{so} [mm]	E_{abs} [J]	Diferença
1	39,87	+250,6%
2	11,37	-
3	11,31	-0,5%
4	11,36	-0,1%

3.2.4.2.3 Comparação de resultados

Na Tabela 16 são apresentados os valores de $P_{máx}$ em função de t_{so} e a respetiva diferença percentual relativamente ao valor de $P_{máx}$ para $t_{so}=2$ mm.

Tabela 16 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os tr\^es adesivos em fun\c{c}\~ao de t_{so} e respetivo aumento percentual

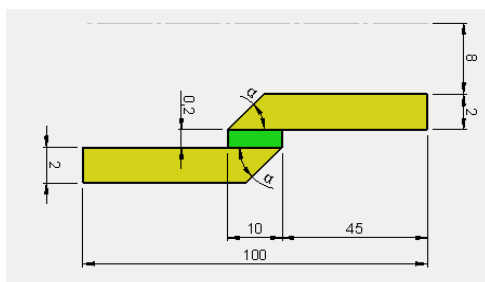
t_{so} [mm]	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
1	25,66	+1,74	23,29	-6,62	24,92	-16,52
2	25,22	-	24,94	-	29,85	-
3	23,69	-7,67	24,14	-3,21	31,77	+6,43
4	25,71	+1,94	27,87	+11,75	31,07	+4,08

Para $t_{so}=1$ mm, o adesivo AV138 foi o que conseguiu atingir o maior valor de $P_{m\acute{a}x}$. Quanto aos restantes valores de t_{so} , o adesivo AV138 teve menores valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$. Com o uso do adesivo DP8005, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ foram superiores para $t_{so}=3$ mm e $t_{so}=4$ mm, em compara\c{c}\~ao com o adesivo AV138. A sua ductilidade permitiu tamb\^em que o adesivo DP8005 registasse maiores $\Delta P_{m\acute{a}x}$, apesar de continuar a existir uma quebra de $P_{m\acute{a}x}$ para $t_{so}=3$ mm, devido ao aumento das concentra\c{c}\~oes de tens\~oes. O adesivo XNR6852 E-2 foi o que teve destacadamente os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$, \~a exce\c{c}\~ao do provete com $t_{so}=1$ mm. A elevada rigidez e menor fragilidade deste adesivo, fizeram com que este atingisse os valores mais elevados de $P_{m\acute{a}x}$. Para al\^em de $P_{m\acute{a}x}$, tamb\^em os valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$ foram os mais altos.

3.2.5 Estudo de altera\c{c}\~oes geom\^etricas

3.2.5.1 Chanfro exterior dos aderentes

A aplica\c{c}\~ao de um chanfro exterior nos aderentes \^e realizada de modo a corrigir o efeito negativo das singularidades, devido \~a geometria das extremidades da junta adesiva tubular. Atrav\^es da an\~alise num\^erica das juntas com esta geometria, ser\~a averiguado se existe alguma melhoria de resist\^encia, analisando as distribui\c{c}\~oes das tens\~oes τ_{xy} e σ_y que se instalam para os tr\^es adesivos. A geometria da junta ensaiada atrav\^es dos MDC no Abaqus[®] \^e apresentada na Figura 88.

Figura 88 - Geometria do modelo para o estudo de α

Serão analisados valores de α de $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ e 90° (sem chanfro exterior). Pode observar-se a malha utilizada para o modelo com $\alpha=15^\circ$ na Figura 89. Para todas as dimensões de α , a malha é semelhante, constituída apenas por elementos quadriláteros. Para a zona do adesivo (representado a verde) serão atribuídos elementos *sweep* do tipo COH2D4. Já para os aderentes (representados a amarelo) foram atribuídos elementos estruturados CPE4R (Figura 88). Conforme se verifica pela Figura 89, o refinamento da malha será maior nas proximidades da camada adesiva, de modo a conseguir resultados mais fidedignos.

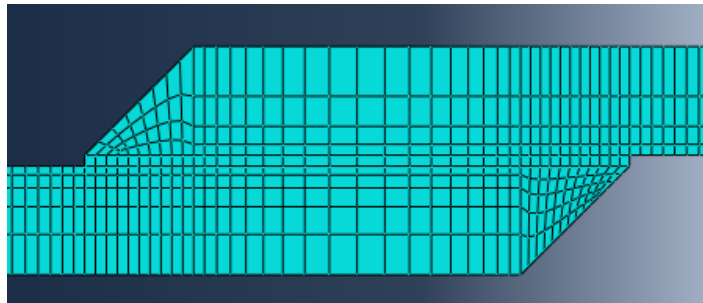


Figura 89 - Pormenor da malha na junta adesiva ($\alpha=15^\circ$)

3.2.5.1.1 Distribuições de tensões

A Figura 90 mostra a distribuição das tensões τ_{xy} em função de α com o adesivo AV138.

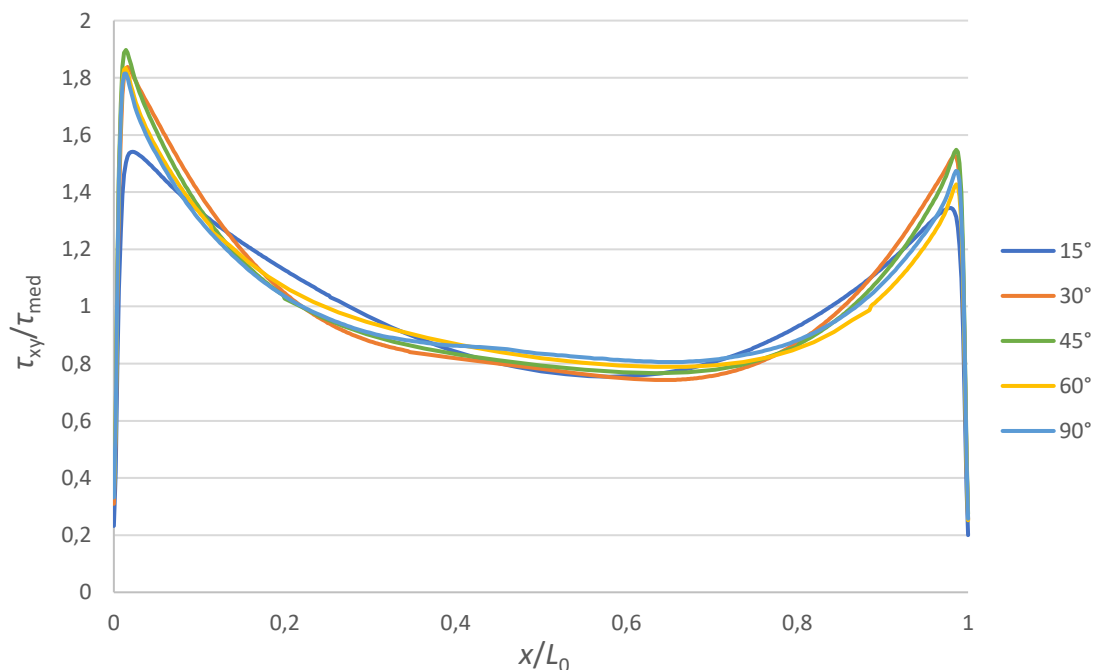


Figura 90 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de α

Destaca-se bastante a junta onde foi utilizado o menor valor de α , neste caso de 15° , com menor concentração de tensões τ_{xy} nos extremos do adesivo, dado que, a adição do chanfro exterior a 15° permitiu reduzir a rigidez nas extremidades da sobreposição, diminuindo não só as concentrações de tensões, como também as deformações nessa zona. De seguida, a segunda junta com menores tensões foi a de 90° (sem chanfro), com um pico máximo de τ_{xy}/τ_{med} 17,5% superior à junta com $\alpha=15^\circ$. As restantes juntas tiveram tensões de magnitude muito idêntica. A junta com pior desempenho foi a junta com 45° , que obteve o maior valor de τ_{xy}/τ_{med} em ambas as extremidades do adesivo, e que foi 4,6% superior à junta sem chanfro. Apesar de os valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} serem diferentes nas duas extremidades da camada adesiva, devido à diferente área dos tubos, o seu comportamento foi exatamente o mesmo.

Na Figura 91 são apresentadas as distribuições das tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de α . Da mesma forma que aconteceu nas tensões τ_{xy} , os picos de tensões são mais elevados nas extremidades das juntas, com a junta de $\alpha=45^\circ$ a ser uma das que teve pior desempenho, juntamente com a junta de 60° , ambas com uma distribuição ao longo do adesivo semelhante e bastante irregular, com um valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} 12,5% superior à junta sem chanfro ($\alpha=90^\circ$). A junta com melhor desempenho foi a junta com $\alpha=15^\circ$, que em comparação com a junta sem chanfro teve um valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} 31,5% inferior. Conforme indicado anteriormente, o acréscimo de α traduziu-se num aumento dos picos das tensões σ_y , uma vez que, a área transversal das juntas irá aumentar, permitindo uma melhor distribuição das tensões de compressão geradas pela deformação longitudinal, absorvendo assim tensões σ_y mais elevadas.

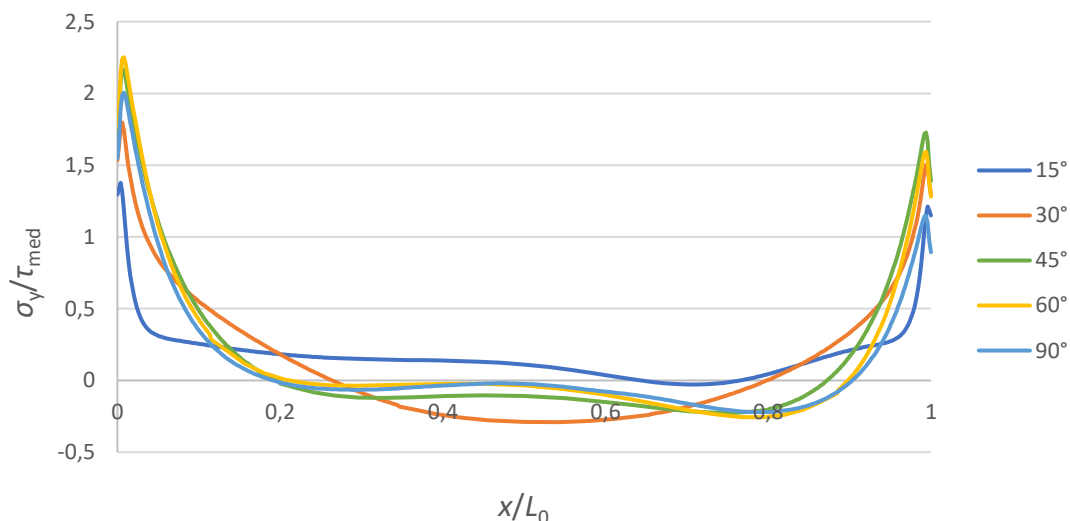


Figura 91 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de α

A distribuição das tensões τ_{xy} em função de α com o adesivo DP8005 são apresentadas na Figura 92. Como se pode constatar, todos os valores de α ensaiados resultam em diferenças muito pequenas nas tensões. Apenas para a junta com 15° de α a distribuição

da tensão ao longo do adesivo é ligeiramente diferente, com o pico de tensão 7,6% inferior ao pico para a junta sem chanfro ($\alpha=90^\circ$). Comparando com o adesivo AV138, o adesivo DP8005 tem uma distribuição mais uniforme das tensões τ_{xy} e com menores valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} , devido à sua menor rigidez e elevada ductilidade.

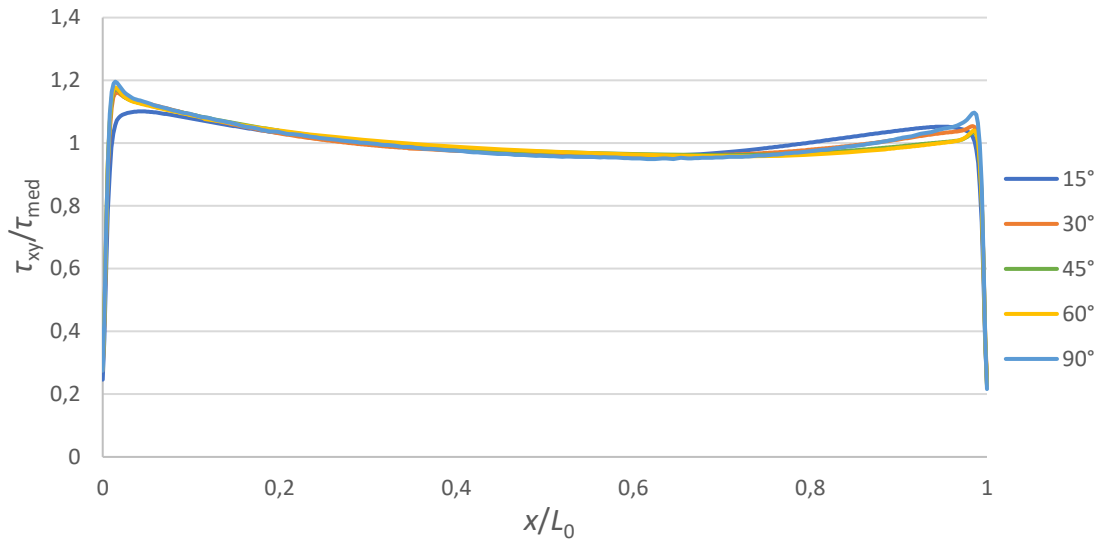


Figura 92 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de α

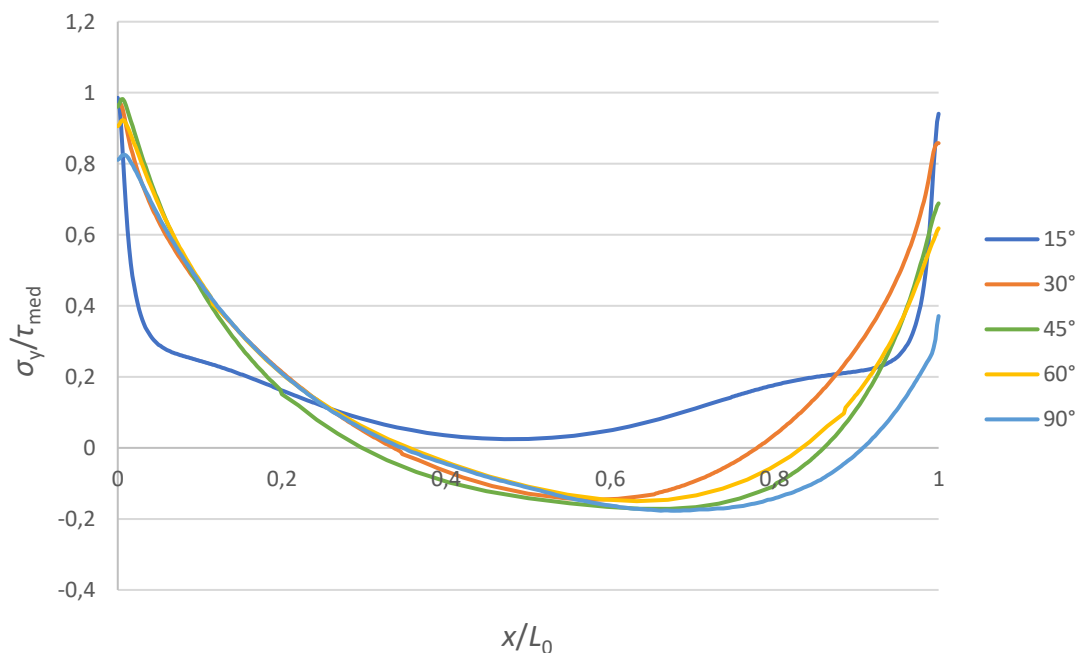


Figura 93 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de α

Na Figura 93 é apresentada, também para o adesivo DP8005, a distribuição das tensões σ_y . Os picos de tensão em $x/L_0=0$ foram semelhantes em todos os ensaios, destacando-se apenas a junta com 90° (sem chanfro) que obteve o melhor desempenho, dado que

o valor máximo de σ_y/τ_{med} é 18% inferior ao valor máximo de σ_y/τ_{med} para a junta com $\alpha=15^\circ$. A junta com chanfro a 15° é a única que teve apenas tensões de tração, ao contrário das restantes que tiveram predominantemente compressão. Tal como nas tensões τ_{xy} , também para as tensões σ_y os picos de tensão foram mais reduzidos e a sua distribuição ao longo da camada adesiva foi mais uniforme, em virtude da elevada ductilidade e menor rigidez comparativamente ao adesivo AV138.

Por fim, foi ensaiado um adesivo de rigidez intermédia em relação aos restantes, o adesivo XNR6852 E-2. Em comparação com os adesivos ensaiados anteriormente, as tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 registaram picos de tensão abaixo do adesivo AV138, que é mais rígido, mas acima dos valores de tensão para o adesivo DP8005, que é mais dúctil. O maior pico de tensão teve lugar para a junta sem chanfro ($\alpha=90^\circ$) em ambas as extremidades do adesivo. Em sentido contrário, a junta com $\alpha=15^\circ$ foi a que teve menores picos de tensão, cerca de 10,6% inferiores à junta sem chanfro, devido à diminuição da rigidez nas extremidades da sobreposição (Figura 94). A distribuição das tensões ao longo da camada adesiva foi menos uniforme do que a verificada para o adesivo DP8005, mas mais uniforme do que as distribuições com o adesivo AV138, dada a menor rigidez do adesivo XNR6852 E-2.

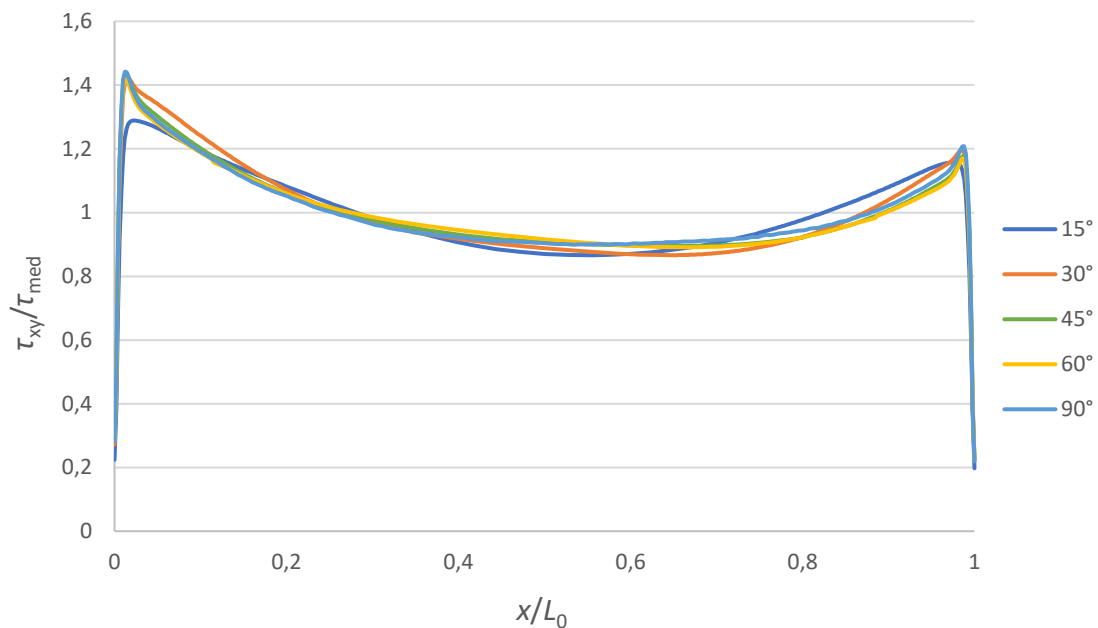


Figura 94 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

A distribuição das tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 é apresentada na Figura 95. A distribuição da tensão foi a mais irregular em comparação com os restantes adesivos ensaiados, por causa da elevada rigidez e reduzida flexibilidade do adesivo. As juntas de $\alpha=45^\circ$ e 60° foram as que tiveram pior desempenho, com picos de tensão muito semelhantes. Para $x/L_0=0$ foi a junta com $\alpha=15^\circ$ a ter o melhor desempenho, com um

valor de σ_y/τ_{med} máximo 21,1% inferior ao verificado para a junta com o maior pico de tensão ($\alpha=45^\circ$). A redução da rigidez do aderente com este ângulo de chanfro continua a ser a principal razão para este ter o melhor desempenho.

