



Estudo de alterações geométricas em juntas adesivas solicitadas ao impacto

JOÃO PEDRO AFONSO VALENTE

novembro de 2017

ESTUDO DE ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS EM JUNTAS ADESIVAS SOLICITADAS AO IMPACTO

João Pedro Afonso Valente

1101076

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DE ALTERAÇÕES GEOMÉTRICAS EM JUNTAS ADESIVAS SOLICITADAS AO IMPACTO

João Pedro Afonso Valente

1101076

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação do Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Doutor Eduardo André de Sousa Marques, do Engenheiro José Joaquim da Mota Machado e do Doutor Lucas Filipe Martins da Silva.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho, Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Adjunto, ISEP

Coorientadores

Doutor Eduardo André de Sousa Marques, Professor Adjunto Convidado, ISEP

Engenheiro José Joaquim da Mota Machado, Investigador, FEUP

Doutor Lucas Filipe Martins da Silva, Professor Associado, FEUP

Arguente

Doutor Abílio Manuel Pinho de Jesus, Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e aos meus coorientadores Doutor Eduardo André de Sousa Marques, Engenheiro José Joaquim da Mota Machado e Doutor Lucas Filipe Martins da Silva, pela oportunidade que me foi concedida e por todo o apoio e disponibilidade prestada durante toda a dissertação.

Ao meu amigo Afonso Vilaça, pelo auxílio prestado com o *software* R® e ambiente de desenvolvimento integrado RStudio®.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, pelos conhecimentos transmitidos, necessários para a elaboração deste trabalho.

Aos meus pais e à minha irmã, pelo apoio e incentivo ao longo de todo o meu percurso académico.

PALAVRAS CHAVE

Análise de Elementos Finitos; Impacto; Junta de sobreposição simples; Modelos de dano coesivo; Análise de tensões; Otimização geométrica.

RESUMO

A evolução industrial tem levado a uma implementação cada vez mais alargada de ligações adesivas. São inúmeras as vantagens apresentadas em relação a ligações mecânicas, como por exemplo a melhor distribuição de tensões, baixo peso e possibilidade de unir materiais dissimilares. Devido à variabilidade de desempenho das ligações adesivas em função das propriedades dos adesivos, é necessário validar ferramentas numéricas através do Método de Elementos Finitos (MEF). É possível potenciar o desempenho ao impacto de juntas adesivas, sem efetuar alterações de projeto complexas, com a variação de parâmetros de geometria ou pela introdução de alterações geométricas nos aderentes. Este trabalho compara os resultados de diferentes alterações geométricas numa junta de sobreposição simples (JSS), quando solicitada ao impacto, através de modelos de dano coesivo (MDC). As alterações geométricas principais implementadas são a variação do comprimento de sobreposição e a variação de espessura dos aderentes. As variações de geometria da JSS são feitas com a introdução de chanfros exteriores e interiores nos aderentes, assim como também são adicionados filetes de adesivo. De modo a observar os efeitos das alterações introduzidas em aderentes de aço com diferentes tipos de adesivos, são utilizados os adesivos Araldite® AV138 (rígido), 3M® DP8005 (dúctil) e Nagase Chemtex® XNR6852 E-2 (elevada tenacidade). É posteriormente feita a combinação das alterações geométricas que melhor resultado produzem. São analisadas as diferenças entre resultados obtidos por modelação 2D e 3D, e estudado o efeito da alteração do material dos aderentes. A técnica de MDC foi positivamente validada para a previsão da resistência de juntas adesivas ao impacto e foram definidas as geometrias de junta ótimas em função do adesivo aplicado.

KEYWORDS

Finite Element Method; Impact; Single-lap joint; Cohesive Zone Modelling; Stress analysis; Geometric optimization.

ABSTRACT

Industrial developments have led to an increasingly wide implementation of adhesive bonding. There are numerous advantages over mechanical joining methods, such as better stress distribution, low weight and the possibility of joining dissimilar materials. Due to the variability of adhesive bonding performance caused by different adhesive properties, it is necessary to validate Finite Element Method (FEM) tools. It is possible to increase the performance of adhesive joints when subjected to impact loadings, without making complex design changes, with the variation of geometric parameters or by modifying the adherends geometry.

This work compares the results of different geometric changes applied to a single-lap joint (SLJ), when subjected to impact, through Cohesive Zone Models (CZM). The main geometric changes implemented are the variation of the overlap length and the adherends thickness. Geometry modifications of the SLJ are made by introducing outer and inner chamfers into the adhesives, as well as adding adhesive fillets. To observe the effects of the modifications introduced in steel adherends with different types of adhesives, the adhesives Araldite® AV138 (stiff), 3M® DP8005 (ductile) and Nagase Chemtex® XNR6852 E-2 (high toughness) are used. The combination of the geometric changes that produce the best result is subsequently made. The differences between results obtained by 2D and 3D modeling are analyzed, and the effect of different adherends materials was studied. The CZM technique was validated for the impact strength prediction of adhesive joints and the optimal joint geometries were defined as a function of the adhesive.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

C3D8R	<i>8-node linear brick, reduced integration with hourglass control</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
COH2D4	<i>4-node two-dimensional cohesive element</i>
COH3D8	<i>8-node three-dimensional cohesive element</i>
CPE3	<i>3-node linear plane strain triangle</i>
CPE4R	<i>4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration, hourglass control</i>
CSTRESS	<i>Contact stresses</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
LE	<i>Logarithmic strain components</i>
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendidos
PE	<i>Plastic strain components</i>
PEEQ	<i>Equivalent plastic strain</i>
RF	<i>Reaction forces and moments</i>
S	<i>Stress components and invariants</i>

SDEG	<i>Scalar stiffness degradation</i>
SHPB	<i>Split Hopkinson Pressure Bar</i>
STATUS	<i>Status (some failure and plasticity models)</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
TFFV	Técnica de Fecho da Fenda Virtual
U	<i>Translations and rotations</i>
V	<i>Translational and rotational velocities</i>

Lista de Símbolos Romanos

b	Largura do aderente
E	Módulo de elasticidade
E	Energia
g	Aceleração gravítica
G	Taxa de libertação de energia
G_c	Taxa crítica de libertação de energia
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
h₀	Altura de queda
L₀	Comprimento de sobreposição
m	Massa
P	Carga aplicada

P_{max}	Carga máxima aplicada
t	Espessura do aderente
t_n	Tensão coesiva à tração
t_{n0}	Resistência coesiva à tração
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_{s0}	Resistência coesiva ao corte
v	Velocidade

Lista de Símbolos Gregos

α	Ângulo de chanfro exterior
β	Ângulo de chanfro interior
δ	Deslocamento
δ_{Pmax}	Deslocamento correspondente à carga máxima aplicada
ϵ_f	Deformação de rotura à tração
θ	Ângulo de filete de adesivo
ν	Coefficiente de Poisson
ρ	Densidade
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de cedência à tração

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Representação da interface entre aderentes e adesivo (adaptado de [4])	7
Figura 2 - Influência do módulo de elasticidade dos aderentes na distribuição de tensões (adaptado de [8]).....	10
Figura 3 - Comparação de distribuição de tensões entre ligações rebitadas e adesivas (adaptado de [4])	11
Figura 4 – Exemplos de aplicação de juntas adesivas no Airbus A380 [10].....	12
Figura 5 – Exemplos de aplicação de adesivos na indústria automóvel [12]	13
Figura 6 - Exemplo de construção em aço e laminados de madeira [2]	14
Figura 7 - Tipos de carregamento aplicáveis a juntas adesivas [13].....	15
Figura 8 - Distorção causada por aplicação de carga (adaptado de [3]).....	15
Figura 9 - Modos de fratura de juntas adesivas [14]	16
Figura 10 - Diferentes tipos de rotura (adaptado de [4])	16
Figura 11 - Configurações de juntas adesivas mais comuns [6]	18
Figura 12 - Efeito da introdução de chanfro na distribuição de tensões de corte [3]	19
Figura 13 - Exemplos de filetes de adesivo (adaptado de [4]).....	20
Figura 14 - Distribuição de tensões de corte em juntas híbridas (adaptado de [17])	21
Figura 15 - Ensaio de tração em provetes maciços (adaptado de [22])	22
Figura 16 - Ensaio losipescu (a) provetes maciços (b) junta adesiva (adaptado de [22]).....	23
Figura 17 – Montagem para ensaio Arcan [22]	23
Figura 18 - Proвете para ensaio DCB (adaptado de [22])	25
Figura 19 – Configuração de ensaio ENF [22]	25
Figura 20 - Ensaio de impacto em blocos (I) paralelismo (II) afastado da zona adesiva (III) próximo da zona adesiva	26
Figura 21 - Diagrama de funcionamento do ensaio SHPB (adaptado de [4])	26
Figura 22 - Esquema de teste de impacto por queda de peso [36]	27
Figura 23 - Influência da taxa de carregamento na tensão de corte [73]	35
Figura 24 - Influência do número de camadas de CFRP na resistência em cobre-junta dupla [74]	36

Figura 25 - Comparação de impacto repetido nos adesivos Loctite 9466 e Scotch DP460 [75]	37
Figura 26 – Comparação de distribuição de tensões entre impacto e estático [77]	38
Figura 27 - Comparação de deslocamento entre modelo de forma fechada e MEF [69]	39
Figura 28 - Efeito da orientação das fibras de reforço na tensão de corte [78]	39
Figura 29 - Comparação de resultados numéricos com experimentais em condições quasi-estáticas [79]	40
Figura 30 - Exemplo de visualização de resultado SDEG	43
Figura 31 - Controlo de malha no modelo de validação.....	44
Figura 32 - Atribuição de materiais no modelo de validação	44
Figura 33 - Visualização da malha do modelo de validação	44
Figura 34 - Condições fronteira [1].....	45
Figura 35 - Aplicação de velocidade inicial	45
Figura 36 – Lei triangular do modelo de dano coesivo.....	46
Figura 37 - Geometria da JSS de validação	48
Figura 38 - Sistema de fixação para ensaio ao impacto (adaptado de [100])	52
Figura 39 – Curva P- δ de validação do adesivo RTV106	53
Figura 40 - Comparação dos resultados obtidos com valores de referência para o adesivo RTV106	54
Figura 41 - Curva P- δ de validação do adesivo AV138.....	55
Figura 42 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo AV138	55
Figura 43 - Curva P- δ de validação do adesivo DP8005.....	56
Figura 44 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo DP8005	57
Figura 45 - Curva P- δ de validação do adesivo XNR6852 E-2	57
Figura 46 - Comparação do resultado obtido com valores de referência com o adesivo XNR6852 E-2	58
Figura 47 - Propagação de tensões após impacto com o adesivo AV138	59
Figura 48 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de L_0	62
Figura 49 – Visualização da malha do modelo com $L_0=12,5$ mm	62
Figura 50 - Controlo de malha no modelo com $L_0=12,5$ mm	63
Figura 51 - Atribuição de materiais no modelo com $L_0=12,5$ mm.....	63

Figura 52 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0	64
Figura 53 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0	65
Figura 54 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de L_0	66
Figura 55 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de L_0	66
Figura 56 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	67
Figura 57 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	68
Figura 58 - Curva P- δ com o adesivo AV138 em função de L_0	69
Figura 59 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de L_0	69
Figura 60 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de L_0	71
Figura 61 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de L_0	72
Figura 62 - Curva P- δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	73
Figura 63 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	74
Figura 64 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $L_0=50$ mm	76
Figura 65 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de t.....	76
Figura 66 - Visualização da malha do modelo com t=3 mm	76
Figura 67 - Controlo de malha no modelo com t=3 mm	77
Figura 68 - Atribuição de materiais no modelo com t=3 mm.....	77
Figura 69 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de t.....	78
Figura 70 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de t	79
Figura 71 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de t.....	79
Figura 72 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de t	80
Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t	80
Figura 74 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t	81
Figura 75 - Curva P- δ com o adesivo AV138 em função de t.....	82
Figura 76 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de t.....	82
Figura 77 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de t.....	83
Figura 78 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de t.....	84
Figura 79 - Curva P- δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t	85

Figura 80 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t	86
Figura 81 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para t=1 mm	87
Figura 82 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de α	88
Figura 83 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=7,5^\circ$	88
Figura 84 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=15^\circ$	88
Figura 85 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=30^\circ$	89
Figura 86 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=45^\circ$	89
Figura 87 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=60^\circ$	89
Figura 88 - Controlo de malha no modelo com $\alpha=45^\circ$	90
Figura 89 - Atribuição de materiais no modelo com $\alpha=45^\circ$	90
Figura 90 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de α	91
Figura 91 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de α	91
Figura 92 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de α	92
Figura 93 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de α	93
Figura 94 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	93
Figura 95 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	94
Figura 96 - Curva P- δ com o adesivo AV138 em função de α	95
Figura 97 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de α	95
Figura 98 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de α	96
Figura 99 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de α	97
Figura 100 - Curva P- δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	98
Figura 101 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	99
Figura 102 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $\alpha=7,5^\circ$	100
Figura 103 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de β	101
Figura 104 - Visualização da malha do modelo com $\beta=7,5^\circ$	101
Figura 105 - Visualização da malha do modelo com $\beta=15^\circ$	101
Figura 106 - Visualização da malha do modelo com $\beta=30^\circ$	102
Figura 107 - Visualização da malha do modelo com $\beta=45^\circ$	102

Figura 108 - Visualização da malha do modelo com $\beta=60^\circ$	102
Figura 109 - Controlo de malha no modelo com $\beta=45^\circ$	103
Figura 110 - Atribuição de materiais no modelo com $\beta=45^\circ$	103
Figura 111 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de β	104
Figura 112 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de β	104
Figura 113 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de β	105
Figura 114 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de β	106
Figura 115 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	106
Figura 116 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	107
Figura 117 - Curva P- δ com o adesivo AV138 em função de β	108
Figura 118 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de β	108
Figura 119 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de β	110
Figura 120 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de β	110
Figura 121 - Curva P- δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	112
Figura 122 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	112
Figura 123 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $\beta=15^\circ$	113
Figura 124 - Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de θ	114
Figura 125 - Visualização da malha do modelo com $\theta=7,5^\circ$	114
Figura 126 - Visualização da malha do modelo com $\theta=15^\circ$	114
Figura 127 - Visualização da malha do modelo com $\theta=30^\circ$	115
Figura 128 - Visualização da malha do modelo com $\theta=45^\circ$	115
Figura 129 - Visualização da malha do modelo com $\theta=60^\circ$	115
Figura 130 - Controlo de malha no modelo com $\theta=45^\circ$	116
Figura 131 - Atribuição de materiais no modelo com $\theta=45^\circ$	116
Figura 132 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de θ	117
Figura 133 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de θ	117
Figura 134 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de θ	118
Figura 135 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de θ	119

Figura 136 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	119
Figura 137 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	120
Figura 138 - Curva P- δ com o adesivo AV138 em função de θ	120
Figura 139 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de θ	121
Figura 140 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de θ	122
Figura 141 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de θ	122
Figura 142 - Curva P- δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	124
Figura 143 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	124
Figura 144 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $\theta=15^\circ$	125
Figura 145 - Malha da configuração ótima para adesivo AV138.....	126
Figura 146 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração ótima do adesivo AV138.....	127
Figura 147 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração ótima do adesivo AV138	128
Figura 148 - Curva P- δ para configuração ótima com o adesivo AV138.....	129
Figura 149 - Valores máximos obtidos para configuração ótima com o adesivo AV138.....	129
Figura 150 - Malha da configuração ótima para o adesivo DP8005	130
Figura 151 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração ótima do adesivo DP8005.....	131
Figura 152 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração ótima do adesivo DP8005	132
Figura 153 - Curva P- δ para configuração ótima com o adesivo DP8005.....	132
Figura 154 - Valores máximos obtidos para a configuração ótima com o adesivo DP8005.....	133
Figura 155 - Malha da configuração ótima para o adesivo XNR6852 E-2.....	134
Figura 156 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração ótima do adesivo XNR6852 E-2	135
Figura 157 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração ótima do adesivo XNR6852 E-2.....	135
Figura 158 - Curva P- δ para configuração ótima com o adesivo XNR6852 E-2	136
Figura 159 - Valores máximos obtidos para a configuração ótima com o adesivo XNR6852 E-2	137
Figura 160 - Malha do modelo 3D	138
Figura 161 - Distribuição 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138.....	139
Figura 162 - Distribuição 3D de tensões σ_y com o adesivo AV138	139
Figura 163 - Comparação 2D vs. 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138	140

Figura 164 – Comparação 2D vs. 3D de tensões σ_y com o adesivo AV138.....	140
Figura 165 - Comparação de curva P- δ entre modelos numéricos 2D e 3D com o adesivo AV138	141
Figura 166 - Comparação entre 2D e 3D dos valores máximos obtidos com o adesivo AV138	142
Figura 167 - Distribuição 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005.....	142
Figura 168 - Distribuição 3D de tensões σ_y com o adesivo DP8005	143
Figura 169 - Comparação 2D vs. 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005	143
Figura 170 - Comparação 2D vs. 3D de tensões σ_y com o adesivo DP8005.....	144
Figura 171 - Comparação de curva P- δ entre modelos numéricos 2D e 3D com o adesivo DP8005	145
Figura 172 - Comparação entre 2D e 3D dos valores máximos obtidos com o adesivo DP8005	145
Figura 173 - Distribuição 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2	146
Figura 174 - Distribuição 3D de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2.....	147
Figura 175 - Comparação 2D vs. 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2.....	147
Figura 176 - Comparação 2D vs. 3D de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2	148
Figura 177 - Comparação de curva P- δ entre modelos numéricos 2D e 3D com o adesivo XNR6852 E-2	149
Figura 178 - Comparação entre 2D e 3D dos valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2	149
Figura 179 – Geometria e dimensões das JSS com camadas interlaminar (verde) e intralaminar (vermelho)	151
Figura 180 - Comparação de distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em diferentes aderentes	152
Figura 181 - Comparação de distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em diferentes aderentes	153
Figura 182 - Curva P- δ para o adesivo AV138 em diferentes aderentes	153
Figura 183 - Comparação de valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em diferentes aderentes	154
Figura 184- Deformação plástica nos aderentes de alumínio com o adesivo AV138.....	155
Figura 185 - Comparação de distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes	155
Figura 186 - Comparação de distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes	156
Figura 187 - Curva P- δ para o adesivo DP8005 em diferentes aderentes	157

Figura 188 - Comparação de valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes	158
Figura 189 - Deformação plástica nos aderentes de alumínio com o adesivo DP8005	158
Figura 190 - Comparação de distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes	159
Figura 191 - Comparação de distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes	160
Figura 192 – Curva P- δ para o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes	160
Figura 193 – Curva P- δ para o adesivo XNR6852 E-2 em aderentes de aço e CFRP	161
Figura 194 - Comparação de valores máximo obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes	161
Figura 195 - Deformação plástica nos aderentes de alumínio com o adesivo XNR6852 E-2	162

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Evolução dos adesivos ao longo das décadas [3].....	8
Tabela 2 - Propriedades do aderente [1].....	49
Tabela 3 – Propriedades estáticas dos adesivos	50
Tabela 4 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [1].....	51
Tabela 5 - Número de elementos em função de L_0	63
Tabela 6 – Influência de L_0 na carga máxima com o adesivo AV138.....	70
Tabela 7 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de L_0	71
Tabela 8 - Influência de L_0 na carga máxima com o adesivo DP8005	72
Tabela 9 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de L_0	73
Tabela 10 - Influência de L_0 na carga máxima com o adesivo XNR6852 E-2	75
Tabela 11 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	75
Tabela 12 - Número de elementos em função de t	77
Tabela 13 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de t	83
Tabela 14 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de t	85
Tabela 15 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t	87
Tabela 16 - Número de elementos em função de α	89
Tabela 17 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de α	96
Tabela 18 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de α	98
Tabela 19 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α	100
Tabela 20 - Número de elementos em função de β	102
Tabela 21 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de β	109
Tabela 22 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de β	111
Tabela 23 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β	113
Tabela 24 - Número de elementos em função de θ	115
Tabela 25 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de θ	121
Tabela 26 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de θ	123

Tabela 27 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ	125
Tabela 28 - Número de elementos da configuração ótima para o adesivo AV138	127
Tabela 29 – Energia absorvida com adesivo AV138 na sua configuração ótima	130
Tabela 30 - Número de elementos da configuração ótima para o adesivo DP8005	130
Tabela 31 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 na sua configuração ótima.....	133
Tabela 32 - Número de elementos da configuração ótima para o adesivo XNR6852 E-2	134
Tabela 33 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 na sua configuração ótima	137
Tabela 34 - Número de elementos por tipo na modelação 3D	138
Tabela 35 - Propriedades dos aderentes de alumínio [112].....	150
Tabela 36 – Propriedades elásticas da CFRP [79]	150
Tabela 37 - Propriedades interlaminares da CFRP [79]	151

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2	OBJETIVOS	1
1.3	ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	LIGAÇÕES ADESIVAS	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	9
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	11
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	14
2.1.4	Adesivos estruturais	17
2.1.5	Configurações possíveis de junta	18
2.1.6	Otimização geométrica das juntas	20
2.2	ENSAIO DE JUNTAS ADESIVAS	21
2.2.1	Testes estáticos	22
2.2.2	Testes dinâmicos/impacto	26
2.3	PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS	27
2.3.1	Solicitações estáticas	28
2.3.1.1	Modelos analíticos	28
2.3.1.2	Métodos numéricos	29
2.3.1.2.1	Mecânica dos meios contínuos	29

2.3.1.2.2	Mecânica da fratura	29
2.3.1.2.3	Modelos de dano coesivo	30
2.3.1.2.4	Mecânica do dano	31
2.3.1.2.5	MEFX	31
2.3.2	Solicitações dinâmicas/impacto	32
2.3.2.1	Modelos analíticos	32
2.3.2.1.1	Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos	32
2.3.2.1.2	Modelo Voigt/Maxwell	32
2.3.2.1.3	Modelo Cowper-Symonds	33
2.3.2.1.4	Modelo Johnson-Cook [58]	33
2.3.2.1.5	Modelos de sobretensão	33
2.3.2.1.6	Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação	34
2.3.2.2	Métodos numéricos	34
2.4	COMPORTAMENTO DE JUNTAS ADESIVAS SUJEITAS A IMPACTO	35
2.4.1	Avaliação experimental	35
2.4.2	Previsão numérica	37
3	DESENVOLVIMENTO	43
3.1	TÉCNICA NUMÉRICA PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO AO IMPACTO	43
3.1.1	Condições da análise numérica	43
3.1.2	Modelos de dano coesivo	46
3.1.3	Validação da técnica numérica	48
3.1.3.1	Geometria da junta	48

3.1.3.2	Materiais utilizados.....	48
3.1.3.2.1	Aderentes.....	48
3.1.3.2.2	Adesivos.....	49
3.1.3.3	Ensaio de impacto [1].....	51
3.1.3.4	Resultados obtidos.....	53
3.1.3.5	Discussão dos resultados.....	58
3.2	ESTUDO NUMÉRICO.....	60
3.2.1	Geometria da junta.....	60
3.2.2	Materiais utilizados.....	61
3.2.2.1	Aderentes.....	61
3.2.2.2	Adesivos.....	61
3.2.3	Estudo dos parâmetros geométricos principais.....	62
3.2.3.1	Comprimento de sobreposição.....	62
3.2.3.1.1	Distribuições de tensões.....	63
3.2.3.1.2	Resistência das juntas.....	68
3.2.3.2	Espessura dos aderentes.....	76
3.2.3.2.1	Distribuições de tensões.....	78
3.2.3.2.2	Resistência das juntas.....	81
3.2.4	Estudo de alterações geométricas.....	88
3.2.4.1	Chanfro exterior dos aderentes.....	88
3.2.4.1.1	Distribuições de tensões.....	90
3.2.4.1.2	Resistência das juntas.....	94

3.2.4.2	Chanfro interior dos aderentes.....	101
3.2.4.2.1	Distribuições de tensões	103
3.2.4.2.2	Resistência das juntas	107
3.2.4.3	Filete de adesivo	114
3.2.4.3.1	Distribuições de tensões	116
3.2.4.3.2	Resistência das juntas	120
3.2.5	Combinação de alterações geométricas ótimas.....	126
3.2.5.1	Huntsman Araldite AV138	126
3.2.5.1.1	Distribuições de tensões	127
3.2.5.1.2	Resistência das juntas	128
3.2.5.2	3M DP8005	130
3.2.5.2.1	Distribuições de tensões	131
3.2.5.2.2	Resistência das juntas	132
3.2.5.3	Nagase Chemtex XNR6852 E-2	134
3.2.5.3.1	Distribuições de tensões	134
3.2.5.3.2	Resistência das juntas	135
3.2.6	Modelo numérico 3D.....	137
3.2.6.1	Huntsman Araldite AV138	138
3.2.6.1.1	Distribuições de tensões	138
3.2.6.1.2	Resistência da junta	141
3.2.6.2	3M DP8005	142
3.2.6.2.1	Distribuições de tensões	142

3.2.6.2.2	Resistência da junta	144
3.2.6.3	Nagase Chemtex XNR6852 E-2	146
3.2.6.3.1	Distribuições de tensões	146
3.2.6.3.2	Resistência da junta	148
3.2.7	Alteração de material dos aderentes	149
3.2.7.1	Huntsman Araldite AV138	152
3.2.7.1.1	Distribuição de tensões.....	152
3.2.7.1.2	Resistência da junta	153
3.2.7.2	3M DP8005	155
3.2.7.2.1	Distribuição de tensões.....	155
3.2.7.2.2	Resistência da junta	156
3.2.7.3	Nagase Chemtex XNR6852 E-2	158
3.2.7.3.1	Distribuição de tensões.....	159
3.2.7.3.2	Resistência da junta	160
4	CONCLUSÕES.....	165
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	169

INTRODUÇÃO

1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO

1.2 OBJETIVOS

1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A evolução industrial tem levado a uma implementação cada vez mais alargada de ligações adesivas. As possibilidades potenciadas, tal como a união de materiais dissimilares, e as suas inúmeras vantagens, das quais se destacam a melhor distribuição de tensões, o seu baixo peso e rapidez e possibilidade de automatização de fabrico, faz das ligações adesivas uma alternativa viável.

Existe uma grande variação de propriedades nos adesivos, sendo que duas das propriedades com grande influência no desempenho de uma junta são a rigidez e resistência. Os adesivos variam desde rígidos e muito resistentes até dúcteis de baixa resistência, passando pelos adesivos com elevada resistência e rigidez intermédia. Os adesivos com elevada resistência e rigidez resultam muitas vezes numa ligação adesiva com baixa resistência, devido à sua fragilidade. Devido à variabilidade de desempenho das juntas em função das propriedades dos adesivos, é necessário validar ferramentas numéricas que possam ser implementadas em ambiente de projeto. Utilizando o Método de Elementos Finitos (MEF), é possível reduzir o tempo de projeto e paralelamente os custos associados.

É possível potenciar o desempenho ao impacto de juntas adesivas sem efetuar alterações de projeto complexas, com a variação de parâmetros de geometria – comprimento de sobreposição ou espessura dos aderentes – ou pela introdução de alterações geométricas – chanfros nos aderentes ou filetes de adesivo. Pelo facto de diferentes adesivos com diferentes propriedades apresentarem resultados diferentes perante alterações geométricas idênticas é necessário analisar a influência das alterações introduzidas para cada caso específico. Através dos resultados produzidos é possível proceder à otimização de geometria para solicitações de impacto.

1.2 Objetivos

O objetivo primário deste trabalho é o estudo da influência da geometria dos aderentes numa junta de sobreposição simples (JSS) quando a mesma é solicitada ao impacto. De

modo a verificar o impacto na resistência máxima de cada alteração introduzida, pretende-se fazer a simulação numérica da aplicação de 3 diferentes adesivos em aderentes de aço para cada caso apresentado. São utilizados adesivos com propriedades distintas: Araldite® AV138, 3M® DP8005 e Nagase Chemtex® XNR6852 E-2. O adesivo AV138 é caracterizado pela sua elevada rigidez e consequente fragilidade quando solicitado ao impacto. O adesivo DP8005 apresenta o menor módulo de rigidez e é caracterizado pela sua elevada ductilidade. Por último é utilizado o adesivo XNR6852 E-2, com um módulo de rigidez com valor intermédio e que tem como principal característica a sua elevada tenacidade. Dadas as distintas propriedades dos adesivos utilizados, obtêm-se resultados representativos para uma grande diversidade de tipos de adesivos existentes para o tipo de solicitação simulada. Inicialmente é efetuada a validação do modelo numérico por modelos de dano coesivo (MDC) utilizado por comparação entre resultados numéricos e experimentais, de forma a que posteriormente o modelo numérico possa ser usado para efeitos de otimização.

No estudo numérico de otimização, as alterações geométricas são aplicadas singularmente. Pretende iniciar-se a alteração de parâmetros principais, como o comprimento de sobreposição e a espessura dos aderentes, e de seguida introduzir alterações à geometria dos aderentes. Após análise dos resultados é feita a combinação de alteração de parâmetros que, em teoria, produz a resistência máxima para cada adesivo.

Complementarmente pretende também fazer-se a modelação 3D do modelo numérico sem alterações geométricas de modo a comparar a distribuição de tensões e carga máxima obtidas para cada adesivo, e fazer a respetiva comparação com o modelo 2D. O último objetivo consiste na alteração do material do aderente – originalmente em aço para alumínio ou fibra de carbono – de modo a mesurar a influência do aderente no desempenho de cada tipo de adesivo.

1.3 Organização do relatório

De modo a fazer uma correta distribuição dos conteúdos, esta dissertação encontra-se dividida em 5 diferentes capítulos.

No capítulo 1 é feita a contextualização do trabalho, são definidos os objetivos propostos e são enumerados os capítulos nos quais está contida a informação.

No capítulo 2 é feita a revisão bibliográfica sobre os conteúdos objeto de estudo nesta dissertação. É abordada a evolução dos adesivos ao longo da história, as suas vantagens

e desvantagens em relação a outros métodos de ligação e as suas principais aplicações. São descritos os diferentes tipos de esforços a que as juntas adesivas possam estar sujeitas e o tipo de rotura que podem apresentar. São de seguida apresentados os tipos de juntas mais comuns utilizados com adesivos estruturais e as otimizações a que os mesmos podem ser sujeitos. As diferentes metodologias de ensaio utilizadas neste domínio encontram-se divididas em testes estáticos ou dinâmicos. Este capítulo encerra com os diferentes métodos de previsão, analíticos ou numéricos existentes, e algumas investigações relevantes nesta área.

O capítulo 3 é iniciado com a descrição das condições do ensaio e o modelo numérico utilizado. Segue-se a validação do modelo numérico com base nos resultados obtidos por Silva [1], tanto experimentais como numéricos. São conjuntamente descritas as propriedades dos materiais utilizados. Após validação do método utilizado para previsão numérica, são apresentados os resultados de distribuição de tensões e carga máxima com a alteração dos parâmetros geométricos principais. Segue-se a apresentação dos mesmos resultados com a alteração da geometria dos aderentes. Recolhidos os resultados de alterações geométricas singulares, encontra-se a análise da configuração teoricamente ótima de alterações geométricas para cada adesivo. Na sequência do cumprimento dos objetivos principais desta dissertação, foram realizados ensaios numéricos com modelação 3D e alterados os aderentes utilizados, sem qualquer alteração geométrica. Estes resultados permitem analisar as diferenças entre modelação 2D e 3D para a taxa de deformação aplicada e estudar os diferentes comportamentos e resistências da junta adesiva com diferentes materiais.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões retiradas do trabalho desenvolvido. Com base nas conclusões apresentadas, são apresentadas sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS

2.2 ENSAIO DE JUNTAS ADESIVAS

2.3 PREVISÃO DE RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS

2.4 COMPORTAMENTO DE JUNTAS ADESIVAS SUJEITAS A IMPACTO

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Definem-se por ligações adesivas as ligações nas quais é aplicado um material na superfície de outros materiais de modo a criar uma ligação entre eles e capaz de resistir à separação [2]. O material ao qual se aplica o adesivo designa-se por aderente ou substrato. Existem dois conceitos importantes na ligação de adesivos aos aderentes, nomeadamente a interfase e interface. Interfase é a região em torno da ligação adesiva (Figura 1) na qual os materiais apresentam características físicas e químicas diferentes dos aderentes ou do adesivo em bruto. A interface está contida na interfase e corresponde à área física de contacto entre o adesivo e o aderente [3].

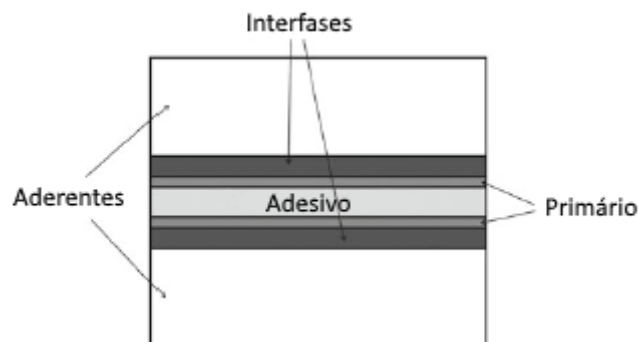


Figura 1 - Representação da interface entre aderentes e adesivo (adaptado de [4])

Existem várias teorias sobre o método de adesão seguidamente descritas ainda que nenhuma delas consiga justificar na totalidade o comportamento de juntas adesivas.

Uma das primeiras teorias apresentadas foi a da adesão que se baseia na penetração do adesivo em poros, cavidades, fendas e irregularidades de modo a causar o encravamento do adesivo no aderente. Segundo esta teoria, é essencial ter uma boa molhagem e o acabamento superficial é determinante para a resistência da ligação. De modo a promover uma boa adesão é essencial uma boa limpeza superficial, por exemplo, através de tratamentos superficiais.

A seguinte teoria tem como justificação a criação de ligações químicas, essencialmente dependente das forças de superfície. Segundo esta teoria, havendo proximidade entre as moléculas do adesivo e aderente, as forças de van der Waals permitem ter adsorção física. Assim sendo, há troca de eletrões entre moléculas dos dois materiais formando uma ligação entre ambos. Para que haja melhor ligação química entre adesivos e aderentes pode recorrer-se ao uso de agentes de ligação e promotores de adesão [5].

A teoria da difusão é apenas aplicável a materiais poliméricos, tanto aderente como adesivo. Com a aplicação de um solvente ou calor, desde que haja compatibilidade e miscibilidade entre o adesivo e o aderente, é criada uma ponte de ligação entre cadeias moleculares dos dois materiais.

Tabela 1 - Evolução dos adesivos ao longo das décadas [3]

Década aproximada de disponibilização comercial	Adesivo ou selante
Pré-1910	Cola de ossos de animais Cola de peixe Adesivos vegetais
1910	Fenol-formaldeídos Colas de caseína
1920	Acetato de celulose Resina alquídica Neopreno Adesivos de soja
1930	Ureia-formaldeído Filmes adesivos sensíveis à pressão Filmes adesivos de resina fenólica Colas de madeira de acetato de polivinil
1940	Nitrilo fenólico Borracha clorada Melamina formaldeído Vinilo fenólico Acrílicos Poliuretanos
1950	Epóxidos Cianoacrilatos Anaeróbios Ligas epóxidas
1960	Poliimidas <i>Polibenzimidazole</i> <i>Polyquinoxaline</i>
1970	Acrílicos de segunda geração Acrílicos sensíveis à pressão Poliuretanos estruturais
1980	Endurecedores para resinas termoendurecíveis Epóxidos à base de água Adesivos de contacto à base de água Filmes termoformáveis e espumas termoendurecíveis
1990	Epóxidos modificados com poliuretano Cura por calor Cura por luz ou ultra-violeta

Por último, existe também a teoria eletrostática. Esta teoria é particularmente aplicável a adesivos em fita, nos quais é necessário exercer pressão durante a sua aplicação. A força necessária ao arrancamento da fita é atribuída à troca de eletrões na interfase. Esta teoria não é universalmente aceite pelo facto de as forças electroestáticas não serem necessariamente a causa da ligação, podendo ser o resultado da mesma [6].

Os primeiros adesivos foram utilizados pelo Homem há milhares de anos. Eram utilizados por caçadores para criar armas de caça. Com o evoluir do tempo, vários materiais foram utilizados como adesivos e selantes para construções. As primeiras formas de adesivos e selantes recorriam à extração de produtos naturais tais como ossos, peles, peixe, leite e plantas [3, 4].

O início da industrialização dos adesivos teve início em volta do ano 1700. O primeiro registo de produção industrial é da década de 1690, na Holanda, sendo que a primeira patente foi registada em 1754 no Reino Unido [2]. Até 1920 quase a totalidade dos adesivos era de origem natural até que na década de 1940 surgiu a maior evolução na tecnologia de adesivos com a introdução de adesivos sintéticos (Tabela 1). O desenvolvimento de adesivos sintéticos permitiu melhorar a compatibilidade com diversos materiais, aumentar a resistência de modo a suportar cargas consideráveis e melhorar a resistência ao ambiente que os rodeia [3].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Para a correta seleção de um adesivo para uma determinada aplicação, devem considerar-se diversos parâmetros de modo a obter uma ligação adequada e mais eficaz para o projeto. O adesivo a utilizar deve ser escolhido de forma a garantir que formará uma ligação capaz de resistir às cargas que lhe serão transferidas em funcionamento, excetuando os casos em que os adesivos tenham apenas função selante. Adicionalmente, deve ser garantida a compatibilidade do adesivo com o material do aderente, ou até mesmo com os diferentes materiais no caso de haver contacto com aderentes de materiais dissimilares. A distribuição de tensões é influenciada pela rigidez dos aderentes, com maior uniformidade em aderentes rígidos (Figura 2), com influência na resistência das juntas adesivas [7]. A composição química tem uma elevada importância na seleção do adesivo. O tipo de junta a formar também é preponderante na seleção do adesivo, assim como o método de aplicação e modo de cura. A facilidade de acesso e os materiais envolvidos podem ser fator de exclusão sendo que, por exemplo, nos casos em que a cura esteja dependente da aplicação de calor deverá ser garantida a preservação da integridade dos aderentes. É também essencial considerar o

meio ambiente a que a junta adesiva está sujeita. O custo é uma variável a ser considerada, principalmente quando se trata de industrialização em larga escala.

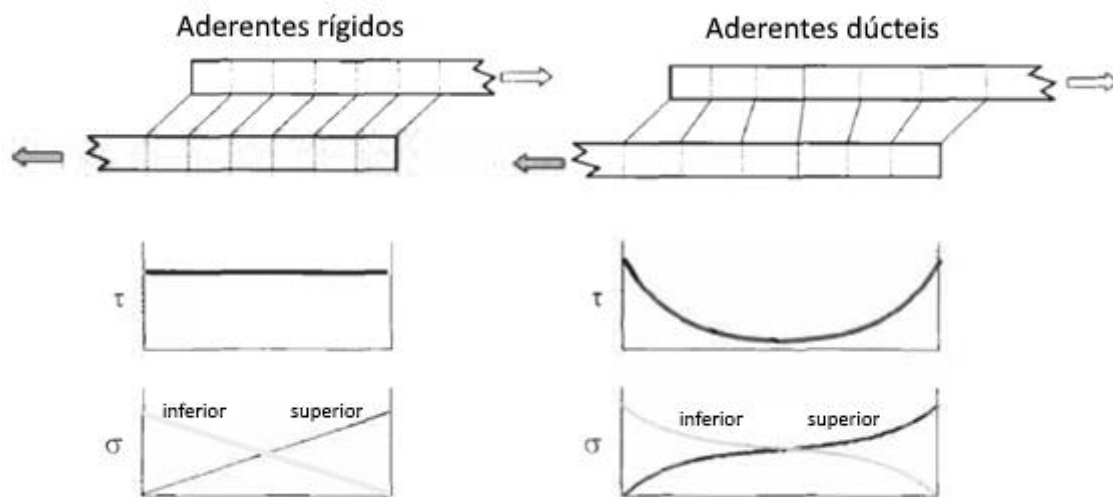


Figura 2 - Influência do módulo de elasticidade dos aderentes na distribuição de tensões (adaptado de [8])

As principais vantagens das ligações adesivas são as seguintes [6]:

- Distribuição mais uniforme de tensões em comparação com ligações mecânicas (Figura 3);
- Amortecimento de vibrações;
- Ligação de materiais dissimilares e com distintos coeficientes de expansão;
- Método conveniente e eficaz de ligar dois materiais podendo a aplicação do adesivo ser automatizada;
- Tornam o projeto mais flexível permitindo o uso de novos conceitos e materiais;
- Permitem ter estruturas com contornos regulares por dispensarem furos para rebites e parafusos ou marcas de soldadura;
- Contacto contínuo entre as duas superfícies ligadas;
- Redução de custos.

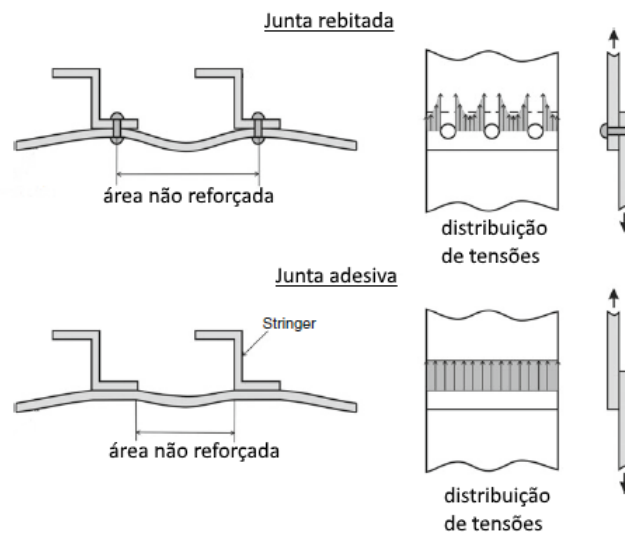


Figura 3 - Comparação de distribuição de tensões entre ligações rebitadas e adesivas (adaptado de [4])

As principais desvantagens das ligações adesivas são as seguintes [6]:

- Projeto da ligação deve eliminar ao máximo forças de arrancamento, clivagem e impacto;
- Necessário usar geometrias que evitem tensões localizadas;
- Limitada resistência a condições extremas, tais como o calor ou humidade;
- Necessária a utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição até cura do adesivo;
- Necessária preparação das superfícies;
- No caso de alguns adesivos, necessidade de fonte de calor para promover a cura do adesivo;
- Maior complexidade no controlo de qualidade;
- Ausência de critério universal de dimensionamento.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

A indústria aeronáutica e aeroespacial foi responsável pelo alavancar do desenvolvimento dos adesivos estruturais. Se inicialmente estes eram utilizados para formar laminados de madeira com a utilização de adesivos naturais, a introdução de diversos materiais metálicos – por exemplo alumínio e titânio – a par da introdução de materiais compósitos reforçados com fibra exigiu a evolução da tecnologia dos adesivos (Figura 4). De modo a colmatar a impossibilidade de ligação de alguns materiais por métodos convencionais – ligações mecânicas ou soldadura – a utilização de adesivos sintéticos foi crucial [9]. No caso da aviação, o uso de adesivos permite reduzir o peso

acrescentado reduzindo o consumo de combustível e emissões de CO₂ e outros gases poluentes. No caso da união adesiva de elementos da fuselagem, o melhor acabamento superficial permite melhorar o desempenho aerodinâmico.

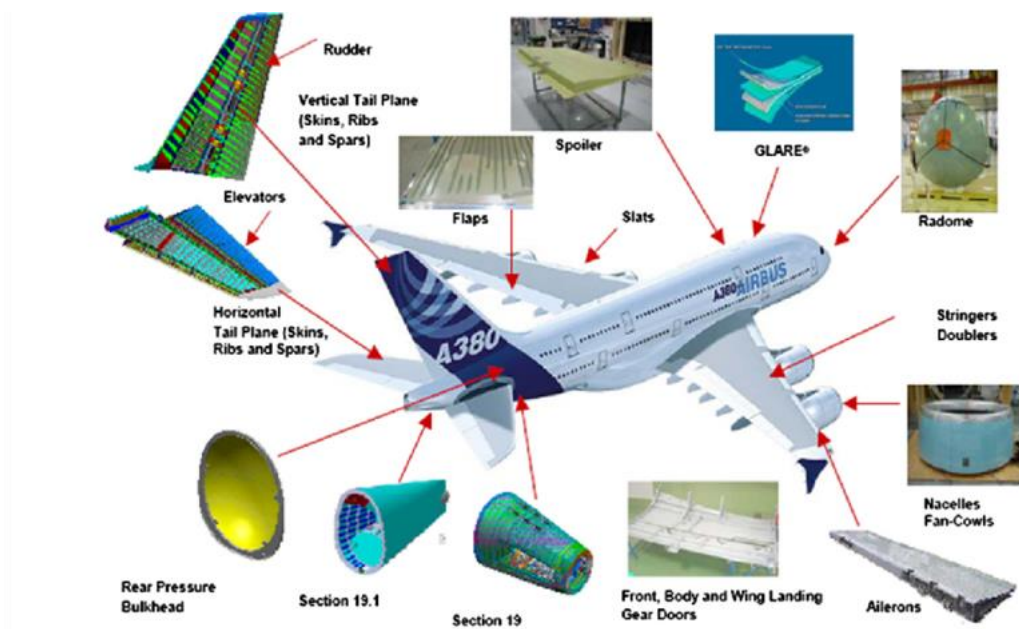


Figura 4 – Exemplos de aplicação de juntas adesivas no Airbus A380 [10]

A evolução dos adesivos sintéticos permitiu a substituição de numerosos elementos de ligação mecânicos – essencialmente ligações rebitadas – por ligações adesivas reduzindo a propensão do aparecimento de fissuras de fadiga, críticas ao longo da vida útil de uma aeronave, a par da redução do custo de produção. Os benefícios em relação aos métodos de ligação convencionais estendem-se com a possibilidade de unir materiais com diferentes coeficientes de expansão térmica, visto que em operação os aviões estão expostos a uma ampla gama de temperaturas [11].