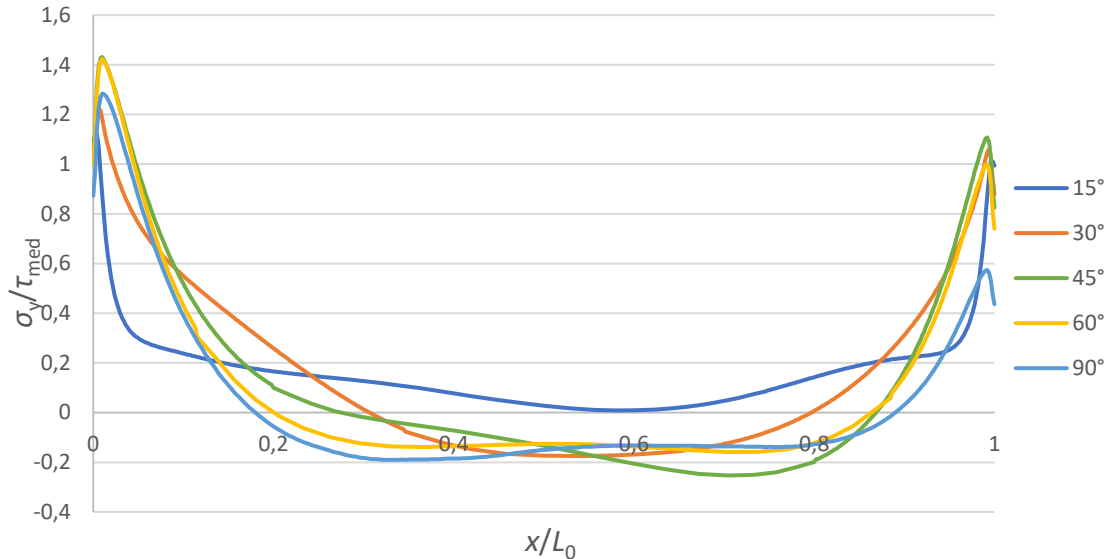


Figura 95 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

3.2.5.1.2 Resistência das juntas e energia absorvida

Na Figura 96 são apresentadas as curvas $P-\delta$ em função de α com o adesivo AV138.

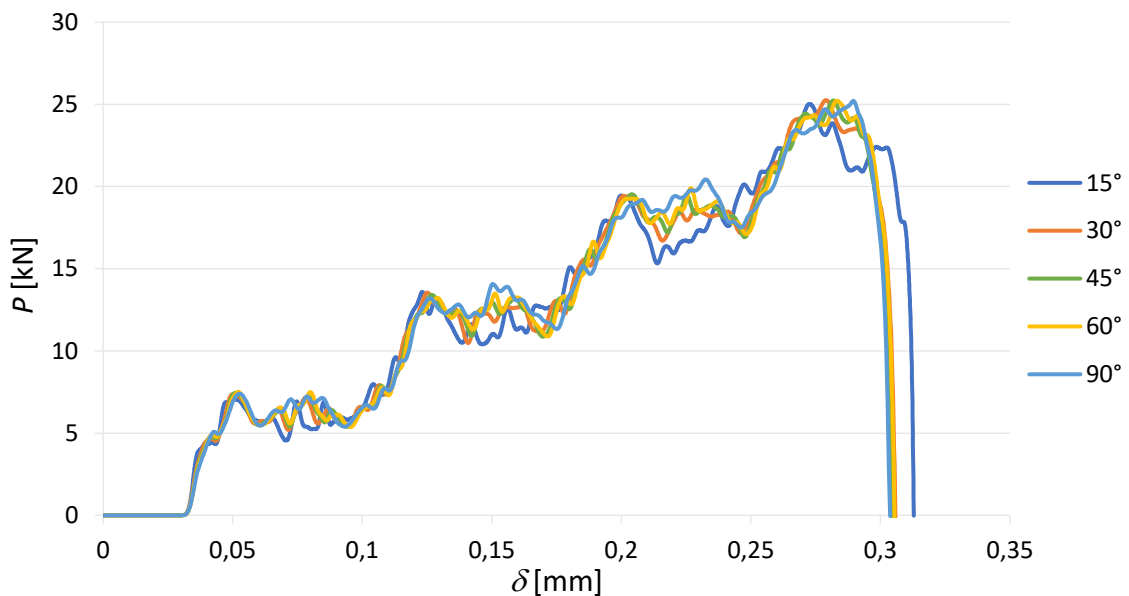


Figura 96 - Curvas $P-\delta$ com o adesivo AV138 em função de α

De uma forma geral a diminuição do valor de α levou a um maior deslocamento de ruptura, sem uma tendência definida, em especial para $\alpha=15^\circ$. Os menores picos de

tensões, tanto σ_y como de τ_{xy} , para a junta com $\alpha=15^\circ$ justificam o maior deslocamento de rotura para a junta em questão (Figura 90 e Figura 91). Apesar disto, o deslocamento de rotura e $P_{m\acute{a}x}$ registados foram muito semelhantes para todos os valores de α (Figura 97).

Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ registados foram praticamente iguais para todos os valores de α , sendo que o aumento percentual máximo de $P_{m\acute{a}x}$ relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $\alpha=90^\circ$ foi de apenas 0,1%, observado para $\alpha=30^\circ$ (Figura 97). As semelhanças nos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos podem dever-se  elevada rigidez do adesivo, associada aos picos das tensões τ_{xy} muito idênticas com qualquer valor de α aplicado nos aderentes.

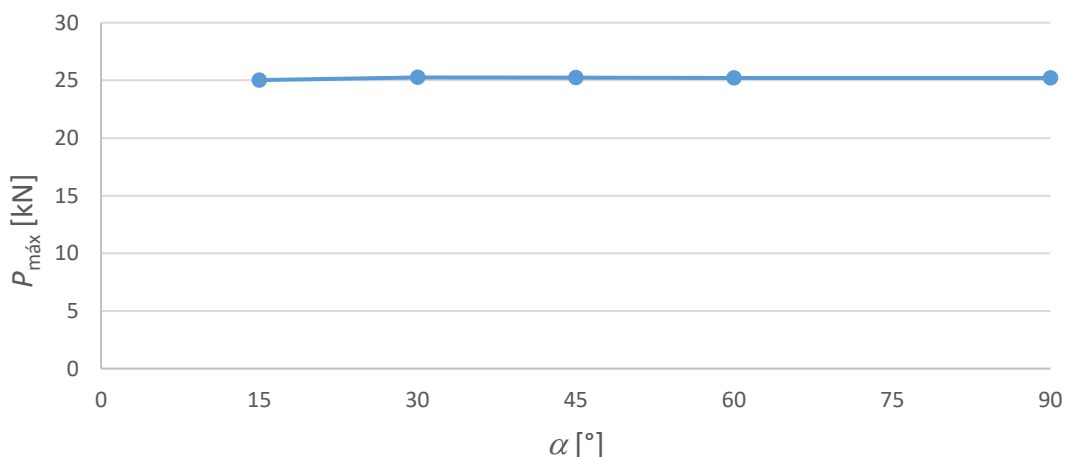


Figura 97 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de α com o adesivo AV138

Como as curvas P - δ foram praticamente sobrepostas, a E_{abs} foi bastante semelhante com variações percentuais inferiores a 1% entre $\alpha=90^\circ$ e $\alpha=30^\circ$. A junta com um $\alpha=15^\circ$ conseguiu absorver mais energia no impacto, aproximadamente +3% em comparação com a junta sem chanfro exterior, derivado de esta, apesar de ter obtido um $P_{m\acute{a}x}$ ligeiramente inferior às restantes juntas ensaiadas, ter um deslocamento de rotura um pouco superior, o que aumentou a área da curva P - δ . (Tabela 17).

Tabela 17 - E_{abs} com o adesivo AV138 em função de α

α [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	3,84	+2,6%
30	3,73	-0,1%
45	3,70	-0,8%
60	3,75	0,1%
90	3,74	-

No caso concreto do adesivo AV138, a adição de um chanfro exterior apenas melhora o desempenho para valores abaixo de $\alpha=30^\circ$. Contudo, dada a dificuldade e custo na execução de chanfros exteriores nos aderentes, a aplicação desta alteração geométrica é irrelevante com este adesivo.

Na Figura 98 são apresentadas as curvas $P-\delta$ com o adesivo DP8005 em função de α . Em comparação com o que aconteceu no adesivo AV138, o adesivo dúctil DP8005 regista valores de $P_{\text{máx}}$ semelhantes e maiores deslocamentos de rotura para qualquer valor de α , dada a maior ductilidade deste adesivo. A análise das tensões σ_y máximas ajuda a perceber o motivo de nenhum valor de α melhorar o desempenho em relação à junta sem chanfro. A junta com $\alpha=90^\circ$ teve destacadamente menores picos de $\sigma_y/\tau_{\text{med}}$, com estes picos a terem um crescimento à medida que se reduziu α .

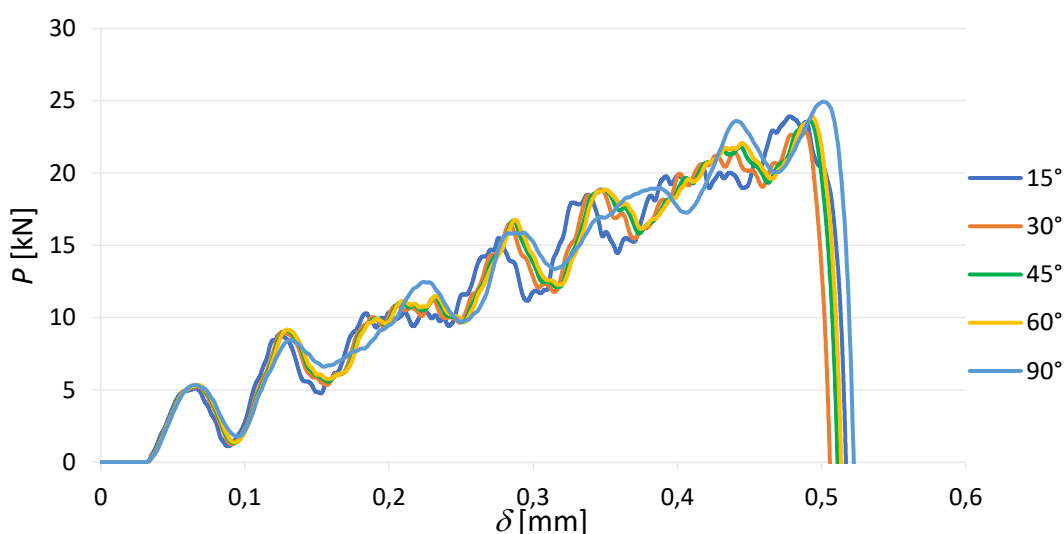


Figura 98 - Curvas $P-\delta$ com o adesivo DP8005 em função de α

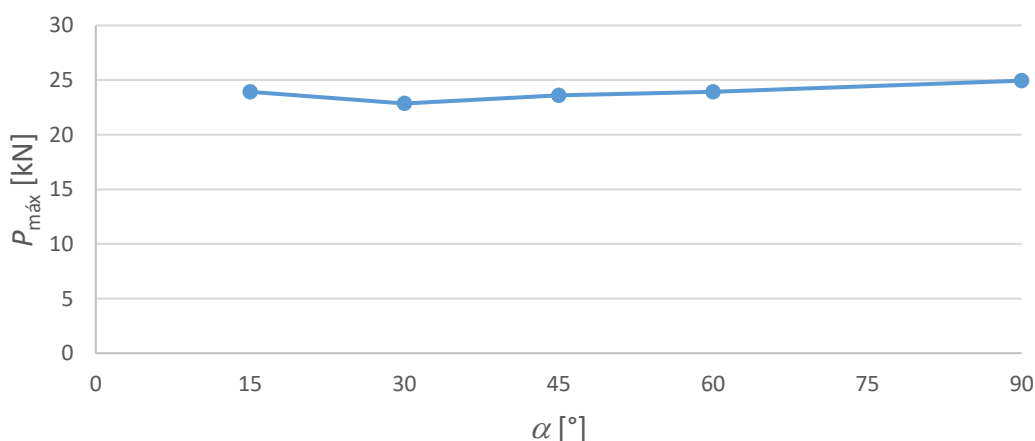


Figura 99 - $P_{\text{máx}}$ para cada valor de α com o adesivo DP8005

No sentido de se perceber melhor os dados referentes a $P_{m\acute{a}x}$, na Figura 99 é apresentada a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α . Conforme foi perceptível na Figura 98, a junta com $\alpha=90^\circ$ foi a que registou maior $P_{m\acute{a}x}$, com um crescimento de 4,1% em relação à segunda junta com maior $P_{m\acute{a}x}$ ($\alpha=60^\circ$). Também se evidencia uma tendência decrescente de $P_{m\acute{a}x}$ com a diminuição do valor de α até $\alpha=30^\circ$. Este decréscimo assenta na tendência de aumento dos valores máximos de σ_y/τ_{med} com o aumento de α . Para $\alpha=15^\circ$ registou-se uma quebra nesta tendência, com $P_{m\acute{a}x}$ a aumentar aproximadamente 4,7% em relação ao valor registado para $\alpha=30^\circ$. A quebra indicada pode-se ter dado devido ao facto de, para $\alpha=15^\circ$, se ter instalado o menor valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} (Figura 92).

A E_{abs} para o adesivo DP8005 foi sempre inferior com a adição de um chanfro exterior ($\alpha < 90^\circ$). Os menores valores de $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamentos de rotura em relação à junta sem chanfro exterior, assim como a menor área das curvas $P-\delta$, traduzem-se numa menor E_{abs} . A diferença percentual de E_{abs} para as juntas com $\alpha < 90^\circ$ não variou muito, tendo sido a junta com $\alpha=15^\circ$ a ter a menor diferença de E_{abs} (-4,3%) comparativamente à junta sem chanfro exterior de aderente. Com os resultados obtidos para a E_{abs} é possível concluir que a adição de um chanfro exterior não apresenta qualquer vantagem, visto que existiu um equilíbrio entre a resistência mecânica e a ductilidade do adesivo.

Tabela 18 - E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de α

α [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	6,07	-4,3%
30	5,84	-8,1%
45	5,98	-5,8%
60	6,05	-4,7%
90	6,35	-

As curvas $P-\delta$ em função de α com o adesivo XNR6852 E-2 são apresentadas na Figura 100. Assim como acontece no adesivo DP8005, existe uma sobreposição quase total das curvas $P-\delta$ com diferenças praticamente nulas no deslocamento de rotura. Estas diferenças foram ainda menores do que as observadas para o adesivo AV138 dada a menor fragilidade do adesivo XNR6852 E-2. Para os valores de $P_{m\acute{a}x}$, existe uma tendência decrescente com o aumento do valor de α , em virtude da incapacidade de os tubos se deformarem plasticamente, devido ao aumento da secção dos tubos nas extremidades da junta (Figura 101). A carga máxima regista-se para $\alpha=15^\circ$, com um $P_{m\acute{a}x}$ 3,8% superior ao $P_{m\acute{a}x}$ da junta com $\alpha=90^\circ$. A distribuição das tensões τ_{xy} influencia a evolução de $P_{m\acute{a}x}$, na medida em que, os valores máximos de τ_{xy} crescem com o aumento de α (Figura 94), diminuindo assim o valor de $P_{m\acute{a}x}$ atingido.

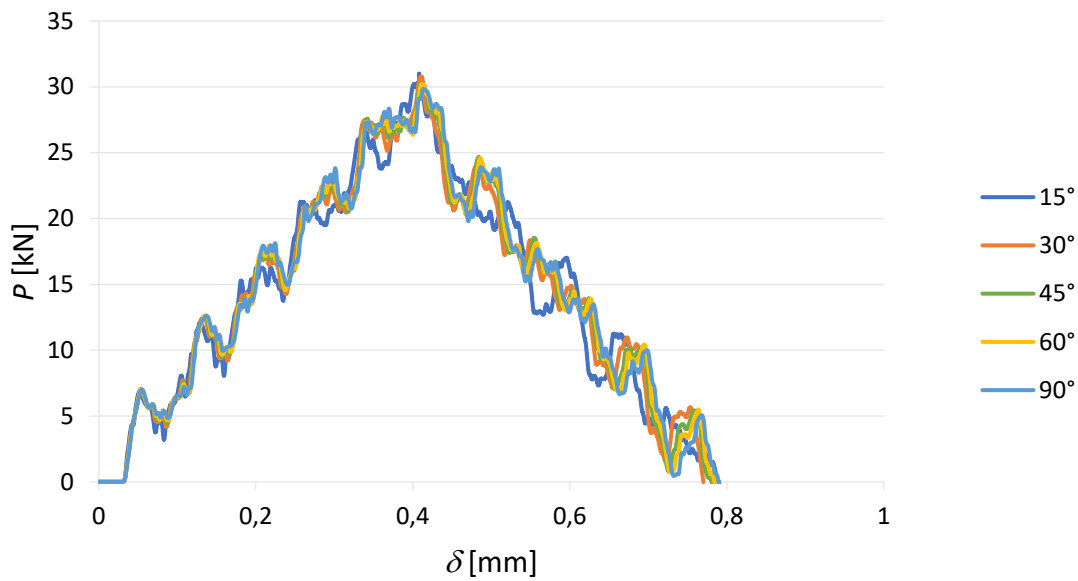


Figura 100 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

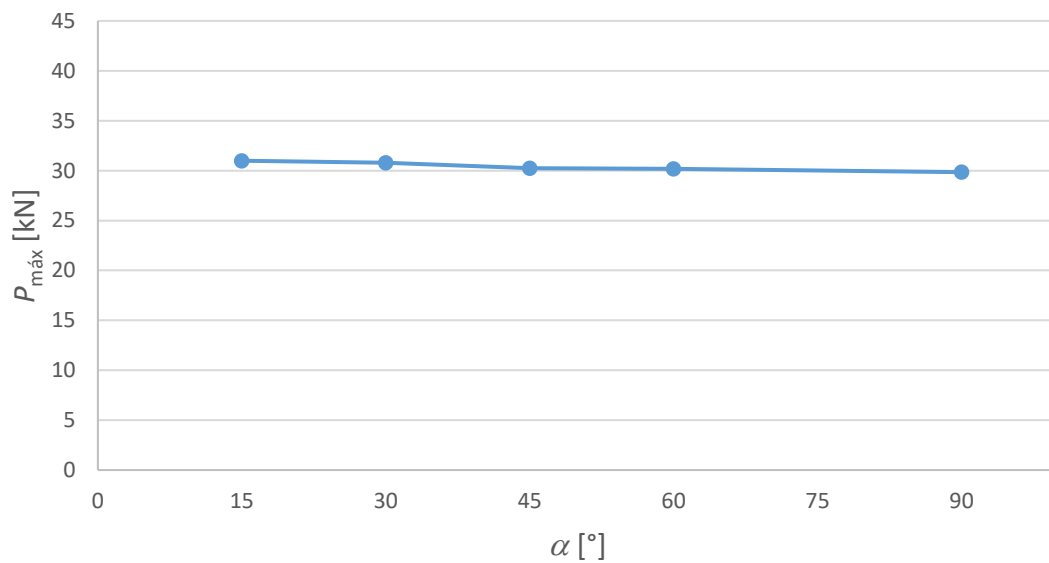


Figura 101 - $P_{\text{máx}}$ para cada valor de α com o adesivo XNR6852 E-2

Na Tabela 19 é apresentada a E_{abs} para cada valor de α e a respectiva diferença percentual para a junta de referência ($\alpha=90^\circ$), com o adesivo XNR6852 E-2. Tal como aconteceu nos adesivos AV138 e DP8005, a elevada sobreposição das curvas P - δ fez com que a E_{abs} seja idêntica para todas as juntas ensaiadas. Destacam-se as juntas com $\alpha=45^\circ$ e $\alpha=15^\circ$, que foram as únicas com melhor desempenho do que a junta sem chanfro, com um aumento de cerca de 10% da E_{abs} . Para ambos os casos, o valor de $P_{\text{máx}}$ atingido e a maior área das curvas P - δ foram os principais fatores a influenciar este aumento de E_{abs} .

Tabela 19 - E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

α [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	12,54	+10,29%
30	11,22	-1,32%
45	12,45	+9,49%
60	11,32	-0,43%
90	11,37	-

3.2.5.1.3 Comparação de resultados

São apresentados na Tabela 20 os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função do valor de α para cada adesivo e a variação percentual para o valor de $P_{m\acute{a}x}$ da junta sem chanfro exterior ($\alpha=90^\circ$).

Tabela 20 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de α e respetivo aumento percentual

α [°]	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{m\acute{a}x}$	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
15	25,02	-0,79	23,92	-4,08	30,99	+3,82
30	25,25	+0,12	22,85	-8,38	30,78	+3,12
45	25,23	+0,04	23,61	-5,33	30,24	+1,31
60	25,21	-0,04	23,91	-4,13	30,18	+1,11
90	25,22	-	24,94	-	29,85	-

Com o adesivo AV138, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ foram praticamente constantes, não se conseguindo identificar qualquer tendência. Dada esta estabilização de $P_{m\acute{a}x}$ os valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$ foram praticamente nulos.

Para o adesivo DP8005 evidencia-se a maior tendência de decréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ com a redução de α e ainda valores bastante menores de resistência para qualquer valor de α , dada a menor rigidez deste adesivo. Quanto aos valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$, o adesivo DP8005 conseguiu superiorizar-se aos restantes adesivos de forma destacada.

Ao contrário dos restantes adesivos, o adesivo XNR6852 E-2 foi o único que beneficiou da introdução de um chanfro exterior, visto que se verifica uma tendência de crescimento de $P_{m\acute{a}x}$ com a diminuição de α . Para além disso, foi com este adesivo que foram atingidos os maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$, para qualquer valor de α aplicado à junta.

Dado os elevados $P_{\text{máx}}$ atingidos e o seu crescimento reduzido, os valores de $\Delta P_{\text{máx}}$ foram reduzidos.

3.2.5.2 Chanfro interior dos aderentes

Através da aplicação de um chanfro interior nos aderentes, é esperada uma diminuição da concentração dos picos de tensão nas extremidades da camada adesiva, com uma maior quantidade de adesivo nas extremidades de L_0 . Através da análise numérica das juntas com esta geometria, será averiguado se existe alguma melhoria de resistência, analisando as distribuições das tensões τ_{xy} e σ_y que se instalam para os três adesivos. A geometria da junta ensaiada através dos MDC no Abaqus® é apresentada na Figura 88. Serão analisados valores de θ de 15°, 30°, 45°, 60° e 90° (sem chanfro interior).

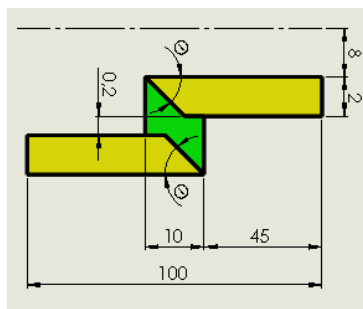


Figura 102 - Geometria do modelo para o estudo de θ

Na Figura 89, pode observar-se a malha utilizada para o modelo com $\theta=15^\circ$. Para todas as dimensões de θ , a malha é semelhante, constituída apenas por elementos quadriláteros. Para a zona do adesivo (representado a verde) serão atribuídos elementos *sweep* do tipo COH2D4. Já para os aderentes (representados a amarelo) foram atribuídos elementos estruturados CPE4R (Figura 102). Conforme se verifica pela Figura 103, o refinamento da malha será maior nas proximidades da camada adesiva, de modo a conseguir resultados mais fidedignos.

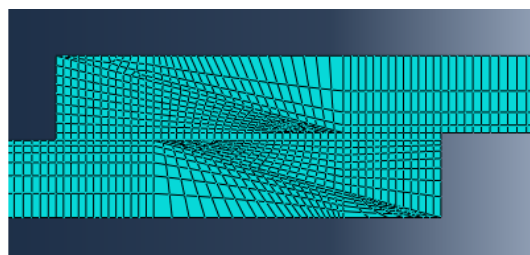


Figura 103 - Pormenor da malha na junta adesiva ($\theta=15^\circ$)

3.2.5.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 104 é apresentada a distribuição das tensões de corte em função de θ para o adesivo AV138. Ao contrário das alterações geométricas ensaiadas anteriormente, com

a adição de um chanfro interior verificam-se 2 picos de tensão τ_{xy} . O primeiro surge nas extremidades da camada adesiva para $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. O segundo dá-se na zona onde se inicia a variação geométrica que origina o chanfro interior e foi superior ao primeiro pico para todos os valores de θ . O excesso de adesivo que se forma nas extremidades, em $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, reduz a magnitude das tensões τ_{xy} devido à diferença de rigidez entre os aderentes e o adesivo. A junta com $\theta=45^\circ$ teve o menor valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} com uma redução de 46,8% em relação ao valor homólogo para a junta sem adição de chanfro interior ($\theta=90^\circ$).

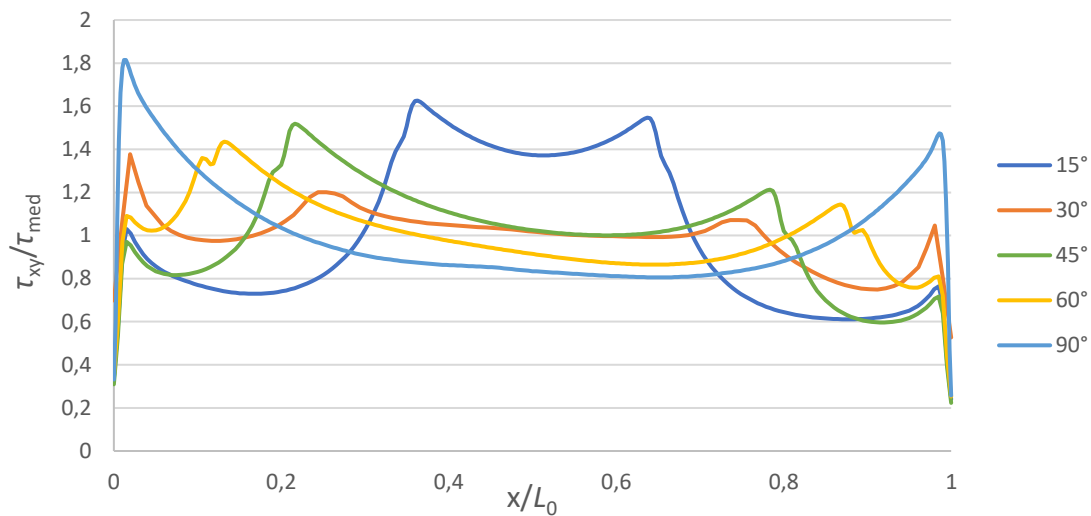


Figura 104 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de θ

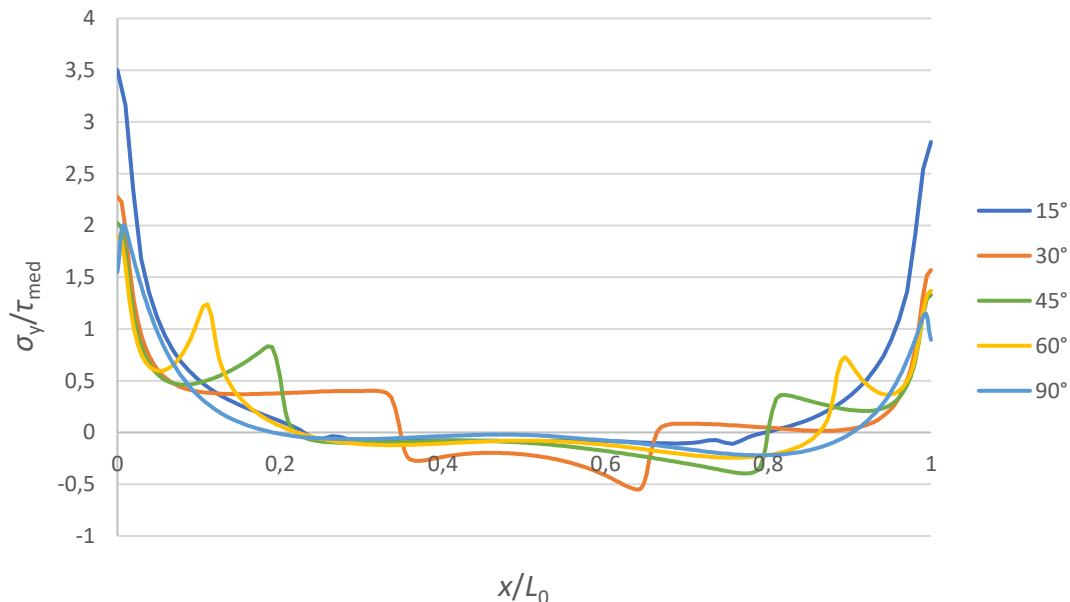


Figura 105 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de θ

Para as tensões σ_y voltam a existir dois picos de tensão nas mesmas zonas em que surgem os picos de tensão τ_{xy} (Figura 104). Desta vez, o pico que se localiza na extremidade da junta adesiva foi o que teve o maior valor máximo de σ_y/τ_{med} para todas as juntas ensaiadas, decorrente da secção transversal mais reduzida do aderente. O segundo pico localiza-se no ponto de x/L_0 em que se inicia a inclinação θ do chanfro interior do aderente. No geral, o aumento de θ traduz-se num aumento das concentrações das tensões σ_y na zona onde se inicia o chanfro. Este aumento de θ resulta num decréscimo da quantidade de adesivo na extremidade da junta, fazendo com que esta fique mais suscetível às tensões criadas pela deformação longitudinal dos aderentes. Contudo, nas extremidades da camada adesiva, o valor máximo de σ_y/τ_{med} deu-se para a junta com $\theta=15^\circ$, que teve um aumento de 57,1% em relação à junta com menor pico de tensão (Figura 105).

A distribuição das tensões τ_{xy} em função de θ para o adesivo DP8005 é apresentada na Figura 106. Desde logo se percebe uma grande diferença na distribuição das tensões de corte em comparação com o adesivo mais rígido (AV138), apesar de as localizações dos valores máximos de tensão continuarem na mesma posição.

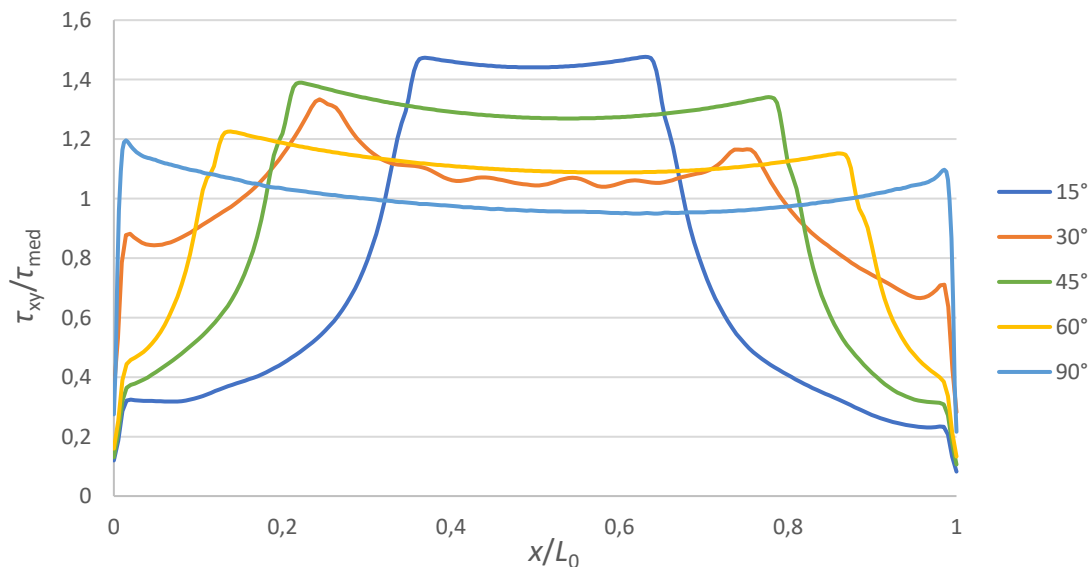


Figura 106 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de θ

A diminuição do valor de θ resultou em maiores patamares de tensão que se concentraram na zona central do adesivo. Como se trata do adesivo com a menor rigidez e com o aumento da sua espessura nos extremos da camada adesiva, a transmissão de esforços é cada vez pior à medida que se reduz o valor de θ . Desta forma, a introdução de um chanfro de adesivo para o adesivo DP8005 revelou-se particularmente ineficaz.

A magnitude das tensões σ_y foi muito semelhante para todos os valores de θ ensaiados (Figura 107), sendo que voltam a existir dois picos de tensões σ_y . Ao contrário do adesivo AV138, os valores máximos de σ_y/τ_{med} são muito próximos para todos os valores de θ .

A junta com $\theta=15^\circ$ teve destacadamente o pior desempenho, com um valor máximo de σ_y/τ_{med} 73,5% superior à junta com melhor desempenho ($\theta=90^\circ$). Em concordância com o que se verifica para as tensões τ_{xy} , as tensões σ_y aumentaram com a introdução de um chanfro interior no aderente, devido à menor quantidade de adesivo nos extremos da camada adesiva com o aumento de θ .

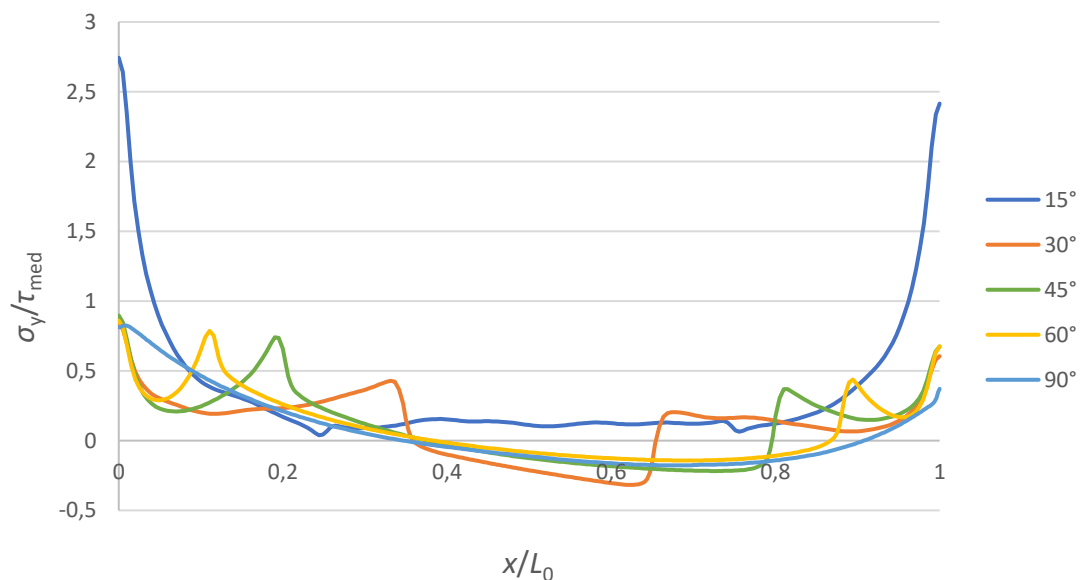


Figura 107 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de θ

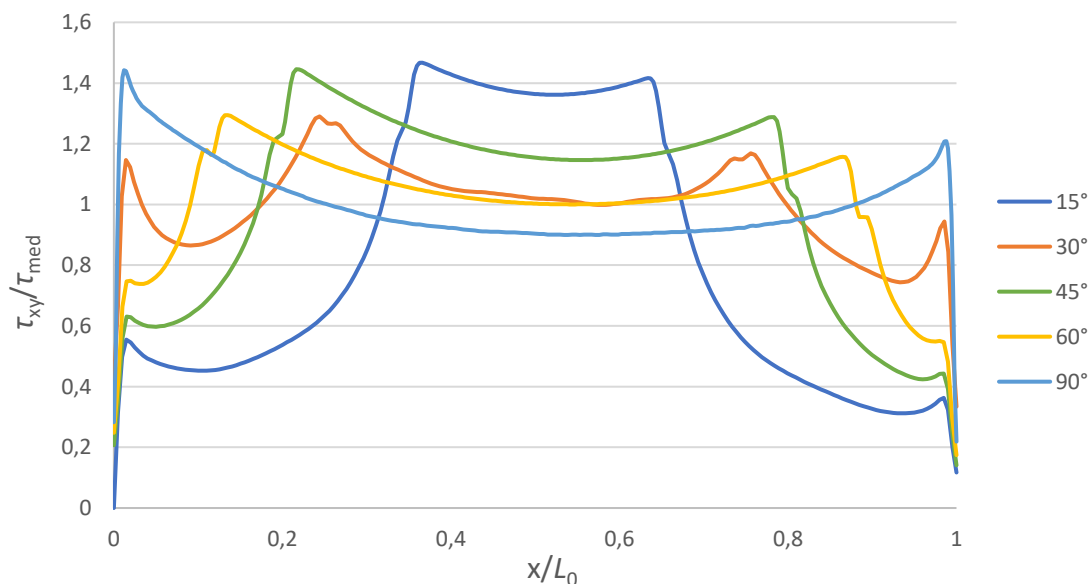


Figura 108 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

Finalmente, é apresentada na Figura 108 a distribuição das tensões τ_{xy} em função de θ com o adesivo tenaz XNR6852 E-2. Neste adesivo os picos de tensão τ_{xy} foram próximos em termos de magnitude e com as mesmas localizações dos adesivos

anteriores, tendo a junta com melhor desempenho ($\theta=15^\circ$) um valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} 57,1% inferior à junta sem adição de chanfro interior. A distribuição das tensões τ_{xy} ao longo da camada adesiva foi menos uniforme do que a verificada para o adesivo DP8005, mas ligeiramente melhor que o adesivo AV138, mais rígido.