A indústria dos transportes, especialmente a indústria automóvel, tem vindo a adotar cada vez mais ligações adesivas nos seus projetos. Sendo vastamente utilizada para aplicação de para-brisas devido à capacidade de funcionar também como selante, os adesivos passaram a ser utilizados na carroçaria dos automóveis com maior abundância (Figura 5).

A ligação de materiais dissimilares pode ser realizada com recurso a diversos processos de fabrico. A vantagem dos adesivos é a união de materiais compósitos. Adiciona-se o facto de criarem ligações resistentes à corrosão. Crucial nos dias de hoje, a inerente redução de peso final do projeto reduz o consumo de combustíveis. A indústria

automóvel dá também grande relevância à segurança em colisões, campo em que as ligações adesivas permitiram a criação de estruturas com melhor desempenho [4]. As indústrias ferroviária e naval beneficiam dos mesmos avanços tecnológicos.

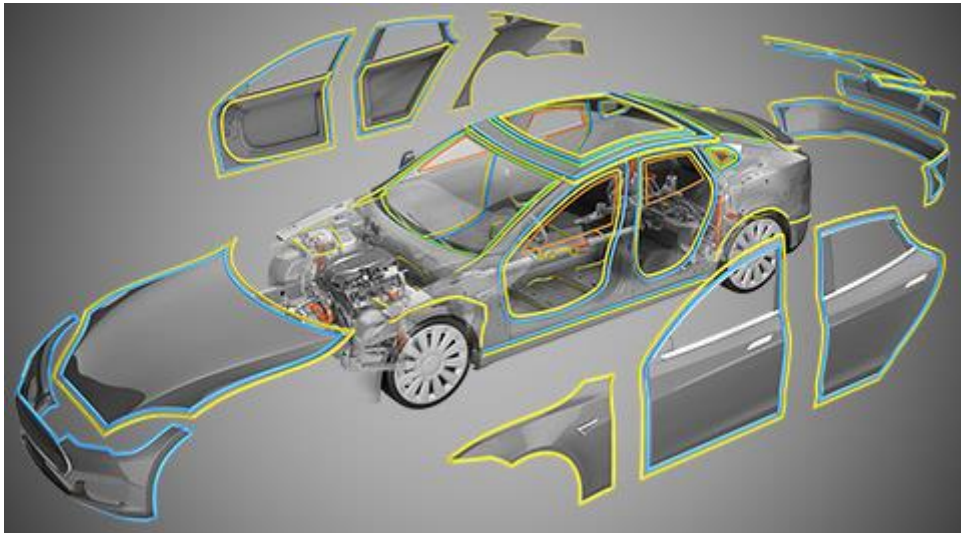


Figura 5 – Exemplos de aplicação de adesivos na indústria automóvel [12]

Na área da eletrónica, são usados adesivos para unir materiais com diferente rigidez e em aplicações que necessitem de isolamento elétrico. O refinamento dos processos de fabrico de semicondutores apenas foi possível devido ao facto de as ligações dos mesmos aos aderentes em que são colocados ser viabilizado pela aplicação de reduzidas quantidades de adesivos sintéticos [9].

No sector da construção civil os adesivos são aplicados na união de estruturas em sandwich para isolamentos térmicos, fabrico de laminados de madeira (Figura 6) e fixação de revestimentos de pisos [2]. São também usados pelas suas capacidades selantes em torno de caixilharias e tubagens [3].

O desenvolvimento tecnológico de adesivos sintéticos permitiu a criação de adesivos biocompatíveis. As suas utilizações mais comuns são a ortodontia, para fixação de aparelhos de correção, reparação de dentes pela possibilidade de cura imediata de adesivos com o auxílio de luz ultravioleta. É possível a sua utilização também para reparação de tecidos pós-cirurgia [4, 11].



Figura 6 - Exemplo de construção em aço e laminados de madeira [2]

Apesar das aplicações acima descritas serem alvo de maior atenção devido à sua complexidade, vários elementos que nos rodeiam têm a tecnologia dos adesivos em si incorporadas. A indústria do calçado faz uso deste método para unir solas [4], o mobiliário para união de diversos elementos, estando também presentes em cosméticos, embalagens, etc. Estão também presentes em aplicações não industriais, distribuídas no mercado de consumo. Os exemplos mais destacados são as fitas adesivas e os adesivos para bricolagem, hobbies e pequenas reparações [3].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

As juntas adesivas podem ser sujeitas a cinco tipos de carregamentos básicos: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento (Figura 7). Sempre que possível, devem ser projetadas de modo a serem sujeitas apenas a tensões de corte visto ser o tipo de carregamento para o qual se atinge a resistência máxima [6].

Embora seja possível idealizar juntas adesivas apenas para trabalho ao corte, a flexão dos aderentes pode causar aplicação de tensões combinadas, isto é, tensões de corte e arrancamento (Figura 8). Devido à complexidade prática de criar uniões com carregamento com um eixo axialmente imóvel ao longo da aplicação de carga, a generalidade das uniões apresenta uma combinação de dois ou mais tipos de carregamento.

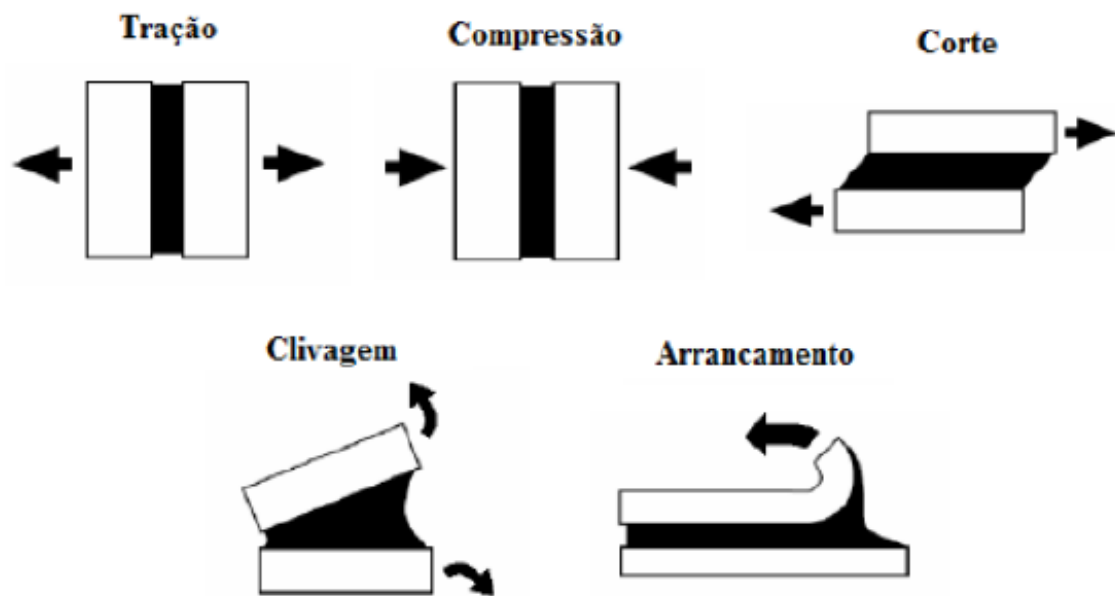


Figura 7 - Tipos de carregamento aplicáveis a juntas adesivas [13]

A propagação de uma fenda de rotura pode ocorrer em três diferentes modos (Figura 9). O modo I ocorre por abertura e os modos II e III ocorrem por corte. Enquanto no modo II a propagação da fenda ocorre na direção normal à frente da fenda, no modo III a propagação ocorre de forma paralela [6].

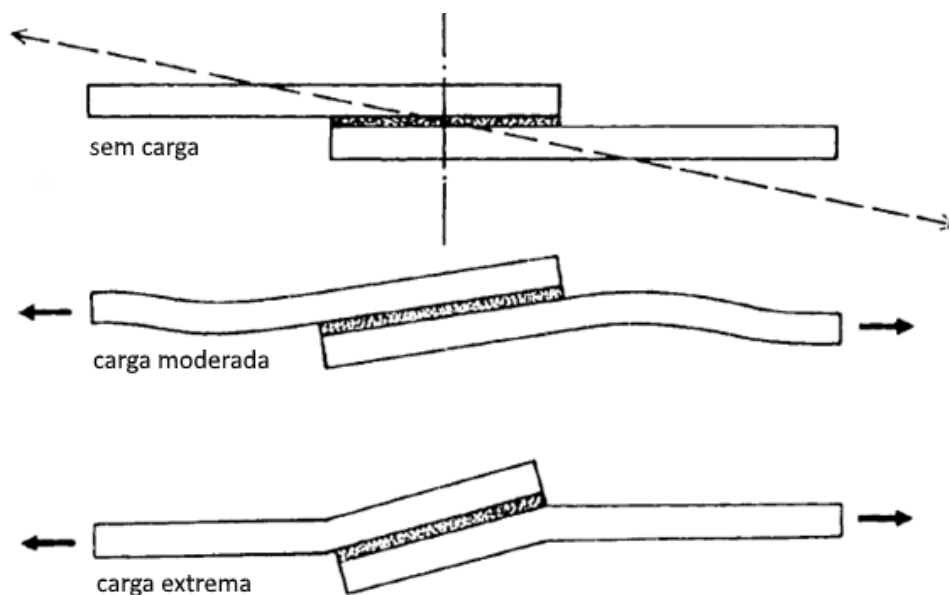


Figura 8 - Distorção causada por aplicação de carga (adaptado de [3])

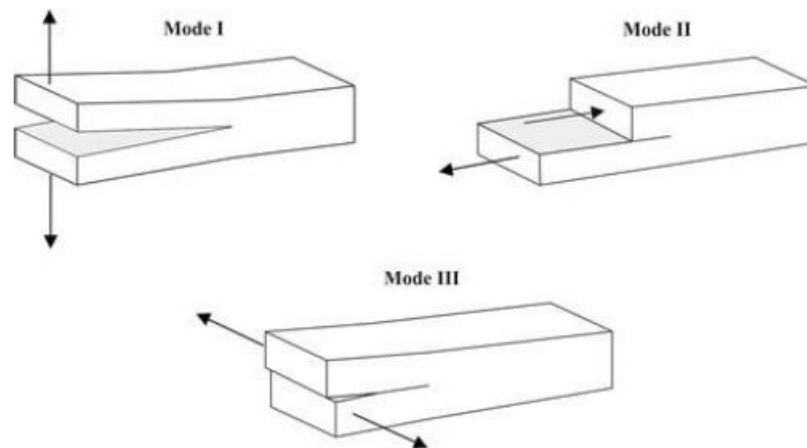


Figura 9 - Modos de fratura de juntas adesivas [14]

A rotura de uma ligação adesiva pode ocorrer por falha do adesivo, do aderente ou de ambos (Figura 10). A preparação de uma junta adesiva e a seleção do adesivo deve ser feita considerando os materiais dos aderentes e condições de trabalho, como por exemplo o tipo de carga aplicada, temperatura e ambiente de exposição. Cumprindo estes pressupostos é expectável obter rotura coesiva pelo adesivo.

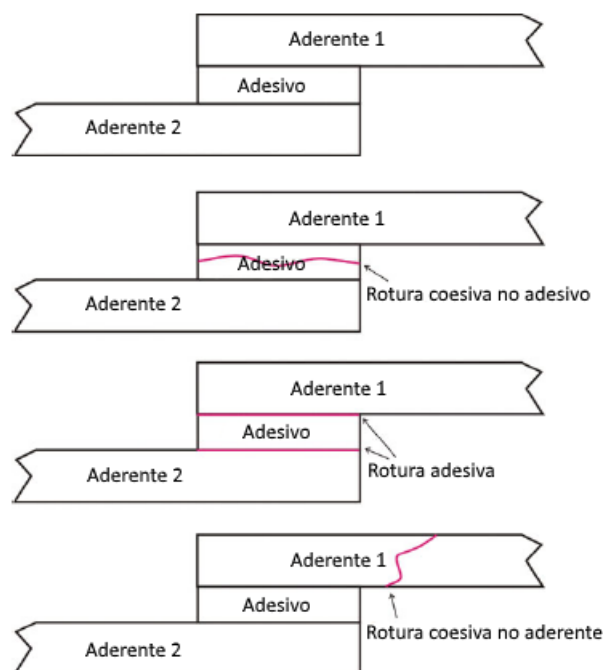


Figura 10 - Diferentes tipos de rotura (adaptado de [4])

Caso a preparação da junta não tenha sido eficaz, haja incompatibilidade do adesivo com o aderente ou as condições a que o adesivo está sujeito não se enquadrem na sua aplicação, a falha resultará por rotura adesiva. Esta rotura caracteriza-se pela separação do adesivo e aderente sem que o limite de resistência de nenhum dos materiais tenha sido atingido. A rotura de uma junta adesiva pode também resultar por uma combinação de rotura coesiva no adesivo e rotura adesiva, pelas mesmas razões acima enunciadas. Havendo boa adesão do adesivo aos aderentes, caso a camada adesiva tenha maior resistência do que o material dos aderentes, serão estes últimos o ponto de falha devido à sua rotura [4].

2.1.4 Adesivos estruturais

Definem-se como adesivos estruturais os adesivos de elevada resistência ao corte (superior a 7 MPa), boa resistência às condições ambientais e com uma durabilidade idêntica ao produto ao qual são aplicados.

Os adesivos podem ser classificados pela sua função, composição química, modo de aplicação ou reação, forma física, custo ou aplicação. Os adesivos estruturais estão divididos por famílias de produtos, das quais cinco são predominantes: epóxidos, fenólicos, poliimidas, poliuretanos e acrílicos [3, 6].

Os adesivos epóxidos predominam na indústria automóvel e aeronáutica devido à grande compatibilidade com diferentes materiais, ainda que se excluam os polímeros e elastómeros com baixa energia de superfície. Apresentam boa resistência ao óleo, humidade e solventes, o que permite a sua aplicação em ambientes adversos e contaminados. Devido à sua estabilidade dimensional, sofrem pouca contração durante o processo de cura. Apesar de serem resinas com comportamento frágil, podem ser aditivadas com agentes modificadores para melhorar essencialmente as propriedades ao impacto e arrancamento. Neste caso o adesivo é designado por epóxido híbrido.

Predominantemente utilizados em madeiras, laminados de madeira ou para unir madeira a metal, os adesivos fenólicos são adesivos com boa estabilidade dimensional. Têm boa resistência a elevadas temperaturas e as suas propriedades não sofrem grande degradação a baixas temperaturas. Aliado ao facto de serem resistentes a fungos e água, os adesivos fenólicos podem ser utilizados no exterior expostos aos elementos. Podem ser modificados, usualmente aditivados de modo a aumentar a tenacidade.

As poliimidas, desenvolvidas pela NASA, vêem o uso particularmente direccionado à indústria aeroespacial devido ao elevado custo e necessidade de curar a temperaturas elevadas. Acresce a frequente necessidade de processamento em vácuo devido à

condensação que ocorre na cura e aos solventes usualmente utilizados. Destacam-se pela capacidade de suportar temperaturas mais elevadas do que adesivos epóxicos e fenólicos.

Contrariamente aos adesivos epóxicos, os poliuretanos são flexíveis sendo ao mesmo tempo adesivos tenazes. Mantêm uma elevada resistência ao corte e arrancamento sendo ao mesmo tempo compatíveis com uma grande variedade de materiais, inclusivamente polímeros difíceis de colar, e veem as suas aplicações limitadas devido à baixa resistência a temperaturas elevadas.

Por último, os adesivos acrílicos destacam-se pela sua rápida cura pelo que são ideais para automatização de processos. Quanto utilizados em plásticos ou metais resultam em uniões adesivas com elevada resistência ao corte. Apesar disso, a sua resistência ao arrancamento é baixa e vêem o seu desempenho degradado a baixas temperaturas. Podem ser modificados para melhoria de propriedades, mantendo como característica base a sua rigidez elevada.

2.1.5 Configurações possíveis de junta

Existem diversos tipos de configurações de juntas adesivas e as mesmas devem ser adequadas aos materiais, geometrias e esforços a que estarão sujeitas. Os tipos de juntas adesivas mais comuns são apresentados na Figura 11.

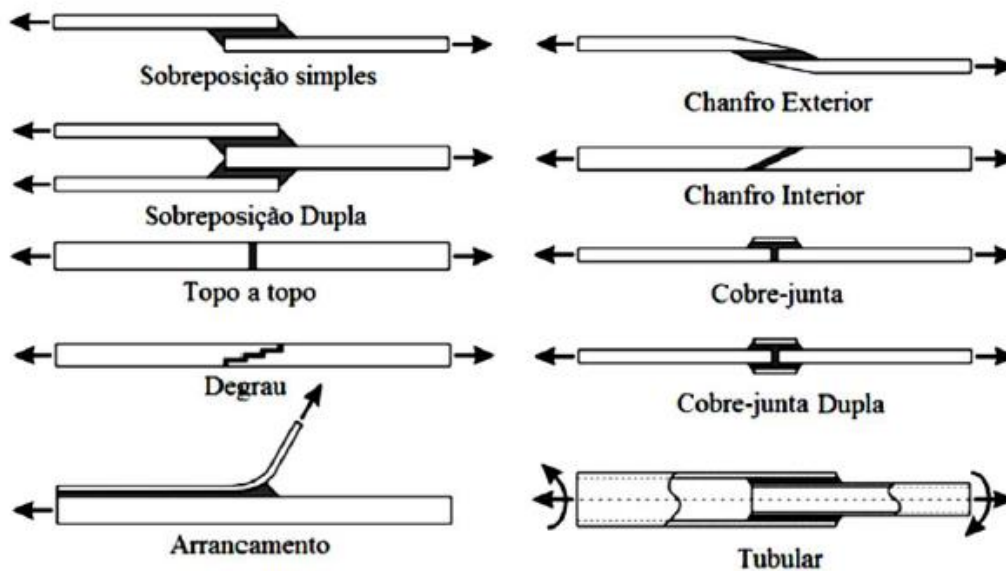


Figura 11 - Configurações de juntas adesivas mais comuns [6]

A configuração mais comum é a JSS devido à sua simplicidade de fabrico. O facto de o carregamento não ser colinear provoca flexão nos aderentes o que leva ao aumento de tensões de arrancamento. Sem que haja grande aumento de complexidade no seu fabrico, a junta de sobreposição dupla (JSD) elimina o efeito de carregamento não colinear. Ainda assim, em casos de carregamentos mais elevados, a flexão dos aderentes paralelos leva a tensões de compressão e arrancamento ao longo das camadas adesivas. O aumento de espessura inerente e necessidade de utilização de dois aderentes num dos topos impossibilita também a sua implementação em determinados casos. Existe a possibilidade de melhorar a distribuição de tensões numa junta de sobreposição simples com a introdução de chanfros nos aderentes (Figura 12) com custos aumentados devido à necessidade de maquinar os aderentes ou, no caso de compósitos laminados, com complexidade aumentada devido à necessidade de desfasar as camadas na sua deposição.

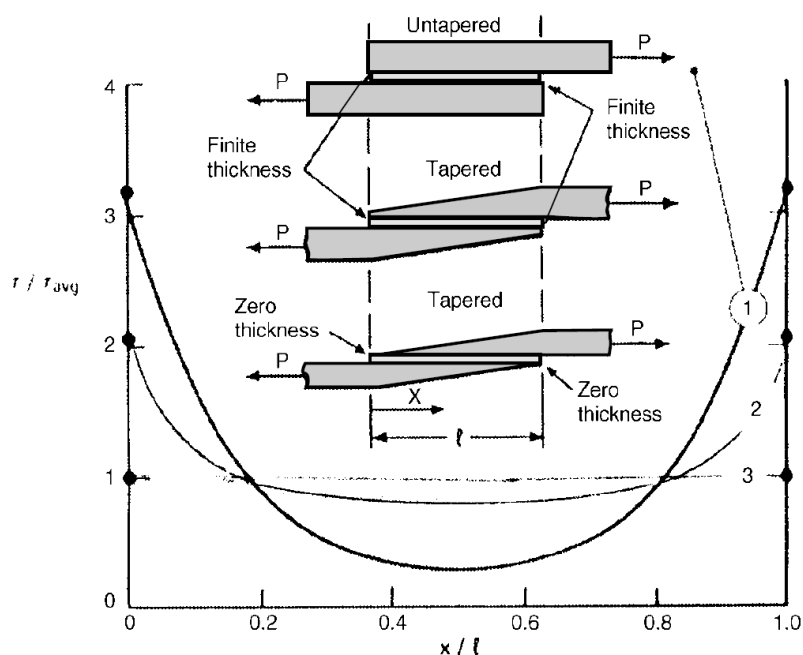


Figura 12 - Efeito da introdução de chanfro na distribuição de tensões de corte [3]

As juntas topo a topo (Figura 11) são simples no fabrico e facilmente acomodáveis, no entanto as solicitações da camada adesiva ocorrem exclusivamente ao arrancamento. De modo a moderar as tensões entre arrancamento e corte é possível introduzir um chanfro interior, que implica maquinagem dos aderentes, ou então fabricar uma junta em degrau, sendo que esta última aumenta ainda a complexidade da maquinagem. Caso seja possível acomodar uma maior espessura nas extremidades de ligação, pode ser

utilizado o método cobre-junta (Figura 11). A utilização de um cobre-junta simples pode originar clivagem se houver flexão num dos sentidos. A utilização de um cobre-junta duplo (Figura 11), caso seja possível a sua implementação, elimina essa vulnerabilidade.

As juntas tubulares (Figura 11), tal como o nome indica, são utilizadas na união de tubos. Para tal é necessário que o diâmetro externo de um dos tubos seja inferior ao diâmetro interno do outro, pelo menos na zona de sobreposição. Deste modo a camada adesiva irá ser maioritariamente sujeita ao corte quando há solicitação axial dos tubos ou torção [3, 6].

2.1.6 Otimização geométrica das juntas

A resistência de uma junta adesiva pode ser melhorada com a introdução de alterações geométricas nos aderentes ou na camada adesiva [4]. Sem qualquer intervenção nos aderentes é possível manter um excesso de adesivo para além dos limites dos aderentes (Figura 13). Esse filete de adesivo criado permite afastar a concentração de tensões do limite dos aderentes e simultaneamente distribuir a tensão de corte por uma maior área [15]. Outra alteração possível na camada adesiva é a criação deocos no interior da camada adesiva, ainda que esta técnica seja principalmente utilizada para estudar os efeitos de defeitos introduzidos durante o processamento dos materiais [16].

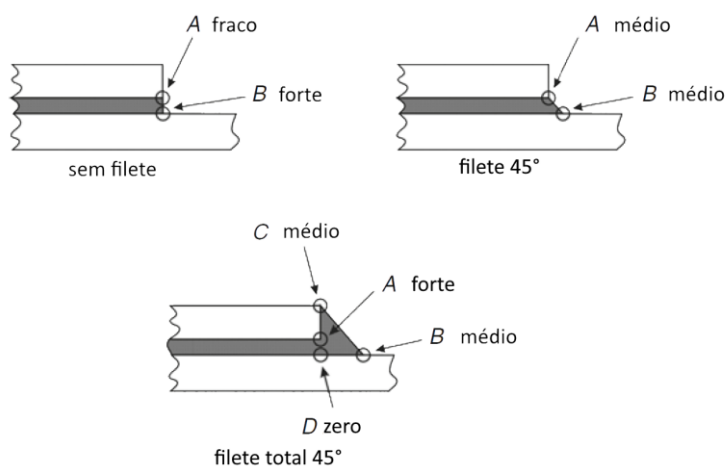


Figura 13 - Exemplos de filetes de adesivo (adaptado de [4])

Alterando a geometria dos aderentes é possível também obter uma distribuição de tensões mais uniformes como é possível verificar na Figura 12. Os tipos de alterações mais comuns são os chanfros interior e exterior. No caso de ser feito um chanfro exterior nos aderentes, pode ser feita a combinação dessa alteração com a introdução de um

filete de adesivo [4]. Para além da melhor distribuição de tensões, os chanfros podem aumentar a resistência ao arrancamento.

De modo a tirar partido das vantagens apresentadas por diferentes adesivos é possível criar juntas híbridas (Figura 14). Esta técnica consiste na utilização de um adesivo rígido de grande resistência no centro da camada adesiva e de um adesivo dúctil nos extremos [17]. A maior capacidade de distribuição de tensões do adesivo dúctil irá evitar a criação de uma fenda de rotura prematura [18].

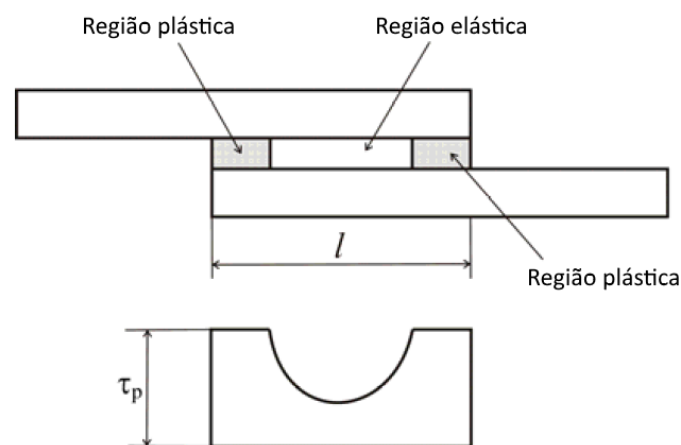


Figura 14 - Distribuição de tensões de corte em juntas híbridas (adaptado de [17])

Para além das otimizações acima descritas, existem também outras técnicas como a variação de topografia ao longo da camada de sobreposição [19], utilização de camada adesiva com espessura variável, arredondamento de arestas no topo dos aderentes [4] ou criação de entalhes nos aderentes [20].

2.2 Ensaio de juntas adesivas

Existe uma grande variedade de ensaios para caracterização mecânica dos adesivos, nomeadamente através da determinação da resistência à tração ou energia de fratura em modo I ou II. Os ensaios podem ser divididos em duas categorias: estáticos e dinâmicos. Os ensaios estáticos decorrem em condições quasi-estáticas, a baixa velocidade e baixa taxa de deformação. Os ensaios dinâmicos são utilizados para taxas de deformação mais elevadas. Nos capítulos 2.2.1 e 2.2.2 é feita uma breve descrição dos ensaios mais comuns para cada uma das categorias.

2.2.1 Testes estáticos

Ensaio constitutivo e de resistência

Para determinação de propriedades de resistência de adesivos são usualmente realizados ensaios de tração em provetes maciços. Os ensaios seguem a norma EN ISO 527-2 [21], em equipamentos de tração e com provetes em formato de osso de cão (Figura 15). São habitualmente utilizados provetes longos para adesivos rígidos – resultam em pouca extensão – e provetes curtos para adesivos flexíveis. Ao longo do ensaio são registados a carga e o deslocamento para criar a curva tensão-deformação. A partir da curva criada é possível determinar o módulo de Young. Caso seja medido também o deslocamento na direção transversal do provete maciço, este ensaio possibilita também a determinação do coeficiente de Poisson [22].

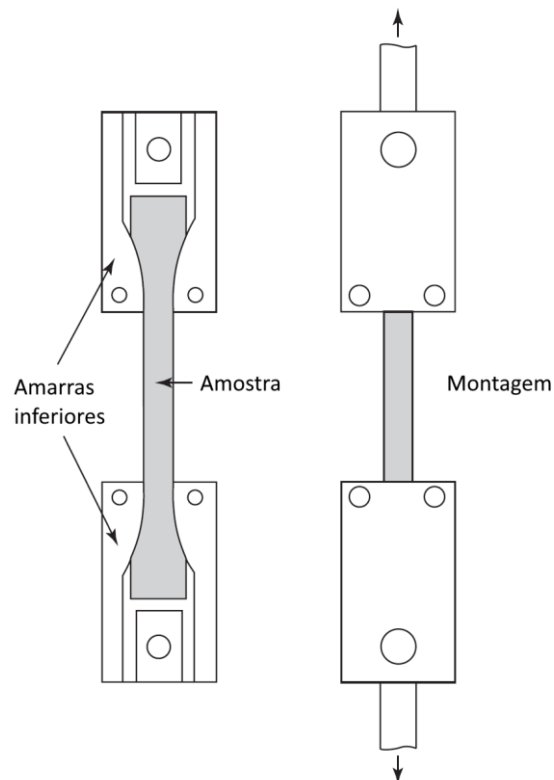


Figura 15 - Ensaio de tração em provetes maciços (adaptado de [22])

Os ensaios à compressão são menos habituais devido ao facto de se poderem obter as propriedades através de ensaios de tração. As normas NF T51-101 e ASTM D 695 descrevem algumas geometrias possíveis para ensaios de compressão [6].

O ensaio losipescu (Figura 16) consiste no fabrico de provetes em forma de viga com entalhe em V e segue a norma ASTM D5379 [23]. Este ensaio pode ser aplicado a provetes maciços de adesivo ou juntas adesivas, ainda que pouco eficaz para adesivos pouco rígidos. É feito carregamento assimétrico em compressão de modo a que seja gerado um binário nulo no centro do provete. O movimento que daí resulta gera tensões de corte que podem ser obtidas através da leitura da carga aplicada e da deformação obtida [22]. Permite também obter o módulo de corte [6].

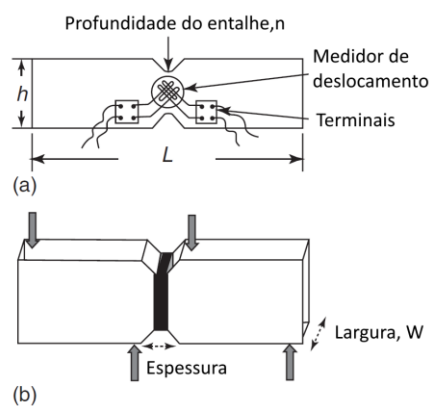


Figura 16 - Ensaio losipescu (a) provetes maciços (b) junta adesiva (adaptado de [22])

Tal como o ensaio losipescu, o ensaio Arcan pode ser utilizado em provetes maciços ou juntas adesivas. Apresenta bom desempenho com todo o tipo de adesivos, incluindo dúcteis. É útil para determinar tensões e deformações de corte, em modo II ou modo misto. Os provetes utilizados neste ensaio apresentam um formato de borboleta (Figura 17) [22].

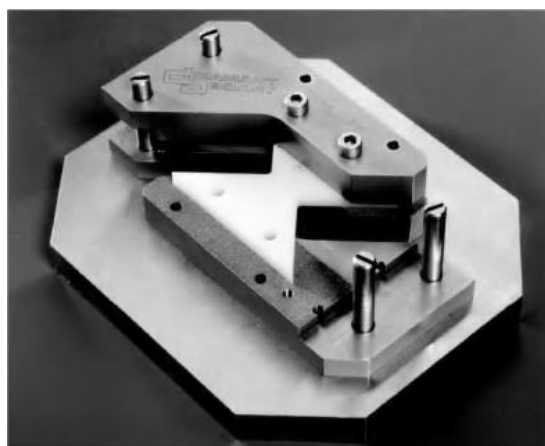


Figura 17 – Montagem para ensaio Arcan [22]

Apresentado na norma ASTM D897 [24], o ensaio de tração em junta topo a topo é um dos mais comuns para determinar as propriedades para esse tipo de solicitações. Consiste na ligação adesiva de dois cilindros metálicos que serão sujeitos à tração. A obtenção de resultados precisos através deste método exige uma perfeita concentricidade dos cilindros e paralelismo das superfícies da interface [22].

A tensão de corte e módulo de corte podem ser determinadas com o uso de tubos ou cilindros aos quais é aplicado momento torsor. No caso da utilização de tubos existe o ensaio *napkin ring* em que é criada uma camada adesiva nos bordos dos extremos de ambos os tubos, de igual diâmetro. No caso do ensaio com cilindros trata-se de uma simples junta topo a topo. Em ambos os casos é imperativa a perfeita concentricidade dos aderentes para produzir resultados válidos. Os resultados são obtidos através do registo da força aplicada e ângulo de torção [22].

A popularidade do ensaio *Thick-Adherend Shear Test* (TAST) – normalizado pela ISO 11003-2 [25] e ASTM D3983 [26]– para a determinação de propriedades ao corte é resultado da sua simplicidade no fabrico dos provetes. O ensaio TAST sofre de erros inerentes à não uniformidade da distribuição de tensões, sendo que as mesmas se tornam mais uniformes quanto maiores as espessuras da camada adesiva e aderentes [6].

Devido ao facto de replicarem condições reais de aplicação, como por exemplo na indústria aeronáutica, é vulgar realizar-se ensaios recorrendo a JSS em equipamentos de tração para sujeitar a camada adesiva ao corte. Os ensaios regem-se pelas normas ASTM D 1002 [27], ISO 4587 [28] e ASTM D 4896 [29]. A flexão que caracteriza esta tipologia de junta quando solicitada induz erros nos resultados, mas a sua utilização contribui para o desenvolvimento de melhorias naquele que é o tipo de junta mais utilizado [6].

Para além da necessidade de analisar o comportamento dos adesivos à tração e ao corte, existem também ensaios de arrancamento. Dois ensaios comuns neste domínio são o ensaio de arrancamento de junta em T (ASTM D1876 [30]) e o ensaio de arrancamento a 180° (ASTM D903 [31]) [6]. No primeiro ensaio, em equipamento de tração, ambos os aderentes são flexíveis e no segundo é utilizado um aderente flexível e outro rígido.

Ensaio de fratura

O ensaio mais utilizado para determinação do G_{IC} , taxa de libertação crítica de energia, é o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) – Figura 18 – descrito nas normas ISO 25217

[32] e ASTM D3433-99 [33]. Pela norma ASTM, o ensaio decorre com rotura de modo I e é terminado logo após o início da fratura. São utilizados os valores da carga aplicada imediatamente antes e logo após o aparecimento da fenda. Seguindo a norma ISO, é feito o carregamento inicial que é removido logo que haja aparecimento de fenda de rotura. O carregamento é depois retomado até que a rotura se expanda até 60 mm desde a fenda obtida no primeiro estágio. Os valores de carga e deslocamento são registados em ambos os estágios do ensaio [22].

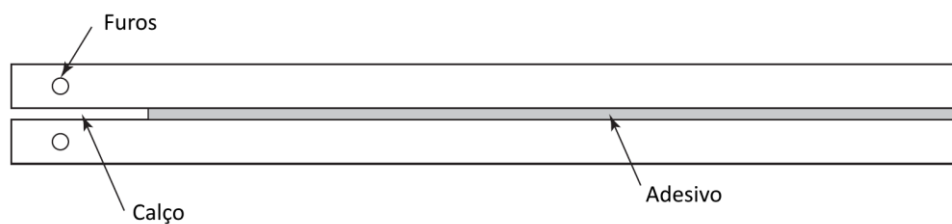


Figura 18 - Provete para ensaio DCB (adaptado de[22])

As mesmas normas regem o ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB). Trata-se de uma geometria alternativa que permite determinar G_{IC} independentemente do comprimento da fenda de rotura. É um ensaio mais dispendioso quando comparado com DCB devido à maior complexidade de fabrico dos provetes. O fabrico de provetes TDCB é especialmente complexo em materiais compósitos [6].

Para a fratura em modo II, é predominantemente utilizado o ensaio *End-Notched Flexure* (ENF) – Figura 19 – e permite obter o valor da taxa crítica de libertação de energia em modo II, G_{IIC} . Este ensaio não se encontra devidamente normalizado para o uso em adesivos. Trata-se de um ensaio originalmente desenvolvido para teste de materiais compósitos, transposto com sucesso para aplicação a ligações adesivas [6, 22].

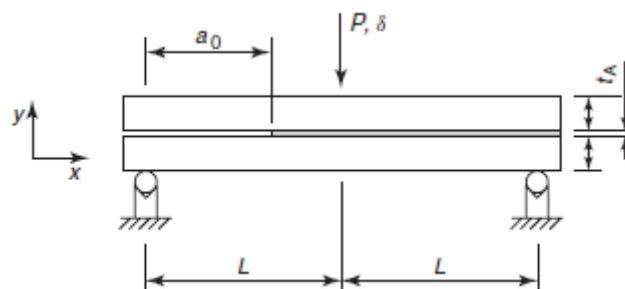


Figura 19 – Configuração de ensaio ENF [22]

2.2.2 Testes dinâmicos/impacto

O ensaio normalizado para condições de impacto é descrito na norma ASTM D950 [34]. Trata-se de um ensaio com uma junta adesiva entre dois blocos, sobre o qual é lançado um pêndulo. Obtém-se daí a energia absorvida que pode posteriormente ser dividida pela área da camada adesiva [6] – energia de fratura, G_C . É um ensaio pouco utilizado devido às suas debilidades, principalmente no que diz respeito ao alinhamento dos blocos (Figura 20). A dificuldade em garantir o paralelismo de superfícies impossibilita a consistente repetibilidade dos resultados [2].

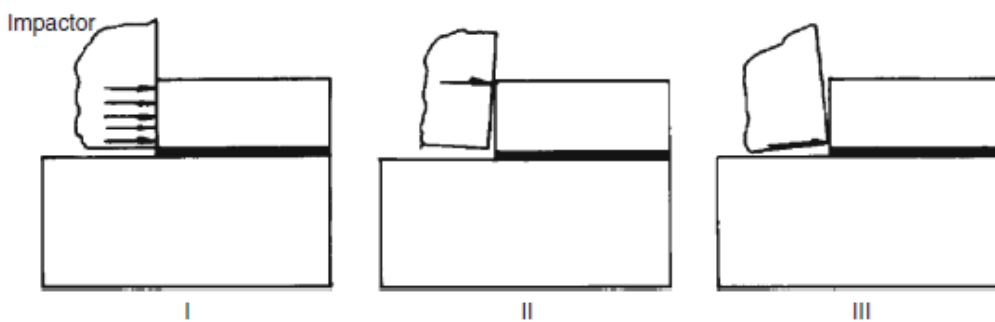


Figura 20 - Ensaio de impacto em blocos (I) paralelismo (II) afastado da zona adesiva (III) próximo da zona adesiva

Diversas variantes da técnica da barra de Hopkinson têm sido utilizadas. As diferentes configurações permitem criar condições de ensaio para compressão, tração, torção e flexão para uma grande diversidade de materiais, incluindo adesivos [22]. A mais popular das variantes é o ensaio *Split Hopkinson Pressure Bar* (SHPB) representado na Figura 21. O ensaio SHPB é capaz de desenvolver taxas de deformação muito elevadas devido ao facto de ser utilizado ar comprimido para lançar um projétil. Este ensaio é usualmente utilizado para compressão, mas pode ser também usado ao corte por compressão das barras em juntas de sobreposição [35].

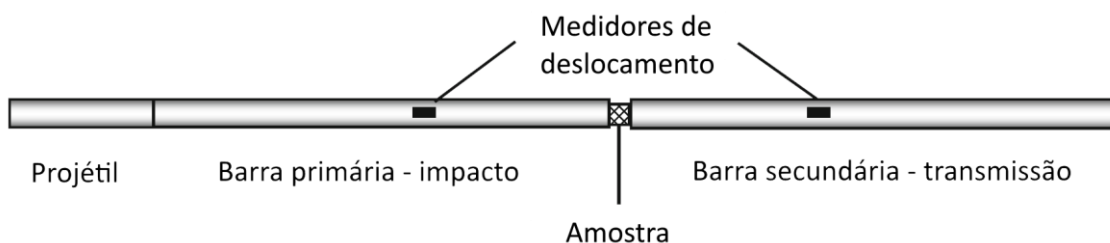


Figura 21 - Diagrama de funcionamento do ensaio SHPB (adaptado de [4])

Por último, existem como alternativa ensaios que consistem na queda de um peso (Figura 22). Estes ensaios podem ser utilizados com juntas topo a topo para ensaios de impacto à tração ou com juntas de sobreposição para solicitações de corte [2, 4]. O equipamento regista a força exercida na célula de carga e acelerómetros permitem a estimativa do deslocamento. Com esses dados é possível obter diretamente os valores de tensão e deformação ao longo do ensaio.

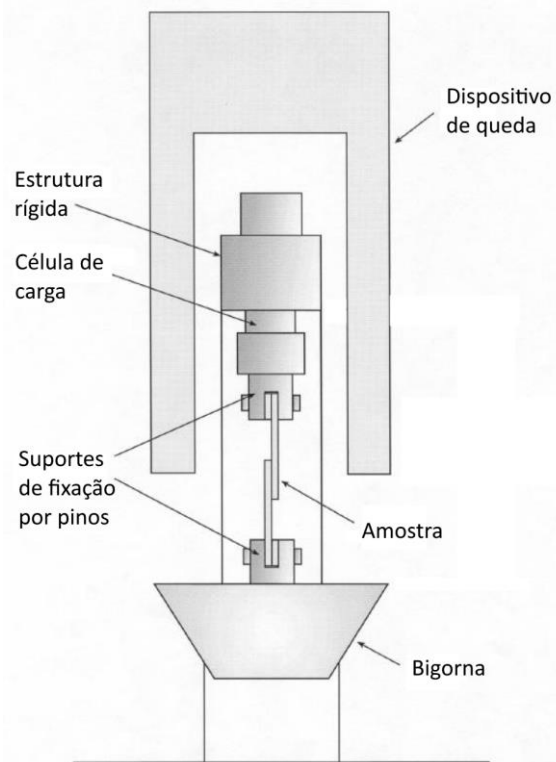


Figura 22 - Esquema de teste de impacto por queda de peso [36]

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, a inexistência de modelos de plasticidade precisos e critérios de rotura adequados levaram ao sobredimensionamento das juntas adesivas resultando invariavelmente em estruturas mais pesadas e dispendiosas. Com a disponibilização de metodologias de *design* e metodologias preditivas fidedignas, surgiram novas possibilidades para o uso eficiente de juntas adesivas. A análise de juntas adesivas pode ser feita segundo dois métodos: modelos de forma fechada (métodos analíticos) ou métodos numéricos (por exemplo MEF). O estudo de juntas adesivas data da década de 1930 com o modelo de forma fechada de Volkersen [37] no qual apenas são

consideradas propriedades elásticas dos materiais e deformação do adesivo ao corte. No entanto, a formulação analítica das juntas adesivas torna-se mais complexa se o adesivo deformar plasticamente, se forem usados aderentes em materiais compósitos, ou se forem utilizados aderentes de materiais dissimilares. O MEF é o mais popular para juntas adesivas, Adams e colaboradores foram pioneiros nesta técnica [38]. A rotação da junta, plasticidade dos aderentes e a influência do filete de adesivo foram estudados em primeira mão por Harris e Adams [39]. O método da mecânica dos meios contínuos para previsão de resistência de juntas adesivas foi usado inicialmente em análises, exigindo a distribuição de tensões e um critério de falha adequado. Uma análise de MEF pode ser também utilizada em conjunto com o critério de mecânica da fratura para previsão de resistência, seja pelo fator de intensidade de tensões ou energia tal como a Técnica de Fecho da Fenda Virtual (TFFV). Contudo, com estas técnicas de propagação de fenda de rotura a modelação torna-se pesada devido à reconstrução da malha durante a análise e conseqüente exigência de recursos computacionais [40]. Grandes desenvolvimentos foram feitos e um deles é a modelação de dano pela combinação do MEF com zona de elementos coesivos. Esta técnica combina o MEF convencional nas regiões em que não é expectável a existência de dano com a mecânica da fratura pelo uso de elementos coesivos para simular a propagação da fenda de rotura. Uma alternativa muito recente à utilização de elementos coesivos é o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que usa funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

2.3.1 Solicitações estáticas

2.3.1.1 Modelos analíticos

Nos estágios iniciais da análise de estruturas com juntas adesivas, os métodos preditivos consistiam em formulações analíticas, e os trabalhos de Volkersen [37] e Goland e Reissner [41] foram precursores de um número de estudos teóricos com a vantagem da simplicidade de alcançar campos de tensões nas juntas devido ao uso de simplificações em termos de geometria da estrutura, carga e condições fronteira, permitindo obter soluções de forma fechada eficientes. Deste modo, cada estrutura podia ser rapidamente analisada, apesar das simplificações atribuídas [42]. Com estes modelos, deformações e tensões podiam ser facilmente calculadas, assim como a distribuição do momento fletor na estrutura. A resistência era tipicamente prevista através de critérios baseados em tensões ou deformações. Até ao momento, estes estudos têm sido progressivamente substituídos por análises numéricas, ainda que ao longo dos anos os estudos teóricos tenham sido refinados em termos de capacidade de modelação, tais

como a não linearidade da camada adesiva [43] ou análises geométricas não lineares [44].