Na Figura 109 são apresentadas as distribuições das tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2, em função de θ . O ensaio realizado para $\theta=15^\circ$ foi o que mais se destacou, tendo um valor máximo de σ_y/τ_{med} 71,2% superior à junta com $\theta=90^\circ$. Assim como no outro adesivo rígido ensaiado (AV138), a junta de $\theta=60^\circ$ foi a que teve o segundo valor mais elevado da tensão σ_y . Entre $\theta=15^\circ$ e $\theta=60^\circ$ verifica-se uma tendência crescente dos picos de σ_y com o aumento do valor de θ , tendo-se dado este fenómeno pelo mesmo motivo documentado para o adesivo AV138.

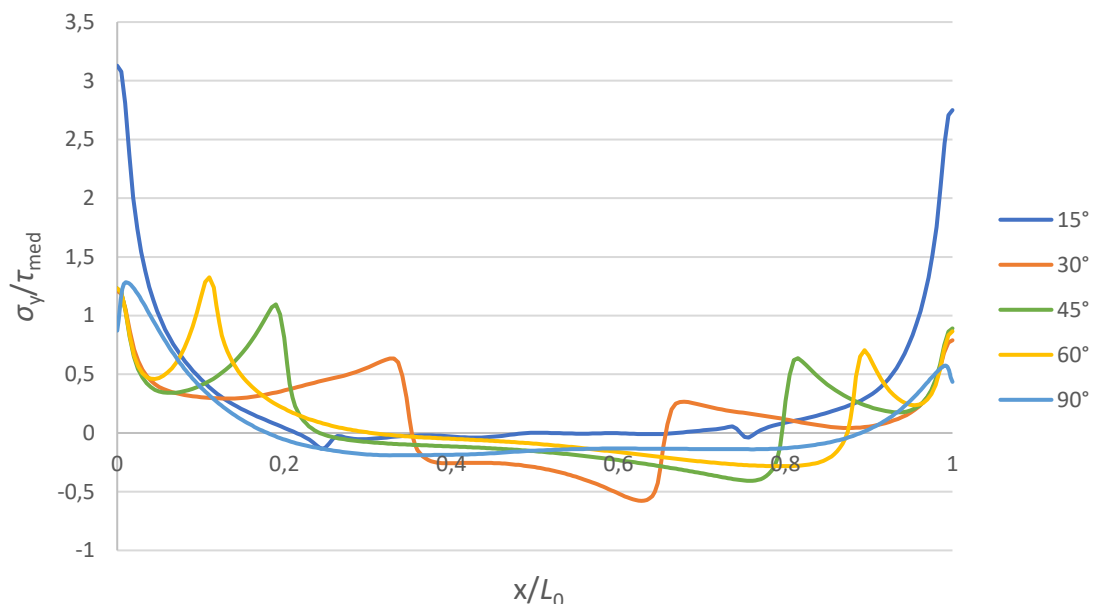


Figura 109 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

3.2.5.2.2 Resistência das juntas e energia absorvida

Na Figura 110 são apresentadas as curvas $P-\delta$ para todos os valores de θ ensaiados com o adesivo AV138. Consegue-se verificar uma sobreposição de praticamente todas as curvas, que atingem um deslocamento de rotura idêntico para todos os valores de θ . A única curva que se destaca foi a curva de 15° , que atingiu um $P_{máx}$ um pouco inferior às restantes.

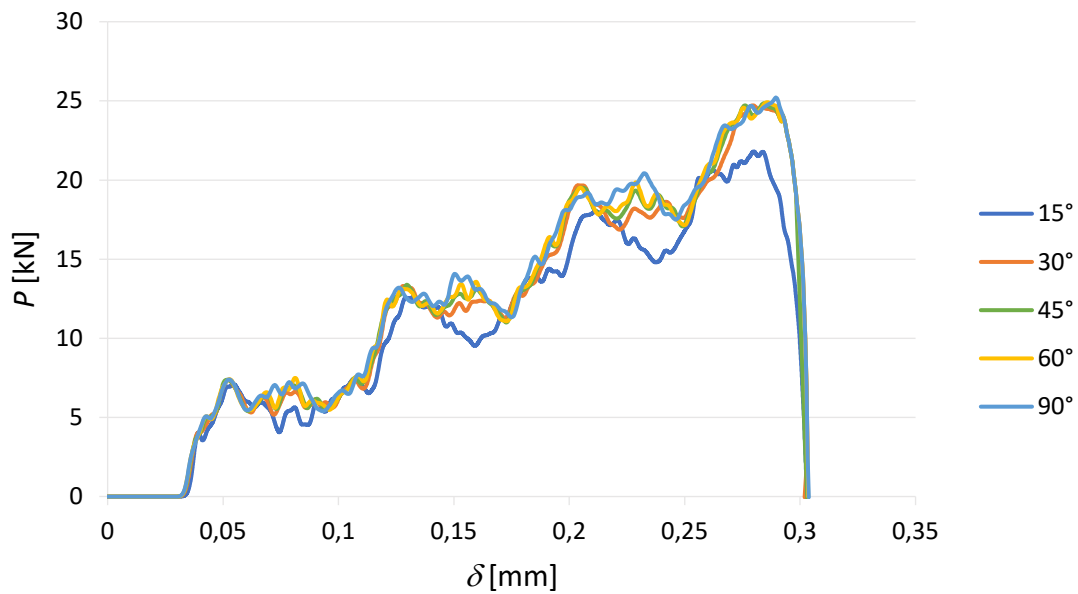


Figura 110 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de θ

Em resultado da elevada sobreposição das curvas P - δ , os valores de $P_{\text{máx}}$ atingidos são próximos para todos os valores de θ , à exceção da junta de 15° que obteve a menor $P_{\text{máx}}$, que foi 13,5% inferior à junta com o maior valor de $P_{\text{máx}}$, registado para $\theta=90^\circ$ (Figura 111). Apesar disso, analisando as tensões τ_{xy} obtidas, com a diminuição de θ verifica-se um afastamento dos picos de concentração de tensões dos extremos da camada adesiva com um ligeiro aumento da sua magnitude, justificando assim que as cargas máximas não aumentem com a redução de θ (Figura 105). Os resultados obtidos para o descolamento justificam-se de igual forma que os resultados para $P_{\text{máx}}$.

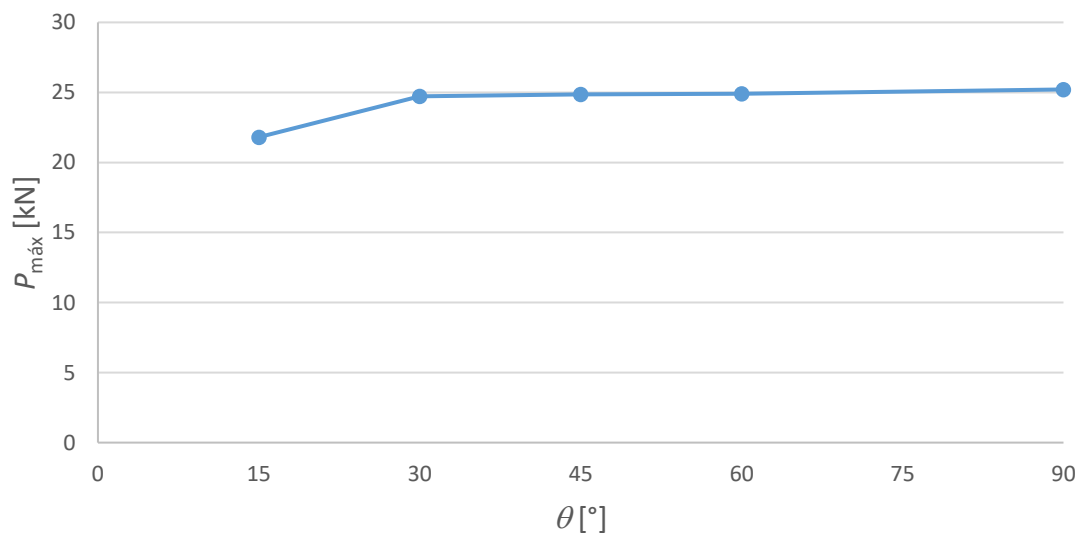
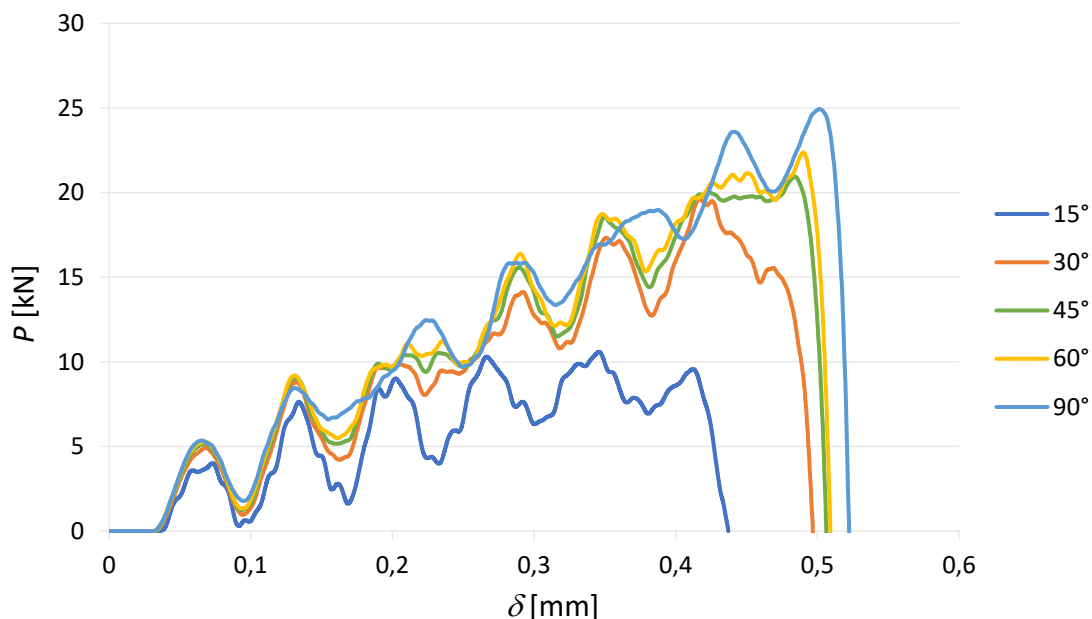


Figura 111 – $P_{\text{máx}}$ para cada valor de θ com o adesivo AV138

Na Tabela 21 é apresentada a E_{abs} para todos os valores de θ ensaiados com o adesivo AV138 e a respetiva diferença percentual para a junta sem chanfro interior de aderente. Apesar de visualmente parecer que as curvas P - δ são totalmente sobrepostas (Figura 110), através do cálculo da E_{abs} evidenciam-se algumas diferenças. Em resultado da maior carga e deslocamentos de rotura atingidos pela junta sem chanfro ($\theta=90^\circ$), todos os valores de θ ensaiados absorveram menos energia, com destaque para a junta de $\theta=15^\circ$ que absorveu bastante menos energia em comparação com as restantes juntas. Para a junta com $\theta=15^\circ$ esta diferença de E_{abs} deveu-se, principalmente, devido à quebra de $P_{m\acute{a}x}$.

Tabela 21 – E_{abs} com o adesivo AV138 em função de θ

θ [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	3,28	-12,3%
30	3,61	-3,5%
45	3,70	-1,1%
60	3,45	-7,7%
90	3,74	-

Figura 112 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de θ

As curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de θ são apresentadas na Figura 112. A redução do valor de θ levou a uma redução de $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamentos de rotura. Esta tendência dá-se, sobretudo, devido à tendência de crescimento das tensões σ_y com a diminuição de θ (Figura 107). O maior crescimento do deslocamento atingido na rotura

deu-se de $\theta=15^\circ$ para $\theta=30^\circ$, aumentando 11,4%. A partir de $\theta=30^\circ$ o deslocamento de rotura foi idêntico para todas as configurações de junta.

A evolução de $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de θ é apresentada graficamente na Figura 113. O aumento do valor de θ leva a um aumento de $P_{m\acute{a}x}$ registado. Assim como para o deslocamento de rotura, o maior aumento de $P_{m\acute{a}x}$ verificou-se de $\theta=15^\circ$ para $\theta=30^\circ$ com cerca de 85,7% de aumento, quase o dobro de $P_{m\acute{a}x}$. A partir daí o crescimento continua a existir, mas de uma forma mais gradual. A diminuição dos picos das tensões σ_y e τ_{xy} com o aumento de θ justificam o crescimento de $P_{m\acute{a}x}$ à medida em que o valor de θ aplicado é superior.

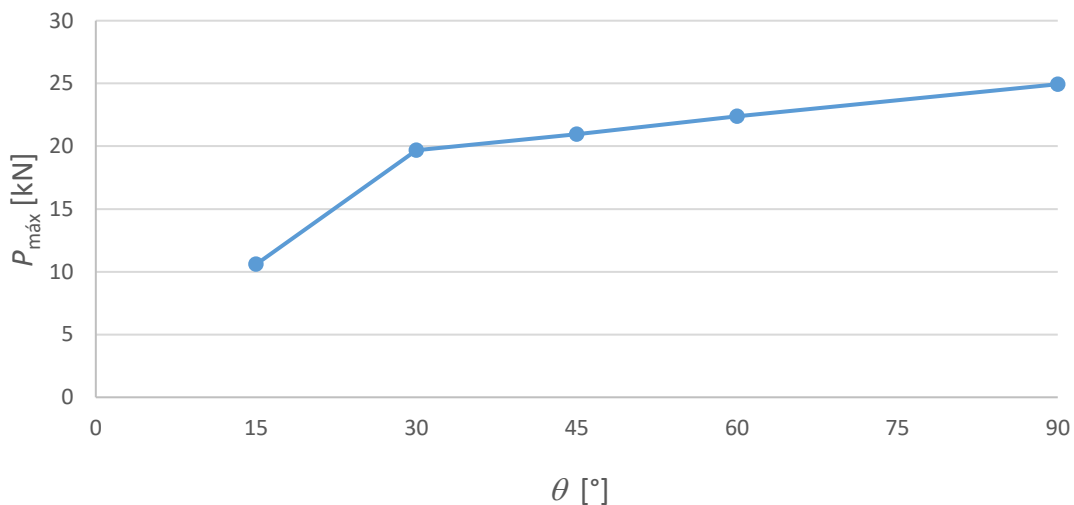


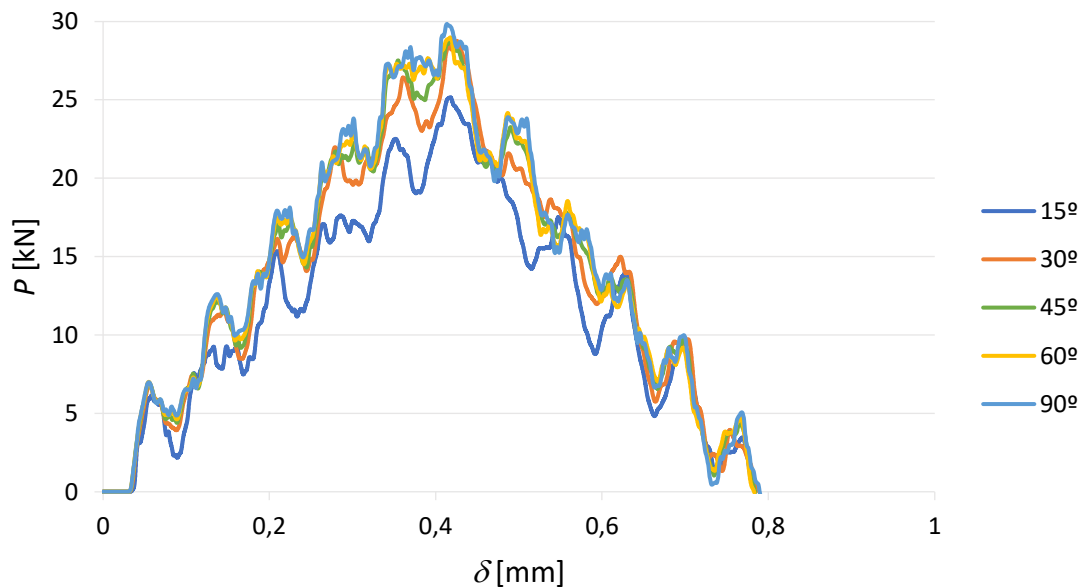
Figura 113 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de θ com o adesivo DP8005

Conforme esperado, através da análise das curvas $P-\delta$, a introdução de chanfro interior resultou em juntas sempre com um pior desempenho, logo menor E_{abs} , em comparação com a junta sem chanfro ($\theta=90^\circ$), conforme comprova o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento de rotura obtido para todas as juntas com $\theta < 90^\circ$. Deste modo, a E_{abs} diminuiu com o decréscimo do valor de θ , sendo a diferença percentual de E_{abs} para a junta com o pior desempenho ($\theta=15^\circ$) de aproximadamente 61,7%. (Tabela 22). O facto de esta junta ter tido o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$ e o menor deslocamento de rotura justifica esta destacada diferença de E_{abs} .

Tabela 22 – E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de θ

θ [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	2,43	-61,7%
30	4,78	-24,7%
45	5,53	-12,9%
60	5,79	-8,8%
90	6,35	-

As curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ são apresentadas na Figura 114. Facilmente se verifica que todas as curvas são bastantes similares, tendo todas elas um perfil idêntico com deslocamentos de rotura praticamente iguais. O valor de $P_{m\acute{a}x}$ é similar para qualquer θ e com uma tendência ligeiramente crescente. Mais uma vez, a proximidade dos valores máximos de σ_y obtidos com este adesivo traduz-se numa diferença diminuta de $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento de rotura, com a introdução de um chanfro interior.

Figura 114 - Curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

Na Figura 115 é apresentada a evolução gráfica de $P_{m\acute{a}x}$ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ . Graficamente, a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ foi visualmente mais perceptível do que com as curvas P - δ , verificando-se um ligeiro aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o crescimento de θ . A junta com maior resistência mecânica foi a junta sem qualquer chanfro ($\theta=90^\circ$) que teve um valor de $P_{m\acute{a}x}$ muito próximo de todas as juntas até $\theta=30^\circ$. Para $\theta=15^\circ$ verificou-

se uma pequena quebra de $P_{\text{máx}}$, resultado da elevada concentração de tensões para esta junta (Figura 109).

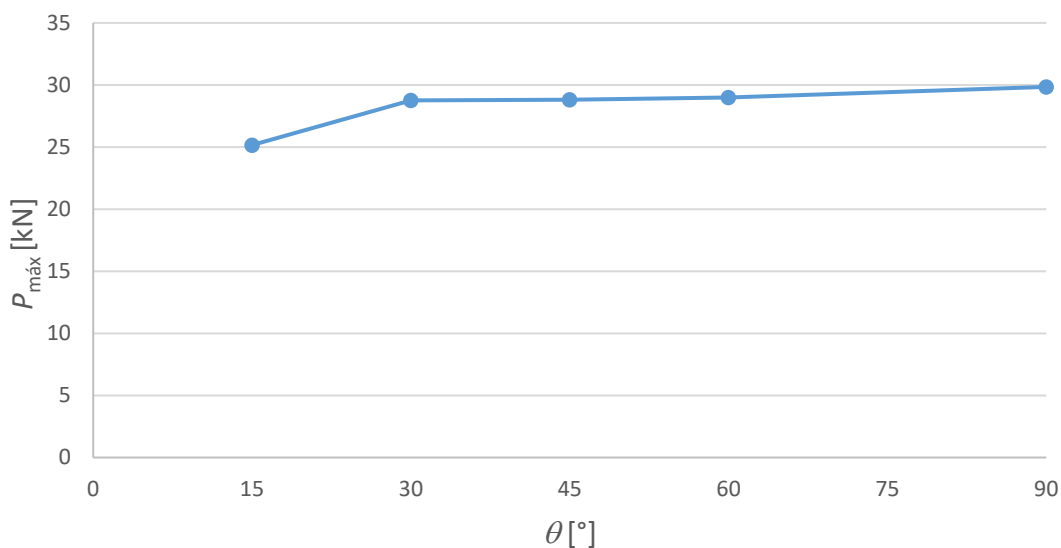


Figura 115 - $P_{\text{máx}}$ para cada valor de θ com o adesivo XNR6852 E-2

A E_{abs} foi também bastante similar para todos os valores de θ , novamente devido à sobreposição das curvas P - δ , resultante dos valores de deslocamento de rotura e $P_{\text{máx}}$ serem, no geral, bastante próximos para qualquer θ (Tabela 23). A única junta com um desempenho nitidamente pior foi a junta com $\theta=15^\circ$ que absorveu menos 18,2% de energia do que a junta sem chanfro ($\theta=90^\circ$), devido à menor área da curva P - δ correspondente (Figura 114).

Tabela 23 - E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

θ [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	9,30	-18,2%
30	10,82	-4,8%
45	11,13	-2,4%
60	11,24	-1,4%
90	11,37	-

3.2.5.2.3 Comparação de resultados

São apresentados na Tabela 24 os valores de $P_{\text{máx}}$ em função do valor de θ para cada adesivo e a variação percentual em relação ao $P_{\text{máx}}$ da junta sem chanfro interior ($\theta=90^\circ$).

Tabela 24 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os três adesivos em função de θ e respetivo aumento percentual

θ [°]	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{\text{máx}}$	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	$P_{\text{máx}}$	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]	$P_{\text{máx}}$	$\Delta P_{\text{máx}}$ [%]
15	21,81	-13,48	10,59	-57,54	25,16	-15,71
30	24,72	-1,94	19,67	-21,13	28,76	-3,65
45	24,85	-1,43	20,95	-15,99	28,81	-3,48
60	24,92	-1,15	22,37	-10,30	28,98	-2,91
90	25,21	-	24,94	-	29,85	-

Desde logo se verifica que a adição de um chanfro interior de adesivo foi penalizadora para qualquer um dos adesivos utilizados. A partir de $\theta=90^\circ$ (junta adesiva tubular sem chanfro), o valor de $P_{\text{máx}}$ teve sempre uma tendência decrescente com a diminuição do valor de θ .

O adesivo AV138 apresentou uma quebra de $P_{\text{máx}}$ pouco significativa até $\theta=30^\circ$, tendo depois uma quebra superior para $\theta=15^\circ$. Devido a esta elevada quebra de $P_{\text{máx}}$ para $\theta=15^\circ$, o maior $\Delta P_{\text{máx}}$ registou-se para este valor de θ .

O adesivo DP8005 foi o que teve menores valores de $P_{\text{máx}}$ e os maiores $\Delta P_{\text{máx}}$. Tal como no adesivo AV138, voltou a dar-se uma acentuada quebra de $P_{\text{máx}}$ entre $\theta=30^\circ$ e $\theta=15^\circ$.

Por fim, o adesivo XNR6852 E-2 foi o que garantiu a maior resistência da junta com os maiores valores de $P_{\text{máx}}$ e, em sentido contrário, os menores $\Delta P_{\text{máx}}$ registados. Para este adesivo a maior quebra de $P_{\text{máx}}$ voltou a repetir-se para os mesmos valores de θ indicados, devido ao facto de existir em todos os adesivos um pico de tensão σ_y largamente superior para $\theta=15^\circ$.

3.2.5.3 Filete de adesivo

Através da adição de um filete de adesivo, o objetivo passa por minimizar os picos de concentrações de tensões nas extremidades da camada adesiva. Para isso, será colocado um excesso de adesivo, que ao contrário do chanfro interior no aderente, não ficará no interior da zona da sobreposição do adesivo com os aderentes. Através da análise numérica das juntas com a adição de filete de adesivo, será averiguado se existe alguma melhoria de resistência, analisando as distribuições das tensões τ_{xy} e σ_y que se instalam para os três adesivos. A geometria da junta ensaiada através dos MDC no Abaqus® é apresentada na Figura 116. Serão analisados valores de β de $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ, 60^\circ$ e 90° (sem filete de adesivo). Para todas estas juntas será mantido um $L_0=10$ mm.

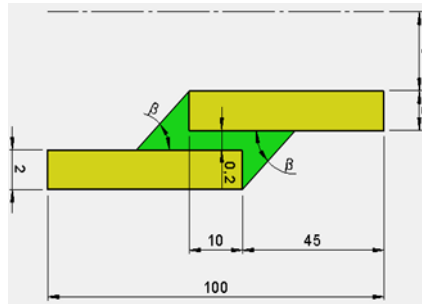


Figura 116 - Geometria do modelo para o estudo de β

Na Figura 60 pode observar-se a malha utilizada para o modelo com β de 15° . Para todas as dimensões de β , a malha é semelhante, constituída apenas por elementos quadriláteros. Para a zona do adesivo (representado a verde) serão atribuídos elementos *sweep* do tipo COH2D4. Já para os aderentes (representados a amarelo) foram atribuídos elementos estruturados CPE4R (Figura 116). Nas proximidades da camada adesiva a malha será mais refinada, visto tratar-se da zona com maior importância para o estudo.

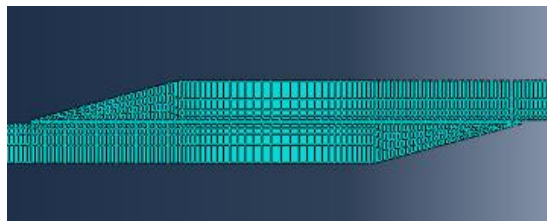


Figura 117 - Pormenor da malha na junta adesiva ($\beta=15^\circ$)

3.2.5.3.1 Distribuições de tensões

Na Figura 118 é apresentada a distribuição das tensões τ_{xy} para todos os valores de β ensaiados com o adesivo AV138. A adição de um filete de adesivo resulta numa prolongação da camada adesiva para além dos topos dos aderentes da junta adesiva tubular, ao contrário dos chanfros interiores e exteriores. Desta forma, as tensões começam a surgir nos extremos do filete, ou seja, para valores acima do comprimento normalizado ($x/L_0 > 1$) e abaixo ($x/L_0 < 0$). Para efeitos do cálculo da tensão τ_{med} foram registadas apenas as tensões dentro dos limites dos aderentes, que se localizam entre 0 e 1 no gráfico. À medida que se reduz o valor de β aplicado existe também uma redução dos efeitos de concentração de tensões τ_{xy} . Esta redução de β aumenta L_0 , o que aumenta a área de adesivo e conduz a distribuições de tensão mais uniformes, reduzindo assim o valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} . A junta com melhor desempenho ($\beta=15^\circ$) teve um valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} 17,1% inferior à junta sem filete ($\beta=90^\circ$). Para as restantes juntas ensaiadas, os picos de tensão na sobreposição do adesivo com o aderente foram semelhantes e sempre inferiores à junta sem filete de adesivo mas, naturalmente, maiores à medida que se aumentou o valor de β . Na extremidade

contrária ($x/L_0=1$) os picos de tensão tiveram magnitudes inferiores, embora com um comportamento semelhante ao referido anteriormente para a zona em que $x/L_0=0$.

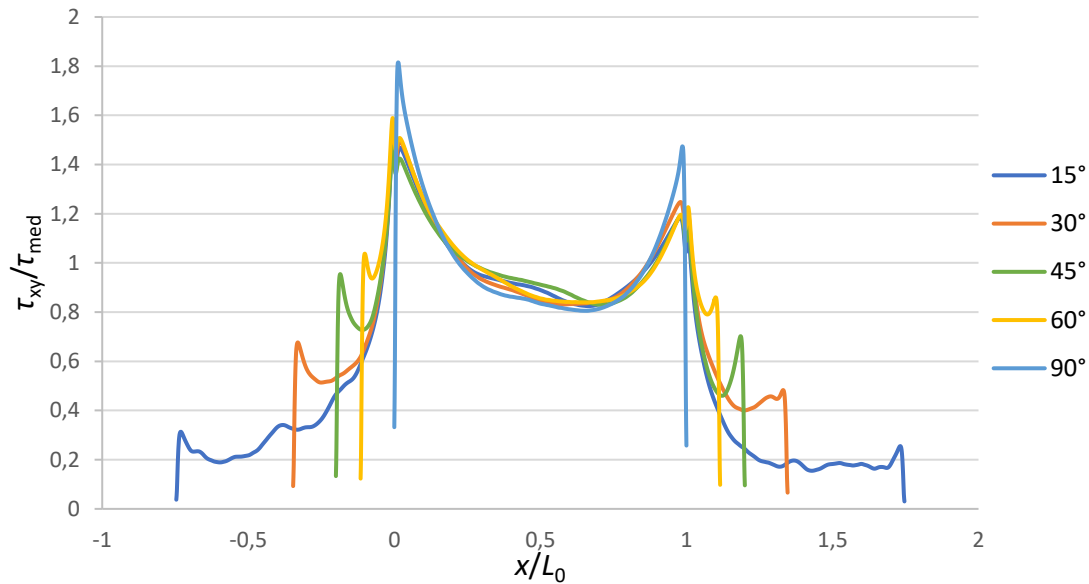


Figura 118 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de β

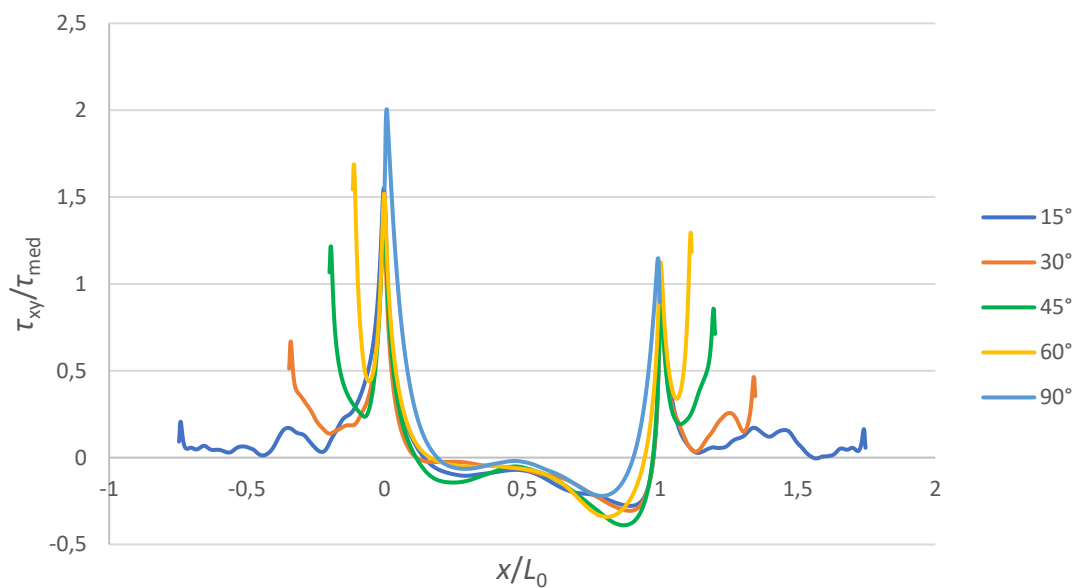


Figura 119 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de β

A introdução de um filete de adesivo foi igualmente benéfica para as tensões σ_y , com uma menor concentração de tensões σ_y nas extremidades da camada adesiva e com o aumento de L_0 , que advém da diminuição de β , a baixar o valor máximo de σ_y/τ_{med} (Figura 119). Posto isto, a junta com o menor valor de β ensaiado ($\beta=15^\circ$) teve

destacadamente o melhor desempenho, com o valor máximo de σ_y/τ_{med} a ser 22,5% inferior ao obtido para $\beta=90^\circ$. Os restantes valores de β utilizados tiveram valores de σ_y/τ_{med} máximos também mais reduzidos do que a junta sem filete e de valor idêntico à junta com $\beta=15^\circ$. Em $x/L_0=1$ a tendência foi igual, apesar de os valores máximos de σ_y/τ_{med} serem mais reduzidos, derivado da diferente área dos tubos e por se tratar de um ensaio dinâmico.

As tensões τ_{xy} com a utilização do adesivo DP8005 são apresentadas na Figura 120. A menor rigidez do adesivo resultou numa maior redução do efeito de concentração de tensões τ_{xy} , comparando com o adesivo AV138. Mais uma vez, a introdução de um filete de adesivo traduziu-se numa distribuição mais uniforme para todos os valores de β , na medida em que o valor de L_0 foi aumentando com a diminuição de β permitindo uniformizar bastante as distribuições das tensões τ_{xy} ao longo da camada adesiva e reduzir os picos de tensão τ_{xy} . Em $x/L_0=0$, os valores máximos de τ_{xy}/τ_{med} foram, tal como no adesivo AV138, muito similares para todas as juntas ensaiadas com filete de adesivo ($\beta < 90^\circ$), existindo uma tendência de decréscimo com a diminuição de β . Assim sendo, a junta com $\beta=15^\circ$ registou o pico mais baixo de tensão, obtendo um valor 23,7% mais baixo que a junta sem filete ($\beta=90^\circ$). A maior área de secção do aderente exterior faz com que os picos de tensão τ_{xy} sejam mais reduzidos em $x/L_0=1$. Apesar disso, verifica-se a mesma tendência documentada para $x/L_0=0$.

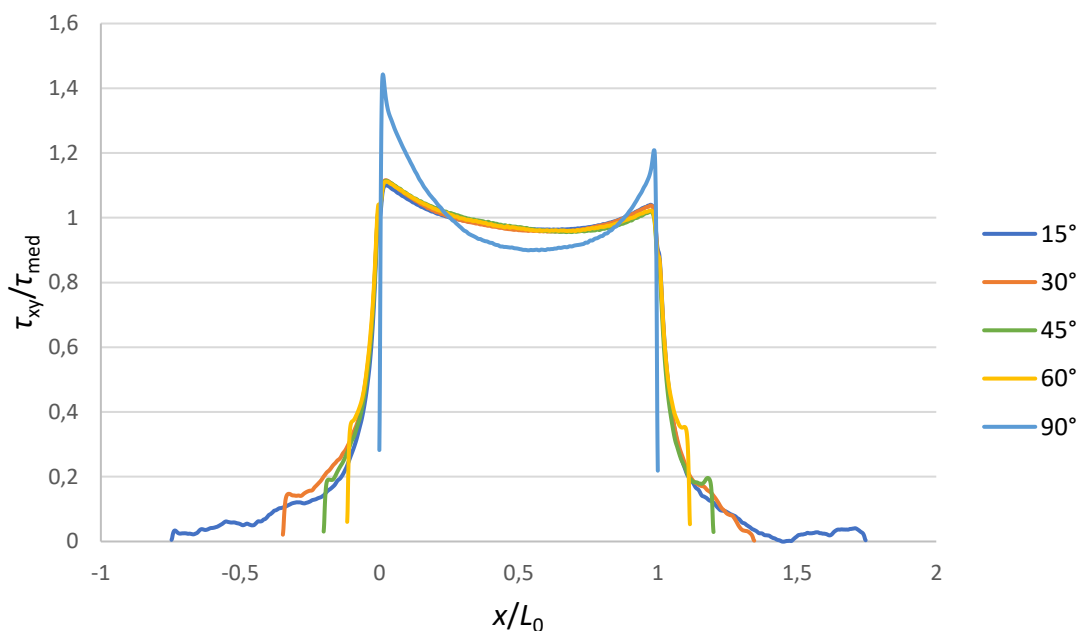


Figura 120 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de β

As tensões σ_y tiveram uma distribuição semelhante, mas mais uniforme do que a obtida com o adesivo AV138. Como consequência da menor rigidez do adesivo DP8005 os valores máximos de σ_y/τ_{med} foram bastante mais baixos comparando com os registados

para o adesivo AV138. Voltou-se a verificar a tendência de redução das concentrações de tensões σ_y , com a redução do valor de β a aumentar o comprimento da camada adesiva levando a um aumento da área adesiva, o que alivia as concentrações de tensões (Figura 121). A localização destes picos de tensão foi também semelhante à verificada para o adesivo AV138. A junta sem filete ($\beta=90^\circ$) destaca-se com um pico de tensão 41,6% mais elevado do que o registado para a junta com melhor desempenho ($\beta=15^\circ$). Como a distribuição das tensões foi bastante uniforme ao longo da camada adesiva, os valores máximos de σ_y/τ_{med} em $x/L_0=1$ são muito próximos dos obtidos para $x/L_0=0$, não sendo tão perceptível a diferença de áreas dos tubos.

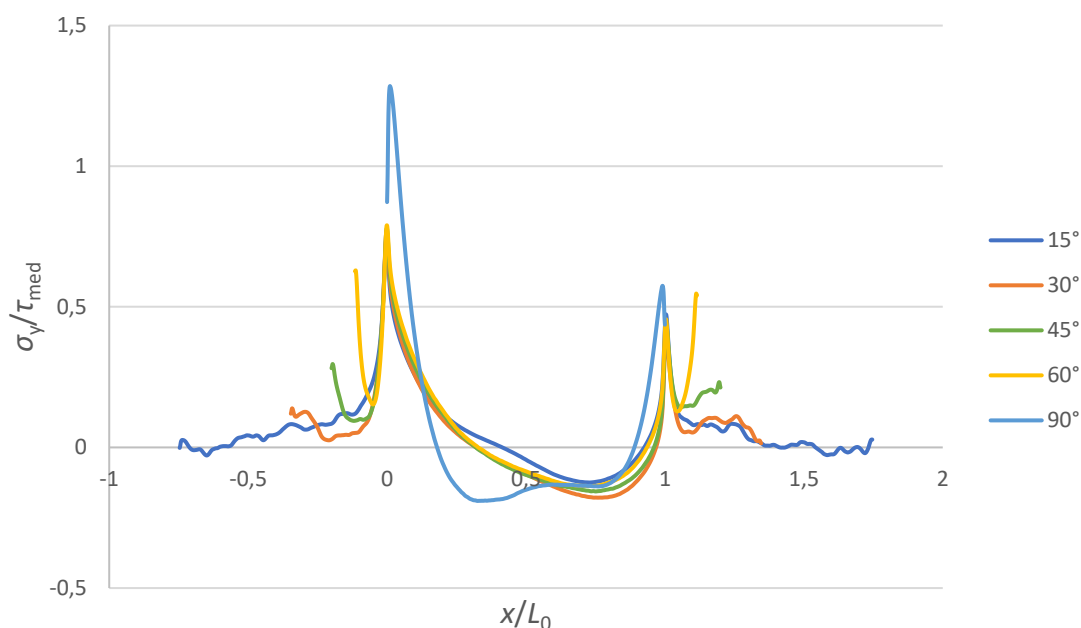


Figura 121 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de β

As distribuições das tensões τ_{xy} em função de β com o adesivo XNR6852 E-2 são apresentadas na Figura 122. Novamente, existe uma tendência decrescente dos picos de tensão τ_{xy} com o decréscimo do valor de β . Apesar disso, as juntas com β de $15^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ e 60° tiveram um valor de τ_{xy}/τ_{med} máximo praticamente igual com apenas 1% de variação entre elas. Para $\beta=15^\circ$ o valor máximo de τ_{xy}/τ_{med} foi cerca de 11,2% mais baixo do que para a junta sem filete ($\beta=90^\circ$), que se destaca claramente com o pico máximo de τ_{xy}/τ_{med} . As distribuições das tensões τ_{xy} ao longo da camada adesiva tiveram um comportamento semelhante ao outro adesivo rígido ensaiado (AV138). A rigidez intermédia do adesivo XNR6852 E-2 confere tensões de magnitude superior ao adesivo dúctil DP8005, mas inferiores às do adesivo AV138, mais rígido. Em $x/L_0=1$ os picos de tensão são bastante mais baixos, devido à maior área do aderente exterior.