2.3.1.2 Métodos numéricos

2.3.1.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Segundo a mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação previstos por MEF são usualmente usados num critério de falha para estimar a resistência de montagens de estruturas. Isso é possível quando os valores previstos, obtidos pelo uso de critérios baseados em tensões ou deformações (por exemplo o critério da tensão normal máxima ou o critério da tensão de corte máxima), atingem a resistência dos constituintes da estrutura. Esta abordagem foi rapidamente aplicada a juntas de uso comum em aplicações estruturais pouco após o MEF ter sido disponibilizado (por exemplo [39]). As vantagens desta técnica incluem a análise de estruturas com ou sem dano inicial e sob condições de carga arbitrárias. No entanto, estes critérios possuem uma limitação intrínseca uma vez que as estruturas com juntas adesivas são propensas a concentrações de tensões nas extremidades da região de sobreposição causadas pelas arestas vivas. Como resultado, numa análise de MEF a uma estrutura com juntas adesivas, as tensões numa determinada região aumentam com o refinamento de malha impedindo a obtenção de convergência, resultando em previsões dependentes da malha utilizada [42]. Ao longo dos anos, foram sendo introduzidas melhorias a esta técnica, tal como a definição de critérios de rotura mais complexos baseados em tensões ou deformações para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos mais realistas de modelos contínuos de materiais, ainda que a dependência da malha não fosse resolvida.

2.3.1.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os seus materiais são contínuas. Defeitos ou ligações de dois materiais em ângulo não são obviamente considerados por esta suposição. Consequentemente, a mecânica dos meios contínuos não apresenta solução para os locais onde se encontram, o que resulta em particularidades de tensão ou deformação. As fendas são os defeitos mais comuns em estruturas, para as quais foi desenvolvida a mecânica da fratura. Na mecânica da fratura, é aceitável que as tensões calculadas pela mecânica dos meios contínuos sejam singulares (infinitas) na extremidade da fenda de fratura. Segundo a atual teoria da mecânica, essa singularidade está sempre presente quando o ângulo da fenda de fratura é menor do que 180° . Este resultado foi descoberto por Williams [45] para singularidades de tensões num entalhe em cunha. Este argumento é também aplicável

a singularidades de tensões em materiais ligados em ângulo. A mecânica da fratura tem sido aplicada com sucesso em diversos problemas de engenharia nos últimos anos. Vários estudos que contêm juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia, G , e respetiva taxa crítica de libertação de energia, G_c (Fernlund e Spelt [46]), ao invés de utilizar o fator de concentração de tensões por não ser facilmente determinável quando a fenda de fratura se propaga até à interface ou até à proximidade do mesmo. No entanto, a fratura das juntas adesivas inerentemente ocorre segundo modo misto devido às diferentes propriedades entre os materiais distintos e a complexidade do sistema de tensões. O critério de falha para o modo misto pode ser desenvolvido num modo análogo ao critério de falha clássico, ainda que o conceito de superfície de fratura (ou região) deva ser introduzido.

2.3.1.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação computacional de métodos da mecânica da fratura elástica linear teve grande sucesso há algumas décadas, mas estavam limitados a plastificação reduzida na extremidade da fenda. Para além disso, adesivos modernos fortalecidos desenvolvem zonas de deformação plástica sob carga que podem exceder a espessura dos aderentes. Os modelos de dano coesivo (MDC) foram desenvolvidos nos finais da década de 1950 / início da década de 1960 (Barenblatt [47]) para descrever dano sob carga estática na zona coesiva na frente da extremidade da fenda de propagação, sendo uma solução promissora para métodos mais refinados para previsão de dano em estruturas com juntas adesivas. Os MDC foram a partir daí amplamente testados para simular a iniciação da fenda de propagação em problemas de falha coesiva ou na interface assim como delaminação em compósitos. Os MDC podem basear-se em elementos de mola ou mais convencionalmente elementos coesivos (Feraren e Jensen [48]), e podem ser facilmente incorporados em MEF convencionais para modelação do comportamento de fratura em vários materiais, inclusivamente em juntas adesivas (Ji et al. [49]). O conceito base dos MDC consiste em que uma ou múltiplas interfaces/regiões de fratura podem ser artificialmente introduzidas em estruturas, nas quais é possível a propagação de dano pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamento. Isto torna-se possível pela definição de leis coesivas em interfaces ou regiões finitas do modelo. As leis do MDC são aplicadas entre nós partilhados por elementos coesivos e podem conectar nós sobrepostos de elementos que representem diferentes materiais ou diferentes camadas em materiais compósitos, ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais que não se tocam de modo a simular uma fina camada, por exemplo uma camada adesiva. O MDC proporciona uma reprodução macroscópica de dano através da reação relativa ao deslocamento provocado por tração entre nós emparelhados ao longo do percurso da fenda, dependente de parâmetros de larga

escala que regem o processo de propagação de fenda de fratura tal como a energia de fratura. A evolução da resistência e perda de rigidez até à falha é modelada para contabilizar a degradação gradual das propriedades do material. As leis coesivas são tipicamente constituídas por relações lineares entre cada estágio de carregamento (Yang e Thouless [50]), embora um ou mais estágios possam ser definidos de diferente forma para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais.

2.3.1.2.4 Mecânica do dano

Nestas metodologias, um parâmetro de dano é estabelecido para modificar a resposta constitutiva de materiais por degradação de rigidez ou resistência, por exemplo em filmes adesivos (Khoramishad et al. [51]), delaminação de compósitos, ou rotura da matriz (Daudeville e Ladeveze [52]), para representar a severidade de dano no material durante a aplicação de carga. Esta variável pode ser utilizada numa lei de evolução de dano para modelar o dano antes de se iniciar a fenda assim como a propagação da mesma. As variáveis de dano podem ser classificadas sob dois principais grupos: (1) variáveis que preveem a quantidade de dano pela redefinição das propriedades do material mas que não se relacionam diretamente com o mecanismo de dano, e (2) variáveis ligadas pela definição física de um tipo específico de dano, tais como porosidades ou área relativa a micro-cavidades (Voyiadjis e Kattan [53]). Na mecânica do dano, a propagação da fenda é definida como função da carga para modelação estática ou contagem cíclica em análises de fadiga. São escassas as publicações neste campo aplicadas a juntas adesivas para cargas estáticas. Comparando com MDC para fadiga, as técnicas da mecânica do dano não providenciam uma clara distinção entre as fases de iniciação e propagação de fadiga, ainda que formem uma base para análise preditiva (Khoramishad et al. [51]). Não obstante, a evolução do dano que antecede a propagação de fenda macroscópica pode ser simulada. Por outro lado, modelação de dano por MDC para fadiga está limitada a percursos pré-definidos de propagação de fenda e, em aplicações específicas, pode ser recomendável a utilização de técnicas de mecânica do dano se o dano for mais disperso ou se o percurso da fenda de rotura não for conhecido (Shenoy et al. [54]).

2.3.1.2.5 MEFX

O MEFX é um aprimoramento recente do MEF para modelação da propagação de dano em estruturas. Utiliza leis de dano para previsão de fratura baseadas na resistência dos materiais para a iniciação do dano e deformação para avaliação da falha (definido por G_{IC}), ao invés de utilizar os valores de t_{n0}/t_{s0} utilizados nos MDC. O MEFX ganha vantagem sobre a modelação por MDC por não exigir um percurso predefinido para propagação

de fenda. Na realidade, permite que as fendas se propaguem livremente no volume de um material sem que seja necessário que a malha coincida geometricamente com as descontinuidades nem seja requerida a reconstrução de malha em redor da fenda (Mohammadi [55]). Este método é uma extensão do MEF, do qual as características foram inicialmente apresentadas no final dos anos 90 por Belytschko e Black [56]. O MEFX consiste no conceito de partição de unidade e pode ser implementado no MEF tradicional introduzindo as 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 (Dolbow e Belytschko [57]). Devido à propagação da fenda, a extremidade da fenda 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.

2.3.2 Solicitações dinâmicas/impacto

2.3.2.1 Modelos analíticos

Nos capítulos que se seguem são sucintamente descritos os diferentes modelos existentes para modelação de juntas adesivas em cenários dinâmicos ou de impacto.

2.3.2.1.1 Modelos constitutivos da dependência da taxa de deformação dos adesivos

As propriedades dos adesivos caracterizam-se por ser dependentes da taxa de deformação. Os adesivos podem exibir um comportamento viscoelástico e viscoplástico. Do mesmo modo referido para os MDC para solicitações estáticas (capítulo 2.3.1.2.3), a dependência da taxa de deformação pode ser representada com o recurso a modelos constitutivos [58].

2.3.2.1.2 Modelo Voigt/Maxwell

A deformação elástica de um adesivo em função do tempo pode ser expressa pelos modelos viscoelásticos de Voigt ou Maxwell, que utilizam a soma das tensões em elementos do tipo mola e amortecedor para modelar o comportamento do adesivo. A complexidade destes modelos pode ainda ser aumentada pela adição de elementos adicionais. Os parâmetros usados neste modelo devem ser determinados por ensaios experimentais [58].

A propagação de ondas de impacto e concentração de tensões das mesmas foram investigadas analiticamente e experimentalmente por Sato e Ikegami [59] em JSS, juntas

com chanfro exterior e chanfro interior (*scarf*) unidas por adesivos. As propriedades viscoelásticas foram obtidas pela formulação de Voigt. Os ensaios experimentais validaram a deformação obtida analiticamente nas juntas com chanfro exterior e chanfro interior (*scarf*), enquanto nas JSS foram obtidas deformações mais complexas experimentalmente.

Khan et al. [60] utilizaram um modelo diferencial baseado em elementos de mola e amortecedor lineares e não lineares combinados com variações de comportamento típicos de polímeros em função da temperatura e taxa de deformação. Este modelo apresentou uma elevada concordância com os resultados numa alargada gama de taxa de deformação e temperatura. A mesma técnica foi aplicada por Iwamoto et al. [61] para previsão de comportamento à deformação por compressão e sensibilidade à taxa de deformação, e os resultados obtidos numericamente foram validados através da comparação com os resultados experimentais obtidos por duas metodologias distintas.

2.3.2.1.3 Modelo Cowper-Symonds

O modelo de Cowper-Symonds [62] é amplamente utilizado para previsão da dependência da taxa de deformação. Caracteriza-se por utilizar um modelo elasto-plástico com endurecimento dependente da taxa de deformação [58].

A utilização deste modelo para estudo da influência da taxa de deformação na resistência máxima à rotura e compressão num adesivo epóxico foi aplicada por Goglio et al. [63]. Apesar de terem sido validados os resultados para as taxas de deformação mais elevadas, não foram obtidos resultados satisfatórios para toda a gama de velocidades de ensaio utilizadas.

2.3.2.1.4 Modelo Johnson-Cook [58]

O modelo de Johnson Cook [64] utiliza um modelo visco-plástico. Este modelo foi utilizado em paralelo com o modelo Cowper-Symonds por Morin et al. [65] e Goglio et al. [63] e apresentou resultados menos satisfatórios quando comparado com este último para taxas de deformação elevadas.

2.3.2.1.5 Modelos de sobretensão

Nos modelos de sobretensão é permitido o aumento de tensão para além da superfície de cedência com independência da taxa de deformação na aplicação de carga seguida de relaxamento para obter a dependência da taxa de deformação [58].

Chiu e Jones [66] desenvolveram um modelo constitutivo unificado para previsão de comportamento de um adesivo termofusível, habitualmente utilizado para reparação de estruturas de aeronaves. O modelo estabelecido reproduziu com sucesso o comportamento de alívio de carga com deformação constante e fluência observada com carga constante.

Um modelo de sobretensão visco-plástico foi também aplicado por Zgoul e Crocombe [67]. Verificou-se a validade deste modelo para ensaios em JSS, produzindo resultados não satisfatórios em ensaios TAST.

2.3.2.1.6 Curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação

Uma nova modelação da dependência da taxa de deformação foi apresentada por Crocombe [68]. Foram consideradas várias metodologias de modelação, entre as quais a utilização de curvas de fluência e curvas isócronas de tensão-deformação. Os resultados numéricos obtidos foram estudados tendo como referência os resultados de ensaios experimentais realizados em juntas de sobreposição dupla. O estudo efetuado permitiu concluir que os algoritmos de curvas de fluência presentes num *software* comercial não podem ser aplicados a taxa de deformação em rampa. Com a utilização de curvas isócronas de tensão-deformação, derivadas de dados experimentais, o autor obteve aumento de tensão com o aumento da taxa de deformação, tal como esperado. Esta metodologia foi validada para a configuração e tipo de adesivos testados, estando sujeito a validação para alterações feitas à configuração descrita.

2.3.2.2 Métodos numéricos

Ainda pouco estudada, a modelação de impacto de juntas adesivas pode ser abordada por resistência dos materiais ou mecânica da fratura [58]. Exige a utilização de modelos dinâmicos, em que os efeitos de inércia se tornam relevantes e têm influência no comportamento das juntas adesivas. É também fundamental determinar as propriedades dos materiais para a taxa de deformação aplicada.

O estudo realizado por Dean et al. [36] em que foram utilizados os modelos de von Mises e Drucker-Prager permitiu concluir que o primeiro método não é válido para adesivos endurecidos. Essa mesma conclusão foi obtida por Zgoul e Crocombe [67].

A combinação de modelos de dano coesivo com mecânica da fratura tem sido implementada com sucesso em juntas adesivas. Seguem leis coesivas, sendo as mais usuais a lei triangular e a lei trapezoidal [58]. Este método foi validado por Carlberger e Stigh [69] para condições de impacto. Os elementos fornecidos por softwares comerciais

suportam com algum rigor a previsão de ruptura em juntas adesivas ao impacto em modelos coesivos dinâmicas, como verificaram May et al. [70], Clarke et al. [71] e Avendaño et al. [72].

2.4 Comportamento de juntas adesivas sujeitas a impacto

2.4.1 Avaliação experimental

Yokoyama e Shimizu [73] realizaram ensaios experimentais quasi-estáticos num equipamento de tração e dinâmicos através de um ensaio com barra de Hopkinson modificado para examinar os efeitos da taxa de carregamento, espessura de camada adesiva e materiais dos aderentes na resistência ao corte. Os ensaios foram realizados com um adesivo cianoacrilato em aderentes de aço e alumínio. Foi possível verificar que a resistência aumenta com o aumento da taxa de carregamento (Figura 23), ainda que o aumento seja significativamente menor com o uso de aderentes de alumínio. A espessura da camada adesiva demonstrou uma grande influência no desempenho, registando o pico máximo no aumento da espessura até 25 μm e decrescendo com aumentos subsequentes.

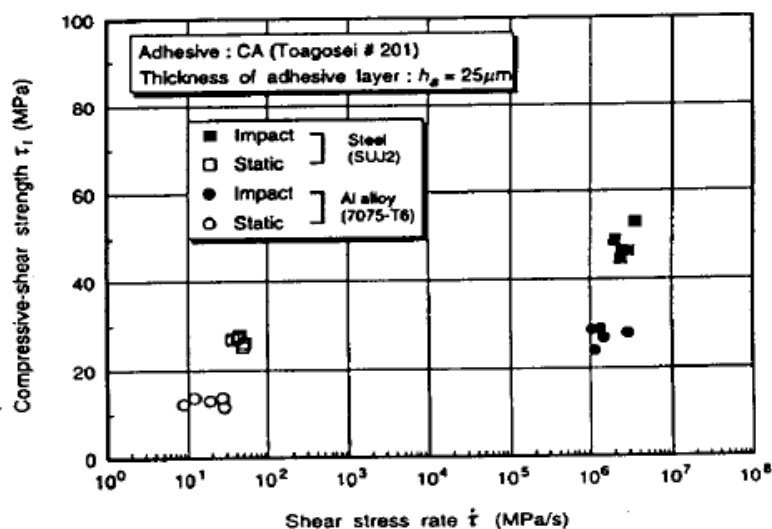


Figura 23 - Influência da taxa de carregamento na tensão de corte [73]

A análise de ensaios de impacto em juntas adesivas de cobre-junta dupla foi realizada por Al-Zubaidy et al. [74]. Estes autores utilizaram um adesivo epóxico para unir, por sobreposição com fibra de carbono reforçada com polímero (CFRP), duas placas de aço. Realizaram ensaios com uma e três camadas de CFRP em regime quasi-estático e

dinâmico. Por comparação dos resultados de impacto com resultados estáticos, observa-se uma grande influência dos ensaios de impacto na resistência máxima atingida. No entanto, não foi possível estabelecer uma dependência direta entre a velocidade de ensaio e o comprimento de sobreposição visto que a tendência apresentada ao longo da variação do mesmo foi semelhante entre os resultados estáticos e de impacto para ambas espessuras de CFRP (Figura 24).

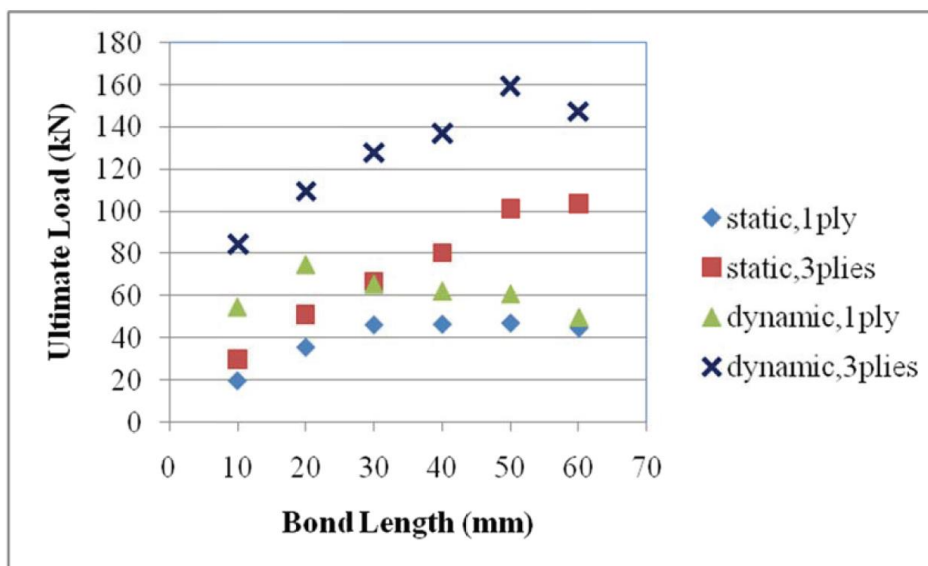


Figura 24 - Influência do número de camadas de CFRP na resistência em cobre-junta dupla [74]

De modo a comparar as diferenças de comportamento entre adesivos dúcteis e frágeis, Kemiklioglu et al. [75] submeteram dois adesivos com essas características, com resistências semelhantes em condições de teste estático, a diferentes energias de impacto (5, 10, 15 e 20 J). Acresce ainda o facto de o estudo realizar impacto repetido, sujeitando as amostras a 3 impactos – exceto os ensaios de 20 J visto haver rotura prematura. O adesivo dúctil apresentou resistência mais elevada nos ensaios de impacto simples e de impacto repetido com 15 J. Por sua vez, o adesivo rígido teve resultados mais elevados de impacto repetido de 5 e 10 J. Comum a ambos os adesivos é o facto de o resultado de impacto com resistência mais elevada se registar nos ensaios de 10 J (Figura 25), tanto em impacto simples como repetido.

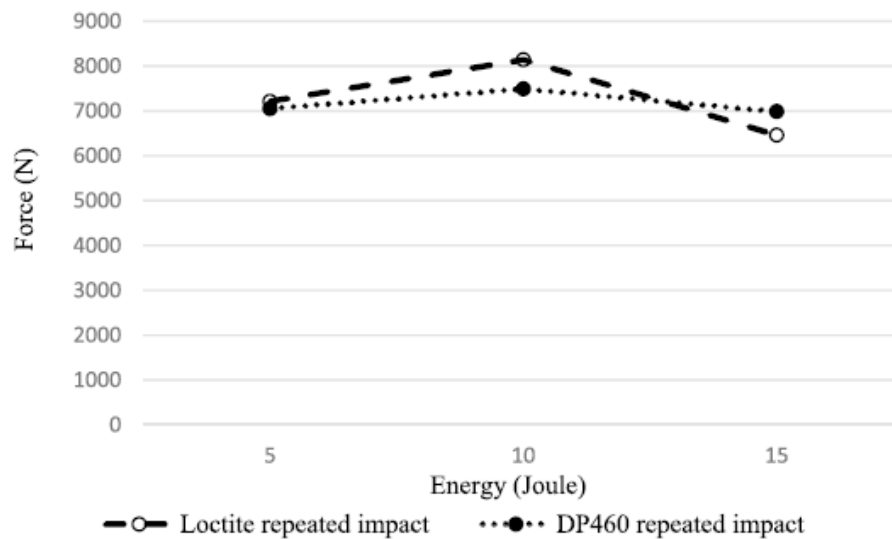


Figura 25 - Comparação de impacto repetido nos adesivos Loctite 9466 e Scotch DP460 [75]

2.4.2 Previsão numérica

Através da modelação de juntas de sobreposição simples com quatro adesivos epóxicos e três diferentes aderentes de alumínio, Harris e Adams [76] compararam resultados obtidos em condições de ensaio quasi-estáticas e dinâmicas. Demonstraram que para baixas taxas de deformação e pequenas massas a modelação sem efeitos de inércia produz resultados válidos. Considerando as propriedades dos adesivos para condições estáticas, a contabilização dos efeitos de inércia permite obter resultados numéricos mais próximos dos resultados experimentais [58].

Liao et al. [77], pelo método de Cowper-Symonds, procederam ao estudo numérico de ondas de propagação de tensão e distribuição de tensões em solicitações de impacto. Procederam à modelação 3D de uma JSS para estudar os efeitos do módulo de Young dos aderentes, o comprimento de sobreposição, a espessura da camada adesiva e a velocidade inicial de impacto na propagação de ondas de impacto e distribuição de tensões e fizeram a análise da resistência das mesmas. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais obtidos em condições idênticas, o que permitiu aos autores validar o método utilizado com a resina epóxida utilizada. Verificou-se que a rotura do adesivo tem origem pelo centro da mesma – na direção da largura – junto ao limite da camada adesiva. Observa-se ainda que, à medida que a velocidade inicial converge para zero, a distribuição de tensões apresenta um padrão semelhante aos ensaios estáticos, ainda que com valores mais elevados (Figura 26).

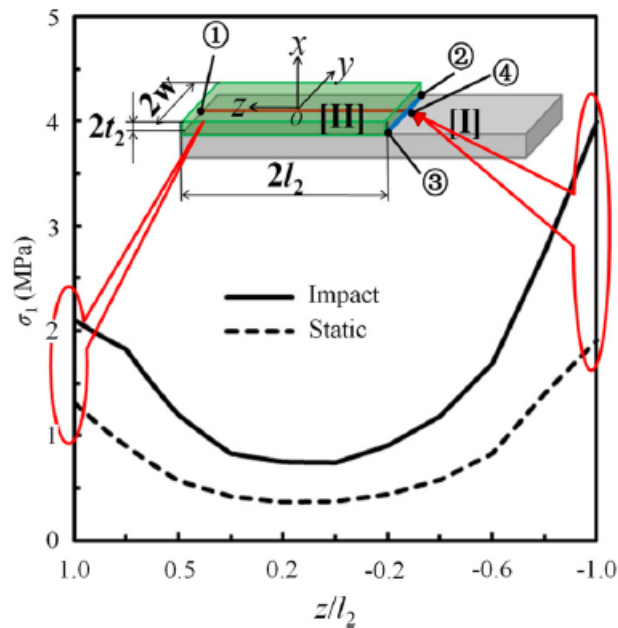


Figura 26 – Comparação de distribuição de tensões entre impacto e estático [77]

Usando como base de comparação soluções analíticas de forma fechada, Carlberger e Stigh [69] aplicaram três diferentes modelos constitutivos em ensaios com um adesivo epóxico para estudar a dinâmica da fratura. Os modelos utilizados foram um modelo simplificado, um modelo com camada adesiva linearmente elástica e por último um modelo com camada adesiva com amaciamento linear. Todos os modelos de MEF apresentaram resultados em concordância com os resultados analíticos (Figura 27). Os autores concluíram que, para valores de rigidez muito elevados a precisão desse mesmo valor não é de grande importância devido à sua fraca influência nos resultados. Concluíram também que a dependência da taxa de deformação é essencial para obter resultados mais fidedignos.

A influência da geometria e materiais em JSD compósitas foi analisada por Hazimeh et al. [78]. O material dos aderentes utilizado foi PEEK reforçado com fibra de vidro. Foi considerado comportamento elástico para aderentes e adesivo. Os ensaios realizados foram utilizados através da modelação 3D, para ensaios quasi-estáticos e dinâmicos. Os autores verificaram que o aumento da rigidez ao corte aumenta a tensão de corte. A heterogeneidade dos resultados devido à heterogeneidade material e/ou geométrica é elevada no início da simulação, devido à propagação de ondas de impacto, e desaparece em microssegundos. Apesar disso, após o desaparecimento dos efeitos induzidos pela propagação de ondas de tensão, os resultados estáticos e dinâmicos sofrem uma aproximação. Os ensaios produzidos com as fibras de reforço alinhadas na direção da

aplicação de carga produziram os melhores resultados, resultando na maior tensão de corte média (Figura 28) e menor coeficiente de homogeneidade.

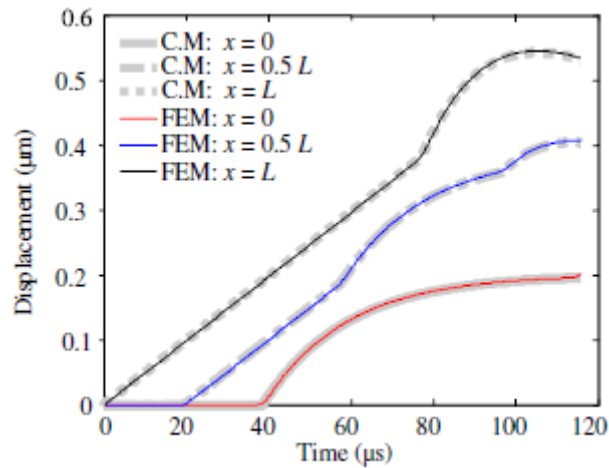


Figura 27 - Comparação de deslocamento entre modelo de forma fechada e MEF [69]

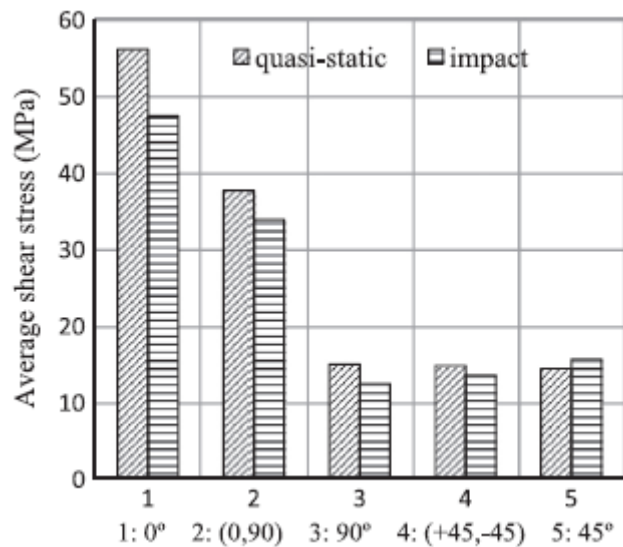


Figura 28 - Efeito da orientação das fibras de reforço na tensão de corte [78]

A aplicação específica da integração de juntas adesivas na indústria automóvel foi analisada por Araújo et al. [79]. Para tal, os autores utilizaram um adesivo epóxico dúctil em JSS com diferentes comprimentos de sobreposição. Os aderentes foram fabricados em CFRP. Realizaram ensaios, numéricos e experimentais, em condições quasi-estáticas, impacto e dinâmicas para análise de vibrações. Os modelos numéricos foram validados para ambas as tipologias, tanto em estático como em dinâmico. Verificou-se um

aumento da resistência com o aumento do comprimento de sobreposição em todos os ensaios (Figura 29). Ocorreu em todos os ensaios estáticos delaminação dos aderentes. Foi possível também verificar a sensibilidade à taxa de deformação do adesivo utilizado, sendo exigida maior carga até à rotura em situações de impacto. Paralelamente, foi feita a comparação de amortecimento de vibrações com aderentes em aço ou CFRP, sendo obtido um melhor desempenho pelos últimos.

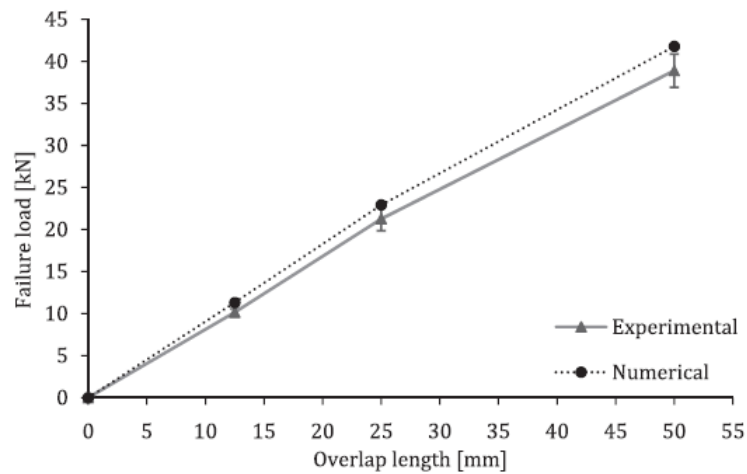


Figura 29 - Comparação de resultados numéricos com experimentais em condições quasi-estáticas [79]

DESENVOLVIMENTO

3.1 TÉCNICA NUMÉRICA PARA PREVISÃO DO COMPORTAMENTO AO IMPACTO

3.2 ESTUDO NUMÉRICO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Técnica numérica para previsão do comportamento ao impacto

Nesta dissertação é analisada uma JSS com MDC em análise MEF. Ao longo da descrição da validação do trabalho numérico são descritas as condições de ensaio e elementos utilizados.

3.1.1 Condições da análise numérica

As condições de análise numérica utilizadas neste trabalho foram as descritas por Silva [1]. A simulação numérica pelo MEF foi feita com o uso do *software* Abaqus® [80]. De modo a simplificar o modelo e consequentemente reduzir o número de elementos de malha, o modelo foi construído em 2D com as dimensões apresentadas no capítulo 3.1.3.1. As propriedades dos adesivos objeto de estudo foram introduzidas como *traction separation* usando *quads damage*.

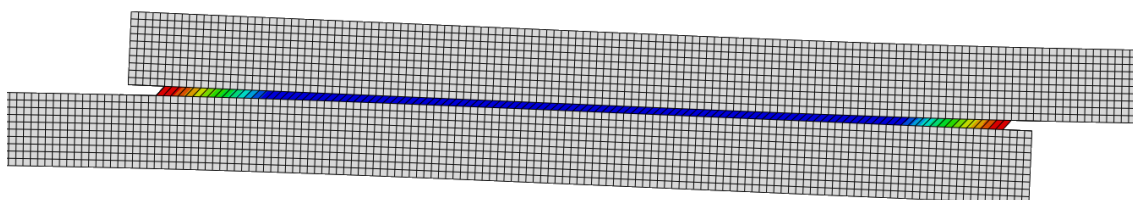


Figura 30 - Exemplo de visualização de resultado SDEG

Em *field outputs* foram requisitados os seguintes parâmetros: CSTRESS, LE, PEEQ, RF, S, SDEG, STATUS, U e V. Alguns dos parâmetros pedidos são especialmente importantes para a análise dos resultados.

O parâmetro RF regista a força de reação aplicada a cada instante. Combinado com o parâmetro U, que por sua vez regista o deslocamento, é possível construir a curva P- δ para cada caso analisado. O parâmetro SDEG permite analisar visualmente a distribuição de dano na camada adesiva (Figura 30) e o parâmetro STATUS faz com que os elementos coesivos sejam eliminados individualmente assim que as suas propriedades mecânicas

são excedidas. Por último, o parâmetro PEEQ permite identificar a deformação plástica equivalente nos aderentes e respetiva localização.



Figura 31 - Controlo de malha no modelo de validação

Foram utilizados dois tipos de elementos no modelo utilizado. Na secção representativa do adesivo foi utilizado um controlo da malha do tipo *sweep* (a amarelo na Figura 31), para posterior definição do elemento coesivo do tipo COH2D4. No restante modelo foram utilizados elementos estruturados (a verde na Figura 31) do tipo CPE4R.

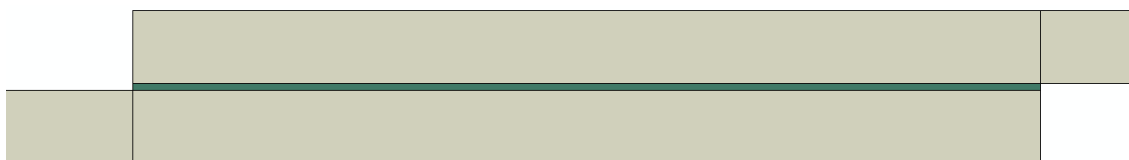


Figura 32 - Atribuição de materiais no modelo de validação

Os materiais foram atribuídos às secções previamente definidas. Na Figura 32 é possível identificar a atribuição do adesivo a verde. No restante modelo foram atribuídas as propriedades do aderente.

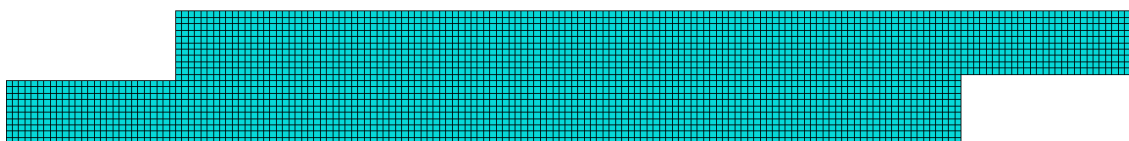


Figura 33 - Visualização da malha do modelo de validação

Para a resolução pelo MEF foi aplicada uma malha uniforme unicamente constituída por quadriláteros com uma dimensão de 0,2 mm, idêntica à espessura de adesivo. No caso específico do modelo de validação resultou num total de 13250 elementos do tipo CPE4R e 125 elementos do tipo COH2D4 resultando num total de 13475 elementos.

Foi feito um encastramento do aderente inferior criando condições fronteira de bloqueio U1, U2 – movimentos de translação nos eixos X e Y, respetivamente – e UR3

para impedir a sua rotação em torno do eixo Z (Figura 34). De igual modo, no aderente superior foi criada uma restrição de movimento em U_2 – correspondente ao deslocamento no eixo Y – de modo a reproduzir as condições experimentais de ensaio. Essa restrição foi implementada no extremo do aderente, exatamente onde é feito contacto com a representação da massa do ensaio experimental (Figura 34).

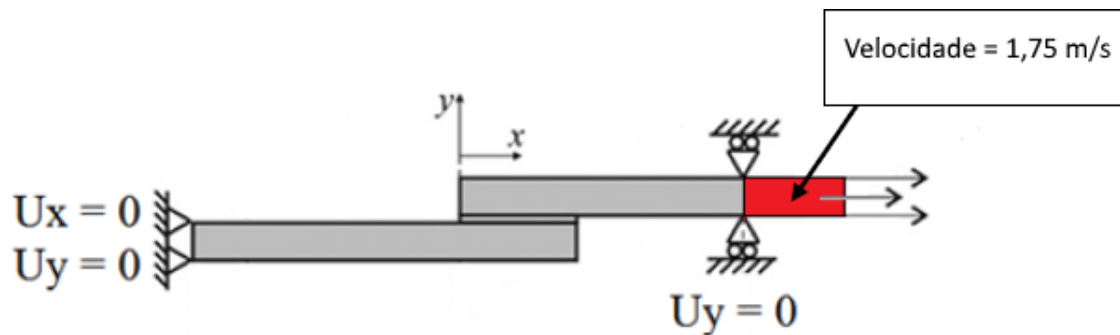


Figura 34 - Condições fronteira [1]

De modo a simular a massa do equipamento do ensaio experimental foi adicionada uma secção suplementar (representada a vermelho na Figura 35) no seguimento do aderente superior, com igual secção. A densidade dessa secção foi devidamente calculada de modo a igualar a massa real.

Sendo o objetivo a simulação numérica representativa de um ensaio experimental de impacto, foi aplicado um campo de velocidade uniforme na secção representada na Figura 35.



Figura 35 - Aplicação de velocidade inicial

O modelo numérico tem um tempo de ensaio de 5 ms. O intervalo de tempo correspondente a cada incremento foi controlado automaticamente pelo *software*. Por sua vez, o *software* garante que a duração desse intervalo para a velocidade de propagação de onda de impacto aplicado não exceda o comprimento de cada elemento. Os *field outputs* foram configurados de modo a que a evolução temporal em representação gráfica seja feita em períodos de 50 μ s. Por sua vez, no *history outputs* foi pedido o registo do deslocamento e das forças de reação a cada 100 incrementos. O motivo para a redução do número de registos foi o excessivo número de pontos que impossibilitavam o tratamento de dados. A redução em 100 vezes do número de pontos

registados não só possibilitou o tratamento de dados como permitiu uma boa resolução para identificação de picos de carga.

De modo a registar a carga a que o modelo está sujeito a cada instante, foi criado o registo da soma das forças de reação na aresta correspondente ao encastramento. Para registo do deslocamento foi selecionado o vértice inferior da interface entre a secção representativa da massa experimental e o aderente.

3.1.2 Modelos de dano coesivo

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 [81]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [82], linear parabólico [83], exponencial [84], polinomial [85] e trapezoidal [86]. 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 [87]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 36, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

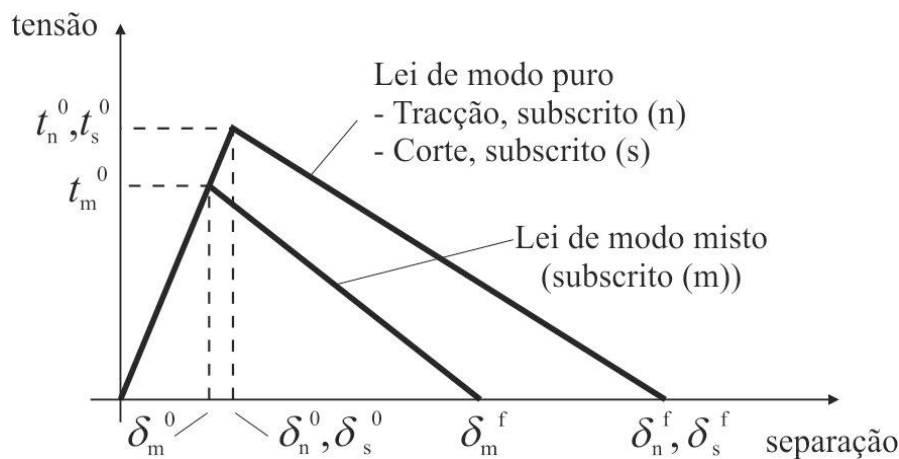


Figura 36 – Lei triangular do modelo de dano coesivo

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 [88]. 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 [89]. 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 [88]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, 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 [90]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 36), pela igualdade da equação 5, 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 36) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

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

3.1.3 Validação da técnica numérica

3.1.3.1 Geometria da junta

Nos ensaios experimentais foi utilizada uma JSS fabricada com uma geometria baseada nas normas ASTM D1002 [27] e ISO 4587 [28]. De modo a verificar a validade do modelo numérico utilizado neste trabalho, a geometria da JSS e respetivas dimensões serão mantidas idênticas às utilizadas por Silva [1].

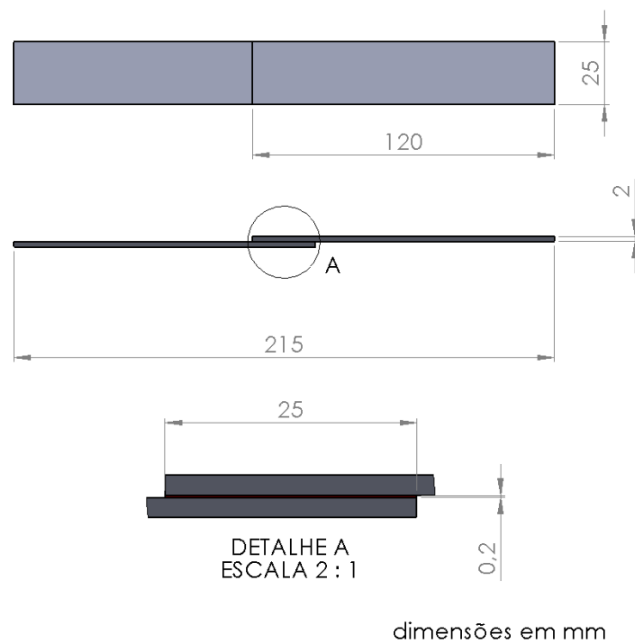


Figura 37 - Geometria da JSS de validação

Trata-se de uma JSS composta por dois aderentes de dimensões idênticas (Figura 37). O comprimento de sobreposição é de 25 mm, onde é aplicado o adesivo. Por sua vez, a zona adesiva tem uma espessura de 0,2 mm.

3.1.3.2 Materiais utilizados

3.1.3.2.1 Aderentes

De modo a que a resistência máxima atingida apenas dependesse do adesivo utilizado, os aderentes foram fabricados no aço DIN 55 Si7. Trata-se de um aço de alta resistência, garantindo que não existe deformação plástica dos aderentes durante o ensaio. Para validação do modelo numérico não foram consideradas propriedades de deformação plástica dos aderentes.

Tabela 2 - Propriedades do aderente [1]

Aderente	DIN 55 Si7
E [GPa]	210
σ_y [MPa]	1078
σ_f [MPa]	1600
ϵ_f [%]	6
ν	0,3 [91]
ρ [g/cm ³]	7,8

3.1.3.2.2 Adesivos

As propriedades de adesivos usadas neste trabalho numérico são as mesmas utilizadas por Silva [1] no seu trabalho experimental. Para isso foram selecionados quatro adesivos com propriedades distintas sendo que dois dos adesivos têm uma elevada ductilidade enquanto os dois restantes são adesivos de elevada rigidez.

O primeiro adesivo dúctil é o Momentive® RTV106. Trata-se de um silicone mono-componente selante e auto-nivelante que vulcaniza à temperatura ambiente. Tem como principais características a sua elevada flexibilidade a baixa temperatura, bom desempenho a temperaturas elevadas, resistência ao meio ambiente e agentes químicos e é também um bom isolante elétrico. Destina-se a selar elementos sujeitos a elevadas temperaturas ou nos quais seja necessário um bom isolamento elétrico [92].

O segundo adesivo dúctil é um adesivo acrílico estrutural bi-componente, 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 espessura da camada adesiva [93].

Passando para um adesivo frágil produzido pela Huntsman®, o Araldite® AV138 é um adesivo bi-componente. A resina epóxi tem de ser aplicada com o endurecedor HV998

e é capaz de curar a baixas temperaturas. A sua resistência a elevadas temperaturas de trabalho aliada à baixa emissão de gases faz com que seja um adesivo indicado para aplicações em telecomunicações, eletrónica e aeroespacial [94].

Por último, é também utilizado neste trabalho o adesivo epóxi 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 para a 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 [1, 95].

Na Tabela 3 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 foram determinados experimentalmente através de ensaios de tração e G e t_s através de ensaios de corte (TAST). As energias de fratura G_{IC} e G_{IIC} foram determinadas através de ensaios DCB e ENF, respetivamente.

Tabela 3 – Propriedades estáticas dos adesivos

Adesivo	RTV106 [96]	DP8005 [81, 97]	AV138 [98]	XNR6852 E-2 [1]
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 [4]; ^b valor do fabricante; ^c valor típico para adesivos epóxicos [99]

As propriedades a diferentes velocidades de ensaio foram determinadas no decorrer do trabalho de Silva [1] e podem ser consultadas na Tabela 4. As propriedades a 1 mm/min e 100 mm/min foram determinadas por resultados de ensaios experimentais. Por sua vez, os resultados a 105000 mm/min – correspondente a 1,75 m/s – resultam de extrapolação logarítmica [67] a partir das propriedades a menor velocidade de ensaio.