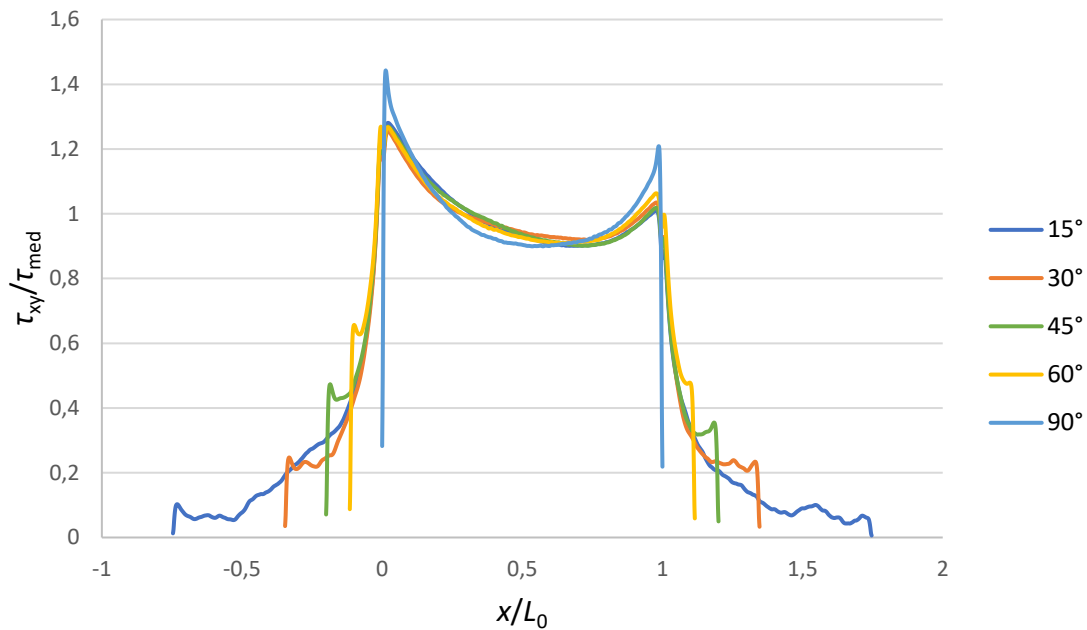


Figura 122 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

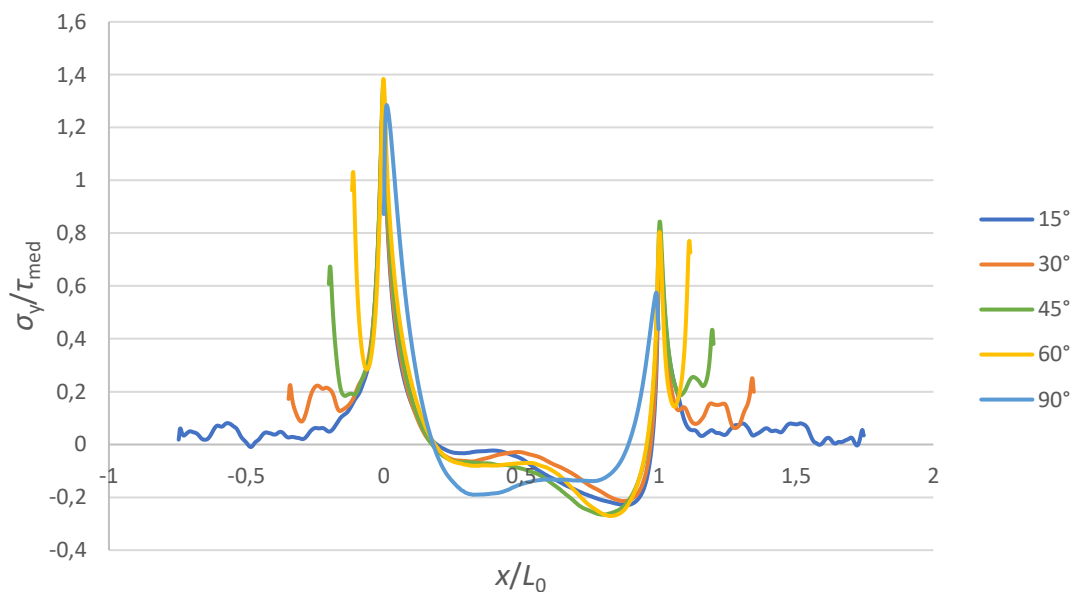


Figura 123 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

Para as tensões σ_y não se verificou uma diminuição dos picos de tensão com a diminuição de β , tendo as juntas com $\beta=45^\circ$ e $\beta=60^\circ$ uma tensão σ_y máxima 11,7% inferior à junta sem filete de adesivo ($\beta=90^\circ$) (Figura 123). Contudo, a junta com $\beta=15^\circ$ conseguiu novamente melhorar o desempenho em relação à junta tubular sem filete de adesivo, sendo a tensão σ_y máxima 5,6% inferior ao maior pico de tensão registado para $\beta=60^\circ$, tendo este fenómeno acontecido pelos mesmos motivos que foram indicados

para o adesivo AV138 e DP8005. Comparativamente com o adesivo AV138 e DP8005, a magnitude das tensões σ_y assumiu valores intermédios, assim como acontece para as tensões τ_{xy} . A distribuição das tensões ao longo da camada adesivo foi mais uniforme do que a distribuição com o adesivo AV138, mas menos uniforme que a do adesivo dúctil DP8005, derivado da rigidez intermédia do adesivo XNR6852 E-2.

3.2.5.3.2 Resistência das juntas e energia absorvida

As curvas P - δ para todos os valores de β com o adesivo AV138 são apresentadas na Figura 124. O decréscimo do valor de β resulta num aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e do deslocamento máximo obtido. Como se verificou no capítulo 3.2.4.1, o aumento de L_0 levou a um aumento de deslocamento e de $P_{m\acute{a}x}$. Desta forma, os resultados obtidos vão de acordo com o previsto, uma vez que a redução de β também se traduz num aumento da área resistente ao corte do adesivo. A junta com $\beta=15^\circ$ destacou-se claramente, tendo um deslocamento de rotura cerca de 122% superior à segunda junta com maior deslocamento de rotura ($\beta=30^\circ$). Esta foi também a única junta em que se verifica uma plastificação do aderente interior que elevou a $P_{m\acute{a}x}$ atingida nesta junta.

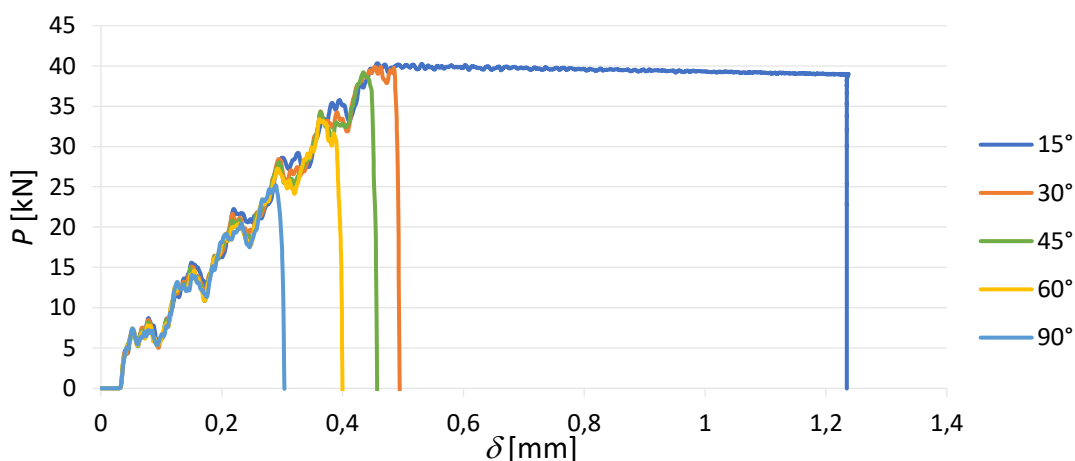


Figura 124 - Curvas P - δ com o adesivo AV138 em função de β

Na Figura 125 está representada graficamente a evolução de $P_{m\acute{a}x}$ registada para cada valor de β . Verifica-se um aumento bastante significativo de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas com filete de adesivo ($\beta < 90^\circ$), comparativamente à junta sem filete de adesivo ($\beta = 90^\circ$), em função do aumento da área resistente ao corte do adesivo. A partir de $\beta = 45^\circ$ a $P_{m\acute{a}x}$ foi praticamente constante, tendo esta variado apenas 2,8% entre a $P_{m\acute{a}x}$ para $\beta = 45^\circ$ e $\beta = 15^\circ$. Os picos de tensão τ_{xy} e σ_y bastante próximos para os valores de β referidos, justificam o reduzido crescimento de $P_{m\acute{a}x}$ com o decréscimo de β (Figura 118 e Figura 119). Assim sendo, utilizando o adesivo AV138, a adição de um filete de adesivo só compensa para valores de β abaixo de 45° .

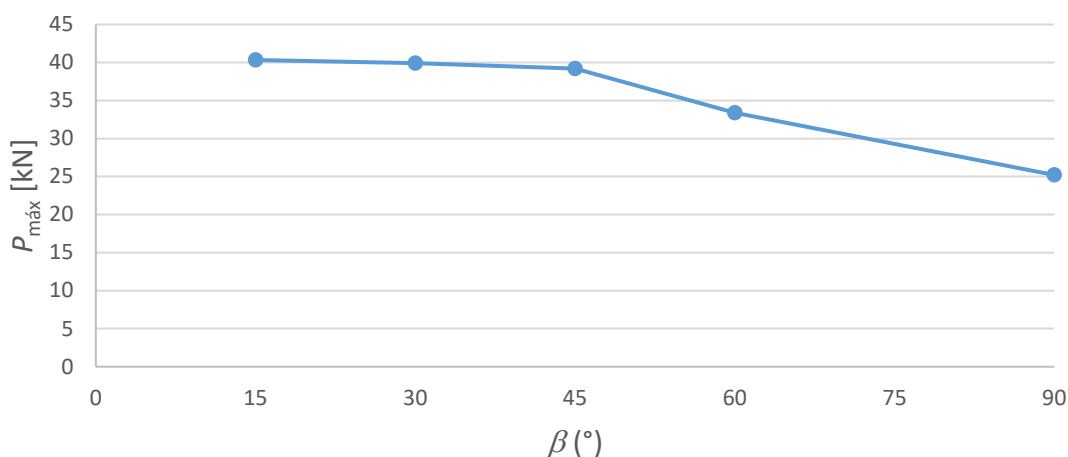


Figura 125 - $P_{\text{máx}}$ para cada valor de β com o adesivo AV138

Em função da maior carga suportada, acompanhada de maior descolamento de rotura, verifica-se um acréscimo de E_{abs} , principalmente para a junta com $\beta=15^\circ$ que absorveu mais 963,4% de energia que a junta sem filete ($\beta=90^\circ$). As restantes juntas ensaiadas também tiveram todas um aumento de E_{abs} , ainda que numa razão bastante inferior à junta com $\beta=15^\circ$ (Tabela 23).

Tabela 25 - E_{abs} com o adesivo AV138 em função de β

β [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	39,77	+963,4%
30	10,33	+176,2%
45	8,74	+133,7%
60	6,57	+75,7%
90	3,74	-

Na Figura 126 são apresentadas as curvas $P-\delta$ com o adesivo DP8005. Novamente repete-se a tendência anterior com um aumento de $P_{\text{máx}}$ e deslocamento de rotura atingidos com a redução de β , que se evidenciou graças ao aliviar das tensões, tanto σ_y como τ_{xy} (Figura 120 e Figura 121). Assim como $P_{\text{máx}}$, o deslocamento de rotura teve uma tendência crescente com a diminuição de β . Deste modo, o deslocamento de rotura máximo deu-se para a junta com $\beta=15^\circ$, que teve um deslocamento 22,2% superior à junta com $\beta=90^\circ$. Para $\beta=30^\circ$ o deslocamento de rotura foi também superior, mas com um crescimento menor, de cerca de 17,8%. As juntas com $\beta=45^\circ$ e $\beta=60^\circ$ tiveram deslocamentos de rotura próximos e aproximadamente 12% superiores à junta sem adição de filete de adesivo.

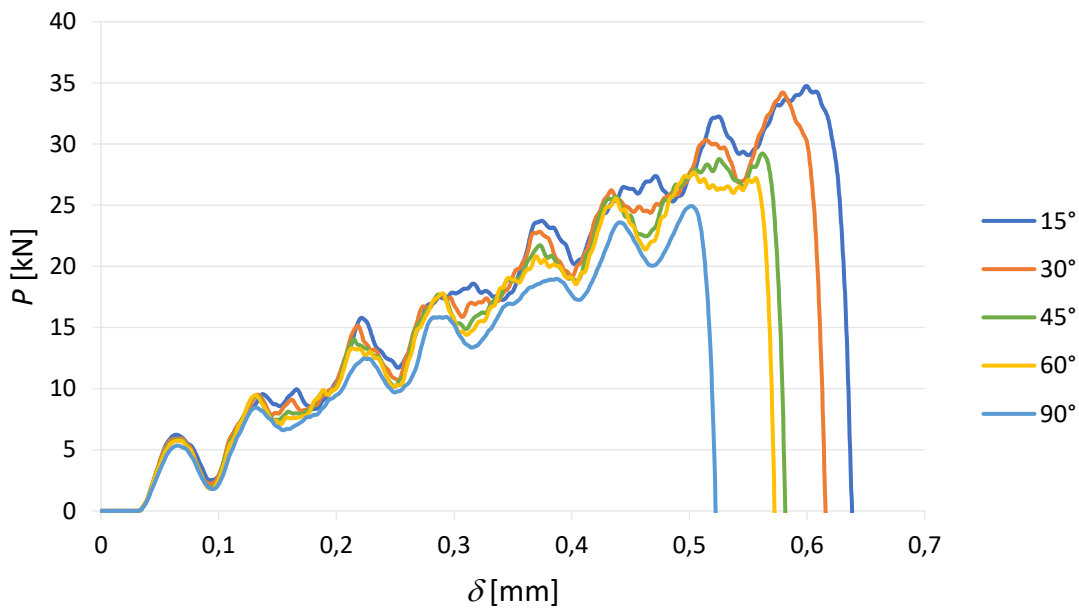


Figura 126 - Curvas P - δ com o adesivo DP8005 em função de β

A $P_{\text{máx}}$ registada em cada valor de β é apresentada na Figura 127. Tal como observado para o adesivo AV138 a adição de um filete de adesivo aumenta a resistência da junta comparando com a junta com β de 90° (sem filete). A passagem de um adesivo rígido (AV138) para um adesivo dúctil (DP8005) leva a que o aumento de $P_{\text{máx}}$ com a redução de β seja menos significativo, com este valor a estagnar a uma $P_{\text{máx}}$ de 35 kN, menos 5 kN em relação ao adesivo AV138, visto que o aderente de alumínio não se deformou plasticamente, não sendo atingido o limite elástico do alumínio de 40 kN. A adição de um filete de adesivo, com o adesivo DP8005, só deve ser considerada para valores de β até 30° .

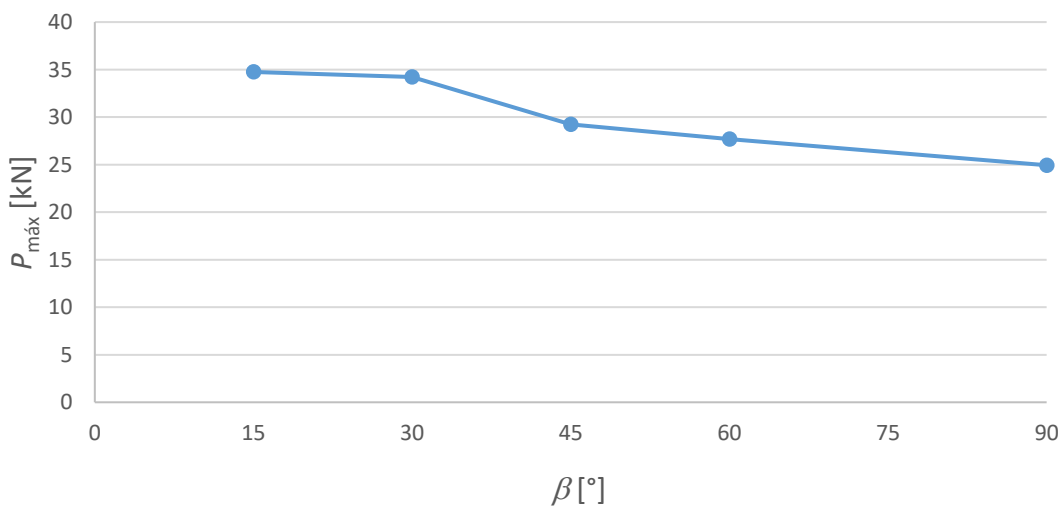


Figura 127 - $P_{\text{máx}}$ para cada valor de β com o adesivo DP8005

Tal como aconteceu para o deslocamento de rotura e $P_{m\acute{a}x}$ obtidos, as juntas com menor valor de β foram as que tiveram um melhor desempenho absorvendo mais energia do que a junta sem filete ($\beta=90^\circ$). De acordo com a Tabela 26, a maior variação percentual de E_{abs} foi de $\beta=15^\circ$, com um aumento de 76,2% em relação à junta sem filete de adesivo. Para as restantes juntas o crescimento de E_{abs} continua, mas a um ritmo menor, crescendo em média 43% em relação a $\beta=90^\circ$ (Tabela 26).

As curvas $P-\delta$ com o adesivo XNR6852 E-2 são apresentadas na Figura 128. Ao contrário do que aconteceu com os restantes adesivos, para o adesivo XNR6852 E-2 a diminuição do valor de β dos 90° até aos 45° não resultou em nenhuma alteração ao deslocamento de rotura registado. Apenas para $\beta=30^\circ$ e 15° se registou um aumento de aproximadamente 56,5% em relação à junta sem filete de adesivo.