Tabela 4 - Propriedades dos adesivos em função da velocidade [1]

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

3.1.3.3 Ensaios de impacto [1]

No ensaio de impacto experimental realizado por Silva [1] foi utilizado um equipamento Rosand® Instrumented Falling Weight Impact Tester type 5 HV. O ensaio de impacto

neste equipamento consiste na queda de um peso que por sua vez transfere a energia do impacto para a amostra em teste.



Figura 38 - Sistema de fixação para ensaio ao impacto (adaptado de [100])

O aderente superior é retido por uma amarra e fixado por um parafuso. É utilizado um calço para assegurar um correto alinhamento vertical e assim reduzir a possibilidade de criar cargas excêntricas. Ao aderente inferior é fixado o peso, com o uso de um parafuso e um calço, descrito no capítulo 3.1.1. Esse peso corre numa guia de modo a garantir um correto alinhamento no momento do impacto.

A carga transmitida como consequência da queda do peso é registada numa célula de carga localizada no sistema de retenção do aderente superior (Figura 38).

De modo a replicar os ensaios experimentais e modelos numéricos realizados por Silva [1], foi adicionado um peso ao aderente superior do modelo numérico utilizado (identificado a vermelho na Figura 34). Pretende obter-se uma energia de impacto de 40 J.

Utilizando a equação (5) para uma energia de impacto correspondente a 40 J obtém-se um valor de altura de queda correspondente de 15,7 cm.

$$E = m \times g \times h_0, \quad (5)$$

onde E representa a energia de impacto aplicada na JSS, m é a massa do peso fixado ao aderente inferior, g corresponde à aceleração da gravidade e h_0 representa a altura de queda do peso.

No entanto, devido ao facto de na modelação numérica não se considerar a distância de queda, foi utilizada a equação (6) para obter a velocidade no momento do impacto. Para as condições deste ensaio, resulta numa velocidade de 1,75 m/s.

$$E = \frac{1}{2} \times m \times v^2, \quad (6)$$

onde v corresponde à velocidade do peso no momento do impacto.

De modo a criar o peso adicional como extensão do aderente superior foram utilizadas as mesmas dimensões de perfil com 2 mm e 25 mm de espessura e largura, respetivamente. A densidade do bloco foi devidamente calculada de modo a ter uma massa idêntica à utilizada nos ensaios experimentais de 26 kg.

3.1.3.4 Resultados obtidos

Para a validação do modelo numérico utilizado vão ser considerados como resultados de referência os resultados obtidos por Silva [1]. Na Figura 39 é apresentada a curva carga-deslocamento (P - δ) com o uso do adesivo RTV106.

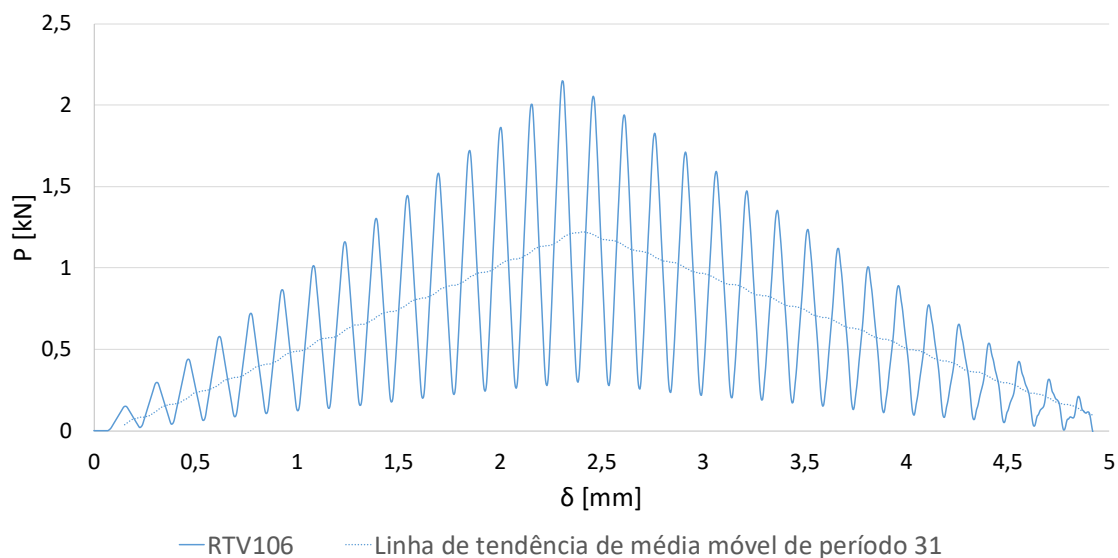


Figura 39 – Curva P - δ de validação do adesivo RTV106

O resultado numérico realizado na JSS com o adesivo RTV106 produziu um resultado com uma variação de carga bastante pronunciada ao longo do deslocamento a que o aderente superior foi sujeito. A curva que representa o resultado obtido não coincide com a curva de referência numérica. No entanto, aplicando uma linha de tendência de média móvel de período igual a 31, obtém-se um perfil da curva idêntico. O deslocamento máximo obtido é o mesmo em ambos os casos e é também coincidente com o deslocamento da referência numérica assim como o deslocamento correspondente à carga máxima. Os resultados numéricos apresentaram um deslocamento máximo consideravelmente maior do que aquele obtido experimentalmente. Por outro lado, o deslocamento correspondente à carga máxima coincide entre resultados e ambas as referências, numérica e experimental.

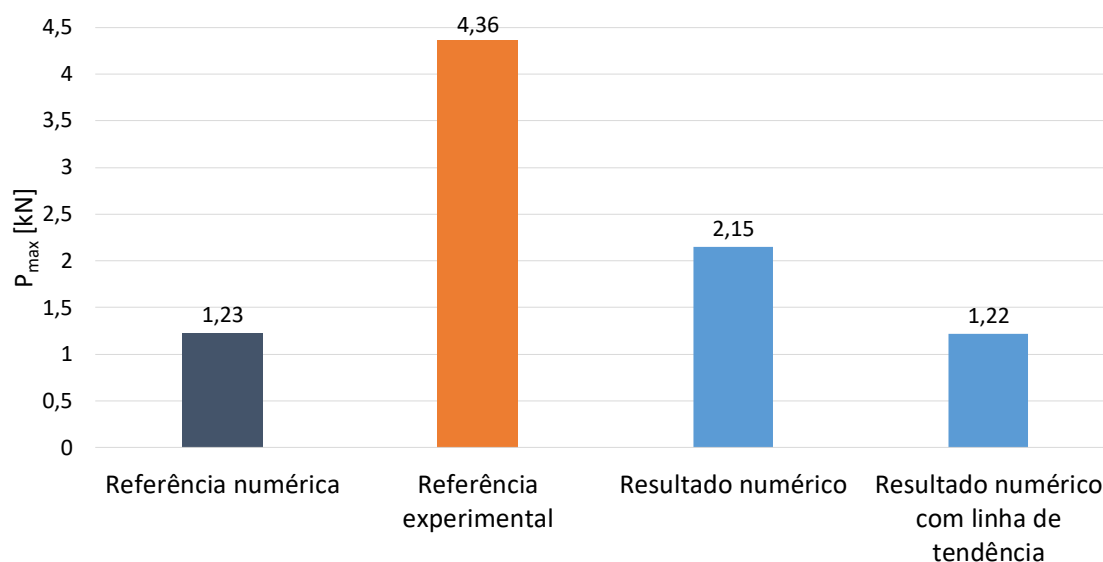


Figura 40 - Comparação dos resultados obtidos com valores de referência para o adesivo RTV106

Comparando a carga máxima registada para cada um dos casos (Figura 40) é possível observar que todos os resultados obtidos por ensaios numéricos ficaram abaixo da média dos resultados experimentais. Os resultados numéricos obtidos registaram um valor mais elevado na curva $P-\delta$ sem linha de tendência. Aplicada a linha de tendência obtém-se um valor muito próximo da referência numérica, sendo que a diferença entre ambos é inferior a 1%. O resultado numérico ficou 51% abaixo da referência experimental. Acrescentando a linha de tendência a diferença aumenta para 72%.

A Figura 41 representa a curva $P-\delta$ com o adesivo AV138. Foram inicialmente utilizadas as propriedades de referência. Devido ao elevado valor de carga máxima atingido e à discrepância entre as curvas resultantes da referência numérica e do resultado

numérico os valores de tensões coesivas foram revistos. O valor de tensão coesiva à tração – t_n – foi arbitrado e o valor de tensão coesiva ao corte – t_s – foi ajustado para cumprir a mesma proporção dos valores obtidos experimentalmente para velocidade de ensaio mais reduzida. O valor de tenacidade ao corte – G_{IIC} – foi também reduzido para aproximar ao valor de tenacidade à tração – G_{IC} – numa proporção semelhante à obtida por outros autores. Os valores estão apresentados entre parênteses na Tabela 4.

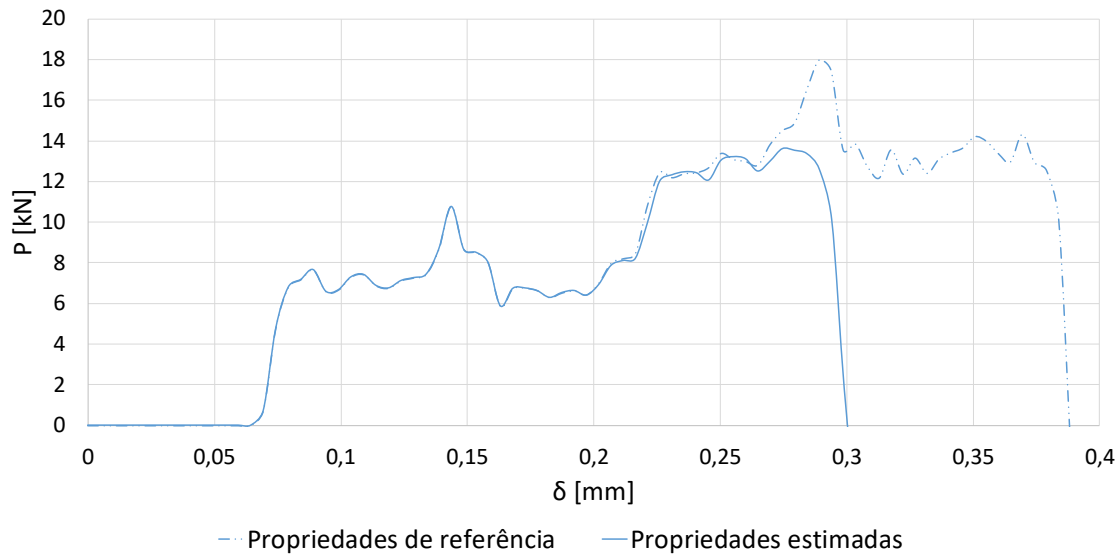


Figura 41 - Curva P-δ de validação do adesivo AV138

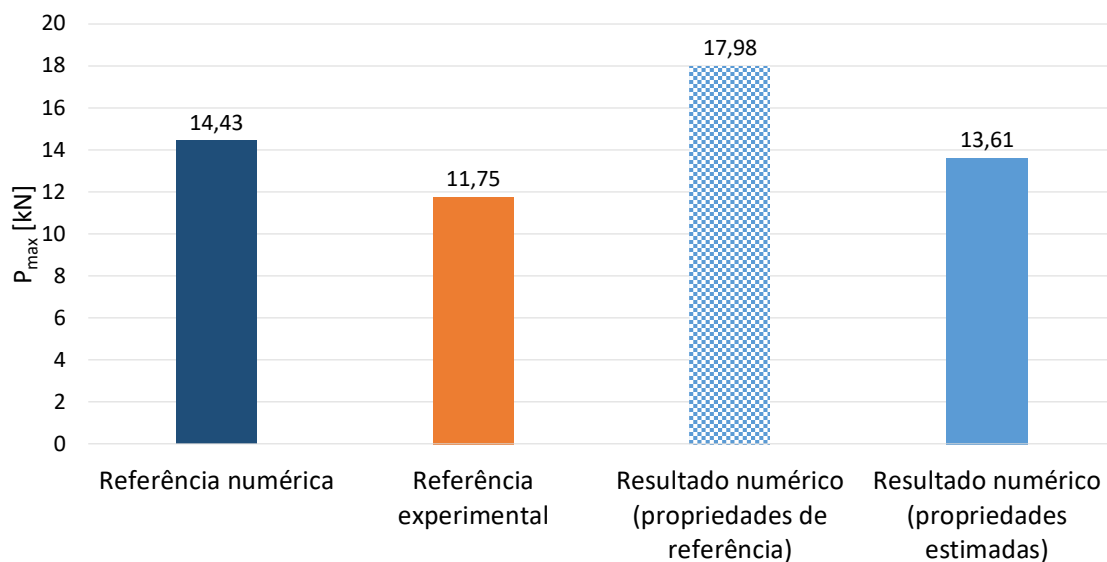


Figura 42 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo AV138

Com as alterações introduzidas foram obtidos novos resultados que resultaram num modelo numérico mais representativo das referências experimentais.

Os valores de carga máxima obtidos com o adesivo AV138 são apresentados na Figura 42. O valor de carga máxima obtido no resultado numérico em que foram utilizadas as propriedades de referência não coincide com o resultado obtido na referência numérica, apresentando um valor 25% superior. Resultou também num valor superior em 25% quando comparado com a referência numérica. Após atribuição das propriedades estimadas, o valor obtido foi 6% menor do que o valor obtido na referência numérica, mas ficou mais próximo da referência experimental para o qual se regista uma diferença de 16%.

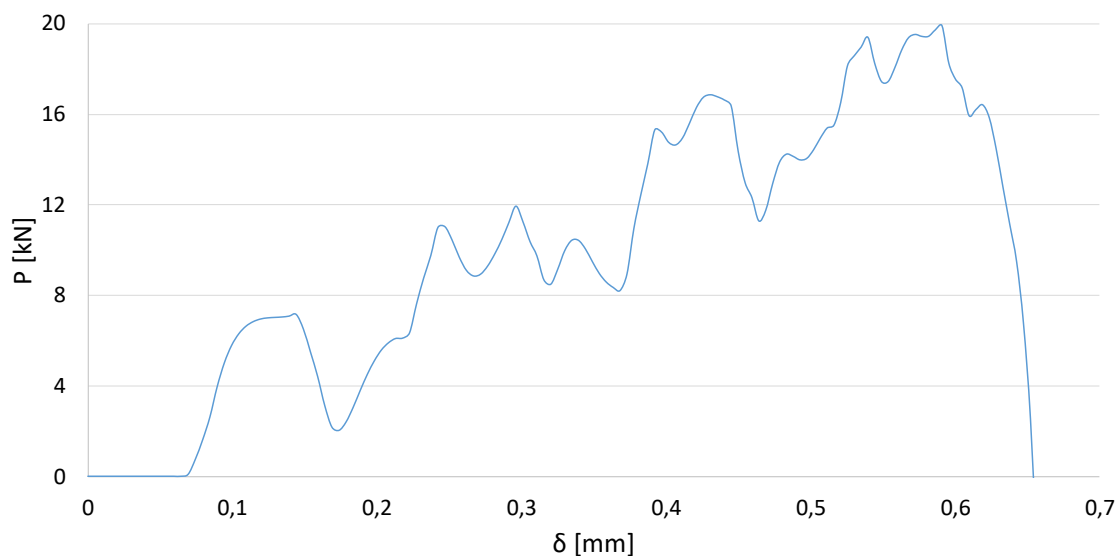


Figura 43 - Curva P- δ de validação do adesivo DP8005

A curva P- δ com o adesivo DP8005 é apresentada na Figura 43. O perfil de curva obtido é em tudo semelhante ao perfil de referência [1], ainda que com uma maior irregularidade ao longo da curva. Os 3 patamares de recuperação apresentados pela referência numérica são também apresentados no resultado da Figura 43 e estão presentes em ambos os casos para valores de deslocamentos semelhantes. O deslocamento máximo obtido está em linha com o gráfico da referência numérica, mas com valores significativamente inferiores ao deslocamento obtido na referência experimental.

Analisando os valores máximos obtidos com o adesivo DP8005, presentes na Figura 44, pode verificar-se que o valor do resultado numérico tem um valor próximo da referência

numérica – diferem em menos de 1%. Esses valores são, no entanto, 19% superiores ao valor obtido experimentalmente.

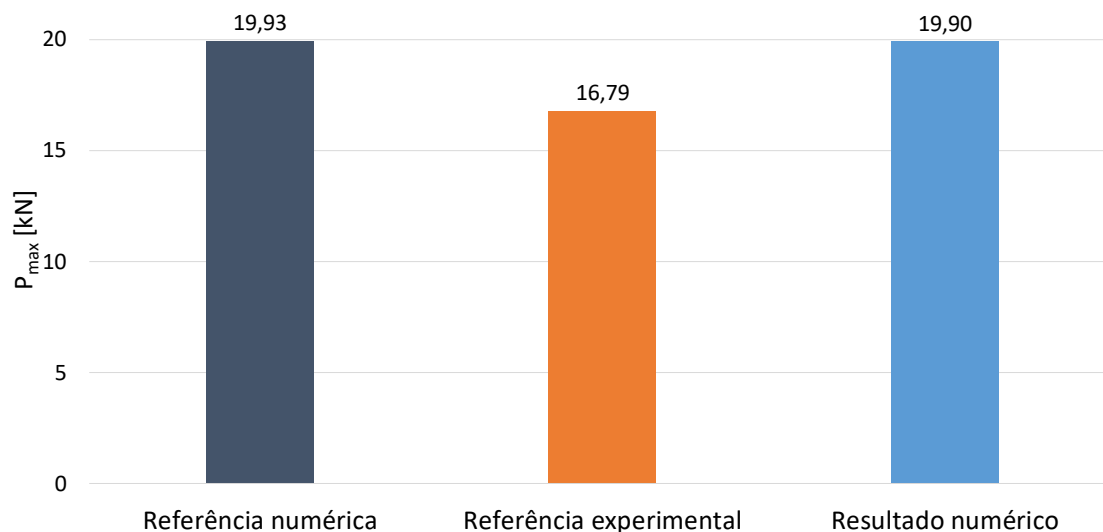


Figura 44 - Comparação do resultado obtido com valores de referência para o adesivo DP8005

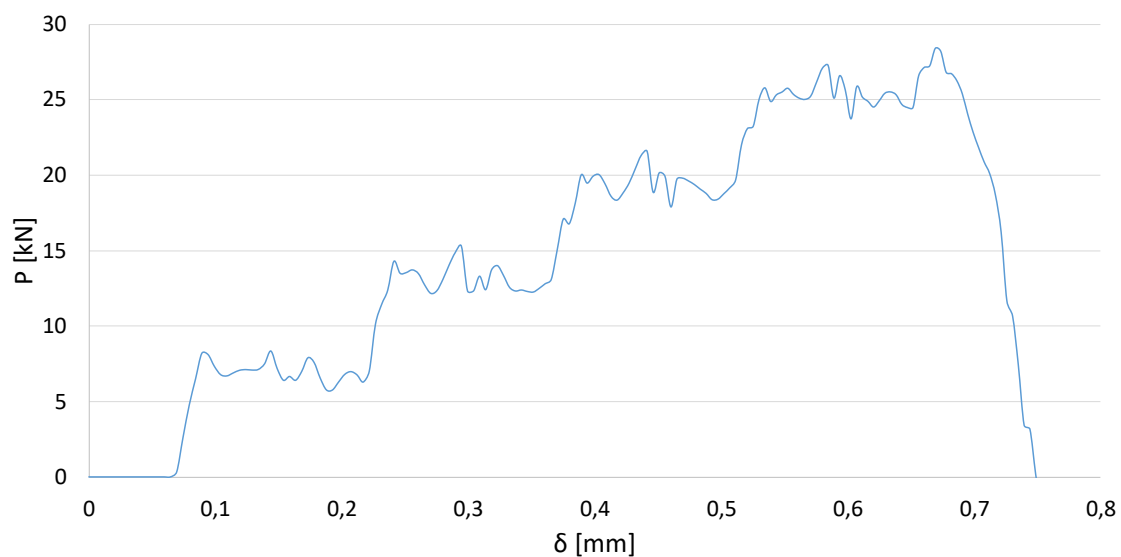


Figura 45 - Curva P- δ de validação do adesivo XNR6852 E-2

Por último, na Figura 45 é apresentada a curva P- δ para validação com o adesivo XNR6852 E-2. Tal como no caso anterior, identificam-se 3 patamares de recuperação antes de ser atingida carga máxima também presentes na referência numérica.

Registou-se um deslocamento máximo assim como o deslocamento correspondente à carga máxima com valores semelhantes ao da referência numérica. Uma vez mais, e como no caso anterior, o deslocamento máximo e deslocamento para carga máxima registados na referência experimental foram significativamente superiores.

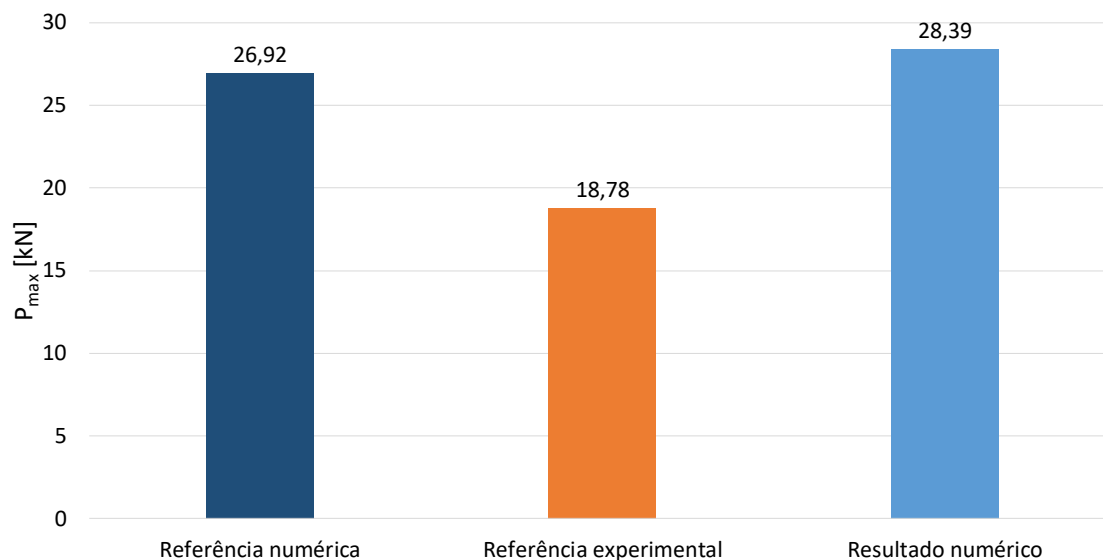


Figura 46 - Comparação do resultado obtido com valores de referência com o adesivo XNR6852 E-2

Na Figura 46 pode comparar-se diretamente os valores de carga máxima obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 para cada um dos ensaios. O resultado numérico obtido foi apenas 5% superior ao da referência numérica, registando-se um aumento substancial de 51% em relação à referência experimental.

3.1.3.5 Discussão dos resultados

Todos os resultados numéricos obtidos apresentam nas suas curvas P- δ algum deslocamento inicial sem que seja registada força de reação no encastramento. Pode verificar-se esse mesmo fenómeno nos ensaios dinâmicos realizados por Varajão [101] e Araújo et al. [79] com a utilização do *software* Abaqus®. Este efeito está também documentado por Liao et al. [77], no qual foram utilizados os *softwares* Ansys® e LS-Dyna®.

O efeito apresentado é provocado por efeitos de inércia associados à aplicação de uma carga dinâmica. Para verificar esse efeito, o campo *field outputs* foi momentaneamente configurado para registar todos os incrementos temporais para se obter uma sequência gráfica dos primeiros momentos do ensaio numérico. Na Figura 47 está representada a

propagação de tensões de von Mises provocada pelo impacto. É perceptível que, apesar de se registar algum deslocamento no aderente superior, apenas decorridos alguns instantes se dá origem a tensões de reação no encastramento.

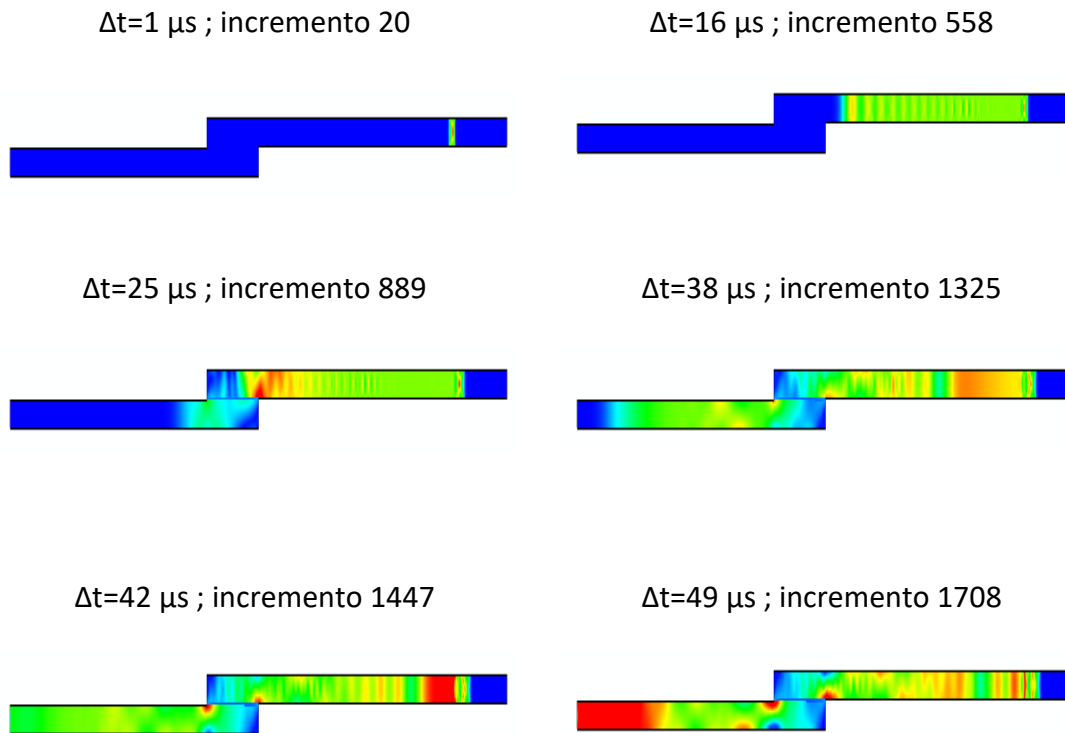


Figura 47 - Propagação de tensões após impacto com o adesivo AV138

O modelo de validação com o adesivo RTV106 não pode ser considerado válido. Apesar de com a utilização de uma linha de tendência ter sido possível replicar a referência numérica, todos os valores numéricos ficaram aquém da referência experimental. Não sendo possível modelar a rotura adesiva nos modelos numéricos aplicados, apenas rotura coesiva é considerada, e tendo havido rotura adesiva nos ensaios experimentais realizados por Silva [1] seria expectável um valor de carga máxima substancialmente superior nos ensaios numéricos. A incongruência no resultado deve-se ao facto de apenas se utilizarem propriedades válidas para casos estáticos (Tabela 4). Acresce o facto de o modelo coesivo apresentar instabilidade com as propriedades utilizadas.

Para a adesivo AV138 não foi possível replicar o resultado da referência numérica. Para isso o valor de algumas propriedades tiveram de ser ajustados de modo a obter resultados mais representativos dos resultados experimentais obtidos por Silva [1]. Devido aos resultados obtidos com os valores de referência, conclui-se que a

extrapolação dos valores obtidos para a velocidade de impacto de 1,75 m/s não é uma metodologia válida para este adesivo. O modelo foi validado utilizando propriedades estimadas (Tabela 4).

A diferença na carga máxima obtida entre o resultado numérico e a referência numérica com o adesivo DP8005 resulta do facto de ter sido utilizada malha uniforme sem utilização do efeito *bias* utilizado por Silva [1]. A possibilidade de ter sido utilizada uma frequência de registo de dados diferente no *history output* poderá também ter contribuído para a diferença. Existe uma diferença de 19% entre o resultado numérico e a referência experimental, mais elevado no primeiro. As condições de ensaio numérico podem não ser possíveis de replicar experimentalmente na sua totalidade. No ensaio numérico é considerada total homogeneidade dos materiais, espessura de adesivo perfeitamente constante, aplicação de adesivo sem bolhas de ar e perfeito alinhamento. Acresce ainda o facto de os ensaios experimentais estarem sujeitos a folgas e deformação elástica dos componentes do equipamento de ensaio assim como a precisão da célula de carga que podem influenciar não só a carga máxima como também o deslocamento. Como resultado, a deformação experimental é tipicamente superior à estimada pelo modelo numérico.

Por último, no resultado numérico com o adesivo XNR6852 E-2 obteve-se uma elevada concordância com a referência numérica, com um valor superior em 5% para o primeiro (Figura 46). A diferença no valor de carga máxima registada resulta dos mesmos fatores enunciados acima para o caso do adesivo DP8005. A diferença para a referência experimental é de 51%. Apesar da elevada discrepância, e mais uma vez pelas mesmas razões atribuídas no caso do adesivo DP8005, é expectável obter resultados superiores em ensaios numéricos. Por se tratar de uma evolução de um adesivo comercial ainda em estado de protótipo foi decidido não rever os valores de tensões coesivas para a velocidade de ensaio utilizada devido à indisponibilidade de maior número de ensaios experimentais para determinação de propriedades. Conclui-se, no entanto, que a extrapolação de propriedades resulta em valores de tensões coesiva demasiado elevados.

3.2 Estudo numérico

3.2.1 Geometria da junta

De modo a determinar a influência de alterações geométricas no comportamento de cada junta adesiva serão alterados vários parâmetros geométricos de modo a estudar o seu efeito na carga máxima suportada e também na distribuição de tensões.

Inicialmente serão apenas alteradas dimensões do comprimento de sobreposição e espessura dos aderentes, independentemente, sem que haja alterações geométricas dos aderentes. De seguida serão introduzidas alterações geométricas nos aderentes. As variações produzidas são: chanfro exterior dos aderentes, chanfro interior dos aderentes e filete de adesivo. Em todos os casos será mantido o comprimento de sobreposição de 25 mm para que possa haver comparação entre alterações geométricas sem que haja influência da área de adesivo aplicada.

3.2.2 Materiais utilizados

3.2.2.1 Aderentes

As propriedades do material do aderente permanecem as mesmas do material utilizado para validação do modelo numérico (Tabela 2). Ou seja, o material utilizado é o aço DIN 55 Si7. Neste estudo numérico passou a ser considerada a deformação plástica do material dos aderentes de modo a poder identificar possíveis concentrações de tensões que não permitam potenciar a total capacidade de absorção de energia da junta adesiva. Isto foi conseguido com a introdução da curva tensão-deformação do material.

3.2.2.2 Adesivos

Os adesivos utilizados no estudo numérico permanecem os mesmos utilizados para validação do modelo numérico com a exceção do adesivo RTV106.

O modelo numérico não foi considerado válido no caso específico do adesivo RTV106 pelo que não seria possível obter resultados válidos em função de alterações geométricas. A validação foi impossibilitada pelos motivos enunciados no capítulo 3.1.3.5.

Dadas as características bastantes distintas dos restantes adesivos – AV138, DP8005 e XNR6852 E-2, frágil, dúctil e tenaz (que combina ductilidade com resistência), respetivamente – é possível verificar não só a alteração de resposta dinâmica da junta adesiva em função da geometria como também comparar a eficácia de cada modificação em função das propriedades dos adesivos. As propriedades dos mesmos podem ser consultadas na Tabela 4.

3.2.3 Estudo dos parâmetros geométricos principais

3.2.3.1 Comprimento de sobreposição

A geometria da JSS utilizada é representada na Figura 48 e apenas é variado o comprimento de sobreposição (L_0). Os valores de L_0 atribuídos são 12,5, 25, 37,5 e 50 mm.

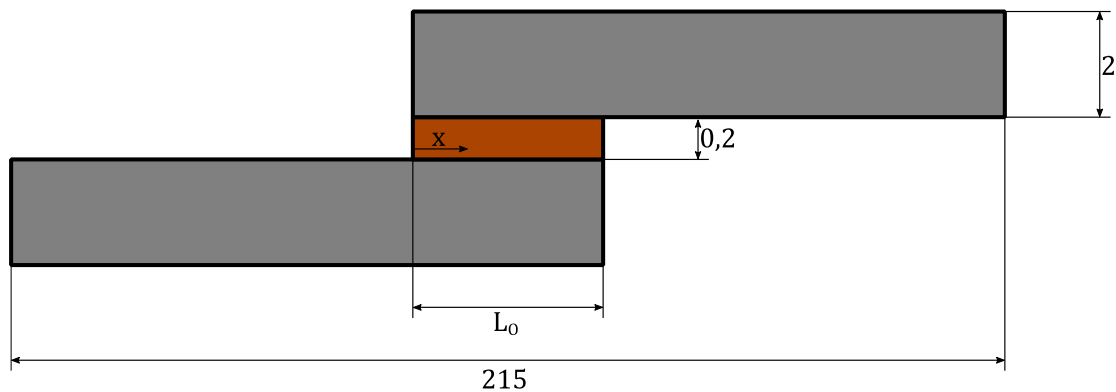


Figura 48 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de L_0

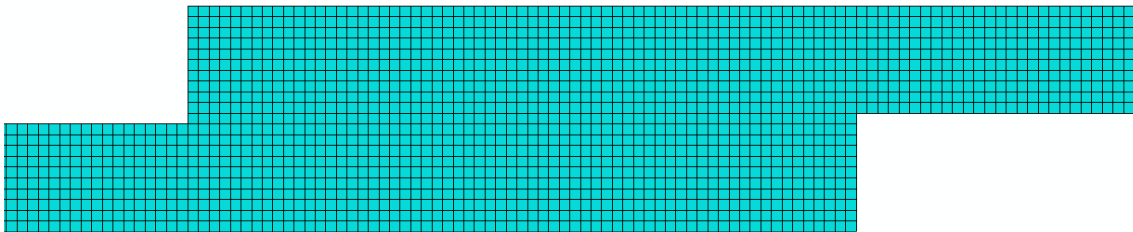


Figura 49 – Visualização da malha do modelo com $L_0 = 12,5$ mm

Na Figura 49 é representada a malha utilizada para o modelo com 12,5 mm de sobreposição. Para as restantes dimensões de L_0 a malha utilizada é idêntica, constituída apenas por quadriláteros. Na Tabela 5 é apresentado o número de elementos para cada comprimento de sobreposição.

Tal como no modelo de validação, a zona adesiva é constituída por elementos *sweep* do tipo COH2D4 (representados a amarelo na Figura 50) e os aderentes por elementos estruturados CPE4R.

Na Figura 51 pode ver-se em tons de cor distintos a atribuição dos diferentes materiais, adesivo e aço. As condições de ensaio – condições fronteira e energia – são as condições

implementadas no capítulo 3.1.1, que serão mantidas ao longo desta dissertação. É também mantido o modelo de dano coesivo detalhado na secção 3.1.2.

Tabela 5 - Número de elementos em função de L_0

Elementos	L_0 [mm]			
	12,5	25	37,5	50
CPE4R	12630	13250	13890	14510
COH2D4	63	125	188	250
Total	12693	13375	14078	14760

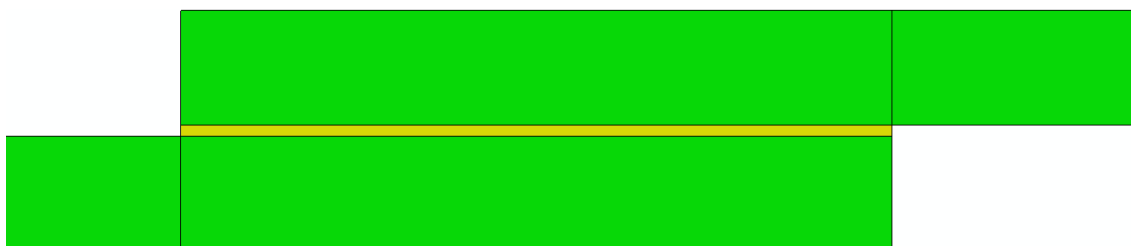


Figura 50 - Controlo de malha no modelo com $L_0=12,5$ mm

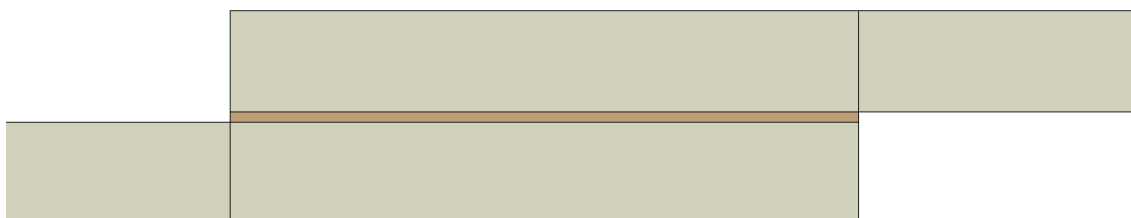


Figura 51 - Atribuição de materiais no modelo com $L_0=12,5$ mm

3.2.3.1.1 Distribuições de tensões

No decorrer desta dissertação, o comprimento de sobreposição representado nos gráficos de distribuição de tensões resulta da divisão do valor da coordenada x (Figura 48) pelo comprimento total de sobreposição. Deste modo é possível a comparação de distribuição de tensões entre JSS com diferentes comprimentos de sobreposição. As tensões apresentadas (corte ou arrancamento) resultam do quociente entre o valor de tensão efetiva sobre a tensão média de corte obtida para o valor de L_0 respetivo.

Na Figura 52 é apresentada a distribuição de tensões de corte com o adesivo AV138 para os L_0 ensaiados. Não é observável nenhuma diferença entre a concentração de tensões para L_0 de 25 e 37,5 mm. Nos locais onde há concentrações de tensões de corte, os extremos da camada adesiva, não há diferença de magnitude entre eles. O valor de 50 mm de sobreposição é aquele que pior desempenho regista, apresentando um pico destacado num dos extremos da camada adesiva. Pelo contrário, o melhor desempenho é registado para o menor comprimento de JSS – 12,5 mm – sendo que a tensão acumulada nos extremos da camada adesiva se encontra abaixo dos restantes valores de L_0 . Ao contrário do que acontece em ensaios quasi-estáticos, não se verifica simetria na distribuição de tensões de corte [102, 103]. Existe uma degradação da distribuição de tensões, verificada também em casos estáticos [104], com o aumento de L_0 , ainda que nos casos dinâmicos esta relação não seja tão linear devido às ondas de tensão de impacto.

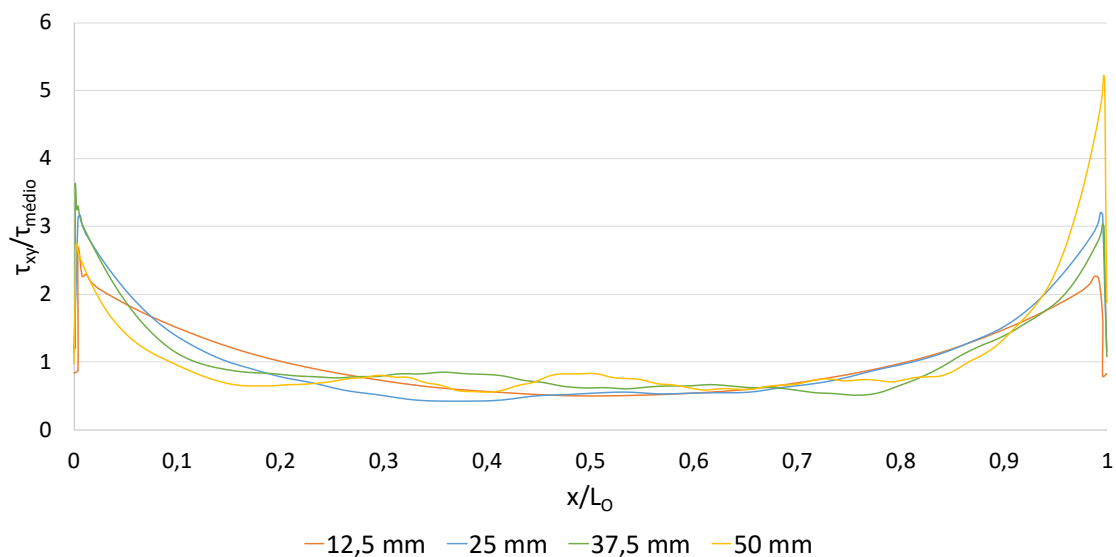


Figura 52 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de L_0

As tensões de arrancamento com o adesivo AV138 são apresentadas na Figura 53. Todas as dimensões de L_0 apresentam resultados com distribuição aproximadamente simétrica nos extremos à exceção da junta adesiva com $L_0=50$ mm. Neste caso, um dos extremos da camada adesiva a concentração de tensões de arrancamento é mais reduzida. Tal como na distribuição de tensões de corte, também na distribuição de tensões de arrancamento se verifica a assimetria e maior variação ao longo do comprimento da JSS ao contrário do que acontece em ensaios quasi-estáticos [102, 103]. Com o aumento de L_0 , aumenta também a concentração e gradientes de tensão nas

extremidades da camada adesiva, tal como se verifica nos casos estáticos, embora neste último caso com uma simetria perfeita relativamente ao centro da junta adesiva [105].

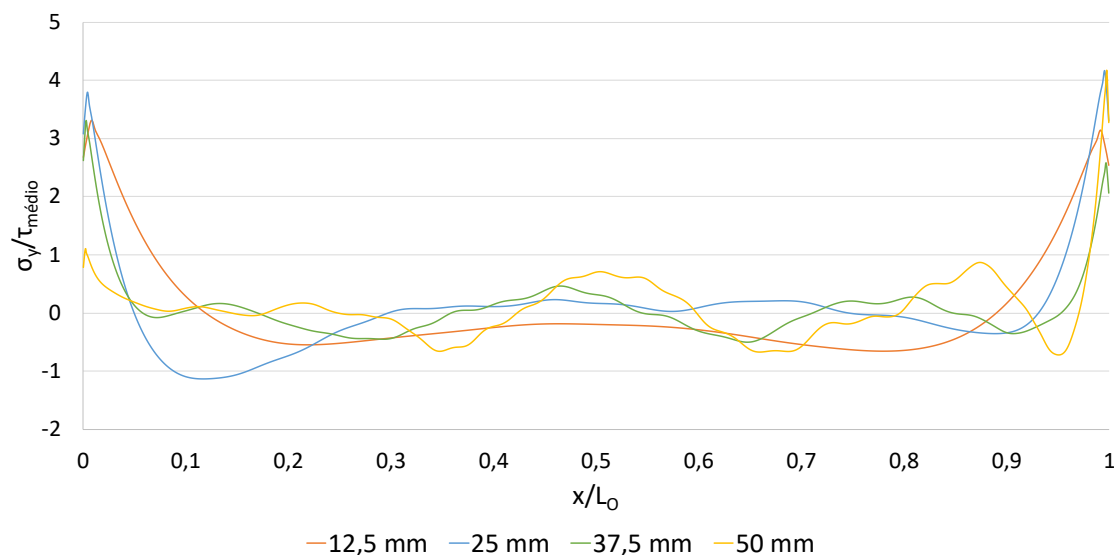


Figura 53 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de L_0

Analisando as tensões de corte para o adesivo DP8005 (Figura 54) repete-se o melhor desempenho do menor L_0 . A concentração de tensões junto aos extremos da camada adesiva aumenta com o aumento de L_0 . No caso de $L_0=50$ mm, em relação a $L_0=37,5$ mm, não há um aumento significativo nos extremos da camada adesiva apesar de haver uma menor uniformidade no centro da camada adesiva. Este efeito deve-se ao efeito de deformação diferencial dos aderentes, que resulta na variação da deformação longitudinal dos mesmos ao longo da camada de adesivo, e conduz a picos de diferencial de deslizamento da camada adesiva nas duas extremidades da ligação. Este efeito ao largamente discutido para o caso de solicitação estática [89]. Para todas as dimensões de L_0 , os picos registados são de menor magnitude com o adesivo DP8005 do que os registados com o adesivo AV138. O facto de se tratar de um adesivo com maior flexibilidade faz com que o próprio adesivo potencie uma distribuição mais uniforme. Neste caso, com o adesivo dúctil, é observada mais uma vez a assimetria das distribuições por se tratar de um ensaio dinâmico.