Tabela 26 - E_{abs} com o adesivo DP8005 em função de β

β [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	11,19	+76,2%
30	10,17	+60,2%
45	8,75	+37,9%
60	8,30	+30,7%
90	6,35	-

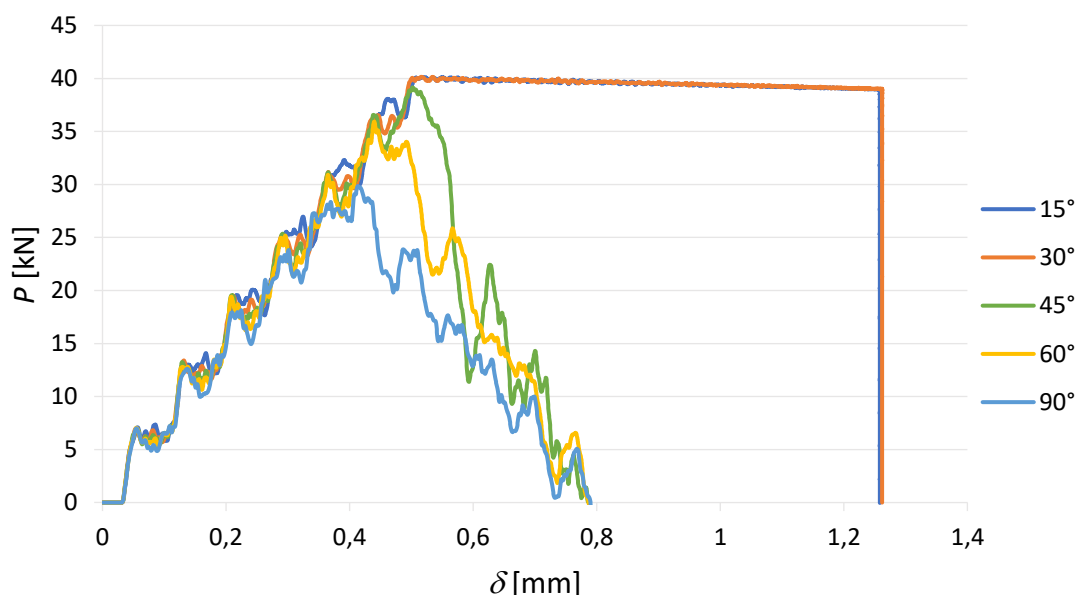


Figura 128 - Curvas $P-\delta$ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

Na Figura 129 é apresentada graficamente a $P_{m\acute{a}x}$ em função de β . De acordo com o previsto, a introdução de um filete de adesivo ($\beta < 90^\circ$) aumenta o valor de $P_{m\acute{a}x}$ atingido

como consequência da diminuição de concentração de tensões, principalmente tensões σ_y . À semelhança do que se registou no outro adesivo rígido ensaiado (AV138), a adição de um filete de adesivo apenas é vantajosa até um valor de β de 45° . A partir daí a $P_{m\acute{a}x}$ atingida estagna nos 40 kN correspondentes ao limite elástico do alumínio, exatamente como sucedeu no adesivo AV138. A junta com maior valor de $P_{m\acute{a}x}$ conseguiu um aumento de 34,5% em relação à junta com $\beta=90^\circ$.

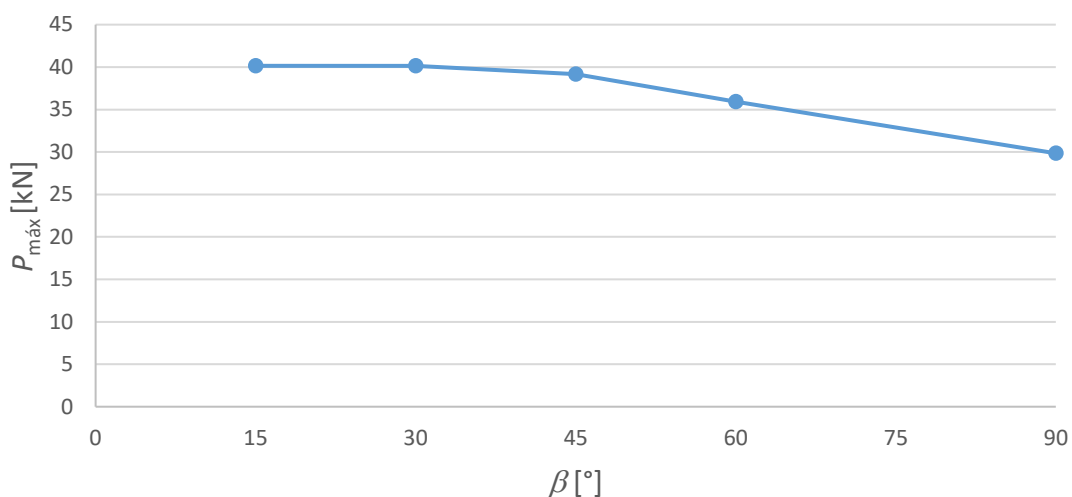


Figura 129 - $P_{m\acute{a}x}$ para cada valor de β com o adesivo XNR6852 E-2

A E_{abs} teve uma natural tendência de crescimento com a redução de β . A maior área das curvas, associada a maiores valores de $P_{m\acute{a}x}$ e deslocamentos de rotura, traduzem-se num aumento da E_{abs} em relação à junta sem filete. As juntas com $\beta=15^\circ$ e $\beta=30^\circ$ superiorizaram-se bastante às restantes, devido não só ao maior $P_{m\acute{a}x}$ atingido, mas principalmente do deslocamento de rotura, conseguindo um aumento de E_{abs} de aproximadamente 250,6% (Tabela 27).

Tabela 27 - E_{abs} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

β [°]	E_{abs} [J]	Diferença
15	39,86	+250,6%
30	39,86	+250,6%
45	14,57	+28,1%
60	13,61	+19,7%
90	11,37	-

3.2.5.3.3 Comparação de resultados

Na Tabela 28 são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de β e a respectiva diferença percentual relativamente ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $\beta=90^\circ$.

Para todos os adesivos ensaiados, a adição de um filete de adesivo permitiu aliviar os picos de tensão e, em consequência, aumentar a resistência da camada adesiva.

Começando pelo adesivo AV138, o crescimento de $P_{m\acute{a}x}$ foi bastante acentuado até $\beta=45^\circ$ (+55,53%), tendo-se depois estabilizado um pouco. A junta com $\beta=15^\circ$ teve o maior valor de $P_{m\acute{a}x}$, em resultado da plastificação que ocorreu no aderente interior.

A menor rigidez do adesivo DP8005 fez com que este atingisse menores $P_{m\acute{a}x}$ para todos os valores de β . Também os valores de $\Delta P_{m\acute{a}x}$ foram bastante inferiores quando comparados com o adesivo anterior.

O adesivo que mais beneficiou da introdução de um filete de adesivo, foi o adesivo XNR6852 E-2. A sua elevada rigidez e menor fragilidade comparativamente ao adesivo AV138, permitiram a este adesivo atingir as maiores $P_{m\acute{a}x}$ para qualquer valor de β . A plastificação do aderente interior para $\beta=30^\circ$ e $\beta=15^\circ$ fizeram com que $P_{m\acute{a}x}$ atingisse o seu valor máximo (40 kN). Dados os elevados $P_{m\acute{a}x}$ atingidos em qualquer valor de β , as $\Delta P_{m\acute{a}x}$ foram bastante mais reduzidas do que as verificadas para o adesivo AV138, mas ligeiramente superiores às do adesivo DP8005.

Tabela 28 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em função de β e respetivo aumento percentual

β [°]	Araldite® AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]	$P_{m\acute{a}x}$ [kN]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
15	40,34	+60,02	34,75	+39,33	40,14	+34,47
30	39,90	+58,27	34,21	+37,17	40,14	+34,47
45	39,21	+55,53	29,23	+17,20	39,16	+31,18
60	33,38	+32,41	27,69	+11,03	35,91	+10,54
90	25,21	-	24,94	-	29,85	-

3.2.6 Análise dos resultados obtidos

Após serem apresentados todos os ensaios desenvolvidos, será feita uma análise e posterior comparação de resultados, de forma a avaliar quais as alterações geométricas e adesivos que melhoram o desempenho de juntas adesivas tubulares sujeitas a impacto.

Para cada um dos adesivos serão apresentados graficamente qual a carga e deslocamento máximos em cada alteração geométrica e o respetivo valor do parâmetro geométrico alterado.

Começando pelo adesivo AV138, as $P_{máx}$ atingidas em cada alteração geométrica são apresentadas na Figura 130. Como todas as alterações geométricas foram ensaiadas para $L_0=10$ mm, as $P_{máx}$ e deslocamentos máximos apresentados para o estudo de L_0 serão as correspondentes à junta com 10 mm, apesar de as juntas com 15 mm e 20 mm terem atingido maior $P_{máx}$ e mais deslocamento de rotura.

Para o adesivo AV138, a adição de um filete de adesivo foi a única alteração geométrica que permitiu melhorar o desempenho ao impacto, registando um $P_{máx}$ 57,9% superior à junta adesiva tubular simples. A alteração de t_{so} e a adição de chanfros não se mostrou vantajosa, dado que não existiu uma melhoria na resistência das juntas.

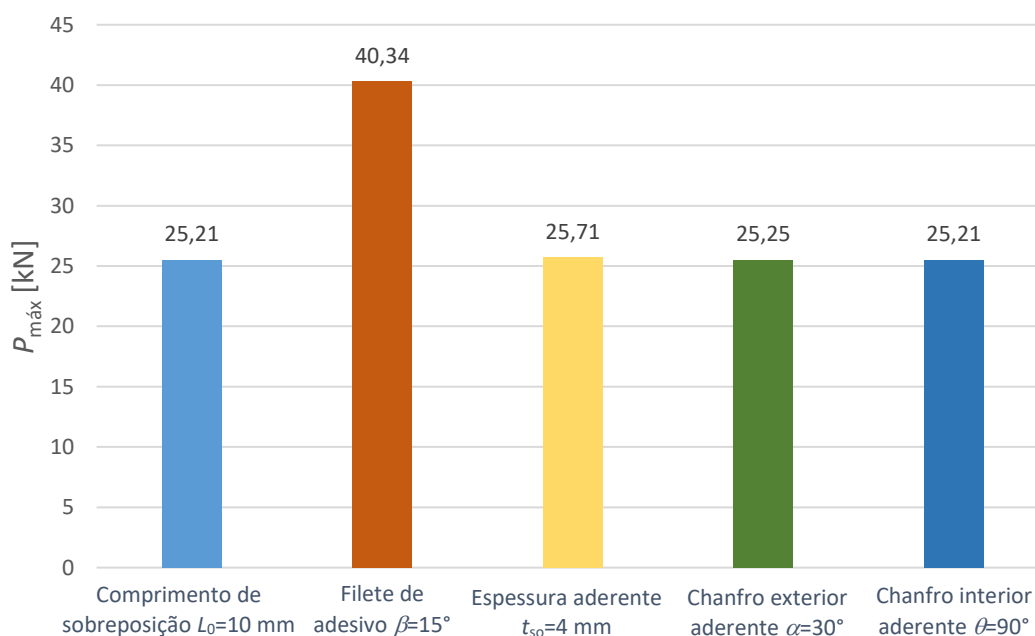


Figura 130 - $P_{máx}$ para cada alteração geométrica com o adesivo AV138

Para o deslocamento de rotura, a alteração de t_{so} e a adição de filete de adesivo foram as únicas que tiveram um melhor resultado em relação à junta sem qualquer alteração geométrica. No caso do filete de adesivo, o deslocamento de rotura foi 195,2% superior, enquanto a alteração de t_{so} se superiorizou com um acréscimo de 357,1%, em relação à junta adesiva tubular de sobreposição simples. Assim como no $P_{máx}$, também no deslocamento de rotura a adição de chanfros não resultou em nenhuma melhoria (Figura 131).

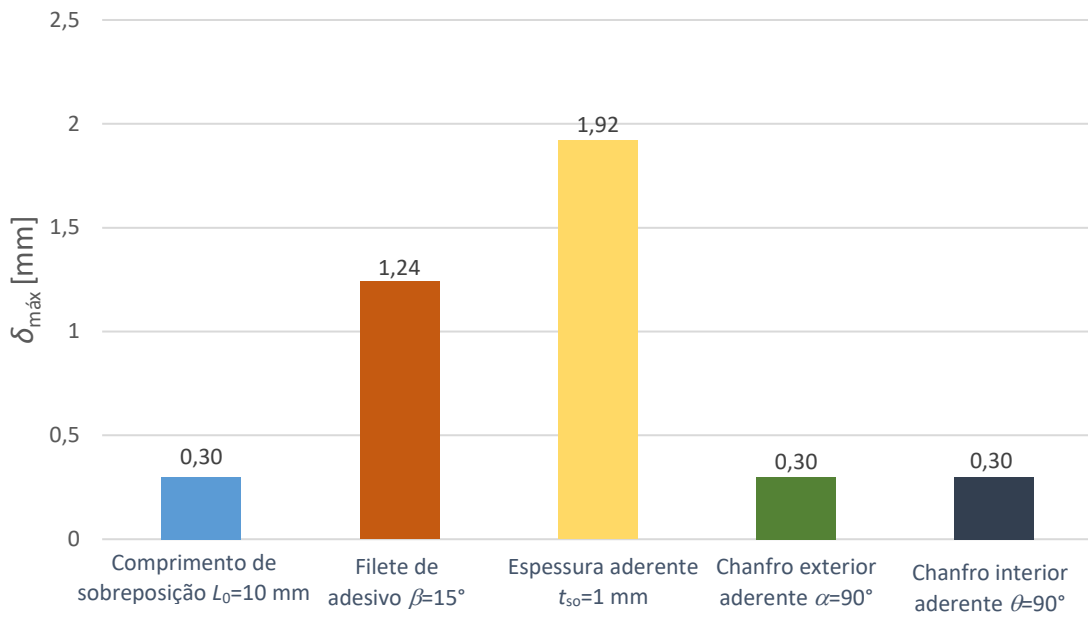


Figura 131 – $\delta_{máx}$ para cada alteração geométrica com o adesivo AV138

Para o adesivo DP8005 os resultados foram semelhantes, apesar de a magnitude de $P_{máx}$ ser ligeiramente inferior em virtude da menor rigidez do adesivo. A adição de filete de adesivo e a alteração de t_{so} são as únicas alterações a melhorar o desempenho da junta. No caso da adição do filete de adesivo, o valor de $P_{máx}$ foi 39,3% superior à junta com $L_0=10$ mm. Já a alteração de t_{so} registou um crescimento mais reduzido, com 11,7% de aumento do valor de $P_{máx}$ (Figura 132).

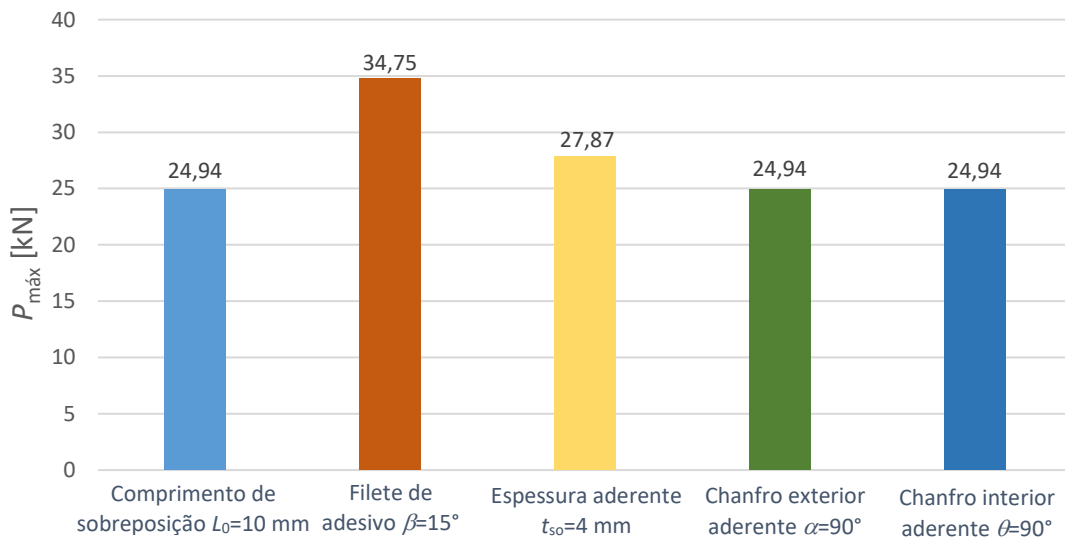


Figura 132 - $P_{máx}$ para cada alteração geométrica com o adesivo DP8005

O deslocamento de rotura (Figura 133) foi novamente superior na junta com a alteração de t_{so} , ainda que com um deslocamento praticamente igual à junta com filete adesivo,

ambas com um aumento de aproximadamente 25% em relação à junta com $L_0=10$ mm. A adição de chanfros resultou sempre em menores deslocamentos de rotura.

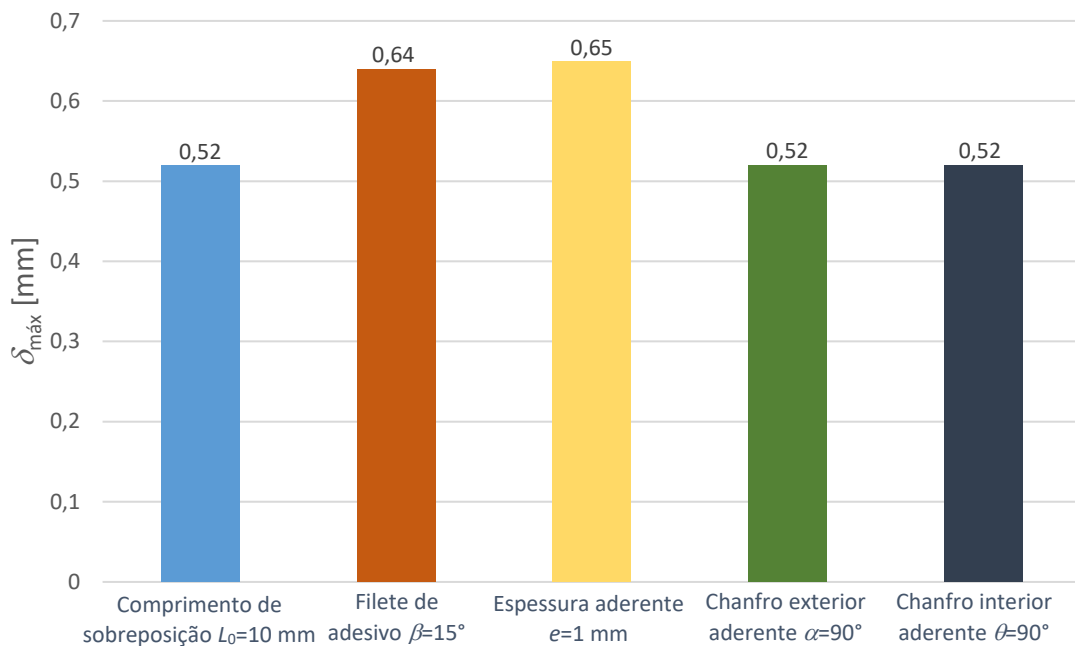


Figura 133 - $\delta_{\text{máx}}$ para cada alteração geométrica com o adesivo DP8005

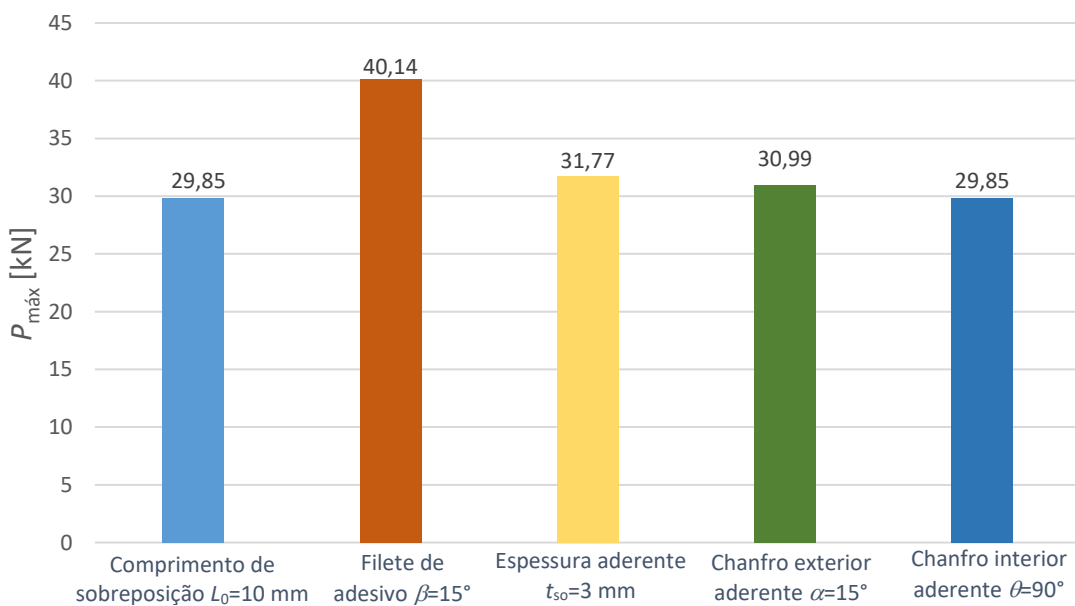


Figura 134 - $P_{\text{máx}}$ atingida para cada alteração geométrica com o adesivo XNR6852 E-2

Finalmente, o valor de $P_{\text{máx}}$ atingido para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo XNR6852 E-2 é apresentado na Figura 134. A adição de um filete adesivo, a alteração de t_{so} e a adição de um chanfro exterior no aderente são as únicas alterações geométricas a registar maior $P_{\text{máx}}$ em comparação com a junta tubular de sobreposição

simples, com aumentos de 34,5%, 6,4% e 3,8%, respetivamente. As magnitudes das $P_{\text{máx}}$ foram semelhantes às do adesivo AV138 que, tal como o adesivo XNR6852 E-2, são mais rígidos que o adesivo DP8005.

Para o deslocamento de rotura (Figura 135) a alteração de t_{so} resultou no maior deslocamento atingido, novamente com valores muito semelhantes ao que aconteceu para o adesivo AV138 e cerca de 142,5% superior à junta tubular de sobreposição simples. A introdução de um filete de adesivo também aumentou o deslocamento, mas com um aumento mais reduzido de 57,5%. A adição de chanfros foi igualmente penalizadora com o uso do adesivo XNR6852 E-2.

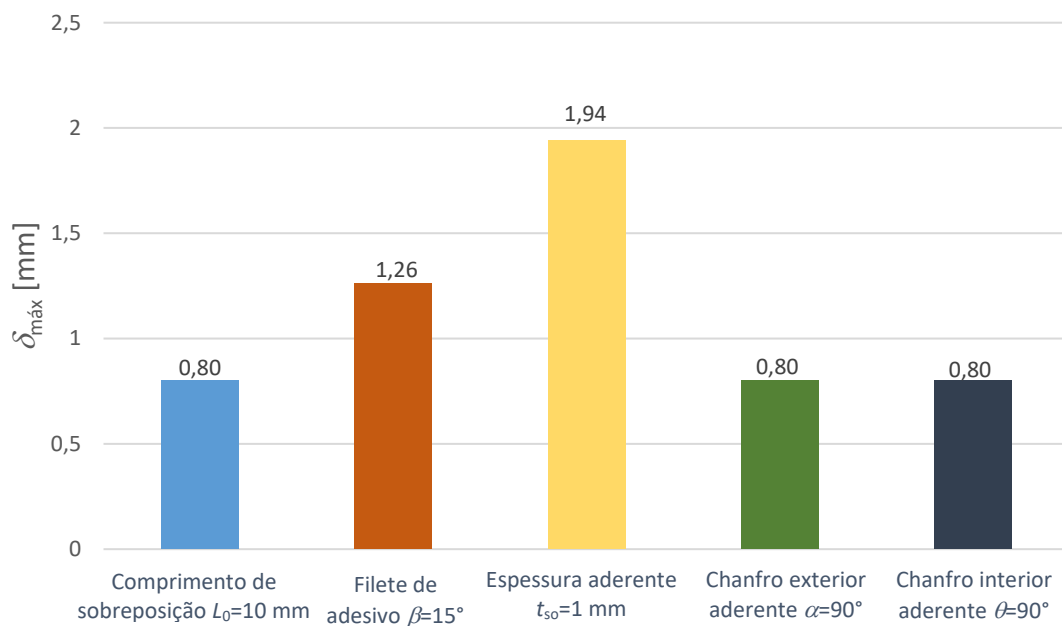


Figura 135 - $\delta_{\text{máx}}$ para cada alteração geométrica com o adesivo XNR6852 E-2

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Conclui-se que o MDC utilizado nesta dissertação foi validado com sucesso para juntas adesivas tubulares com os três adesivos. Foram utilizados adesivos com propriedades distintas para estudar a influência destes quando solicitados ao impacto.

Desta forma, o MDC foi aplicado na presente dissertação para o estudo de juntas tubulares solicitadas ao impacto. Como parâmetros geométricos estudados, estudou-se o L_0 e t_{50} . Conforme seria espectável, o aumento de L_0 resulta num aumento de resistência, em função do aumento da área da camada adesiva. Para nenhum dos adesivos o aumento de resistência foi linearmente proporcional ao aumento de L_0 , sendo o adesivo XNR6852 E-2 o que teve melhores resultados. O aumento de t_{50} também fez aumentar ligeiramente a resistência das juntas.

Foram ainda estudadas alterações geométricas (chanfro interior, chanfro exterior e filete de adesivo), das quais se retiraram as seguintes ilações:

- A adição de chanfros exteriores e interiores nos aderentes não resultou numa melhoria do desempenho, tanto para os adesivos rígidos como para o adesivo dúctil ensaiado. Como indicado anteriormente, o ângulo com melhores resultados foi sempre o ângulo de 90° , à exceção da junta com o adesivo XNR6852 E-2, que aumentou ligeiramente a sua resistência com a adição de um chanfro exterior nos aderentes;
- A utilização de um filete de adesivo é a alteração geométrica com melhores resultados. A redução do efeito de concentração de tensões e o aumento da área da camada adesiva traduziram-se num aumento da resistência em todos os adesivos ensaiados, com o adesivo XNR6852 E-2 a ter o melhor desempenho.

Desta forma, a alteração geométrica e o adesivo que maximiza o desempenho de juntas adesivas tubulares ao impacto foi a adição de um filete de adesivo a 15° com o adesivo XNR6852 E-2.

Para trabalhos futuros, dada a escassez de estudos desenvolvidos na área das juntas adesivas tubulares, devem-se desenvolver os mesmos ensaios, mas em condições estáticas para poder comparar com os resultados obtidos ao impacto. Para além disso, seria importante realizar ensaios experimentais com diferentes geometrias, alterações geométricas e respetivas combinações para poder comparar e validar os resultados obtidos nesta dissertação.

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Da Silva, L.F.M. e A. Öchsner, *Modeling of adhesively bonded joints*. 2008, Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
2. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Cambridge: Woodhead Publishing Ltd.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindustria.
4. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Douramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
5. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova Iorque, USA: McGraw-Hill.
6. Cognard, P., *Adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 2. 2005, Amesterdão, Holanda: Elsevier.
7. Cognard, J.Y., L. Sohier, R. Créac'Hcadec, F. Lavelle, e N.J. Lidon, *Influence of the geometry of coaxial adhesive joints on the transmitted load under tensile and compression loads*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012. **37**: p. 37-49.
8. Adams, R. e J. Comyn, *Joining using adhesives*. Assembly Automation, 2000. **20**(2): p. 109-117.
9. Gent, A. e O. Yeoh, *Failure loads for model adhesive joints subjected to tension, compression or torsion*. Journal of Materials Science, 1982. **17**(6): p. 1713-1722.
10. Baurova, N. e A.Y. Sergeev, *Structural studies of fracture patterns in adhesive joints after pullout testing*. Polymer Science Series D, 2014. **7**(4): p. 298-302.
11. Lee, H.-K., S. Pyo, e B. Kim, *On joint strengths, peel stresses and failure modes in adhesively bonded double-strap and supported single-lap GFRP joints*. Composite Structures, 2009. **87**(1): p. 44-54.
12. Labbé, S. e J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012. **33**: p. 26-35.
13. Volkersen, O.V., *Die Niekraftverteilung in Zugbeanspruchten mit Konstanten Laschenquerschriften*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
14. Lubkin, J. e E. Reissner, *Stress distributions and design data for adhesive lap joints between circular tubes*. Transactions of American Society of Mechanical Engineers, 1956. **78**: p. 1213-1221.
15. Hart-Smith, L., *Adhesive-bonded double-lap joints*. NASA contract report, 1973.
16. Qiu, C., P. Feng, Y. Yang, L. Zhu, e Y. Bai, *Joint capacity of bonded sleeve connections for tubular fibre reinforced polymer members*. Composite Structures, 2017. **163**: p. 267-279.

17. Oh, J.H., *Strength prediction of tubular composite adhesive joints under torsion*. Composites science technology, 2007. **67**(7-8): p. 1340-1347.
18. Choi, J.K. e D.G. Lee, *Torque transmission capabilities of bonded polygonal lap joints for carbon fiber epoxy composites*. The Journal of Adhesion, 1995. **48**(1-4): p. 235-250.
19. Lee, S.J. e D.G. Lee, *Development of a failure model for the adhesively bonded tubular single lap joint*. The Journal of Adhesion, 1992. **40**(1): p. 1-14.
20. Hosseinzadeh, R. e F. Taheri, *Non-linear investigation of overlap length effect on torsional capacity of tubular adhesively bonded joints*. Composite Structures, 2009. **91**(2): p. 186-195.
21. 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.
22. Pereira, H.F.S.G., *Comportamento à fadiga de componentes estruturais sob a ação de solicitações de amplitude variável*. 2006, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
23. Molitor, P., V. Barron, e T. Young, *Surface treatment of titanium for adhesive bonding to polymer composites: a review*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2001. **21**(2): p. 129-136.
24. Sekercioglu, T., *Investigations of adhesively bonded joints behaviour under dynamic loading*. 2001, Ph. D. Thesis, Pamukkale University, Denizli, Turkey, 2001 (in Turkish).
25. Lee, D.G., K.S. Kim, e Y.-T. Im, *An experimental study of fatigue strength for adhesively bonded tubular single lap joints*. The Journal of Adhesion, 1991. **35**(1): p. 39-53.
26. Canyurt, O.E., *Fatigue strength estimation of adhesively bonded tubular joint using genetic algorithm approach*. International journal of mechanical sciences, 2004. **46**(3): p. 359-370.
27. Loctite, *Loctite Worldwide Design Handbook: 1996-97*. 1995, Düsseldorf, Alemanha: Loctite Corporation.
28. Sekercioglu, T., A. Gulsoz, e H. Rende, *The effects of bonding clearance and interference fit on the strength of adhesively bonded cylindrical components*. Materials design, 2005. **26**(4): p. 377-381.
29. Knox, E., M. Cowling, e S. Hashim, *Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes*. International journal of fatigue, 2000. **22**(6): p. 513-519.
30. da Silva, L.F., A. Pirondi, e A. Öchsner, *Hybrid adhesive joints*. Vol. 6. 2011, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
31. Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Hoboken, Nova Jersey, EUA: John Wiley & Sons.
32. Öchsner, A. e J. Gegner, *Critical analysis of the substrate deformation correction in the thick-adherend tensile-shear test*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2004. **24**(1): p. 37-41.
33. Sato, C.a. e K. Ikegami, *Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2000. **20**(1): p. 17-25.

34. Da Silva, L., V. Esteves, e F. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, 2011. **42**(5): p. 460-470.
35. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
36. Yamashita, M., H. Kenmotsu, e T. Hattori, *Dynamic crush behavior of adhesive-bonded aluminum tubular structure—Experiment and numerical simulation*. *Thin-Walled Structures*, 2013. **69**: p. 45-53.
37. Friedman, K., J. Hutchinson, E. Weerth, e D. Mihora, *Transit bus design effects utilizing improved steel or fiber reinforced composite structures*. 2007, SAE Technical Paper.
38. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2008, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
39. Teixeira, L.M.B.S., *Caracterização do comportamento mecânico de juntas de sobreposição simples coladas com adesivos estruturais*. 2000, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
40. da Silva, L.F., P.J. das Neves, R. Adams, A. Wang, e J. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints—Part II: Comparative study*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009. **29**(3): p. 331-341.
41. Gleich, D., M. Van Tooren, e A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*. *Journal of adhesion science technology*, 2001. **15**(9): p. 1091-1101.
42. Adams, R. e N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *Journal of strain analysis*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
43. Grant, L., R. Adams, e L.F. da Silva, *Effect of the temperature on the strength of adhesively bonded single lap and T joints for the automotive industry*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2009. **29**(5): p. 535-542.
44. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
45. Adams, R. e J. Harris, *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 1987. **7**(2): p. 69-80.
46. Kishore, A.N. e N.S. Prasad, *An experimental study of Flat-Joggle-Flat bonded joints in composite laminates*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2012. **35**: p. 55-58.
47. Yan, Z.-M., M. You, X.-S. Yi, X.-L. Zheng, e Z. Li, *A numerical study of parallel slot in adherend on the stress distribution in adhesively bonded aluminum single lap joint*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2007. **27**(8): p. 687-695.
48. Hart-Smith, L., *Stress analysis- A continuum mechanics approach(in adhesive bonded joints)*. *Developments in adhesives- 2*. London, Applied Science Publishers, 1981: p. 1-44.
49. Penado, F.E., *A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 1998. **11**(3): p. 272-287.
50. Panigrahi, S. 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 Composites*, 2007. **26**(2): p. 183-201.

51. Harris, J. e R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
52. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
53. Al-Zubaidy, H., X. Zhao, e R. Al-Mahaidi, *Effect of impact tensile load on strength of CFRP bonded steel plate joints*. Procedia engineering, 2011. **14**: p. 1312-1317.
54. Charalambides, M., A. Kinloch, e F. Matthews, *Strength prediction of bonded joints*. Bolted/Bonded Joints in Polymeric Composites, 1997.
55. Whitney, J.M. e R. Nuismer, *Stress fracture criteria for laminated composites containing stress concentrations*. Journal of composite materials, 1974. **8**(3): p. 253-265.
56. 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.
57. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
58. Dillard, D.A., H.K. Singh, D.J. Pohlit, e J.M. Starbuck, *Observations of decreased fracture toughness for mixed mode fracture testing of adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1515-1530.
59. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer. p. 1-93.
60. 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 & Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
61. Cornec, A., I. Scheider, e K.-H. Schwalbe, *On the practical application of the cohesive model*. Engineering fracture mechanics, 2003. **70**(14): p. 1963-1987.
62. Wang, Y., J. Chen, e H. Li, *Improved cohesive zone model and its application in interface contact analysis*. Acta metallurgica sinica, 2008. **21**(4): p. 295-302.
63. Khoramishad, H., A. Crocombe, K. Katnam, e I. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
64. Daudeville, L. e P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
65. Voyiadjis, G.Z. e P.I. Kattan, *Damage mechanics*. 2005: CRC Press.
66. 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*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
67. Mubashar, A., I. Ashcroft, e A. Crocombe, *Modelling damage and failure in adhesive joints using a combined XFEM-cohesive element methodology*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(8): p. 682-697.
68. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.

69. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
70. Machado, J., E. Marques, e L.F. da Silva, *Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(6): p. 421-452.
71. Khan, A.S., O. Lopez-Pamies, e R. Kazmi, *Thermo-mechanical large deformation response and constitutive modeling of viscoelastic polymers over a wide range of strain rates and temperatures*. International Journal of Plasticity, 2006. **22**(4): p. 581-601.
72. Iwamoto, T., T. Nagai, e T. Sawa, *Experimental and computational investigations on strain rate sensitivity and deformation behavior of bulk materials made of epoxy resin structural adhesive*. International Journal of Solids Structures, 2010. **47**(2): p. 175-185.
73. Cowper, G.R. e P.S. Symonds, *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. 1957, Brown Univ Providence Ri.
74. Ludwik, P., *Elemente der technologischen Mechanik*. 2013, Heidelberg, Alemanha: Springer-Verlag.
75. Goglio, L., L. Peroni, M. Peroni, e M. Rossetto, *High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive*. International journal of adhesion & Adhesives, 2008. **28**(7): p. 329-339.
76. Crocombe, A., *Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM73 adhesive*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 1995. **15**(1): p. 21-27.
77. Valente, J.P.A., *Estudo de alterações geométricas em juntas adesivas solicitadas ao impacto*. 2017, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
78. da Silva, M.R.G., *Impact of mixed adhesive joints for the automotive industry*. 2015, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
79. Standard, A.S.t.m, *D1002-10*. Standard test method for apparent shear strength of single-lap-joint adhesively bonded metal specimens by tension loading. 2010, West Conshohocken: ASTM International.
80. Standardization, I.O.f., *ISO 4587:2003, Adhesives - Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*. 2003.
81. Marques, E., M. Banea, L. da Silva, R. Carbas, e C. Sato, *Effect of Low Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Energy of a Room Temperature Vulcanizing Silicone Adhesive*. 2016.
82. da Silva, L., R. da Silva, J. Chousal, e A. Pinto, *Alternative Methods to Measure the Adhesive Shear Displacement in the Thick Adherend Shear Test*. Journal of Adhesion Science and Technology. 2008. **22**(1): p. 15-29 (15) 15.
83. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
84. da Silva, L.F.M., F.A.C.R.G. de Magalhães, F.J.P. Chaves, e M.F.S.F. de Moura, *Mode II Fracture Toughness of a Brittle and a Ductile Adhesive as a Function of the Adhesive Thickness*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(9): p. 891-905.
85. Systèmes, D.D., *ABAQUS Version 6.14*. 2014.

86. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
87. 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.
88. 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.
89. *3M Scotch-Weld Structural Plastic Adhesive Technical Data*. 2016.
90. Reedy Jr, E.D., *Chapter 5 - Strength of butt and sharp-cornered joints A2 - Chaudhury, M*, in *Adhesion Science and Engineering*, A.V. Pocius, Editor. 2002, Elsevier Science B.V.: Amsterdam. p. 145-192.
91. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
92. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
93. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
94. 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.
95. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
96. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1): p. 147-161.
97. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
98. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
99. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
100. Nunes, S., R. Campilho, F. Da Silva, C. De Sousa, T. Fernandes, M. Banea, e L. Da Silva, *Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.