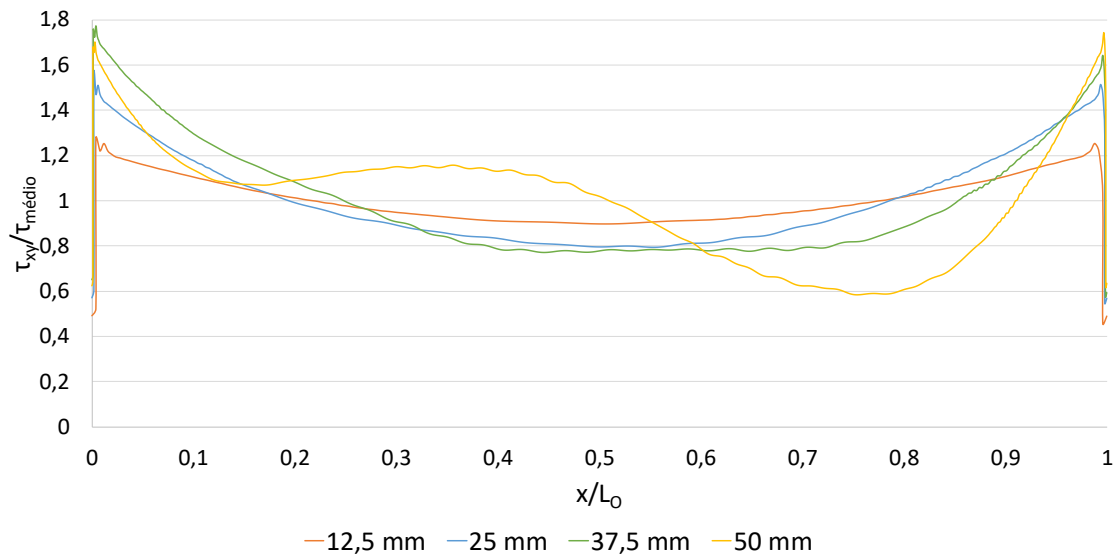


Figura 54 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de L_0

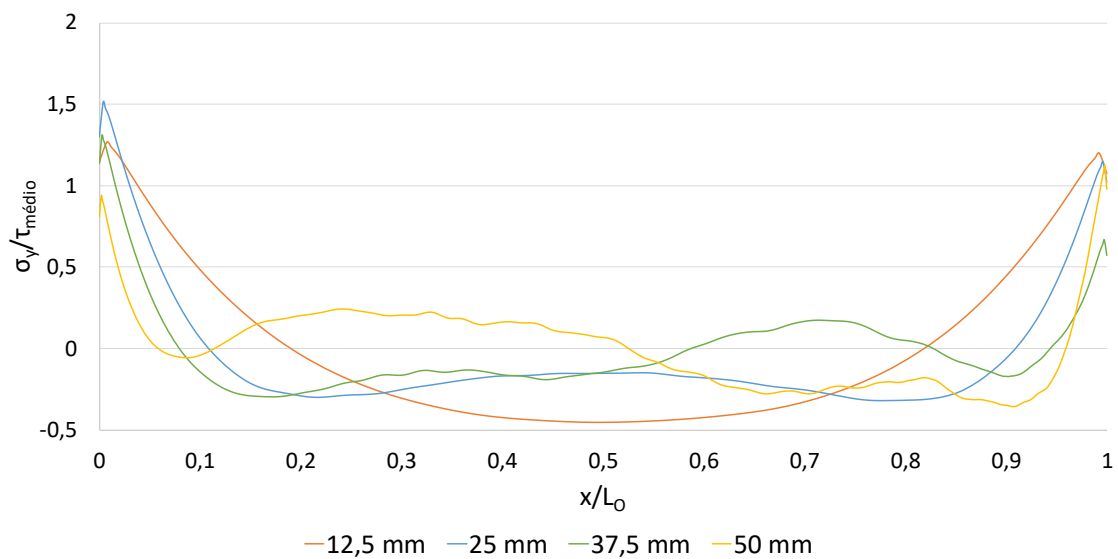


Figura 55 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de L_0

O desempenho na distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo DP8005 está representado na Figura 55. Para o valor de L_0 de 25 mm há registo de um pico superior aos restantes ensaios. Os ensaios de $L_0=37,5$ e $L_0=50$ mm destacam-se dos restantes por terem menor concentração de tensões em extremos opostos. Na parte central da junta adesiva os resultados diferem. Enquanto nas duas JSS de menor dimensão só há existência de compressão, nas duas juntas de maior dimensão há também existência de tensões de arrancamento. À exceção do menor comprimento de sobreposição, no qual

a propagação das tensões resultantes do impacto se faz em menor tempo, a assimetria das distribuições apresentadas resulta do facto de se tratar de um ensaio dinâmico. Este comportamento contrasta com o comportamento observado em casos estáticos, em que a tendência de concentração de tensões se acentua monotonicamente com o aumento de L_0 [105].

Na Figura 56 é apresentada a distribuição de tensões de corte com o adesivo XNR6852 E-2. O melhor desempenho é registado com o menor L_0 da zona adesiva. Os comprimentos L_0 intermédios, de 25 e 37,5 mm, apresentam um desempenho semelhante com ligeira vantagem para a de maior dimensão devido ao facto de num dos extremos da JSS apresentar uma menor concentração de tensões. A JSS de maior dimensão apresenta uma distribuição mais irregular ao longo de L_0 . Agrava o facto de ser o ensaio em que se regista o maior pico de tensão acumulado num dos pontos, correspondente a um dos extremos da camada adesiva. Observa-se que permanecem os efeitos do ensaio dinâmico do qual resultam distribuições de tensões assimétricas. A magnitude da concentração de tensões de corte com o adesivo XNR6852 E-2 encontra-se entre os dois restantes adesivos, como resultado da rigidez intermédia deste adesivo em relação aos restantes.

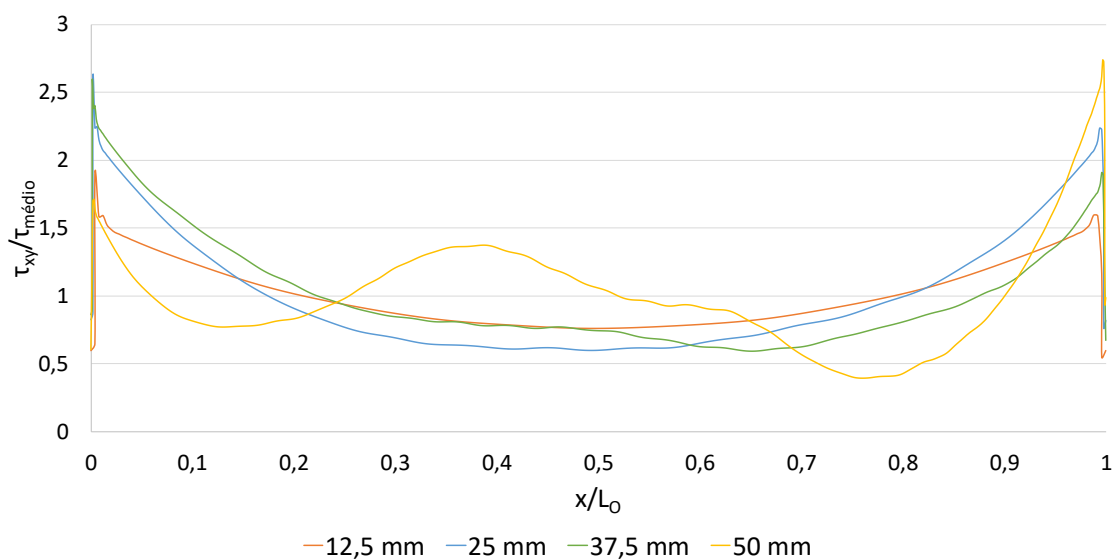


Figura 56 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

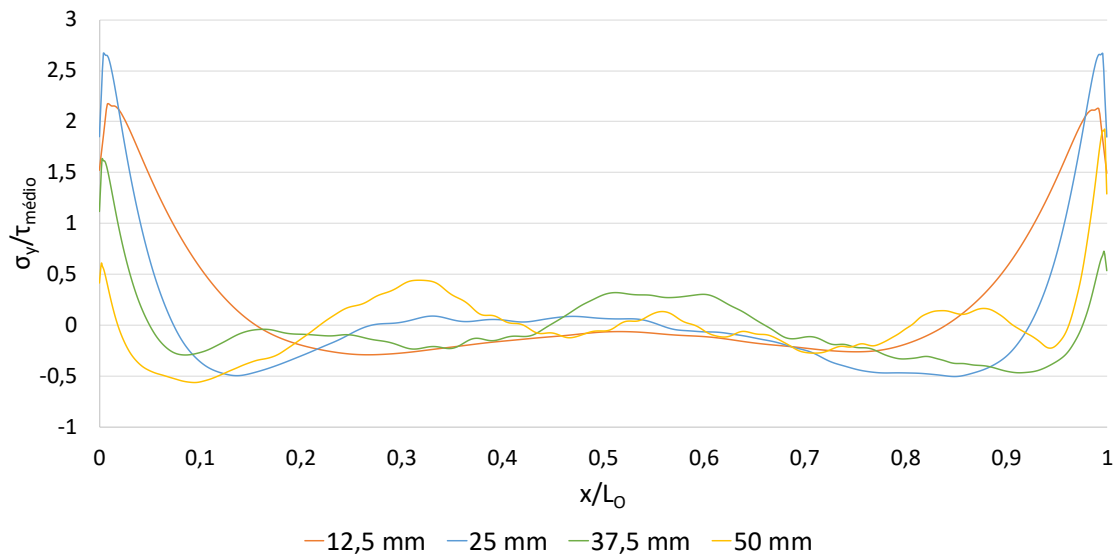
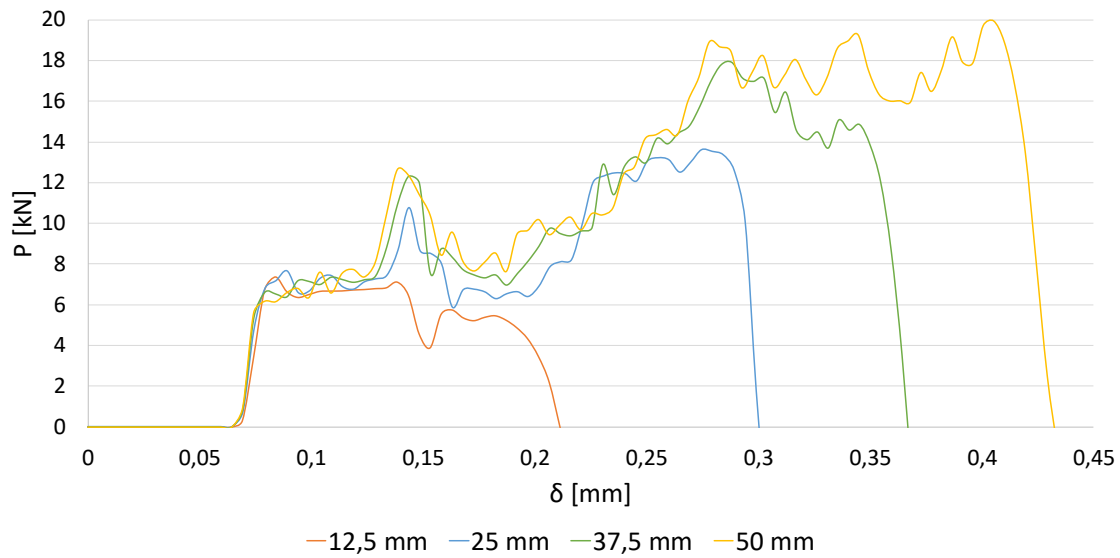
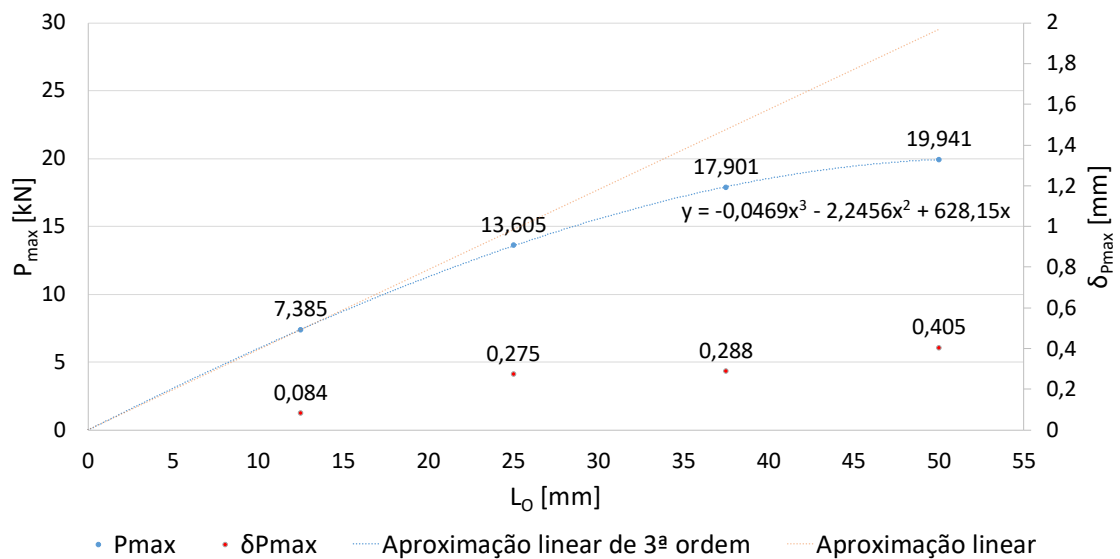


Figura 57 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

Para o mesmo adesivo, XNR6852 E-2, pode ver-se na Figura 57 a distribuição de tensões de arrancamento. Destaca-se pela negativa, tendo os maiores picos de concentração, a JSS com $L_0=25$ mm seguida pelo ensaio com $L_0=12,5$ mm. Os resultados dos dois maiores comprimentos de sobreposição apresentam um melhor desempenho com distribuição de tensões muito semelhante. Entre eles, difere o facto de a concentração de tensões de arrancamento se encontrar em extremos opostos da camada adesiva. Verifica-se uma vez mais que não há simetria na distribuição de tensões de arrancamento que se verifica nos ensaios estáticos. Tal como na distribuição de tensões de corte, a magnitude de concentração de tensões de arrancamento tem valores intermédios aos obtidos com os adesivos AV138 e DP8005, fruto da rigidez de valor intermédio do adesivo XNR6852 E-2.

3.2.3.1.2 Resistência das juntas

Na Figura 58 são apresentadas as curvas $P-\delta$ para os vários L_0 da JSS com o adesivo AV138. A carga máxima e o deslocamento aumentam com o aumento de L_0 .

Figura 58 - Curva P-δ com o adesivo AV138 em função de L₀Figura 59 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de L₀

Os valores de carga máxima e deslocamento correspondente à carga máxima para cada comprimento de sobreposição com o adesivo AV138 podem ser consultados na Figura 59. Pode verificar-se que o valor de carga máxima aumenta com o aumento de L₀. Esse aumento de resistência é acompanhado também por um maior deslocamento até ao ponto de rotura. Foi acrescentada uma linha de tendência linear de modo a verificar visualmente a proporcionalidade do aumento de resistência com o aumento de L₀. A

variação é tipicamente linear para valores de L_0 pequenos. Regista-se, no entanto, uma perda de linearidade acima de $L_0=25$ mm.

A eficácia do aumento de L_0 pode ser analisada com maior detalhe na Tabela 6. A diferença apresentada na última coluna da tabela diz respeito à variação percentual de cada L_0 em relação a $L_0=12,5$ mm. A proporção de aumento da carga máxima em relação ao aumento de área adesiva está de acordo com os resultados observados nas distribuições de tensões. Não se verifica linearidade nessa proporção devido ao aumento de concentração de tensões de corte com o aumento de L_0 [105]. A penalização no aumento de 25 mm para 37,5 mm não foi significativa pois, como analisado no capítulo 3.2.3.1.1, ambas tiveram desempenho semelhante. A JSS de maior dimensão de L_0 é a que maior penalização sofre devido essencialmente à maior concentração de tensões de corte que podem ser vistas na Figura 52.

Tabela 6 – Influência de L_0 na carga máxima com o adesivo AV138

L_0 [mm]	P_{max} [kN]	Diferença
12,5	7,385	-
25	13,605	+84%
37,5	17,901	+142%
50	19,941	+170%

Na Tabela 7 é apresentada a energia absorvida pelo modelo com a aplicação do adesivo AV138 transferida pelo impacto. No decorrer deste trabalho o cálculo de energia absorvida pelo modelo é feito através do cálculo da área abaixo da curva $P-\delta$. O cálculo foi feito no *software* R® [106] com uso do ambiente de desenvolvimento integrado RStudio® [107]. Foi utilizada a função *trapz* da biblioteca *pracma* para cálculo de área por integração trapezoidal [108].

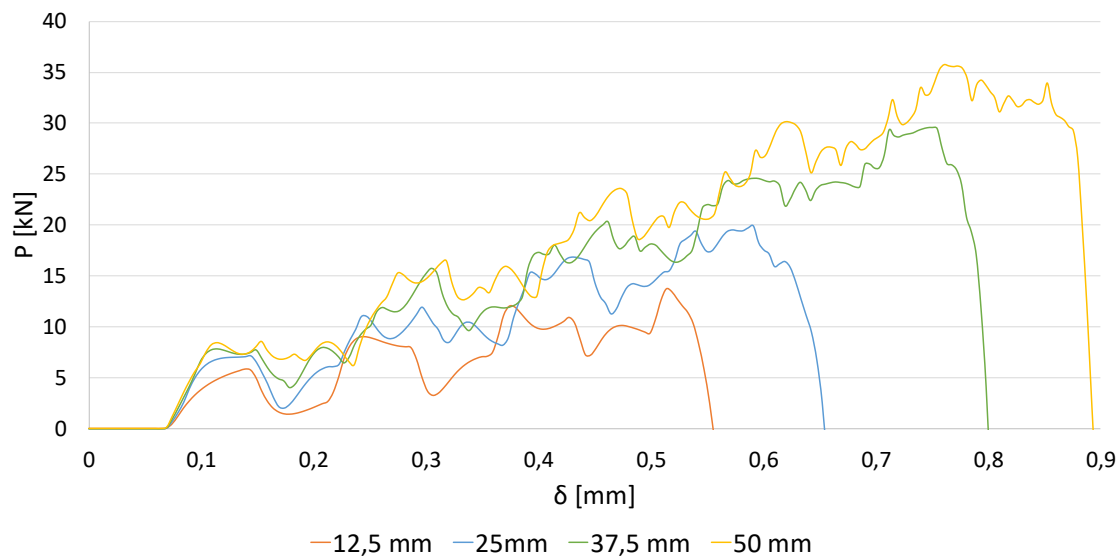
Com o aumento do L_0 e o conseqüente aumento da área da zona adesiva, verifica-se um aumento substancial a cada incremento de L_0 . A energia absorvida aumenta numa razão superior à razão de aumento de comprimento, devido ao maior volume de material para absorção de impacto, o que por sua vez resulta num maior tempo de impacto e deslocamento até à rotura.

Tabela 7 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de L_0

L_0 [mm]	E [J]	Diferença
12,5	0,78	-
25	2,03	+160%
37,5	3,23	+314%
50	4,63	+494%

Na Figura 60 são apresentadas as curvas $P-\delta$ com o adesivo DP8005 para os diferentes valores de L_0 ensaiados. Tal como no caso do adesivo AV138, tanto a carga suportada como o deslocamento máximo atingido aumentam com o aumento de L_0 .

Os valores de carga máxima atingida e o deslocamento respetivo no qual se deu a rotura estão presentes na Figura 61. O deslocamento correspondente à carga máxima atingida aumenta com o aumento do comprimento de sobreposição, sem que haja linearidade logo desde $L_0=12,5$ mm.

Figura 60 - Curva $P-\delta$ com o adesivo DP8005 em função de L_0

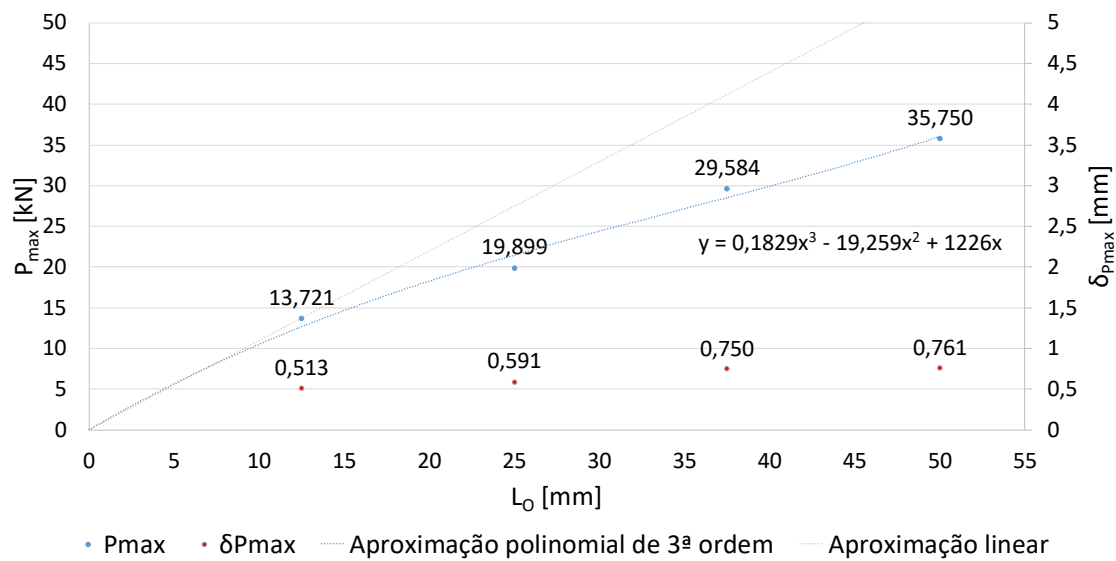


Figura 61 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de L_0

O acréscimo de L_0 não causa um aumento linear na carga máxima atingida com o adesivo DP8005. A razão do aumento pode ser vista graficamente na Figura 61 e analisada na Tabela 8. Apesar de os valores máximos atingidos serem mais elevados, o aumento percentual resultante do aumento de L_0 é menos significativo do que no caso do adesivo AV138. No entanto, devido à melhor capacidade de dispersão da energia de impacto por se tratar de um adesivo flexível, há maior linearidade na proporção do aumento de carga com aumento de L_0 quando comparado com o adesivo AV138. Esse facto pode ser observado na distribuição de tensões de corte apresentada na Figura 54.

Tabela 8 - Influência de L_0 na carga máxima com o adesivo DP8005

L_0 [mm]	P_{max} [kN]	Diferença
12,5	13,721	-
25	19,899	+45%
37,5	29,584	+116%
50	35,750	+161%

A energia absorvida pelo modelo o adesivo DP8005 (Tabela 9) apresenta um aumento menor em função de L_0 do que com o adesivo AV138. Apesar do menor aproveitamento da maior área de sobreposição por parte do adesivo DP8005, a energia absorvida com o aumento de L_0 também regista um aumento devido à maior carga suportada e ao maior deslocamento obtido.

Tabela 9 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de L_0

L_0 [mm]	E [J]	Diferença
12,5	3,36	-
25	6,49	+93%
37,5	11,80	+251%
50	16,42	+389%

As curvas P - δ com o adesivo de maior tenacidade, XNR6852 E-2, são apresentadas na Figura 62. Uma vez mais os resultados apresentam carga aplicada mais elevada quanto maior o valor de L_0 . O deslocamento máximo teve o mesmo comportamento com a exceção da JSS de 12,5 mm de sobreposição na qual foi obtido um deslocamento máximo superior à JSS de 25 mm de sobreposição.

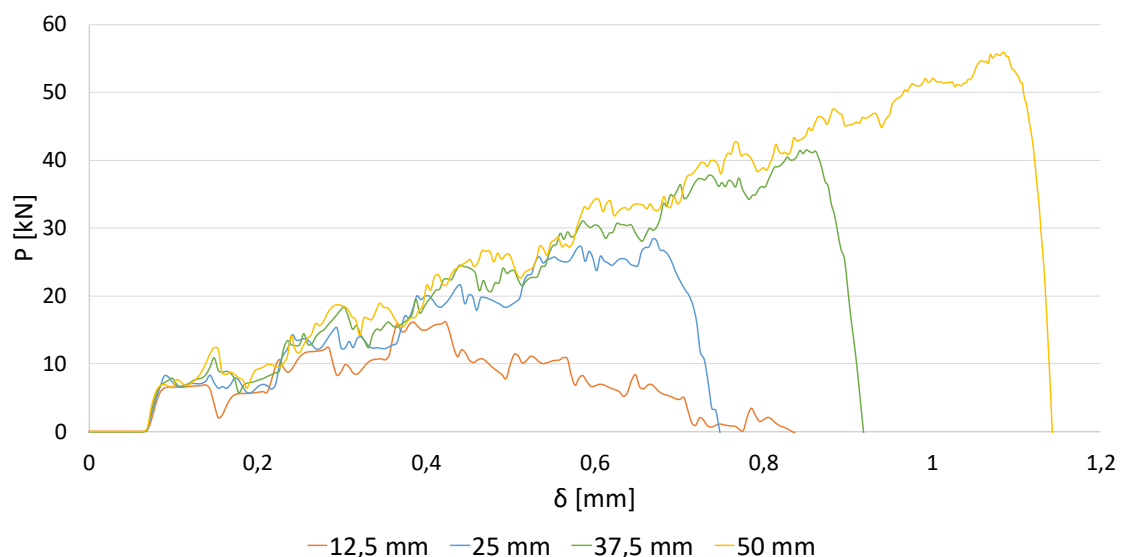


Figura 62 - Curva P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

Apesar de o deslocamento máximo para 12,5 mm ter sido superior ao resultado da JSS de 25 mm o mesmo não se verificou no deslocamento correspondente à carga máxima. Tal como nos dois outros adesivos, com o adesivo XNR6852 E-2 a carga máxima atingida e o deslocamento correspondente aumentam com o aumento de L_0 . Os valores registados podem ser consultados na Figura 63.

Na Tabela 10 é apresentada a influência de L_0 na carga máxima com o adesivo tenaz. De entre os três adesivos objeto de estudo neste trabalho, este foi o adesivo no qual se registou um maior aproveitamento do aumento da área da camada adesiva. O adesivo XNR6852 E-2 não só registou os valores mais elevados de carga máxima suportada como é também o adesivo no qual o aumento de L_0 é mais significativo. Este comportamento está relacionado com a maior tenacidade deste adesivo, que se traduz num aproveitamento superior da totalidade da camada adesiva. Este comportamento é idêntico ao observado para um carregamento estático, que se encontra amplamente descrito na literatura [104].

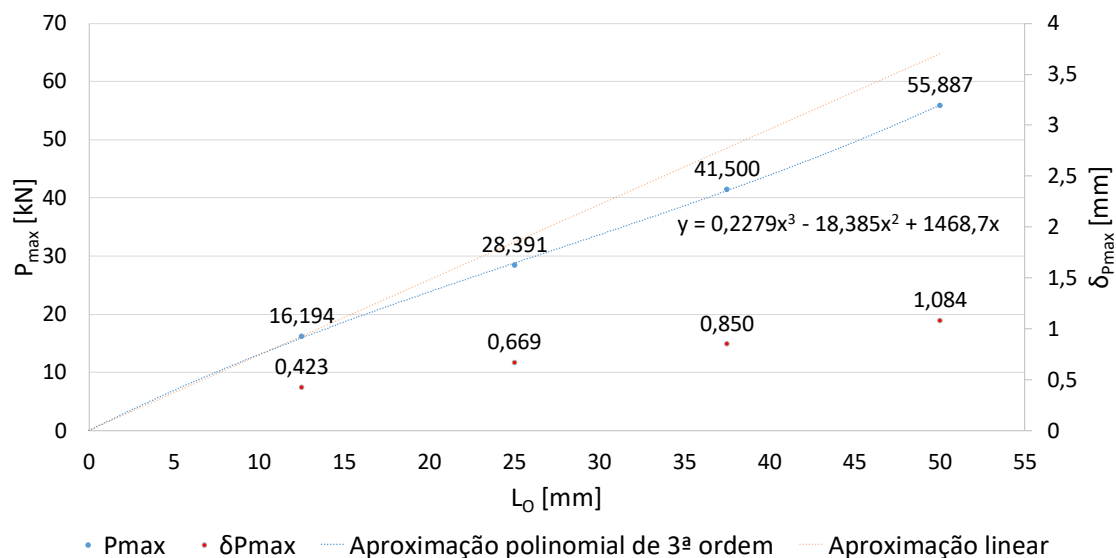


Figura 63 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

Na Tabela 11 é apresentada a energia absorvida pelo modelo com o adesivo XNR6852 E-2. Sendo que se trata de um adesivo especialmente desenvolvido para aplicações sujeitas a impacto, os resultados vão de encontro ao esperado sendo que é o adesivo que apresenta maior capacidade de absorção de energia. Por outro lado, não apresentou o maior acréscimo de energia absorvida com o aumento de L_0 em nenhum dos casos, sendo superado por um dos outros adesivos no caso de 25 ou 37,5 mm ou até mesmo por ambos no caso de o aumento de L_0 ser feito até 50 mm.

Tabela 10 - Influência de L_0 na carga máxima com o adesivo XNR6852 E-2

L_0 [mm]	P_{max} [kN]	Diferença
12,5	16,194	-
25	28,391	+75%
37,5	41,500	+156%
50	55,887	+245%

No estudo da influência de L_0 na JSS apenas se verificou deformação plástica dos aderentes com o adesivo XNR6852 E-2. Foram ultrapassados os limites de elasticidade com os comprimentos de sobreposição de 25, 37,5 e 50 mm (Figura 64). A deformação plástica máxima obtida foi de 0,02%, 0,2% e 0,4%, respetivamente. Devido aos reduzidos valores, não se poderá considerar que a deformação plástica tenha influência nas distribuições de tensões e conseqüentemente na carga máxima obtida.

Tabela 11 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0

L_0 [mm]	E [J]	Diferença
12,5	5,86	-
25	11,03	+88%
37,5	19,29	+229%
50	32,55	+455%

Todos os adesivos apresentaram cargas máximas mais elevadas a cada aumento de L_0 . O adesivo XNR6852 E-2 é aquele que maior incremento apresenta com os maiores valores de L_0 , enquanto o adesivo AV138 apresenta a maior diferença entre os dois valores de L_0 mais reduzidos. Para todos os valores de L_0 testados, o menor incremento foi obtido com o adesivo DP8005.

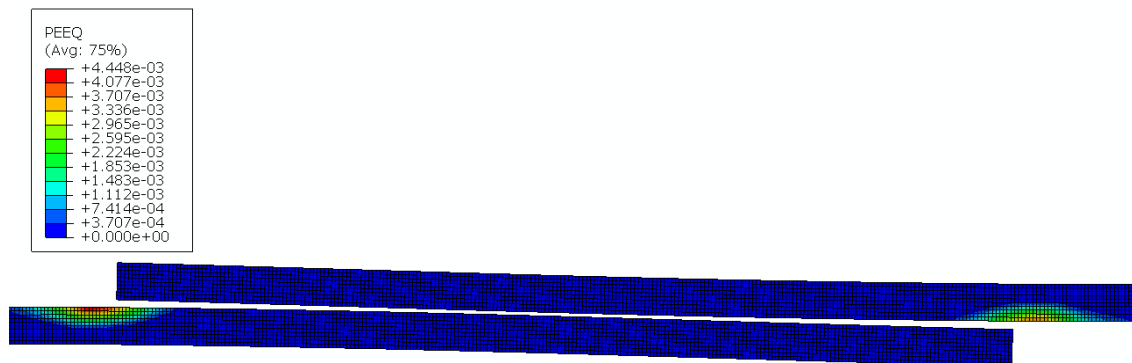


Figura 64 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $L_0=50$ mm

3.2.3.2 Espessura dos aderentes

A geometria da JSS utilizada é representada na Figura 65 e apenas é variada a espessura dos aderentes (t). Os valores de t utilizados são 1, 2, 3 e 4 mm.

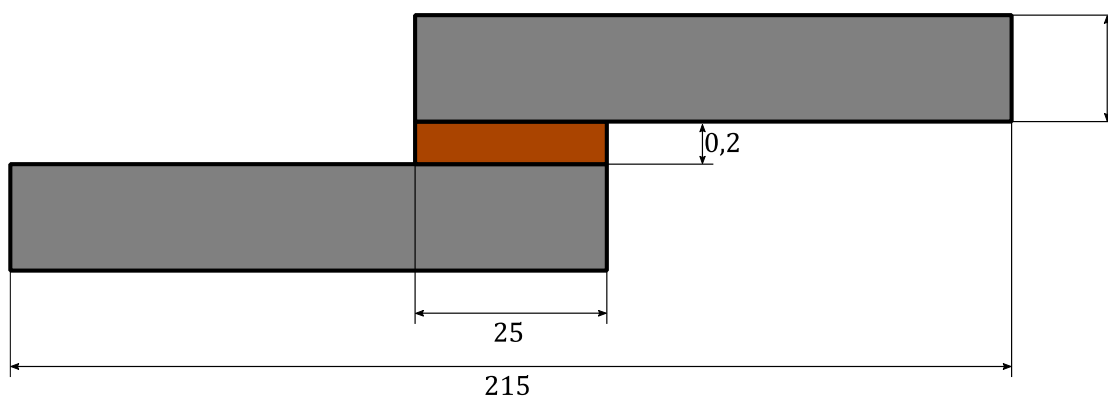


Figura 65 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de t

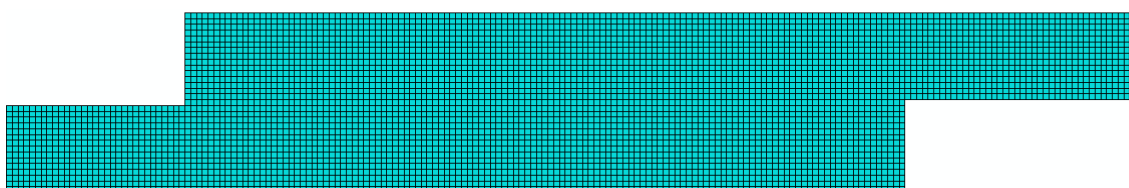


Figura 66 - Visualização da malha do modelo com $t=3$ mm

Na Figura 66 é representada a malha utilizada para o modelo com aderentes com 3 mm de espessura. Para as restantes dimensões de t a malha utilizada é idêntica, constituída

apenas por quadriláteros. Na Tabela 12 é apresentado o número de elementos para cada variação de espessura de aderente.

Tabela 12 - Número de elementos em função de t

Elementos	t [mm]			
	1	2	3	4
CPE4R	6625	13250	19875	26500
COH2D4	125	125	125	125
Total	6750	13375	20000	26625

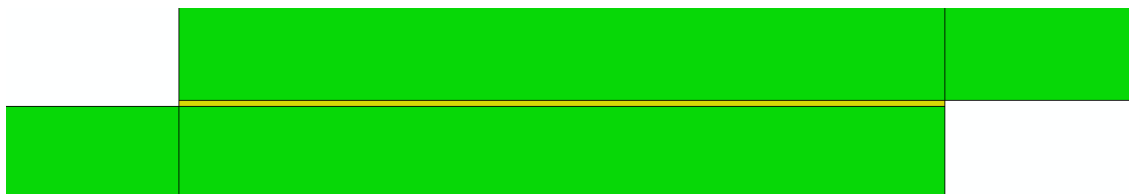


Figura 67 - Controlo de malha no modelo com t=3 mm

Do mesmo modo utilizado nos casos anteriores, a zona adesiva é constituída por elementos *sweep* do tipo COH2D4 (representados a amarelo na Figura 67) e os aderentes por elementos estruturados CPE4R.



Figura 68 - Atribuição de materiais no modelo com t=3 mm

Na Figura 68 pode ver-se em tons de cor distintos a atribuição dos diferentes materiais, adesivo e aço.

3.2.3.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 69 é apresentada a distribuição de tensões de corte com o adesivo AV138 para as diferentes espessuras de aderente (t) utilizadas. Apenas é possível observar um pior desempenho na distribuição de tensões no caso da menor espessura (1 mm), que apresenta um pico na concentração de tensões num dos extremos da camada adesiva. A menor espessura resulta num efeito de deformação mais localizado nas extremidades da ligação, o que claramente afeta a distribuição de tensões para espessuras particularmente reduzidas. No caso estático este comportamento foi observado por Pinto et al. [81].

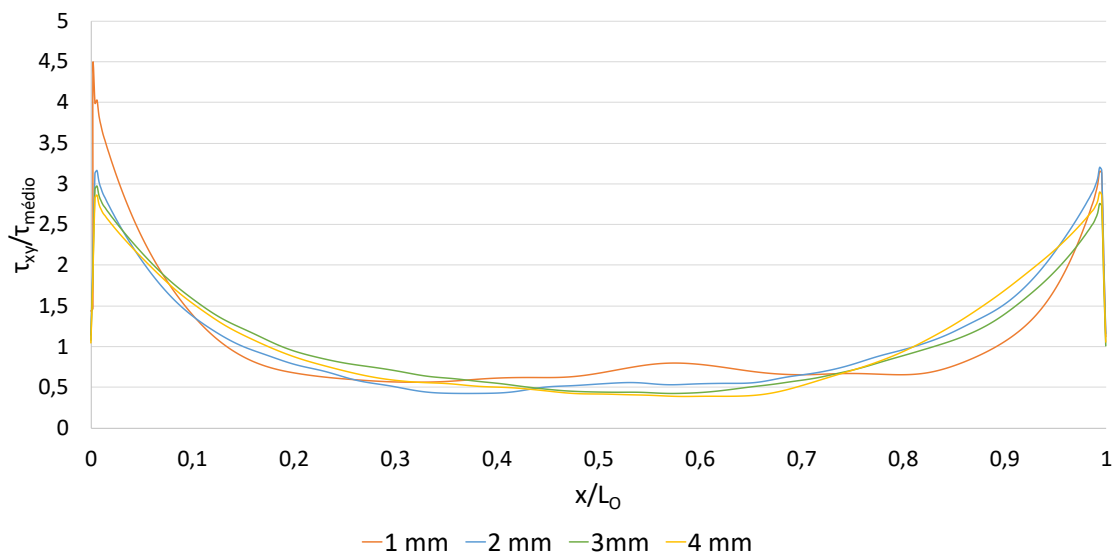


Figura 69 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de t

As tensões de arrancamento com o adesivo AV138 são apresentadas na Figura 70. Não existem diferenças significativas entre o uso de 2, 3 ou 4 mm de espessura de aderentes. Utilizando a menor espessura – 1 mm – obtêm-se concentrações nos extremos da camada adesiva semelhante aos restantes casos, sofrendo inclusivamente uma ligeira redução num dos extremos da camada adesiva. Existe uma maior irregularidade ao longo da junta adesiva, alternando entre compressão e arrancamento. A utilização de aderentes com 4 mm de espessura resultou apenas em tensões de compressão na região central da zona adesiva [89].

Analisando as tensões de corte para o adesivo DP8005 (Figura 71) regista-se uma redução de concentração de tensões nos extremos da camada adesiva com o aumento da espessura dos aderentes. Os resultados invertem-se no centro da camada adesiva.

Observando a escala do gráfico da Figura 71 verifica-se que, apesar de haver diferenças, estas não são significativas. A menor rigidez do adesivo DP8005 permite melhor distribuição de tensões ao longo da JSS, quando comparado com o adesivo AV138.

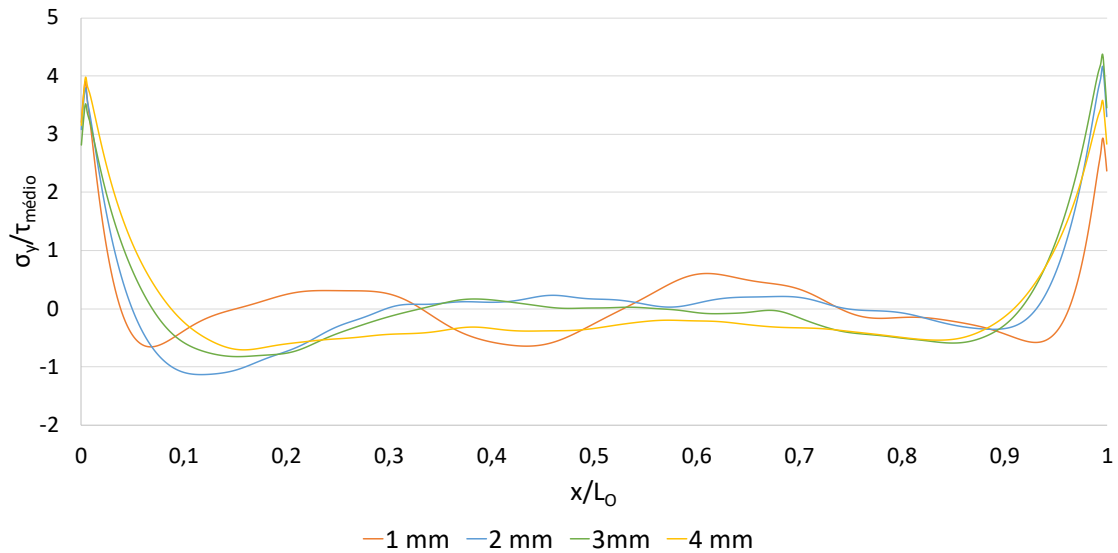


Figura 70 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de t

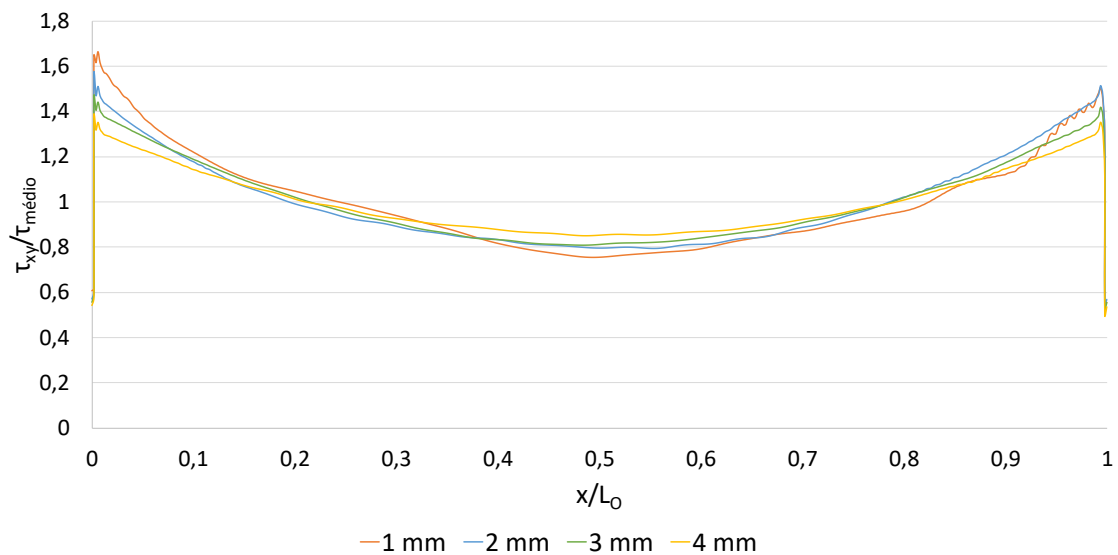


Figura 71 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de t

O desempenho na distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo DP8005 está representado na Figura 72. A menor rigidez deste adesivo resulta numa distribuição

mais homogénea ao longo da camada adesiva em comparação direta com os resultados com o adesivo AV138. Num dos extremos da camada apenas se regista um melhor desempenho com a utilização de aderentes de 3 mm. No extremo oposto observa-se um aumento da concentração de tensões com o aumento da espessura.

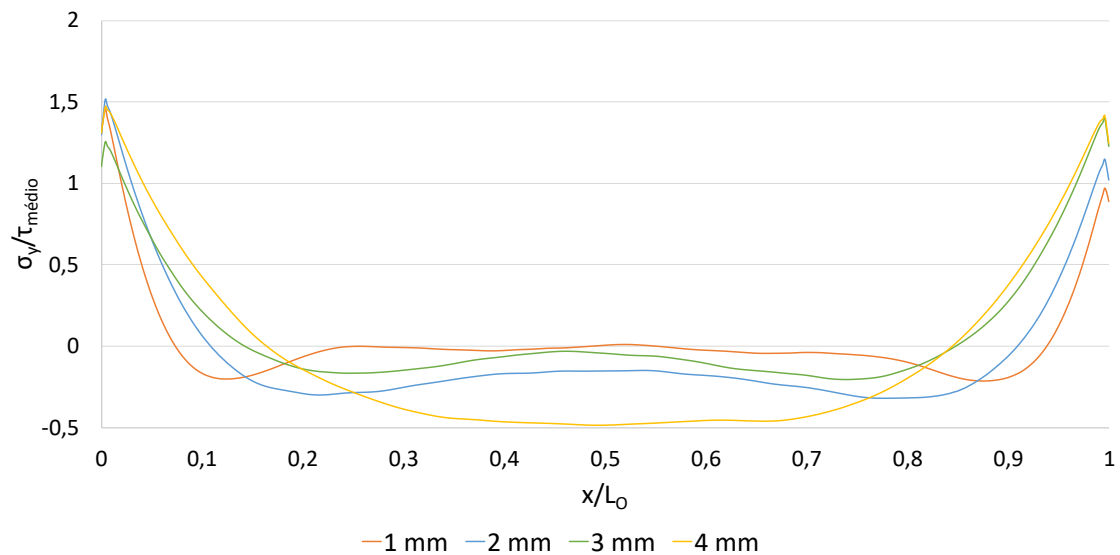


Figura 72 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de t

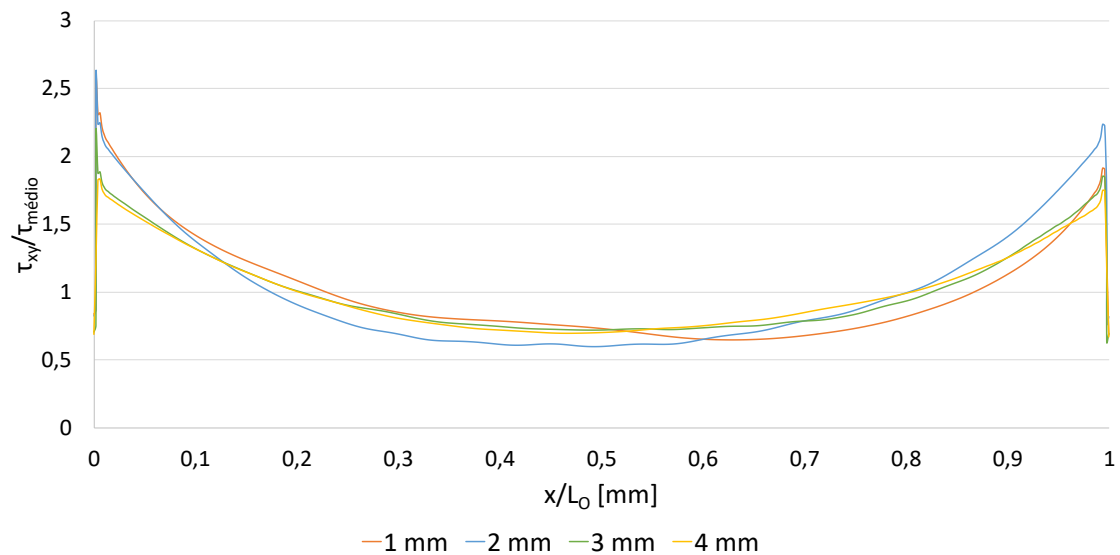


Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t

Na Figura 73 é apresentada a distribuição de tensões de corte com o adesivo XNR6852 E-2. Observa-se o pior desempenho com a utilização de aderentes com 2 mm de espessura. Quando utilizados aderentes com 1 mm de espessura obtém-se também uma concentração de tensões de corte superiores à utilização de 3 ou 4 mm num dos extremos da camada adesiva. Os ensaios efetuados com as duas maiores espessuras de aderentes tiveram resultados semelhantes entre si, sendo os ensaios que apresentam o melhor desempenho global. A magnitude de concentração de tensões tem valores intermédios quando comparado com os dois outros adesivos.

Para o mesmo adesivo, XNR6852 E-2, pode ver-se na Figura 74 a distribuição de tensões de arrancamento. Nos extremos da camada adesiva obtém-se um menor efeito de concentração de tensões quanto menor a espessura dos aderentes, com a exceção de um dos extremos com a utilização de aderentes de 4 mm. Repete-se a magnitude de concentração de tensões com resultados situados entre os dois outros adesivos em estudo.

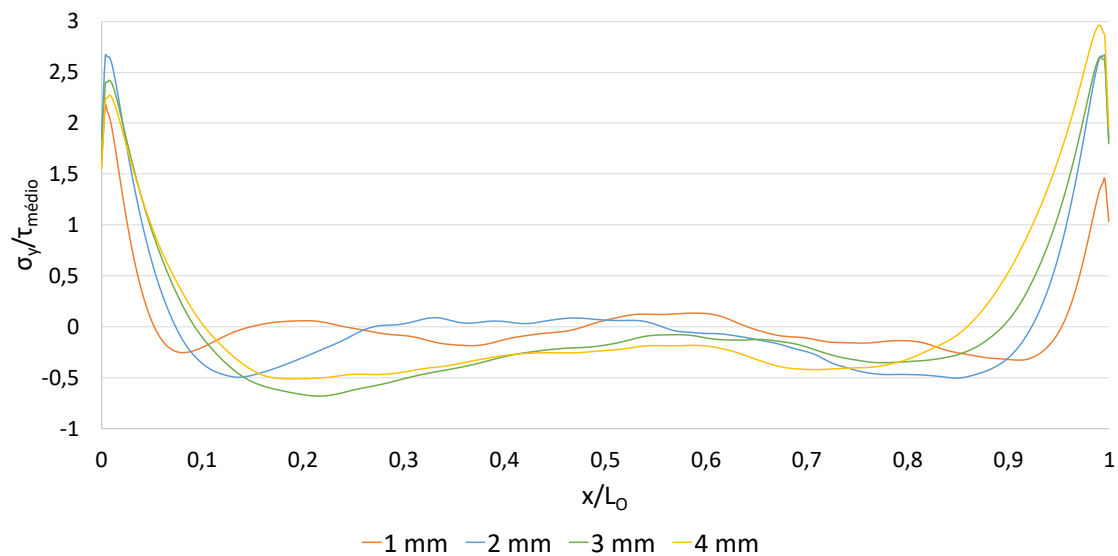


Figura 74 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t

3.2.3.2.2 Resistência das juntas

Na Figura 75 são apresentadas as curvas P- δ para as diversas espessuras de aderentes com o adesivo AV138. A carga máxima obtida aumenta com o aumento da espessura. Em contraponto, o aumento de espessura tem o efeito oposto no deslocamento máximo obtido.

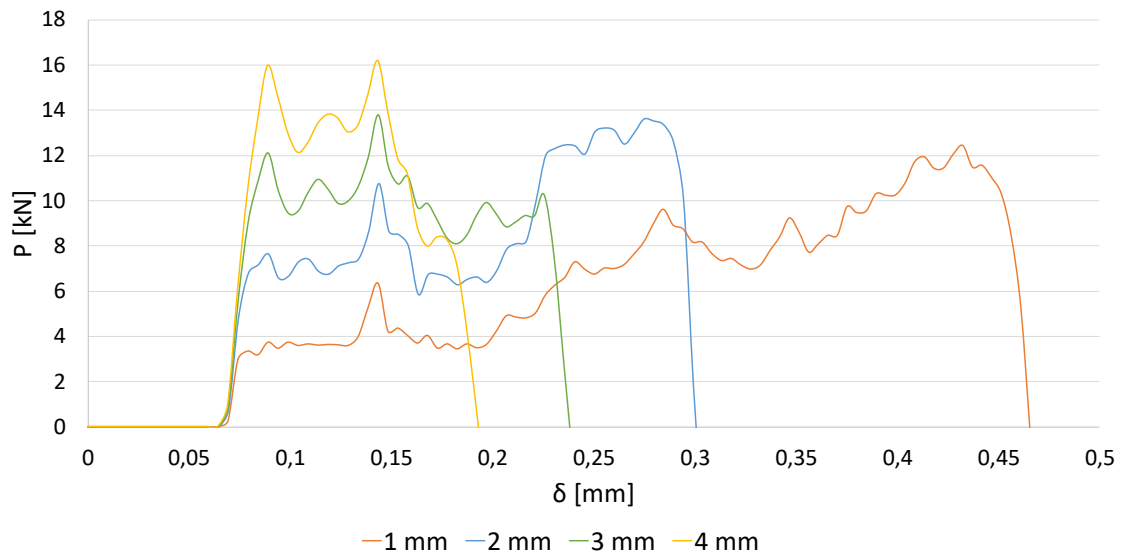


Figura 75 - Curva P-δ com o adesivo AV138 em função de t

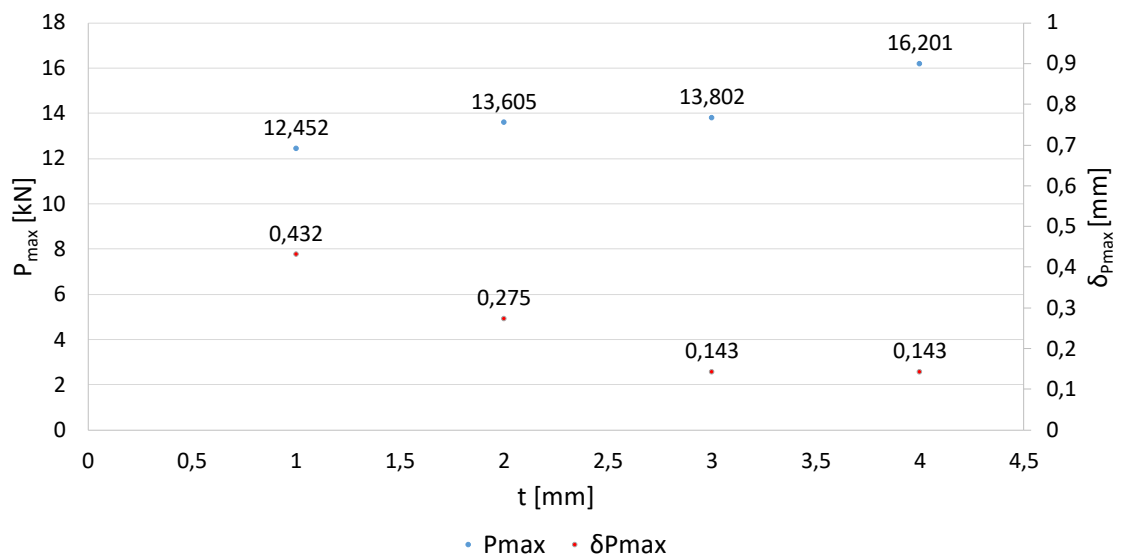


Figura 76 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de t

O valor de carga máxima e deslocamento correspondente à carga máxima para cada valor de t com o adesivo AV138 pode ser consultado na Figura 76. A carga máxima suportada é mais elevada quanto maior a espessura dos aderentes, ainda que o incremento obtido pelo aumento da espessura de 2 mm para 3 mm seja muito reduzido. O deslocamento correspondente à carga máxima diminui com o aumento até 3 mm de espessura dos aderentes. Apesar de a carga máxima obtida ser mais elevada com 4 mm de espessura – 19% mais elevada quando comparado com t=2 mm – o deslocamento

para a carga máxima é idêntico ao caso de 3 mm. A menor flexão obtida com aderentes de maior espessura é vantajosa para um adesivo rígido com menor capacidade de homogeneização na distribuição de tensões.

Na Tabela 13 é apresentada a energia absorvida pelo modelo com a utilização do adesivo AV138. Os resultados com $t=2$ mm são tidos como valor de referência visto ter sido a espessura utilizada no modelo de validação. Verifica-se um decréscimo da energia absorvida com o aumento da espessura. A redução deve-se ao facto de que, com maior volume de material nos aderentes, maior é a transferência de energia de impacto para a camada adesiva.

Tabela 13 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de t

t [mm]	E [J]	Diferença
1	2,71	+33%
2	2,03	-
3	1,60	-21%
4	1,38	-32%

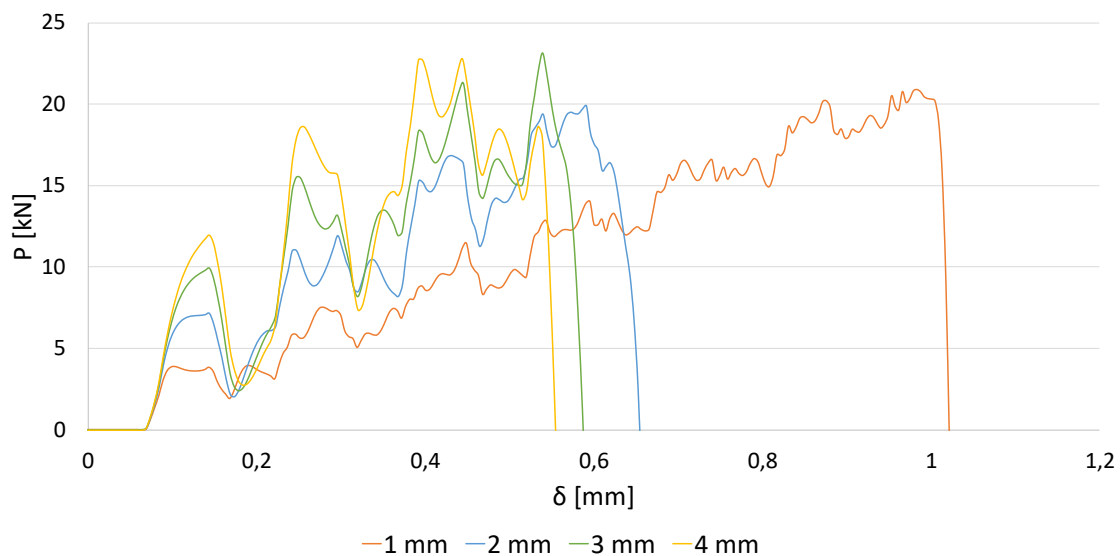


Figura 77 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de t

Na Figura 77 são apresentadas as curvas P- δ com o adesivo DP8005 para as diferentes espessuras de aderentes. Ao contrário dos resultados obtidos com o adesivo AV138, não há uma variação tão significativa na carga máxima suportada. O deslocamento máximo obtido teve o mesmo comportamento do adesivo AV138, ou seja, quanto maior a espessura, maior é o deslocamento.

O gráfico comparativo dos valores de carga máxima atingidas e o deslocamento respetivo no qual se deu a rotura está presente na Figura 78. Neste caso não há uma tendência entre o valor de t e a carga máxima obtida. Regista-se uma diminuição na carga máxima quando a espessura dos aderentes é aumentada de 1 mm para 2 mm. Isto resulta do facto de, com o deslocamento máximo atingido quase duplicado, a duração do tempo de transição do impacto para a camada adesiva ser maior e haver assim maior capacidade de absorção de tensões no adesivo. Há um aumento na carga máxima para o resultado com t=3 mm – 16% acima do resultado com t=2 mm – seguida de uma nova redução para o caso de t=4 mm, sendo que este último apresentou um valor mais elevado do que o caso de t=1 mm. A menor flexão dos aderentes de maior espessura prejudica a distribuição de tensões ao longo da propagação da energia de impacto.

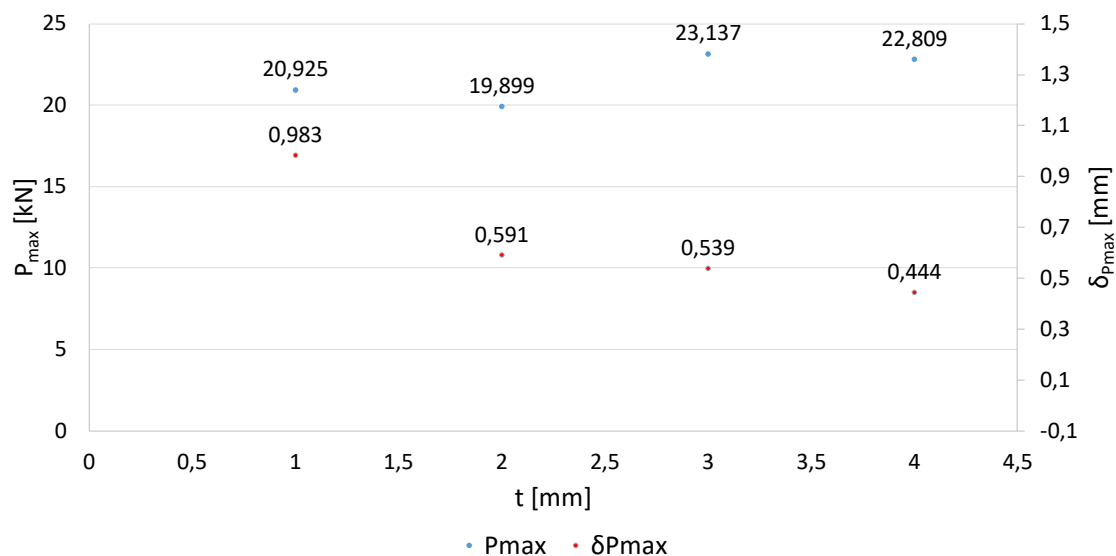


Figura 78 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de t

A absorção de energia com o adesivo DP8005 é apresentada na Tabela 14. Entre 2 e 4 mm de espessura de aderentes não há diferenças significativas na energia absorvida pois o aumento na carga suportada é acompanhada por um decréscimo de deslocamento. O ensaio com apenas 1 mm de espessura dos aderentes resulta num

aumento significativo não pela carga suportada, mas sim pelo deslocamento máximo atingido que quase duplicou o resultado dos restantes ensaios.

Tabela 14 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de t

t [mm]	E [J]	Diferença
1	10,78	+66%
2	6,49	-
3	6,30	-3%
4	6,31	-3%

As curvas P- δ com o adesivo XNR6852 podem ser analisadas na Figura 79. Com a utilização do adesivo tenaz, a distribuição dos resultados não se repete em relação aos dois restantes adesivos. A utilização de aderentes com apenas 1 mm de espessura continua a resultar no maior deslocamento. No entanto, a ordem nos restantes adesivos inverte-se no que ao deslocamento máximo diz respeito. Os ensaios com aderentes de 3 e 4 mm apresentaram sinais de recuperação da camada adesiva após ultrapassar o ponto de carga máxima. No que à carga máxima obtida diz respeito, apenas para t=4 mm se verifica um valor destacadamente mais elevado.

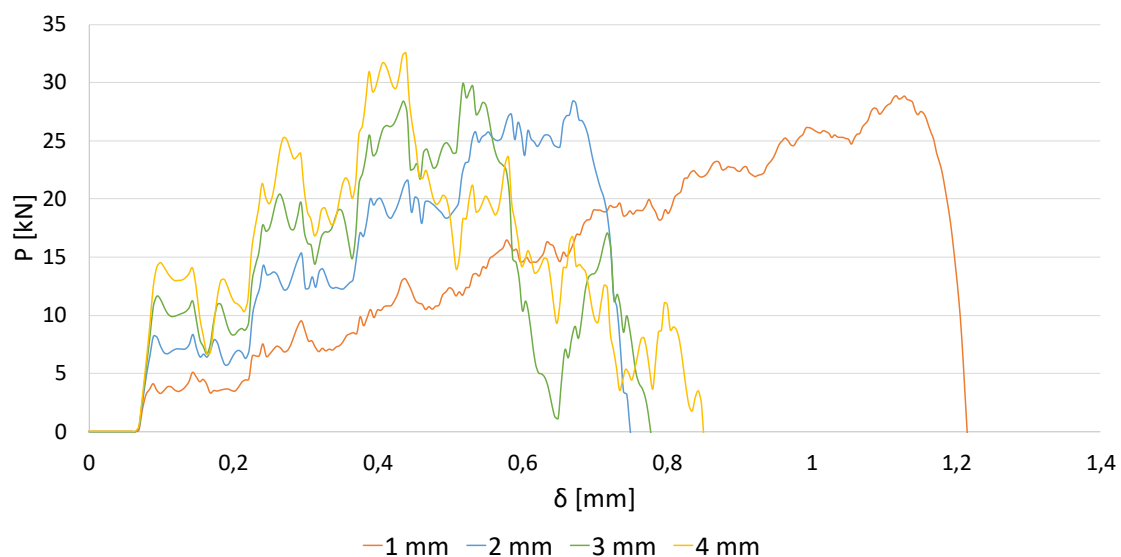


Figura 79 - Curva P- δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t

Na Figura 80 é possível observar em pormenor os valores de carga máxima obtida e o deslocamento correspondente. Apesar de o deslocamento máximo não apresentar a tendência de redução com o aumento de espessura como no caso dos adesivos AV138 e DP8005, essa tendência repete-se no caso do deslocamento para a carga máxima. Não é possível observar uma tendência na carga máxima obtida. O ensaio com 2 mm apresentou o valor mais reduzido, seguido dos ensaios com 1 mm e 3 mm, sendo que este último apresenta um aumento muito reduzido em relação ao anterior. A resistência mais elevada para $t=1$ mm, quando comparada com a espessura de 2 mm, ocorre pelas mesmas razões enunciadas para o adesivo DP8005. O ensaio com $t=4$ mm tem o melhor desempenho superando destacadamente os restantes resultados, e resulta num aumento de 15% face a $t=2$ mm. Ao contrário do adesivo DP8005, a menor deformação elástica dos aderentes de maior espessura não prejudica o desempenho da JSS devido à principal característica do adesivo XNR6852 E-2, elevada tenacidade.

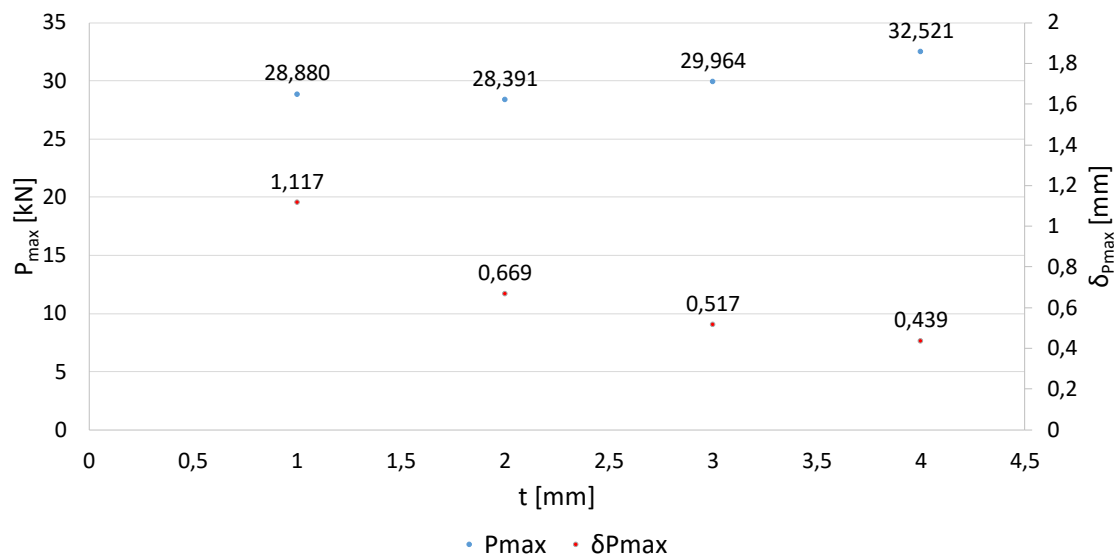


Figura 80 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t

Na Tabela 15 encontram-se os valores de energia absorvida com o uso do adesivo XNR6852 E-2. Os resultados com 2 mm e 3 mm podem considerar-se idênticos, influenciando para este resultado o deslocamento atingido pela camada adesiva após rotura no ensaio com 3 mm. Esse mesmo efeito, aliado à carga máxima obtida, resultou num aumento da energia absorvida no ensaio com $t=4$ mm. Usufruindo do quase duplicar do deslocamento máximo e um valor de carga máxima próximo dos restantes resultados, utilizando aderentes com apenas 1 mm de espessura obtém-se o maior valor de energia absorvida.

Tabela 15 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de t

t [mm]	E [J]	Diferença
1	17,85	+62%
2	11,03	-
3	11,00	-0,3%
4	12,38	+12%

No estudo do efeito da alteração da espessura dos aderentes apenas se verificou deformação plástica quando utilizado o adesivo XNR6852 E-2 com espessuras de aderentes de 1 ou 2 mm. Os ensaios resultaram em 0,6% (Figura 81) e 0,02% de deformação permanente, respetivamente. Não se conclui interferência na distribuição de tensões e consequentemente na carga máxima obtida em nenhum dos casos devido ao reduzido valor de plasticidade obtido.

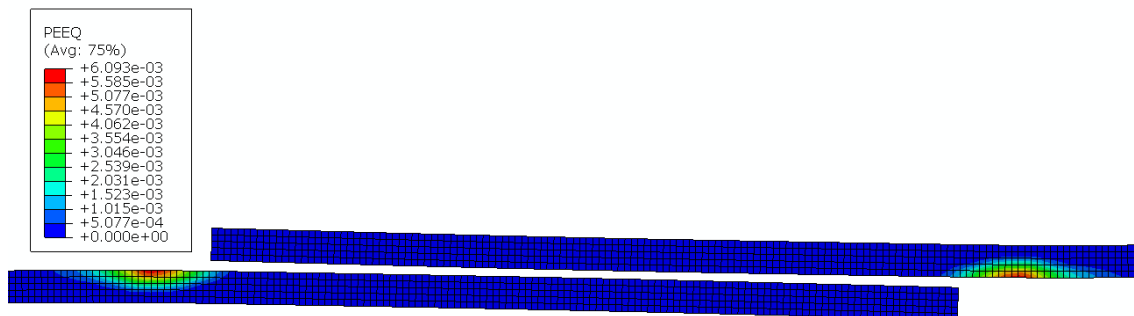


Figura 81 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para t=1 mm

O aumento de espessura de aderentes face à espessura de referência (t=2 mm) resulta em melhor desempenho com todos os adesivos testados. Enquanto o valor máximo é obtido com t=4 mm para os adesivos AV138 e XNR6852 E-2, a espessura de 3 mm é aquela que melhor resultado produz com o adesivo DP8005. Ainda que reduzido, existe um aumento da resistência da JSS com t=1 mm com dois dos adesivos em comparação com a espessura de referência. No entanto, devido à elevada rigidez e fragilidade do adesivo, com o AV138 o desempenho sofre degradação com a redução de espessura.

3.2.4 Estudo de alterações geométricas

3.2.4.1 Chanfro exterior dos aderentes

A geometria da JSS utilizada é representada na Figura 82 e apenas é variado o ângulo de chanfro exterior dos aderentes (α). Os valores de α atribuídos são $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° e 90° .

Em todos os modelos com variação de chanfro exterior foi utilizada inicialmente uma malha uniforme com os mesmos parâmetros da malha utilizada nos modelos de validação. De seguida foram criadas, na zona com declive, subdivisões verticais com 0,2 mm de espaçamento. Nos vértices criados com o limite exterior foram então criadas linhas verticais de modo a refinar a malha e reduzir a utilização de elementos triangulares.

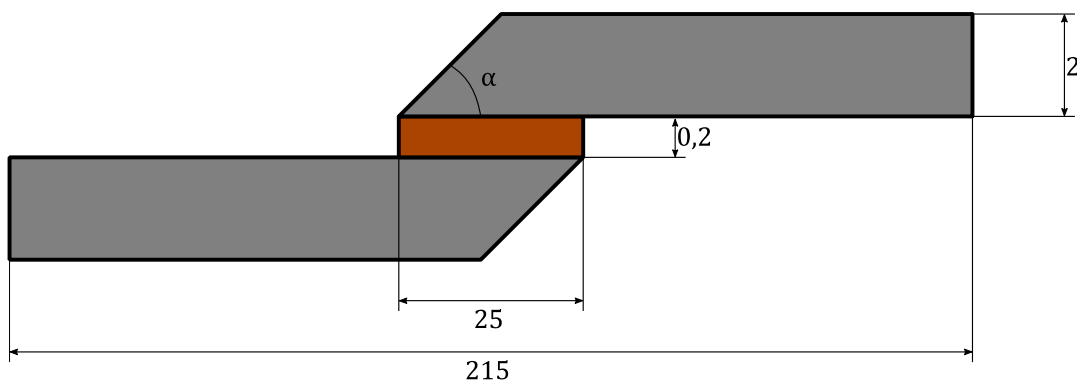


Figura 82 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de α

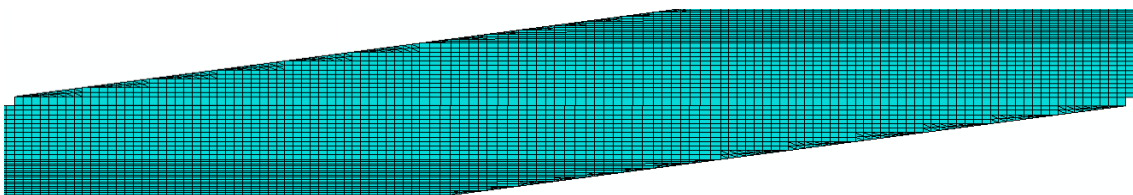


Figura 83 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=7,5^\circ$

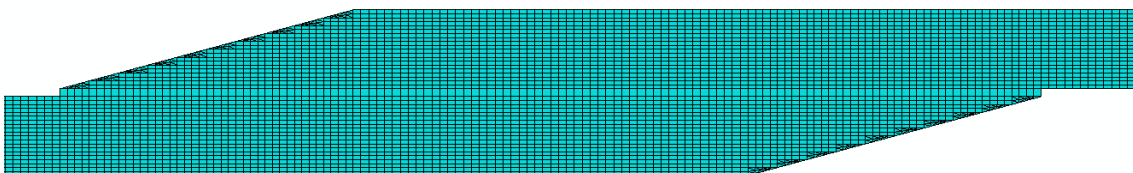
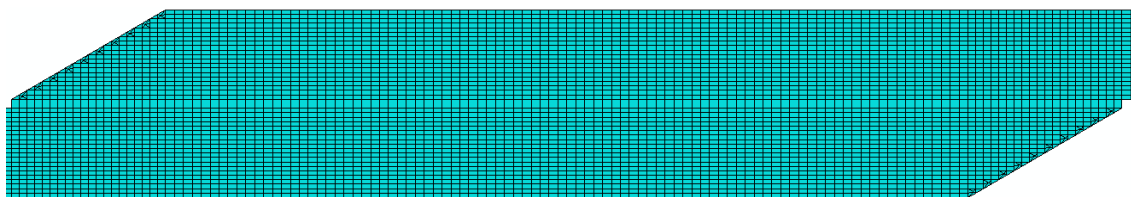
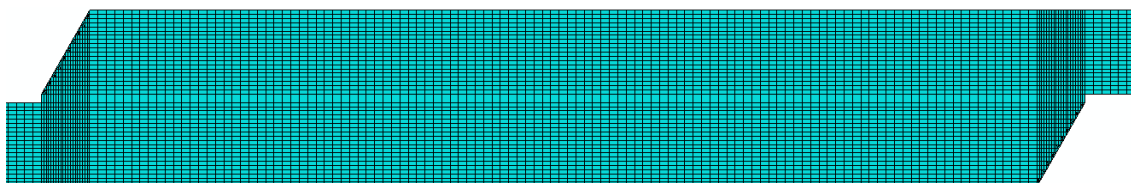


Figura 84 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=15^\circ$

Figura 85 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=30^\circ$ Figura 86 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=45^\circ$ Figura 87 - Visualização da malha do modelo com $\alpha=60^\circ$

Da Figura 83 à Figura 87 pode ver-se a representação da malha utilizada no modelo de 7,5°, 15°, 30°, 45° e 60°, respetivamente. O modelo com $\alpha=90^\circ$ corresponde à inexistência de chanfro. Como tal, a malha utilizada é idêntica à do modelo de validação (Figura 33). Na Tabela 16 é apresentado o número de elementos para cada α .

Tabela 16 - Número de elementos em função de α

Elementos	α [°]					
	7,5	15	30	45	60	90
CPE4R	37176	25820	26260	26860	27180	13250
CPE3	568	280	120	120	120	-
COH2D4	127	130	130	145	153	125
Total	37871	26230	26510	27125	27453	13375

A introdução do chanfro exterior nos aderentes altera o controlo de malha dos modelos devido à existência de divisões de área compostas por triângulos. A zona adesiva é constituída por elementos *sweep* do tipo COH2D4 (representados a amarelo na Figura 88). Os aderentes são constituídos na sua totalidade por elementos estruturados. Nas zonas triangulares são utilizados elementos CPE3, enquanto no restante modelo continuam a ser utilizados elementos CPE4R como nos casos prévios.

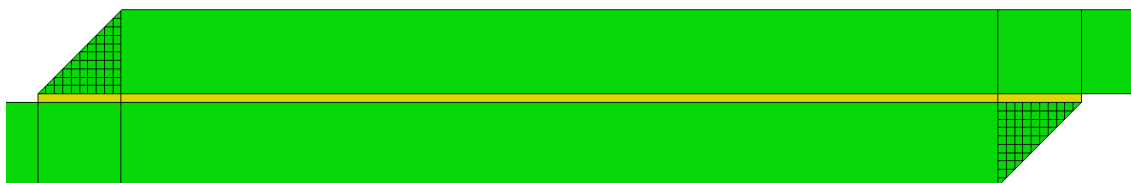


Figura 88 - Controlo de malha no modelo com $\alpha=45^\circ$

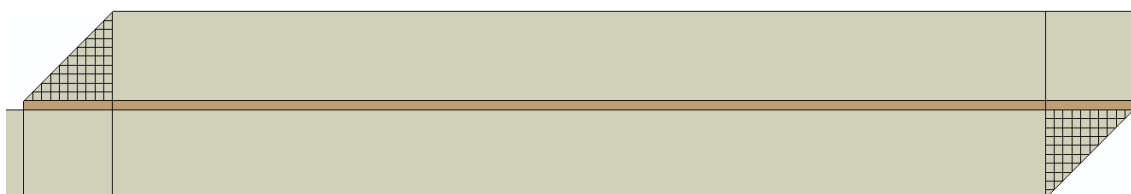


Figura 89 - Atribuição de materiais no modelo com $\alpha=45^\circ$

Para a atribuição de materiais a introdução do chanfro exterior dos aderentes não traz alterações em relação aos estudos dos capítulos prévios (Figura 89).

3.2.4.1.1 Distribuições de tensões

A Figura 90 representa a distribuição de tensões de corte com o adesivo AV138 em função de α . Observa-se um desempenho destacado, com menor concentração de tensões nos extremos do adesivo quando usado um ângulo de apenas $7,5^\circ$. O ensaio com ângulo de 60° apresenta de seguida a menor concentração de tensões num dos extremos da camada adesiva. Seguem-se, os ensaios de 30° e 90° (sem chanfro) com desempenho idêntico. Os restantes ensaios, 15° e 45° , apresentam destacadamente maior vulnerabilidade aos efeitos de concentração de tensões de corte. Em casos estáticos, a tendência de redução é linear [109].

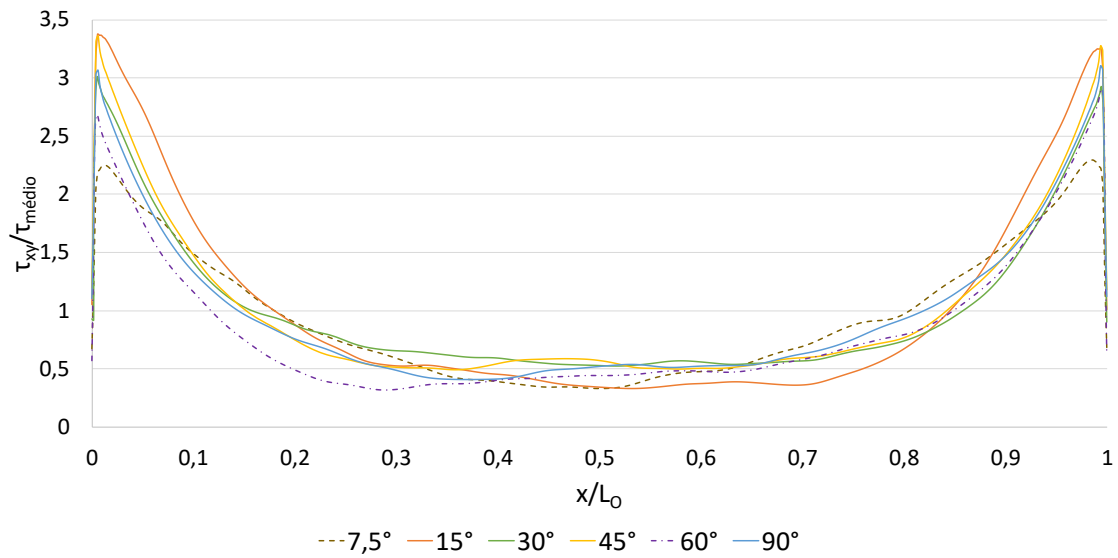


Figura 90 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de α

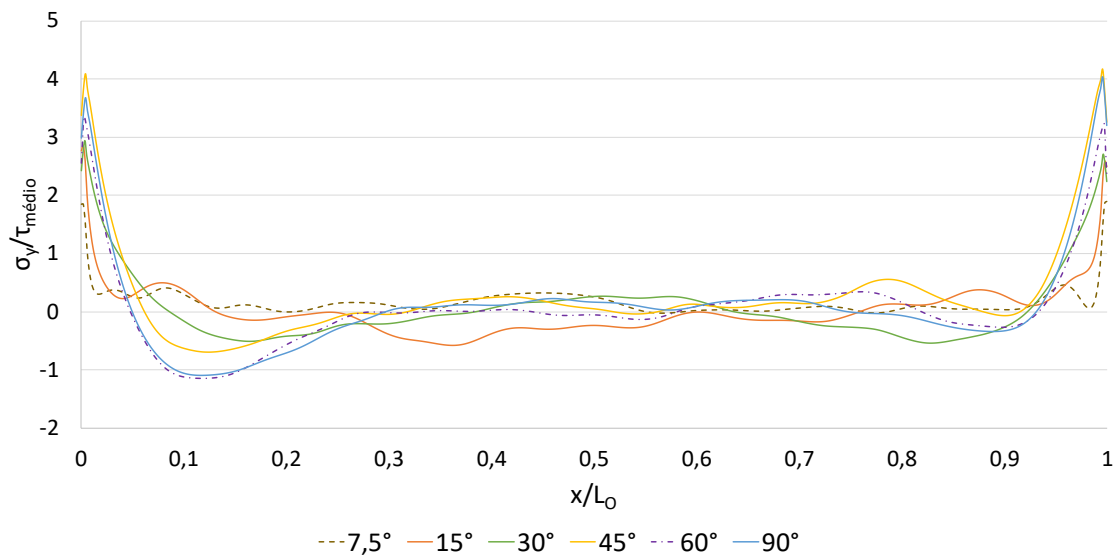


Figura 91 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de α

As tensões de arrancamento com o adesivo AV138 em função de α podem ser vistas na Figura 91. Os ensaios com 45° e 90° apresentam picos de concentração semelhantes, e as mais elevadas de entre todos, ainda que as variações ao longo da junta adesiva sejam distintas entre ambos. Segue-se o ensaio com 60° de chanfro, que apresenta uma ligeira redução nos valores de pico de concentração. Os restantes ensaios apresentam um comportamento semelhante nos extremos da camada adesiva, com menor

concentração de tensões nos extremos da camada adesiva. No caso estático, tal como nas tensões de corte, a redução é linear [109].

Com a utilização do adesivo DP8005, são apresentadas na Figura 92 as distribuições de tensões de corte para cada valor de α . Os ensaios resultam em diferenças insignificantes entre todos os casos, ainda que haja um desfazamento ao longo da junta mais pronunciado no caso do chanfro de 7,5°. Devido à maior flexibilidade do adesivo há menor efeito de concentração de tensões de corte no limite do adesivo.

Para o mesmo adesivo, DP8005, são representadas na Figura 93 as tensões de arrancamento para cada um dos ensaios realizados. Os picos de concentração de tensões situam-se uma vez mais no extremo da camada adesiva. Os ângulos entre 30° e 60° apresentaram distribuições e concentrações de tensões similares. Destacam-se os ensaios com os ângulos de 7,5° e 15° com melhor desempenho. Ambos apresentam picos de concentração de tensões da mesma magnitude, embora a distribuição de tensões seja diferente na zona intermédia da ligação. A JSS com chanfros de 7,5° resulta quase na totalidade em tensões de arrancamento enquanto o uso de chanfros de 15° resulta predominantemente em tensões de compressão. No entanto, a menor extensão da zona afetada pelos efeitos de concentração de tensões com $\alpha=7,5^\circ$ beneficia a carga máxima atingida.

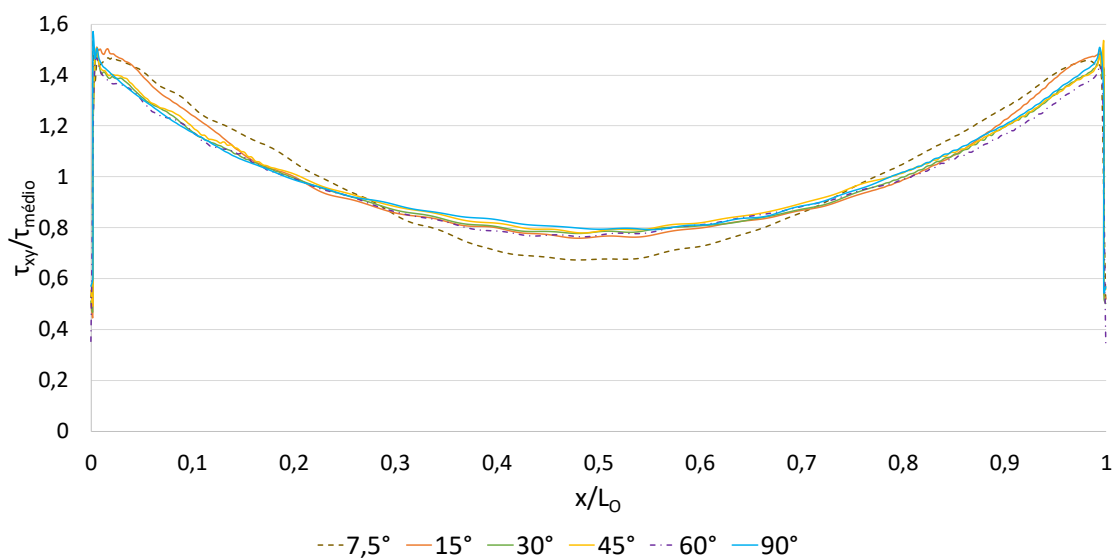


Figura 92 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de α

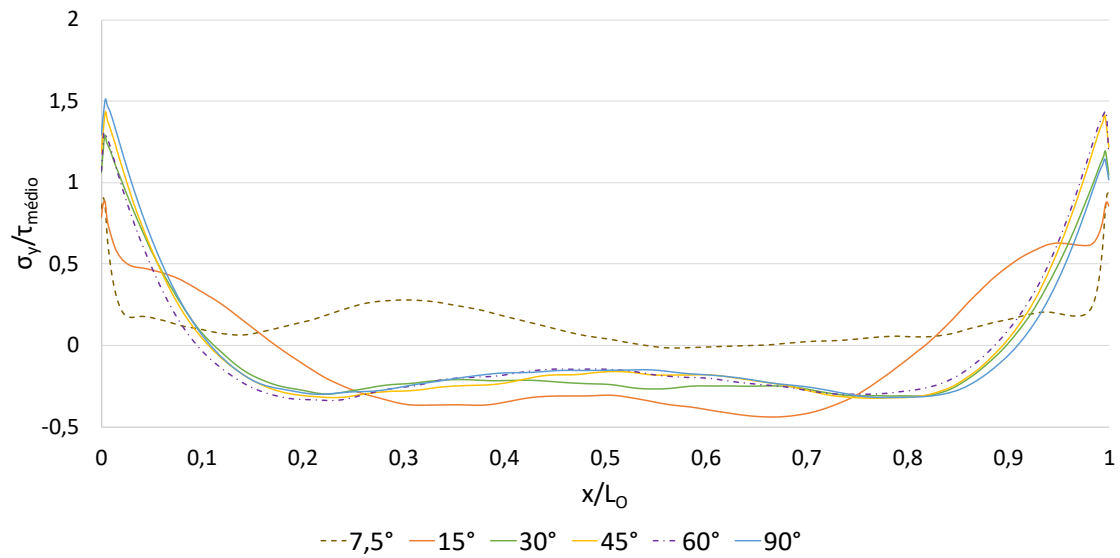


Figura 93 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de α

Com a alteração do adesivo para o adesivo de rigidez intermédia, XNR6852 E-2, o efeito de concentração de tensões situa-se entre os outros dois adesivos. A distribuição de tensões de corte apresenta resultados semelhantes em todos os ângulos (Figura 94), com picos destacados na junta com chanfro de 45° e na junta sem chanfro (90°) em extremos opostos da camada adesiva.

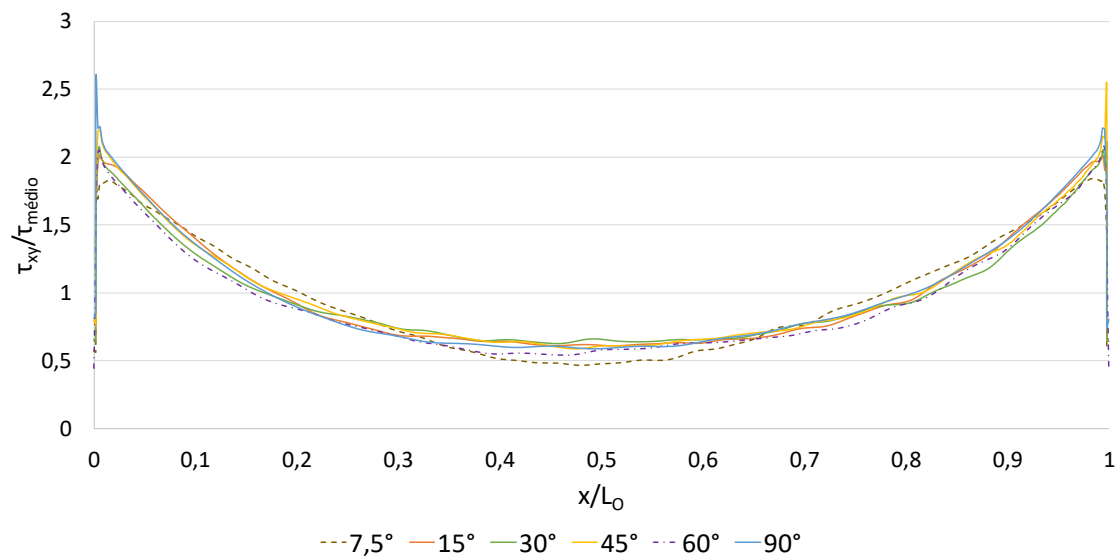


Figura 94 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

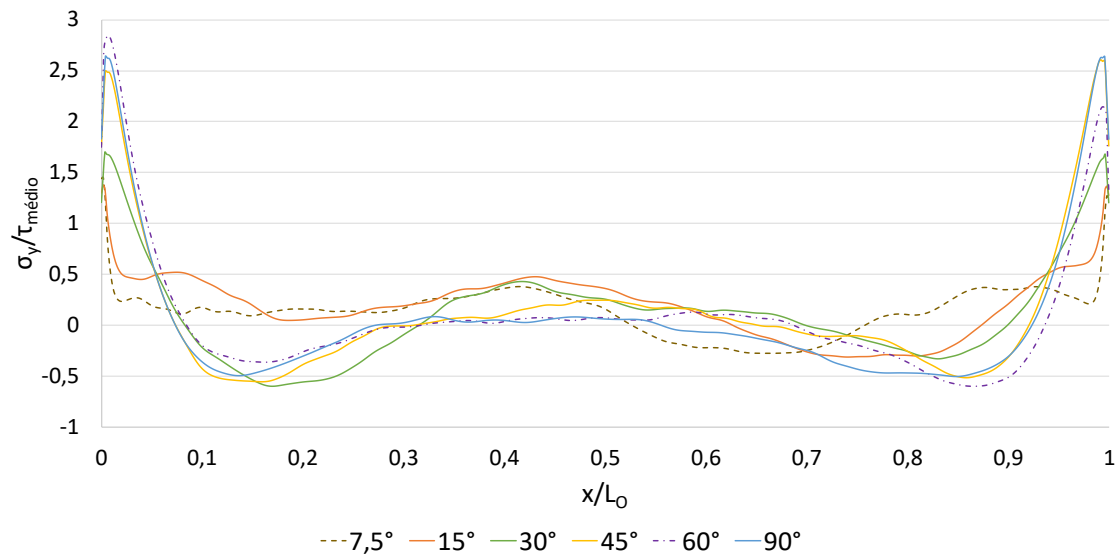


Figura 95 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

Na Figura 95 é apresentada a distribuição de tensões de arrancamento para o adesivo XNR6852 E-2. Com este adesivo observa-se maior dispersão nos resultados. Tal como no caso do adesivo AV138, regista-se os menores picos de concentração de tensões nos chanfros de 7,5° e 15°, ambos com a mesma magnitude em ambos os extremos da camada adesiva. O chanfro de 30° é o resultado que se segue em termos de eficácia. Os restantes oferecem um desempenho semelhante entre eles com a particularidade de o chanfro de 60° apresentar, entre eles, a maior concentração num dos extremos e a menor no extremo oposto da camada adesiva.

3.2.4.1.2 Resistência das juntas

Na Figura 96 são apresentadas as curvas P- δ em função de α , com o adesivo AV138. Observa-se uma sobreposição das curvas ainda que nalguns ensaios haja maior variação ao longo do deslocamento. O ensaio com $\alpha=7,5^\circ$ é aquele que apresenta desfasamentos mais notórios. O deslocamento máximo atingido é igual em todos os ensaios.

Na Figura 97 é possível analisar de forma mais detalhada a carga máxima atingida em cada um dos casos e o deslocamento à qual a mesma foi atingida, fruto da melhor distribuição de tensões (Figura 90 e Figura 91). Existe um aumento de carga máxima atingida com a redução do valor de α . A carga máxima atingida é 6% superior ao da JSS sem chanfro (90°). O deslocamento correspondente à carga máxima sofre pequenas variações ao longo dos ensaios, sem tendência definida, e sofre uma redução mesurável no caso de 7,5°. Nesse ensaio específico, a menor vulnerabilidade ao efeito de

concentração de tensões de corte resulta numa maior resistência. Por outro lado, o facto de a JSS de 7,5° estar sujeita predominantemente a tensões normais de arrancamento – os restantes ensaios apresentam tensões de compressão ao longo da camada adesiva – resulta num deslocamento mais reduzido. Acresce o facto de se tratar de um adesivo de elevada rigidez e conseqüentemente afetado pela maior flexão dos aderentes nos extremos da camada adesiva devido à menor espessura de material.

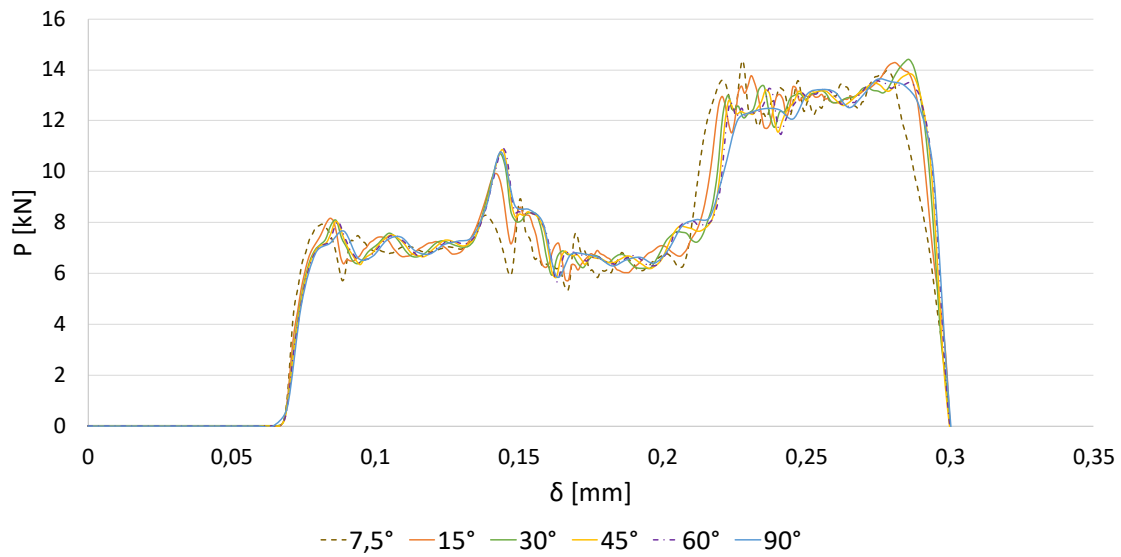


Figura 96 - Curva P-δ com o adesivo AV138 em função de α

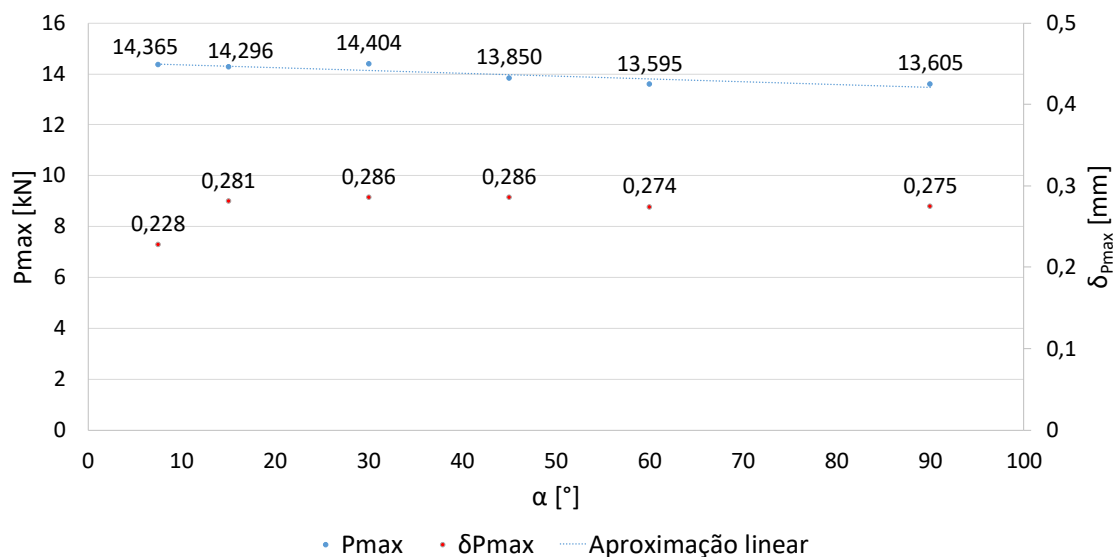
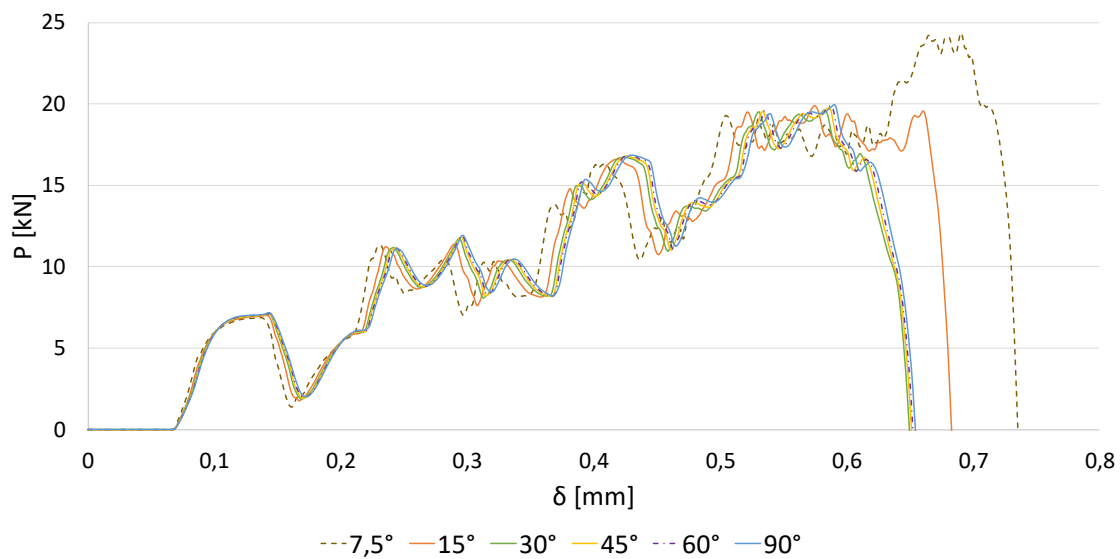


Figura 97 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de α

Tabela 17 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de α

α [°]	E [J]	Diferença
7,5	2,01	-1%
15	2,05	1%
30	2,05	1%
45	2,05	1%
60	2,05	1%
90	2,03	-

A energia absorvida para os casos estudados é apresentada na Tabela 17. Como analisado anteriormente, os deslocamentos máximos obtidos são idênticos em todos os ensaios e as curvas P- δ têm quase total sobreposição. Como resultado, as diferenças obtidas na absorção da energia de impacto são diminutas.

Figura 98 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de α

As curvas P- δ com o adesivo DP8005 em função de α são apresentadas na Figura 98. Há sobreposição quase total das curvas com a exceção dos ensaios com $\alpha=7,5^\circ$ e $\alpha=15^\circ$. Com $\alpha=15^\circ$, obtém-se um maior deslocamento máximo, no qual se verifica um

desfasamento com perfil semelhante quando comparado com as restantes curvas. O caso de $7,5^\circ$ apresenta um aumento ainda mais pronunciado no deslocamento máximo e ao mesmo tempo observa-se um aumento de carga máxima obtida nesse acréscimo de deslocamento, devido à menor extensão dos picos de tensão de arrancamento (Figura 93).

A Figura 99 permite analisar os dados obtidos para a carga máxima obtida com maior exatidão. Entre os valores de α de 15° a 90° (sem chanfro), não se observam diferenças significativas na carga máxima atingida, ainda que existam pequenas variações entre os ensaios sem que haja tendência definida. Os deslocamentos à qual a carga máxima é atingida também não sofrem alterações significativas à exceção dos casos de $7,5^\circ$ e 60° , com um valor mais elevado. O ensaio produzido com ângulo de $7,5^\circ$, como as distribuições de tensões de arrancamento fariam prever, apresentou a carga máxima atingida mais elevada, devido à menor extensão dos picos de concentração de tensões. Com $\alpha=7,5^\circ$, obtém-se um aumento de 22% em relação à JSS sem chanfro (90°). O deslocamento correspondente é também mais elevado quando comparado com os restantes ensaios. Analisando a distribuição de tensões de arrancamento (Figura 93) conclui-se que, apesar de haver apenas tensões de arrancamento contrariamente aos restantes casos em que há tensões de compressão, a menor acumulação de tensões nas imediações das extremidades da camada adesiva resulta num melhor desempenho.

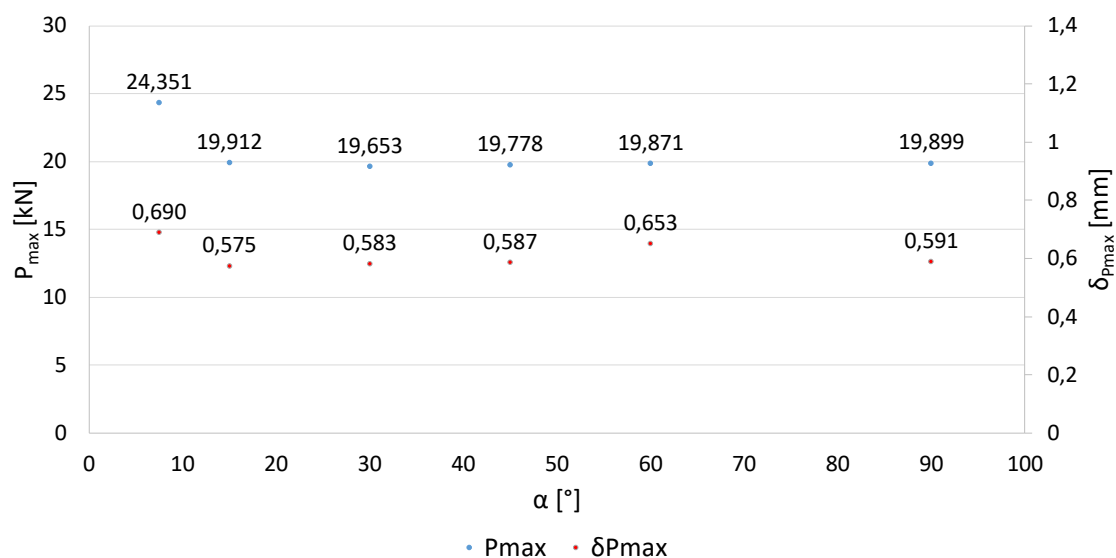
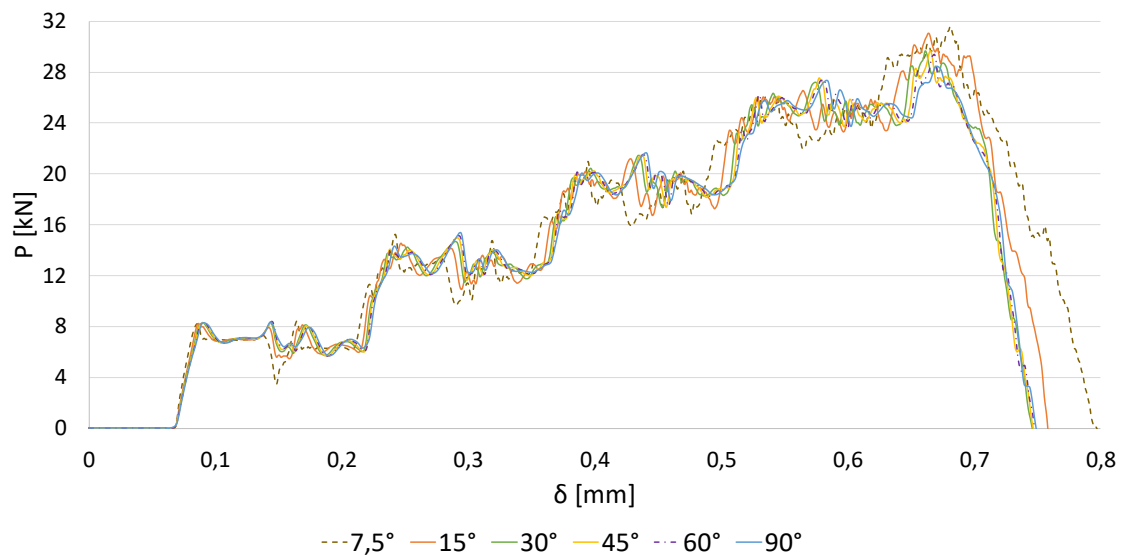


Figura 99 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de α

Tabela 18 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de α

α [°]	E [J]	Diferença
7,5	8,43	+30%
15	7,18	+11%
30	6,40	-1%
45	6,44	-1%
60	6,46	-1%
90	6,49	-

Devido à quase total sobreposição das curvas P- δ entre 30° e 90° a variação de absorção de energia é desprezável (Tabela 18). O valor mais elevado do ensaio com 15° é obtido exclusivamente a partir do incremento de deslocamento obtido, enquanto no ensaio de 7,5° se regista um aumento significativo devido ao facto de se registar um aumento de ambos os parâmetros, carga e deslocamento.

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

Na Figura 100 estão representadas as curvas P- δ para os diversos valores de α quando utilizado o adesivo XNR6852 E-2. Os ensaios efetuados resultam em curvas similares,

com elevada sobreposição. Apenas se destacam pelo maior deslocamento obtido os ensaios de 7,5° e 15°, mais elevado no primeiro destes dois.

Sem que haja diferenças destacáveis nos resultados da distribuição de tensões de corte (Figura 94), a distribuição de tensões de arrancamento (Figura 95) é concordante com os resultados de carga máxima obtidos (Figura 101). Tal como no caso do adesivo AV138, há uma clara tendência de aumento da resistência com a redução de α dos aderentes. Nos deslocamentos correspondentes obtidos apenas se identifica uma diferença mais elevada no caso de $\alpha=7,5^\circ$ em que o deslocamento foi mais elevado. As diferenças registadas no deslocamento para a carga máxima são menores do que as observadas com o adesivo AV138 devido à menor fragilidade do XNR6852 E-2. A introdução do chanfro de menor valor angular resulta num aumento, em relação à JSS sem chanfro (90°), de 11% na carga máxima atingida.

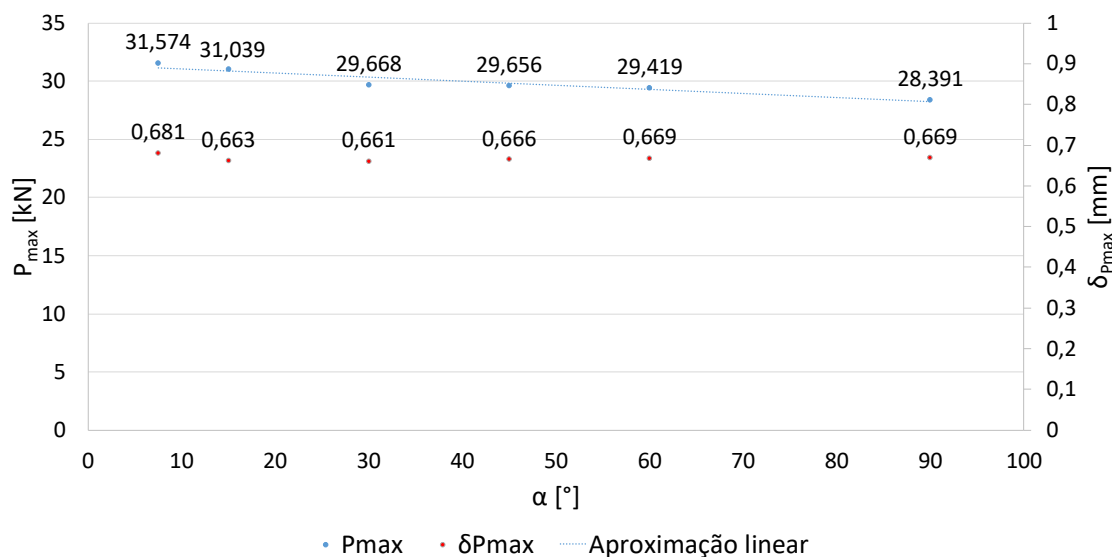


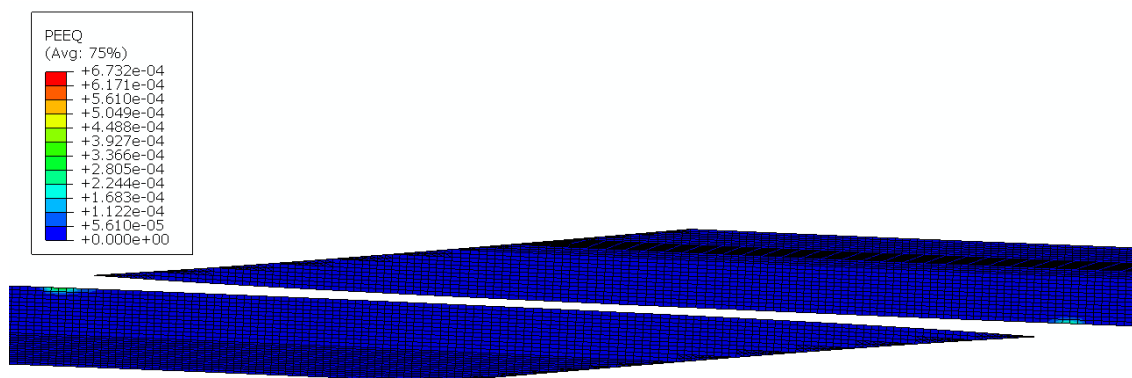
Figura 101 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

Com a repetição do ocorrido nos casos precedentes devido à elevada sobreposição das curvas P- δ , não se registaram diferenças entre os casos de 30° e 90°. Os incrementos obtidos pelos dois outros ensaios resultaram dos aumentos de carga máxima e deslocamento máximo obtidos.

Tabela 19 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de α

α [°]	E [J]	Diferença
7,5	11,96	+8%
15	11,42	+4%
30	11,04	+0,1%
45	11,03	0%
60	11,03	0%
90	11,03	-

Ocorreu deformação plástica com todas as variantes de α estudadas, mas apenas com o adesivo XNR6852 E-2. A deformação plástica obtida foi de 0,07% para 7,5° (Figura 102), 0,02% para 90° e 0,03% para os restantes. Devido à baixa deformação plástica obtida, não é possível concluir que a mesma tenha tido influência no desempenho da camada adesiva por interferência nas distribuições de tensões.

Figura 102 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $\alpha=7,5^\circ$

Os dois adesivos de maior rigidez, AV138 e XNR6852 E-2, beneficiam de modo aproximadamente linear com a redução do valor de α . Com o adesivo DP8005, existe uma variação sem tendência definida, de reduzida amplitude, com ângulos entre 15° e 90°. Apesar disso, com $\alpha=7,5^\circ$ é obtido o maior incremento na carga máxima de entre os adesivos testados, quando comparado com o valor de referência (90°).

3.2.4.2 Chanfro interior dos aderentes

A geometria da JSS utilizada é representada na Figura 103 e apenas é variado o ângulo de chanfro interior dos aderentes (β). Os valores de β atribuídos são $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° e 90° .

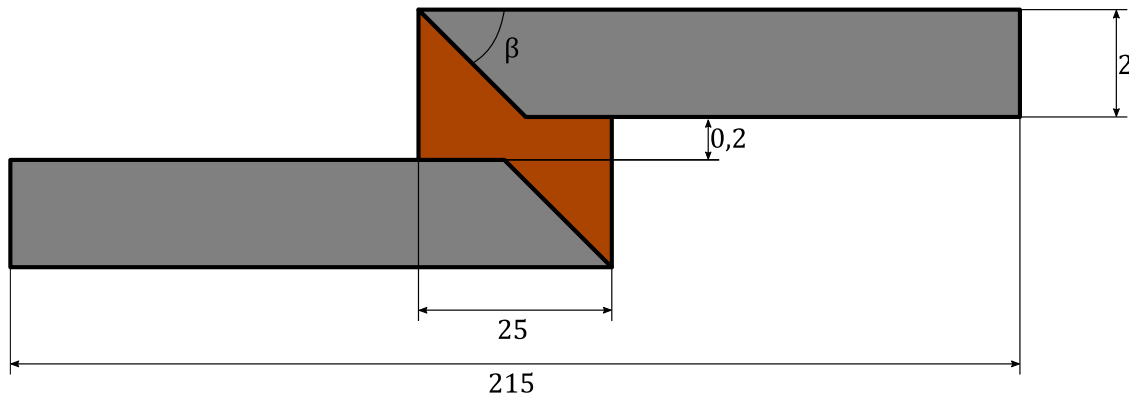


Figura 103 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de β

O método de criação de malha para os modelos com chanfro interior dos aderentes foi igual ao seguido no capítulo 3.2.4.1 de modo a reduzir o número de elementos triangulares.

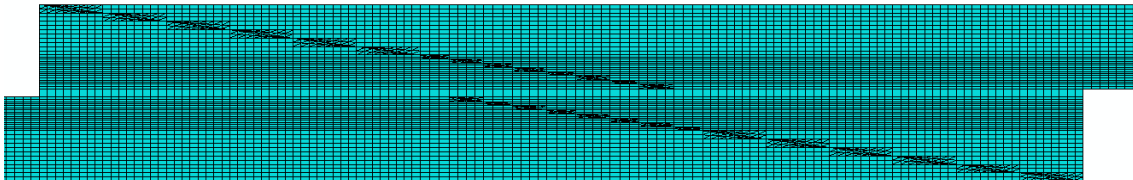


Figura 104 - Visualização da malha do modelo com $\beta = 7,5^\circ$

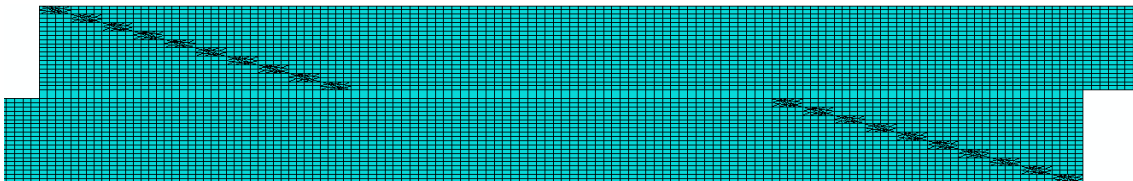


Figura 105 - Visualização da malha do modelo com $\beta = 15^\circ$

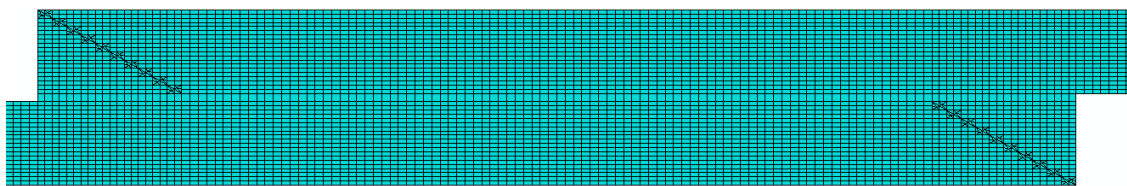


Figura 106 - Visualização da malha do modelo com $\beta=30^\circ$

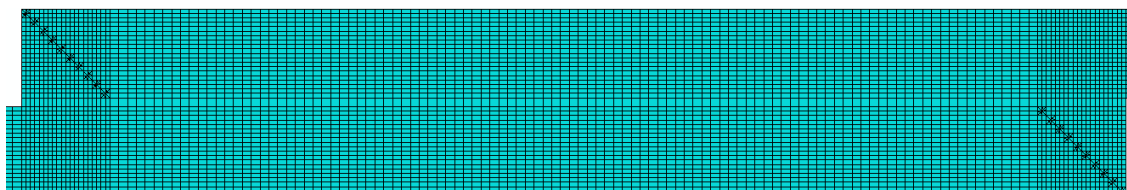


Figura 107 - Visualização da malha do modelo com $\beta=45^\circ$

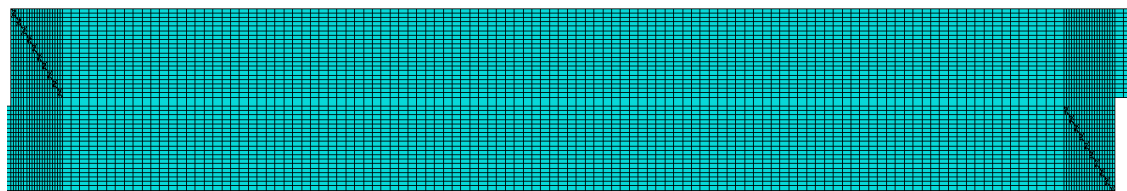
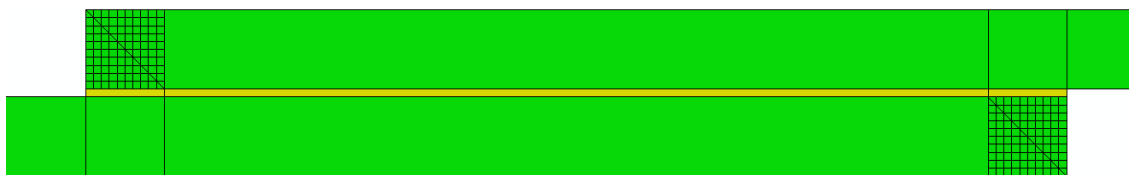


Figura 108 - Visualização da malha do modelo com $\beta=60^\circ$

Da Figura 104 à Figura 108 pode ver-se a malha utilizada nos modelos de 7,5°, 15°, 30°, 45° e 60°, respetivamente. De forma idêntica ao estudo da introdução de chanfros exteriores nos aderentes, o modelo com $\beta=90^\circ$ corresponde à inexistência de chanfro. Neste caso, a malha é idêntica à utilizada no modelo de validação (Figura 43). O número de elementos utilizados para cada ângulo β atribuído é apresentado na Tabela 20.

Tabela 20 - Número de elementos em função de β

Elementos	$\beta [^\circ]$					
	7,5	15	30	45	60	90
CPE4R	36442	26540	26620	27220	27540	13250
CPE3	1112	560	240	240	240	-
COH2D4	127	130	130	145	153	125
Total	37661	27230	26990	27605	27933	13375

Figura 109 - Controlo de malha no modelo com $\beta=45^\circ$

O controlo de malha nos modelos com chanfro interior dos aderentes é idêntico ao controlo utilizado nos modelos com chanfro exterior dos aderentes. A zona adesiva é constituída por elementos *sweep* do tipo COH2D4 (representados a amarelo na Figura 109). Os aderentes são constituídos na sua totalidade por elementos estruturados. Nas zonas triangulares são utilizados elementos do tipo CPE3 e aos elementos restantes foi atribuído o tipo CPE4R.

A introdução do chanfro interior introduz a necessidade de utilizar propriedades coesivas dos adesivos na camada representada a cinzento na Figura 110. Esta zona delimitada corresponde à atribuição dos elementos *sweep* que consequentemente representa os elementos por onde se propaga a falha coesiva ao impacto. São atribuídas propriedades elásticas ao adesivo que se encontra no interior dos chanfros (representado a rosa na Figura 110). Ao restante modelo é atribuído o material dos aderentes (representado a vermelho).

Figura 110 - Atribuição de materiais no modelo com $\beta=45^\circ$

3.2.4.2.1 Distribuições de tensões

A distribuição de tensões de corte com o adesivo AV138 em função de β está representada na Figura 111. Os picos de concentração de tensões situam-se no limite do chanfro no interior do aderente. Devido ao facto de a variação de ângulo alterar a localização desse limite, quanto menor o valor do ângulo maior é a distância entre os picos de concentração de tensões em relação aos extremos da camada adesiva.

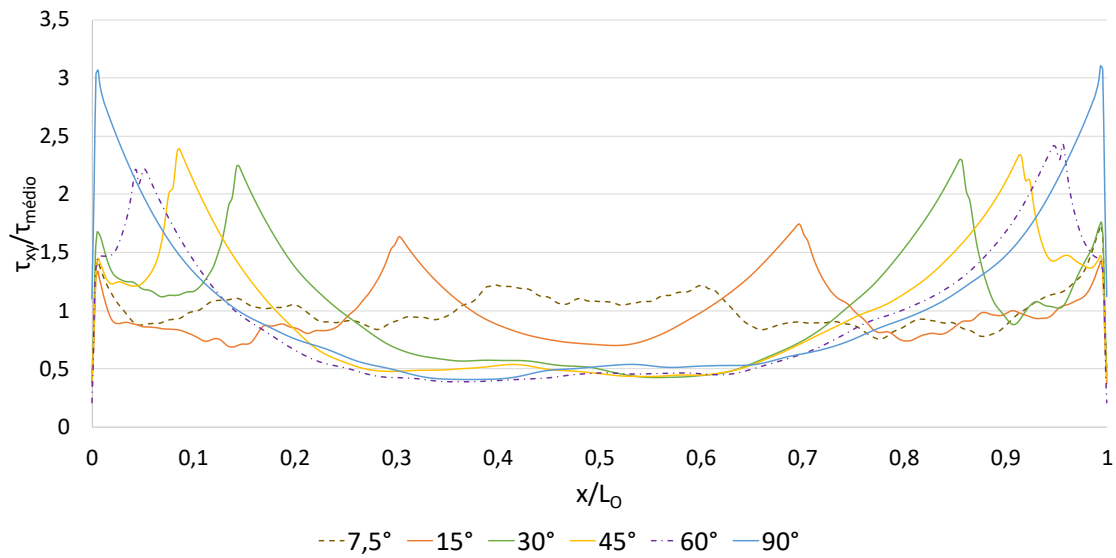


Figura 111 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de β

Verifica-se uma redução do efeito de concentração de tensões de corte com a redução do ângulo β . Com a introdução do chanfro interior, os extremos da camada adesiva resultam numa maior espessura de adesivo entre aderentes. As diferenças observadas entre os aderentes com β de 30° , 45° e 60° são menos significativas quando comparadas com as restantes. A menor rigidez nas zonas exteriores de ligação induzida pelo aumento de espessura do adesivo potencia uma melhor distribuição de tensões de corte, na medida em são reduzidas as tensões geradas por deformação diferencial dos aderentes.

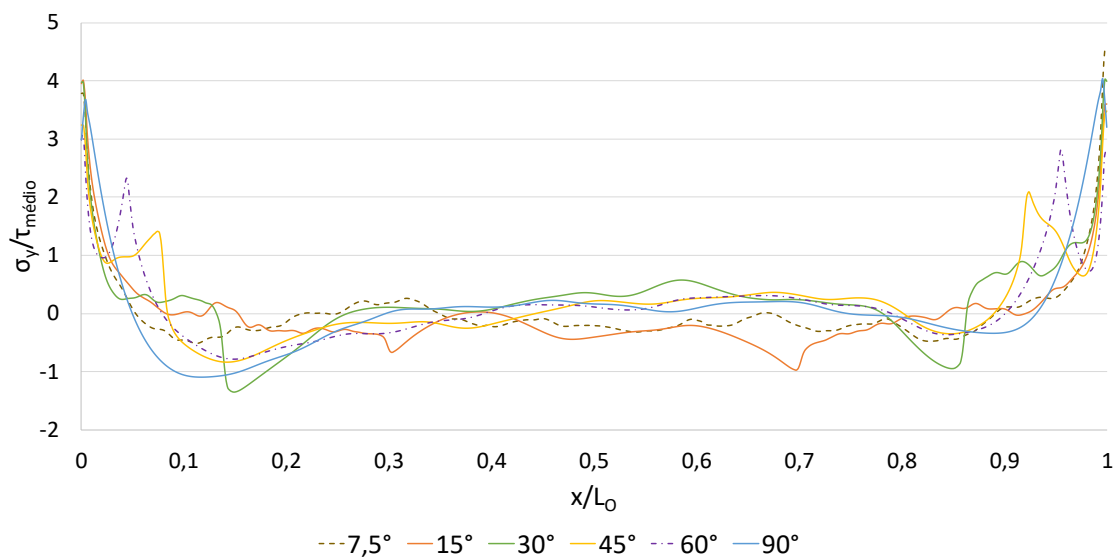


Figura 112 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de β

Ainda com o adesivo AV138, a distribuição de tensões de arrancamento em função de β é apresentada na Figura 112. Neste caso, não se registam diferenças significativas entre os casos estudados no que diz respeito aos valores de pico. O único elemento de diferenciação ocorre no ensaio realizado com um ângulo de 60° em que, contrariamente aos restantes resultados, o valor máximo de concentração de tensões num dos topos não se encontra no limite da camada adesiva. As tensões de compressão são reduzidas junto dos extremos da camada adesiva com a introdução de chanfros interiores, comparando com o resultado sem chanfros. O mesmo efeito é observado em casos estáticos [110].

A Figura 113 mostra a distribuição de tensões de corte em função de β para o adesivo DP8005. Não se observa a mesma tendência nos resultados relativamente ao caso anterior, ainda que a localização dos valores máximos se encontre na mesma posição. A criação de um ângulo de chanfro de 60° , em relação a 90° (sem chanfro), apenas revela uma ligeira redução do efeito de concentração de tensões de corte. Com a redução do valor de β esse efeito volta a sofrer um aumento, com registo de desempenhos progressivamente piores até ao ângulo de 15° . Por último, o ensaio com $7,5^\circ$ apresenta um desempenho semelhante ao ângulo de 30° , ainda que os valores máximos de concentração de tensões se encontrem numa zona mais interior da JSS. A baixa rigidez do adesivo introduzido com maior espessura nos extremos da camada adesiva penaliza a transmissão de esforços com a introdução desta alteração geométrica.

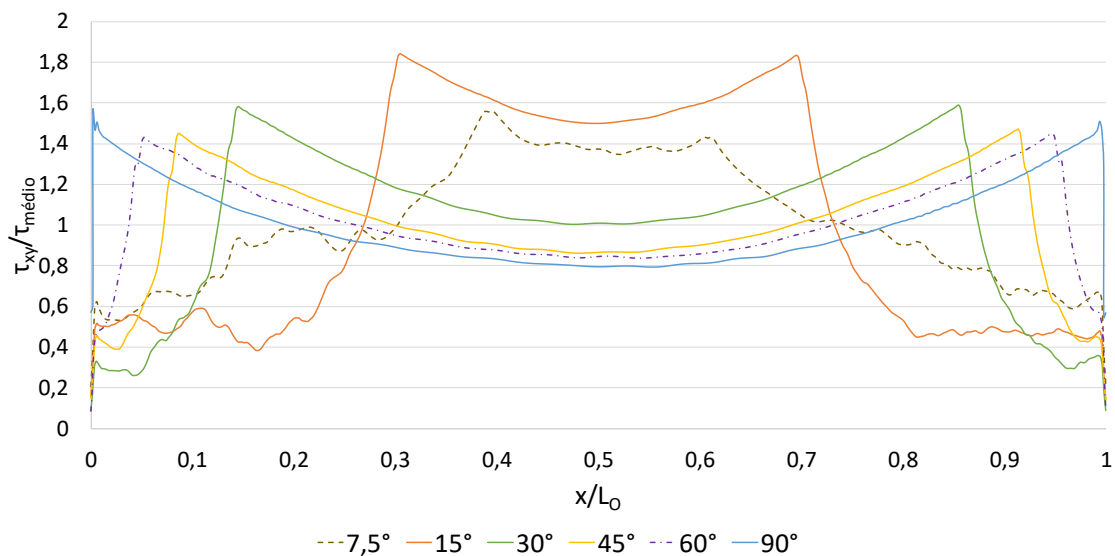


Figura 113 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de β

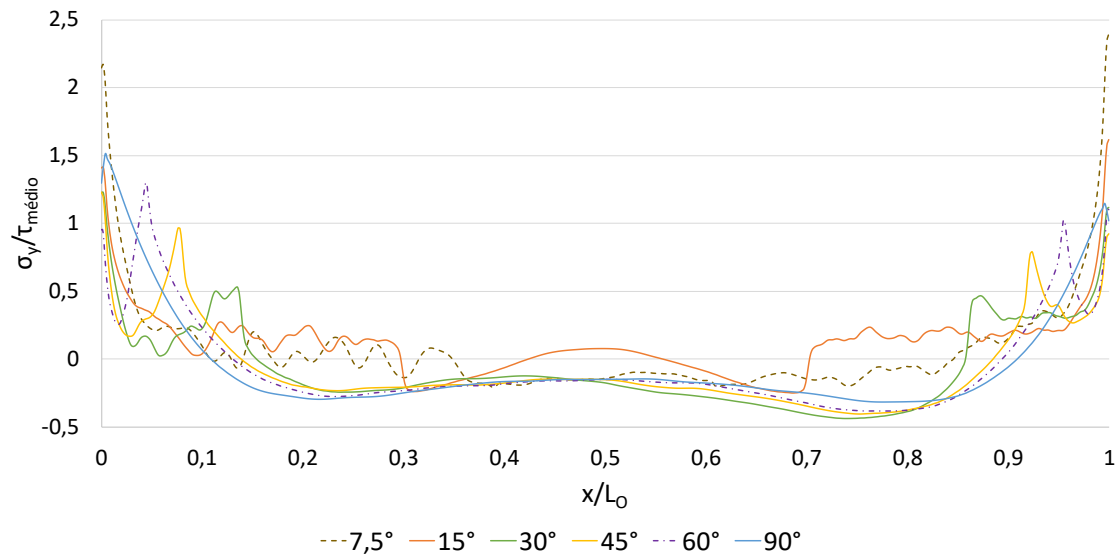


Figura 114 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de β

A distribuição de tensões em função de β com o adesivo dúctil, DP8005, pode ser consultada na Figura 114. Não é possível estabelecer uma relação direta entre β e a magnitude de concentração de tensões de arrancamento. A JSS com pior desempenho, isto é, com maior concentração de tensões de arrancamento resultou do ensaio com um ângulo de 7,5°. Para os restantes valores de β o comportamento é idêntico. O pico de concentração encontra-se em todos os casos nos extremos da camada adesiva.

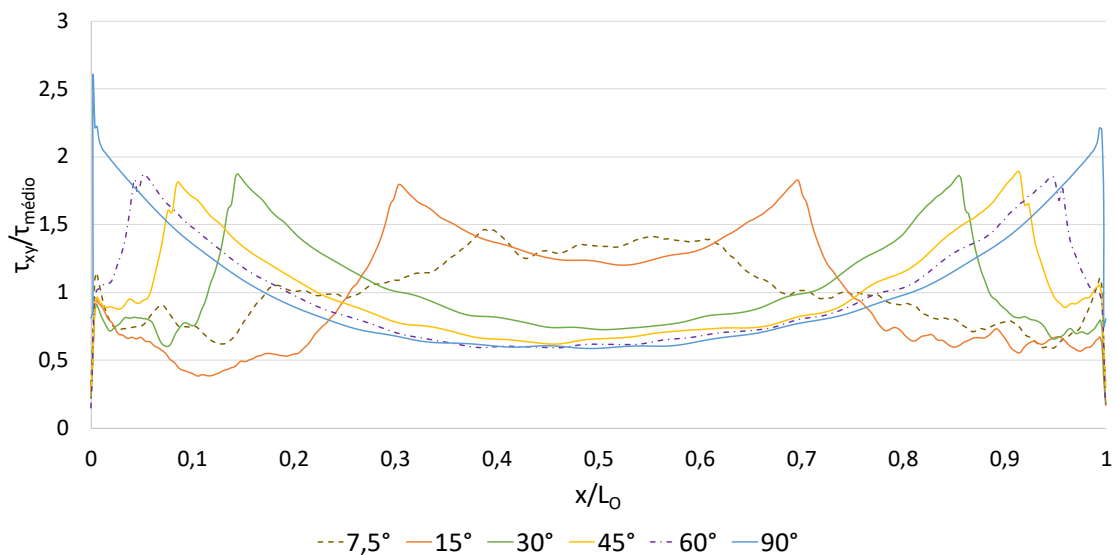


Figura 115 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

Para o último adesivo, XNR6852E-2, apresenta-se na Figura 115 a distribuição de tensões de corte em função de β . Excluindo a diferente localização, os picos de concentração de tensão das JSS com β de 15°, 30°, 45° e 60° resultam num desempenho idêntico. O chanfro de 7,5° apresenta destacadamente o melhor resultado na distribuição de tensões de corte com o adesivo tenaz. No extremo oposto encontra-se a JSS sem chanfro (90°) com o maior efeito de concentração de tensões de corte e com a localização desses picos no extremo da camada adesiva.

Na Figura 116 encontra-se a representação da distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β . De entre os ensaios realizados apenas se destaca o ensaio feito com o menor ângulo, com uma magnitude de tensões de arrancamento superior a todos os restantes ensaios. Tal como analisado no caso do adesivo AV138, também com este adesivo se observa, para 60°, o valor máximo de concentração de tensões de arrancamento numa das extremidades da camada adesiva não se encontra no limite exterior.

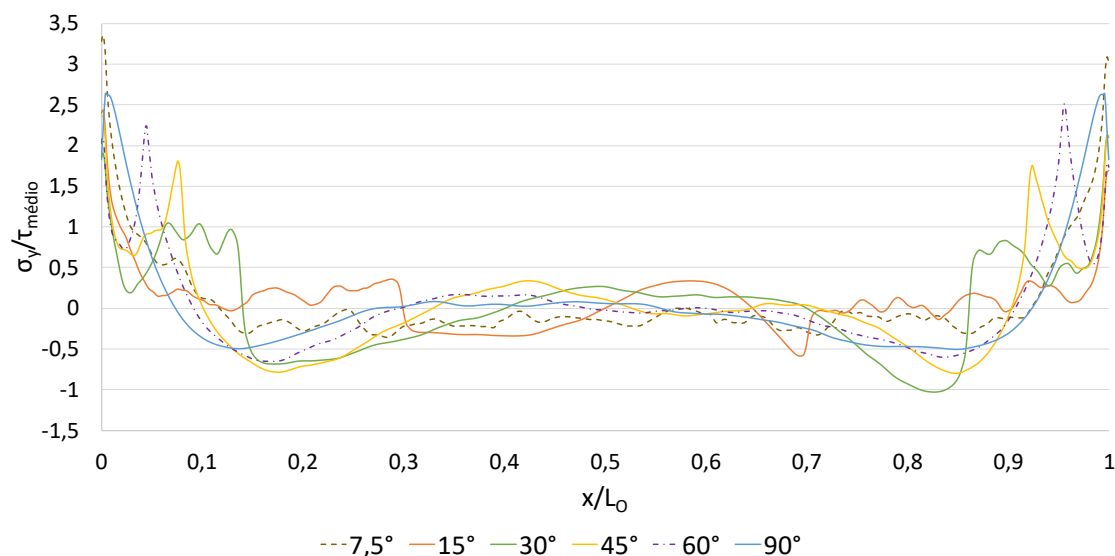
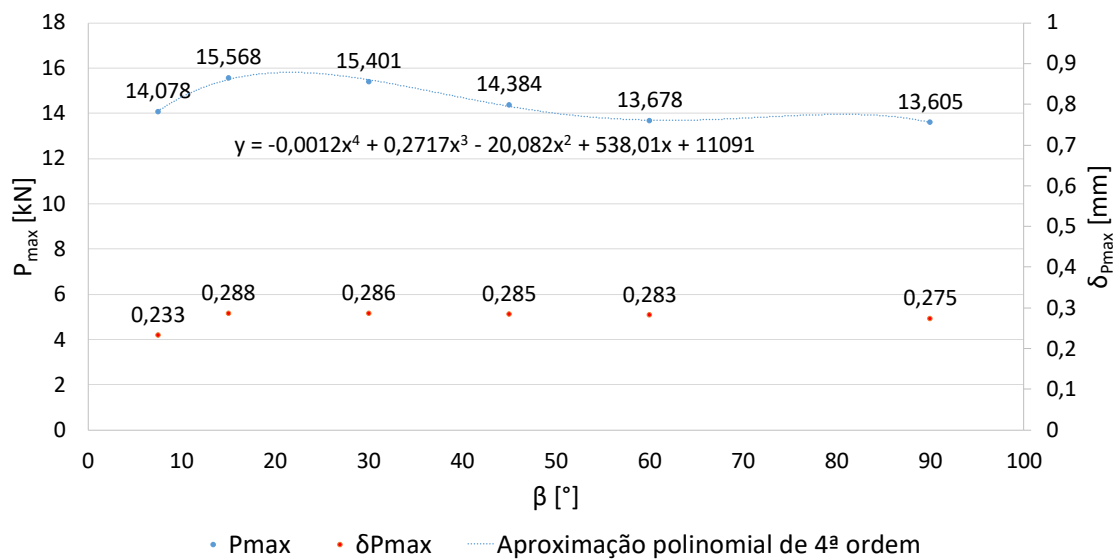
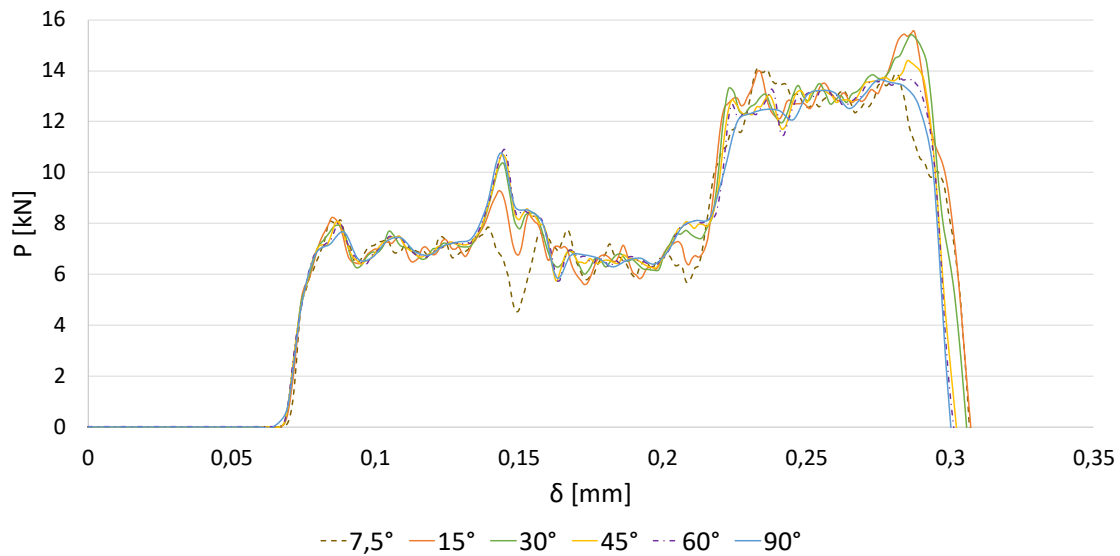


Figura 116 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

3.2.4.2.2 Resistência das juntas

Na Figura 117 são apresentadas as curvas P- δ para os diferentes valores de β com o adesivo AV138. Há uma elevada sobreposição de todas as curvas, nas quais apenas é possível diferenciar ao longo do deslocamento os ensaios com ângulos de 7,5° e 15°. Os deslocamentos máximos obtidos, apesar de próximos, não são coincidentes entre ensaios.



Na análise detalhada dos valores de carga máxima obtidos (Figura 118), observa-se uma tendência de aumento de resistência com a redução do valor do ângulo até 15°, seguido de uma degradação de desempenho para 7,5°. O aumento da carga máxima obtida até aos 15° – 14% mais elevada do que na JSS sem chanfro (90°) – resulta de um afastamento dos picos de concentração de tensões de corte dos extremos da camada adesiva e da redução da sua magnitude Figura 111. Para 7,5° há diminuição de performance da junta adesiva. De facto, a redução dos valores de pico de concentração de tensões de corte

resulta em maior acumulação de tensões de corte junto dos extremos da camada adesiva quando comparado com o estudo feito com 15°. O deslocamento coincidente com a carga máxima segue a mesma distribuição da carga máxima pelas mesmas razões anteriormente enunciadas.

Na Tabela 21 são apresentados os valores de energia absorvida pelas JSS com o adesivo AV138. Ainda que a diferença seja reduzida ou até mesmo nula entre todos os ensaios, destacam-se os ensaios de 15° e 30° com um aumento de 4% em relação à JSS sem chanfro (90°). A causa desse aumento é visível na Figura 117 em que, para os casos em questão, é obtido maior deslocamento e carga máxima de forma destacada dos restantes. O ensaio com $\beta=7,5^\circ$ absorve menos energia como resultado da menor carga e deslocamento atingidos.

Tabela 21 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de β

β [°]	E [J]	Diferença
7,5	2,03	0%
15	2,12	+4%
30	2,12	+4%
45	2,08	+2%
60	2,06	+1%
90	2,03	-

As curvas P- δ com o uso do adesivo DP8005 em função de β estão representadas na Figura 119. A curva correspondente a 7,5° é facilmente identificável devido ao facto de ter o menor deslocamento e cargas atingidas mais reduzidas. Não tão distante, mas também desfasada das restantes curvas, está a curva correspondente a 15°. As restantes curvas apenas são identificáveis individualmente após o ponto de rotura, próximo entre todas elas.

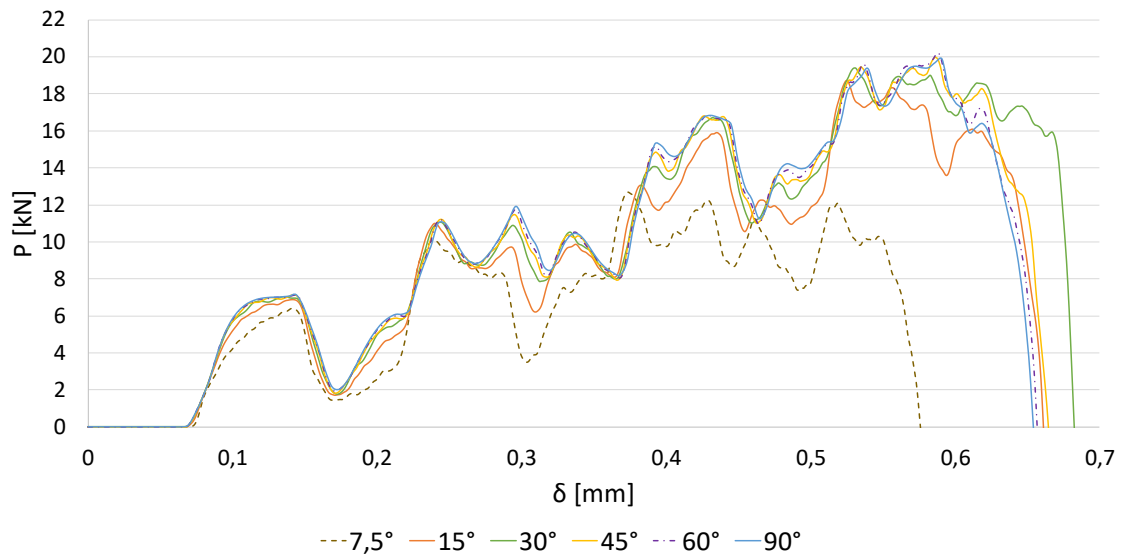


Figura 119 - Curva P-δ com o adesivo DP8005 em função de β

Com o estudo detalhado dos valores de carga máxima atingida expostos na Figura 120 pode verificar-se que se obteve uma melhoria com a introdução de um chanfro de 60° comparado com 90° (sem chanfro), embora com apenas 2% de aumento de P_{max} . No entanto, com a redução progressiva do valor do ângulo há uma degradação de desempenho acompanhada de uma redução do deslocamento à qual P_{max} é atingida. A redução de 60° até 30° é moderada, sendo que ocorre uma redução maior para $\beta=15^\circ$ e abrupta quando utilizado $\beta=7,5^\circ$.

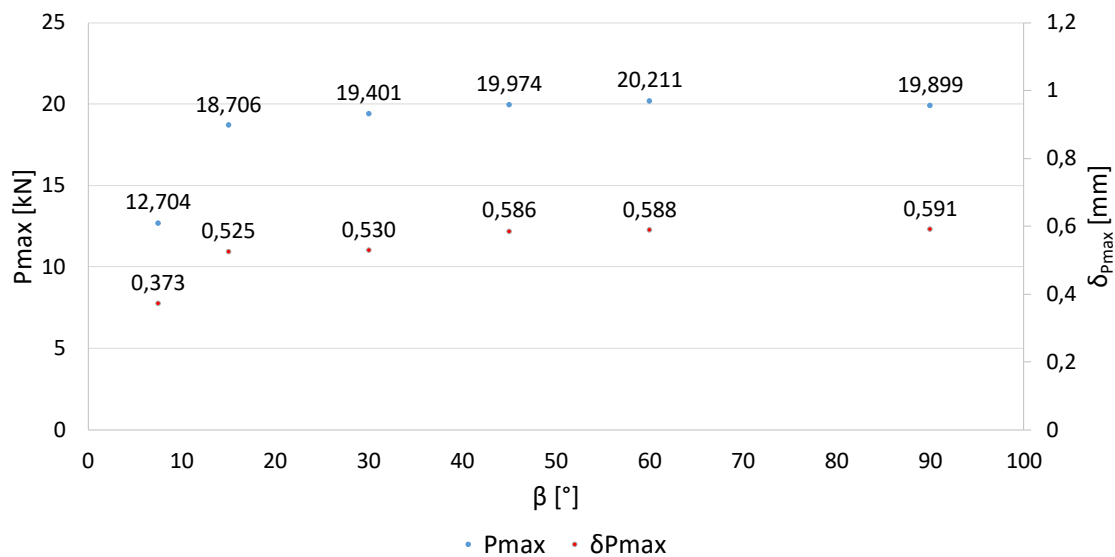


Figura 120 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de β

A baixa variação entre a ausência de chanfro (90°) e 45° deve-se ao facto de a magnitude da concentração das tensões de corte ser semelhante entre os ensaios. A redução significativa no ensaio de 15° é consequência do pior desempenho de distribuição de tensões de corte. Com $\beta=7,5^\circ$ a redução dos picos de tensão de corte em relação ao caso de 15° resultou numa maior acumulação de tensões nas regiões próximas do limite da camada adesiva, o que levou a maior degradação do desempenho da JSS.

Devido ao deslocamento máximo atingido ser o mais reduzido de todos os ensaios, assim como a carga máxima atingida ser a menor, o ensaio de 7,5° foi aquele que menor energia de impacto absorveu (Tabela 22). Nos restantes ensaios a introdução de um chanfro interior não revelou impacto significativo na absorção de energia.

Tabela 22 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de β

β [°]	E [J]	Diferença
7,5	3,69	-43%
15	6,02	-7%
30	6,92	+7%
45	6,60	+2%
60	6,52	+0,5%
90	6,49	-

Com o adesivo tenaz, XNR6852 E-2, foram obtidas as curvas P- δ da Figura 121. Os perfis das curvas são entre eles semelhantes, em que as cargas máximas e deslocamento máximo obtidos são próximos. Diverge apenas a curva que representa o estudo do chanfro interior de menor ângulo, com pior desempenho em ambos os parâmetros, fruto da menor transmissão de esforços na zona com grande concentração de adesivo.

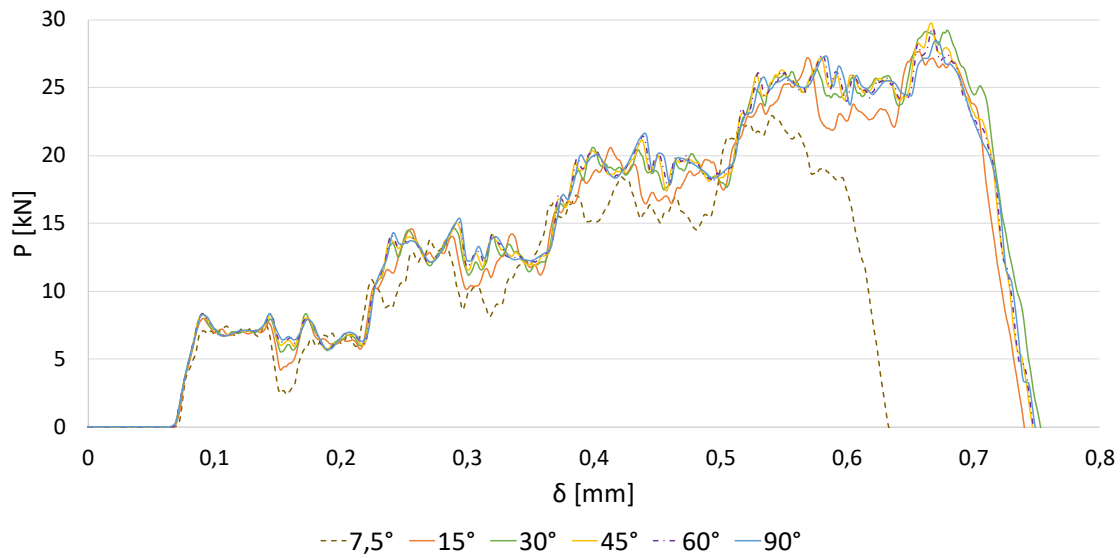


Figura 121 - Curva P-δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

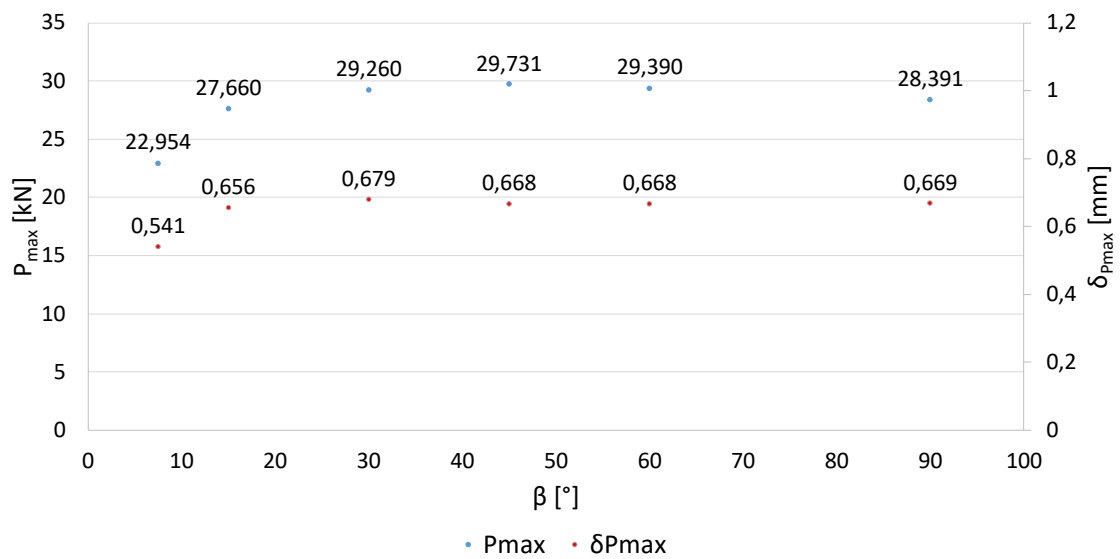


Figura 122 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

A tendência de variação de carga máxima com o adesivo XNR6852E-2 (Figura 122) é semelhante à tendência verificada com o adesivo DP8005. A introdução de um chanfro – 90° corresponde à ausência de chanfro – de 60° aumenta o valor de carga máxima, com um ângulo de 45° a aumentar ainda mais esse valor, com este último a resultar num aumento de 5% em relação ao resultado sem chanfro. A redução do valor desse ângulo reduz também o valor da carga máxima. Essa redução é menos pronunciada do que com o adesivo DP8005 por ter um módulo de elasticidade mais elevado. Este resultado está

relacionado com o valor da rigidez do adesivo, que tem valor o valor intermédio dos três adesivos ensaiados.

Do mesmo modo ao ocorrido no caso do adesivo DP8005, com o adesivo XNR6852 E-2 apenas se regista uma diferença significativa, no caso uma redução, da energia de impacto absorvida com um $\beta=7,5^\circ$. Os valores obtidos podem ser consultados na Tabela 23.

Tabela 23 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de β

β [°]	E [J]	Diferença
7,5	7,07	-36%
15	10,43	-5%
30	11,11	+1%
45	11,03	0%
60	11,04	+0,1%
90	11,03	-

Ocorreu deformação plástica em todos os ensaios com chanfro interior, apenas com o adesivo XNR6852 E-2, à exceção de $\beta=7,5^\circ$. Um chanfro de 15° resultou em 0,006% de deformação plástica (Figura 123), 0,02% para 90° (sem chanfro) e 0,04% para os restantes. Devido à reduzida deformação plástica resultante não se conclui que a mesma tenha influência no desempenho da JSS.

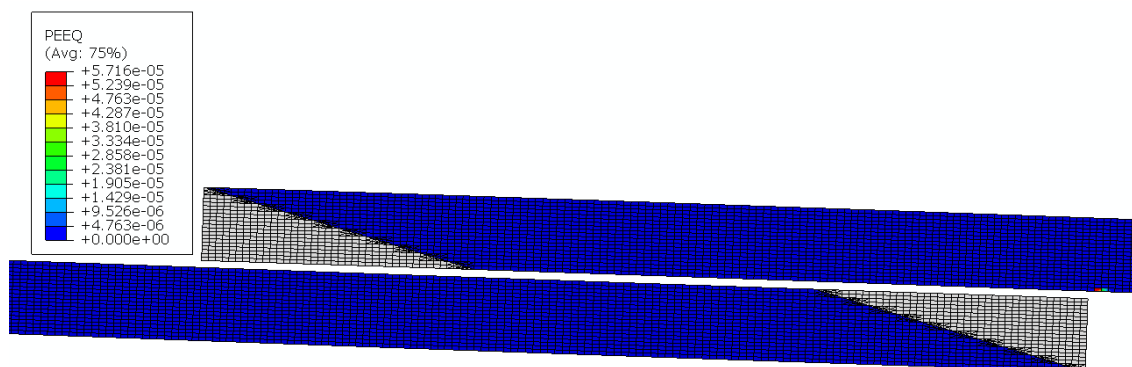


Figura 123 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $\beta=15^\circ$

Os três adesivos apresentaram resultados distintos. Quanto maior a rigidez do adesivo, melhor o efeito de β com valores mais reduzidos. O valor angular com o qual se obtém o melhor resultado estabelece uma relação com a rigidez do adesivo utilizado. Para o adesivo AV138, o melhor resultado é obtido com $\beta=15^\circ$, enquanto para o XNR6852 E-2 corresponde a $\beta=45^\circ$ e para o DP8005 a $\beta=60^\circ$. Todos os valores de carga máxima estão acima do valor de referência, a JSS sem chanfro (90°).

3.2.4.3 Filete de adesivo

A representação da geometria da JSS utilizada é apresentada na Figura 124. É feita a variação do ângulo de filete de adesivo (θ) sem que haja alteração do comprimento dos aderentes. São utilizados os seguintes valores de θ : $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° , 60° e 90° . Devido a erros obtidos no decorrer das simulações por deformação excessiva, foram excluídos os resultados com $\theta=7,5^\circ$ para os adesivos DP8005 e XNR6852 E-2.

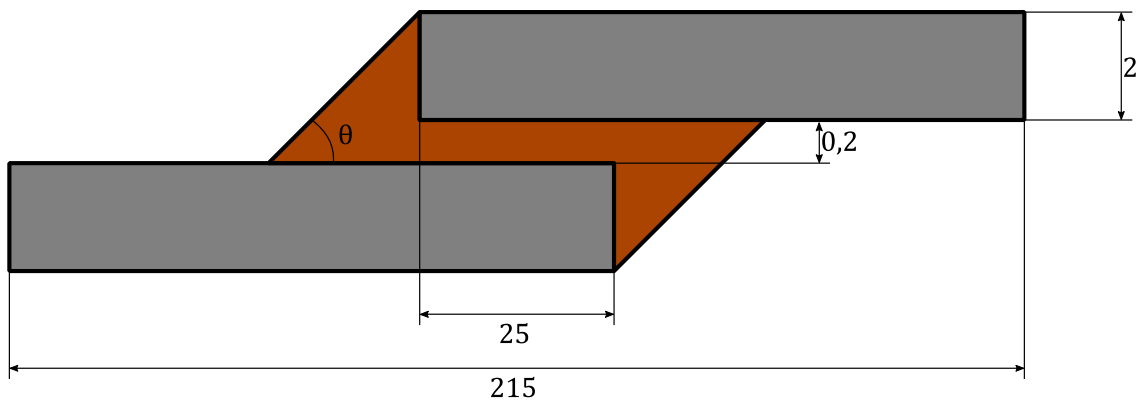


Figura 124 – Geometria e dimensões das JSS para estudo do efeito de θ

A malha utilizada foi criada de modo a reduzir o número de elementos triangulares. A metodologia seguida pode ser consultada no capítulo 3.2.4.1.

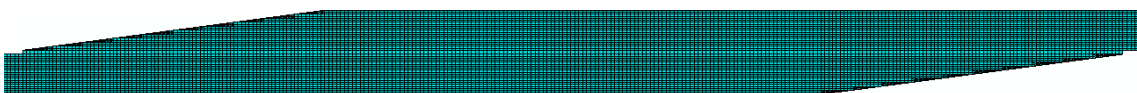


Figura 125 - Visualização da malha do modelo com $\theta=7,5^\circ$

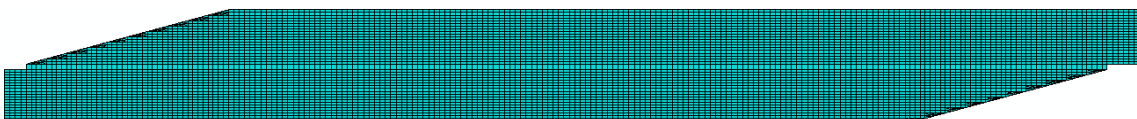
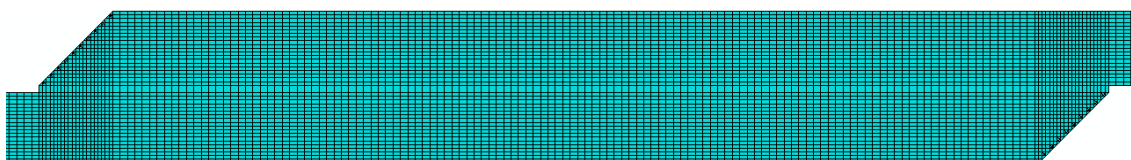


Figura 126 - Visualização da malha do modelo com $\theta=15^\circ$

Figura 127 - Visualização da malha do modelo com $\theta=30^\circ$ Figura 128 - Visualização da malha do modelo com $\theta=45^\circ$ Figura 129 - Visualização da malha do modelo com $\theta=60^\circ$

Entre a Figura 125 e a Figura 129 podem ser vistas as representações das malhas para os modelos de 7,5°, 15°, 30°, 45° e 60°, respetivamente. De modo idêntico aos casos anteriores em que há alterações angulares, o modelo com $\theta=90^\circ$ representa a ausência de filete de adesivo. Neste caso, a malha é idêntica à utilizada no modelo de validação (Figura 43). A quantidade de elementos gerados e o seu tipo estão descritos na Tabela 24.

Tabela 24 - Número de elementos em função de θ

Elementos	θ [°]					
	7,5	15	30	45	60	90
CPE4R	28100	27340	26980	27260	27420	13250
CPE3	600	280	120	120	120	-
COH2D4	285	205	165	165	165	125
Total	28985	27825	27265	27545	27705	13375

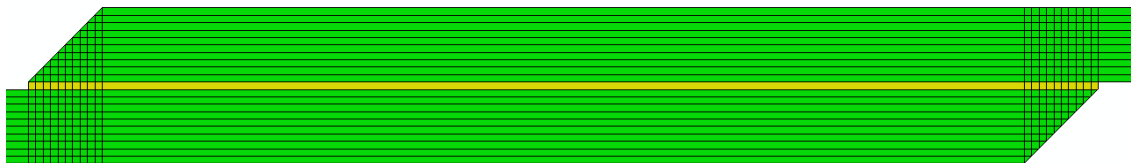


Figura 130 - Controlo de malha no modelo com $\theta=45^\circ$

O controlo de malha nos modelos com filete de adesivo é idêntico ao controlo utilizado nos modelos com chanfro exterior dos aderentes e pode ser consultado no capítulo 3.2.4.1.

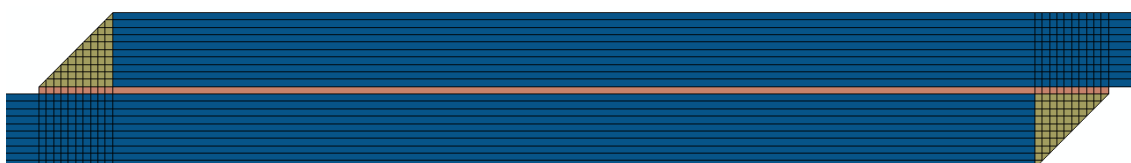


Figura 131 - Atribuição de materiais no modelo com $\theta=45^\circ$

As semelhanças com o modelo de variação de chanfro exterior dos aderentes terminam com a atribuição dos materiais. Como em todos os outros modelos estudados, na camada adesiva constituída por elementos *sweep* (a laranja na Figura 131) foram atribuídas propriedades coesivas visto esta ser a zona por onde será propagada a rotura. A castanho na Figura 131 são aplicadas as propriedades elásticas do adesivo e no restante modelo atribui-se o material dos aderentes.

3.2.4.3.1 Distribuições de tensões

Ao contrário do que acontece com a introdução de chanfros nos aderentes, a introdução de filetes de adesivo prolonga a camada adesiva para além dos topos dos aderentes da JSS. Devido a esse facto, a tensão média de corte calculada para os ensaios com filete de adesivo foi obtida apenas com os valores de tensão registados dentro do limite dos aderentes. De igual modo, nas distribuições de tensões a distância 0 e 1 correspondem aos limites da camada adesiva entre aderentes sendo a restante distância correspondente à camada adesiva sob os filetes de adesivo.

A distribuição de tensões de corte com o adesivo AV138 para os diversos valores de θ utilizados encontra-se representada na Figura 132. Observa-se uma redução dos efeitos de concentração de tensões de corte com a redução do valor de θ aplicado. O maior comprimento de sobreposição total resultante de ângulos de menor valor resulta numa

maior área para distribuição de tensões, o que resulta numa maior homogeneidade. Os resultados obtidos são idênticos aos resultados obtidos em ensaios estáticos [111].

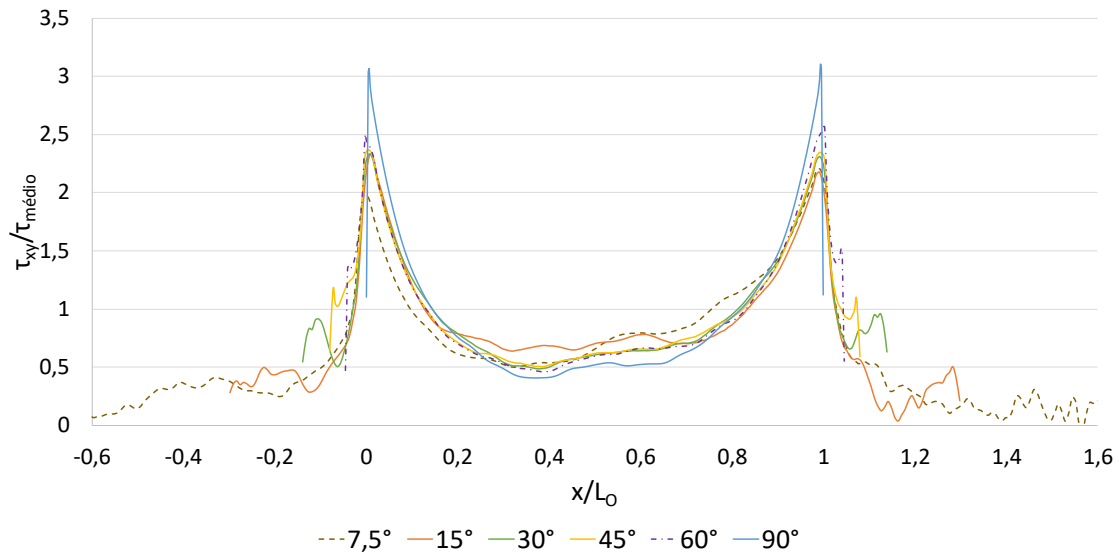


Figura 132 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em função de θ

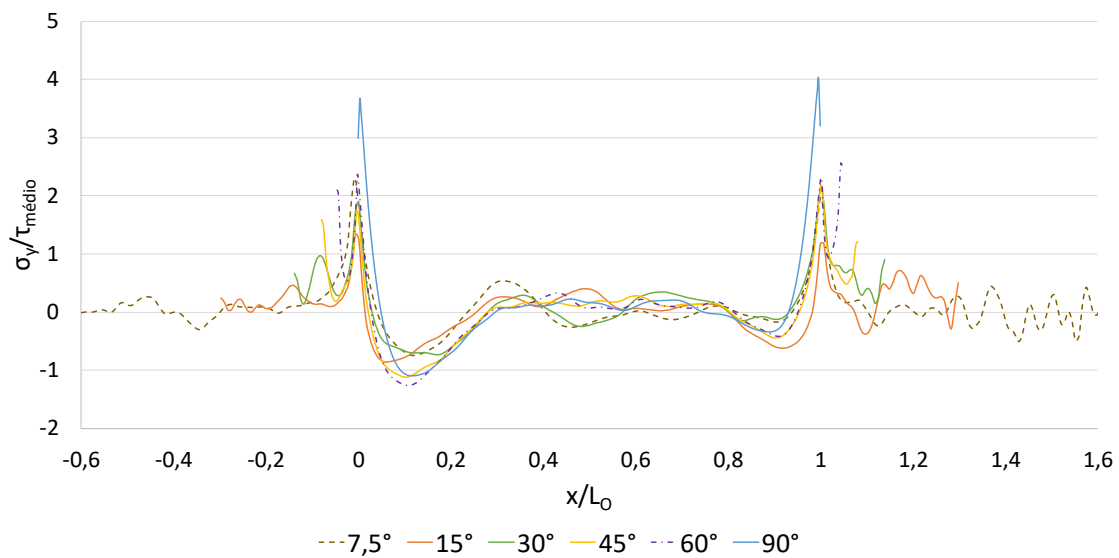


Figura 133 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de θ

A Figura 133 apresenta a distribuição de tensões arrancamento em função de θ . Observa-se um grande aumento de desempenho, isto é, menor concentração de tensões de arrancamento com a introdução de um filete de adesivo. Entre os valores de

θ ensaiados não é possível fazer distinção assertiva de entre os casos. O efeito observado é idêntico ao que está largamente documentado em casos de solicitação estática [111].

Alterando o adesivo para DP8005, são obtidas as distribuições de tensões de corte da Figura 134. Devido à menor rigidez do adesivo, a redução do efeito de concentração de tensões de corte é menor do que no caso do adesivo rígido. Ainda que a introdução de filetes de adesivo melhore a distribuição de tensões de corte da JSS, não se observa alterações de magnitude dos picos entre os diversos ângulos de filete considerados.

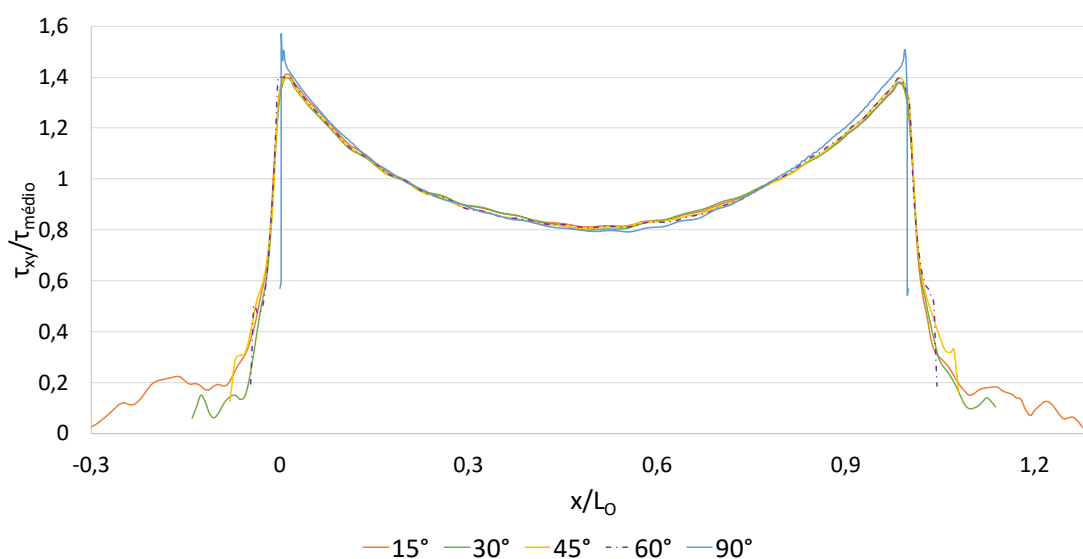


Figura 134 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em função de θ

A análise da distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo DP8005 permite retirar uma conclusão idêntica à análise de tensões de corte (Figura 135). Com qualquer dos valores de θ utilizados, há redução dos picos de concentração de tensões em comparação com a ausência de filete de adesivo (90°). As tensões de pico de entre os ângulos ensaiados não apresentam diferenças assinaláveis.

Na Figura 136 é apresentada a distribuição de tensões de corte com o adesivo XNR6852 E-2 para os diferentes filetes de adesivo utilizados. De modo idêntico ao adesivo AV138, existe uma tendência de redução de picos de concentração de tensões de corte com a redução do valor de θ . Devido à menor rigidez deste adesivo, a melhoria de desempenho não é tão significativa como no caso do adesivo rígido, AV138. Pelo mesmo motivo, as melhorias foram melhores do que as apresentadas pelo adesivo DP8005 devido à baixa rigidez deste último.

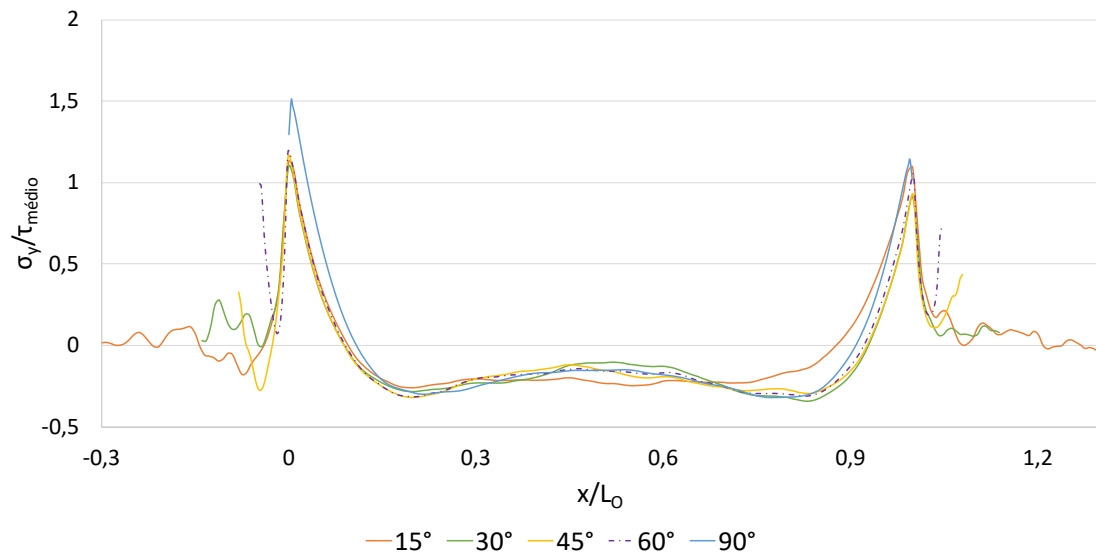


Figura 135 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em função de θ

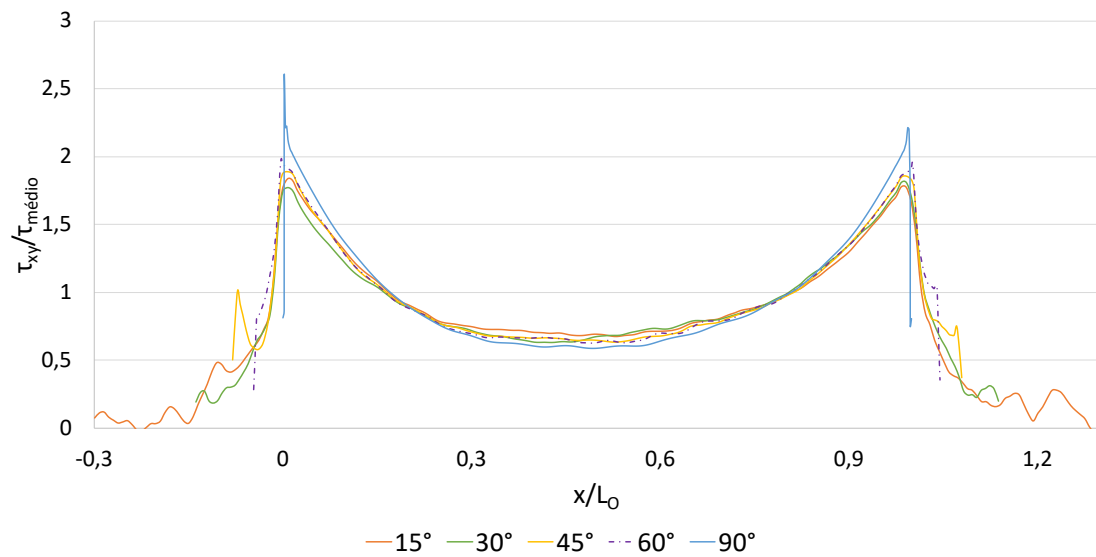


Figura 136 - Distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

Repete-se a análise da distribuição de tensões de arrancamento feita para os adesivos AV138 e DP8005, agora com o adesivo XNR6852 E-2 (Figura 137). A introdução de filetes de adesivo reduz a concentração de tensões de arrancamento sem que seja possível obter uma tendência entre ensaios realizados. No extremo onde é aplicada carga, há uma tendência lógica de decréscimo dos picos de tensão, não observada no extremo oposto.

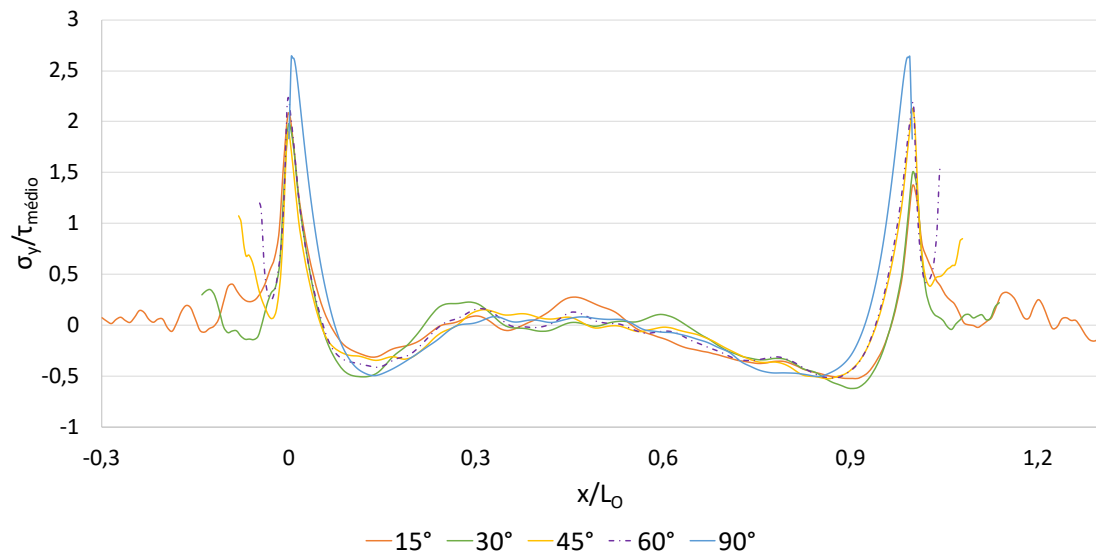


Figura 137 - Distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

3.2.4.3.2 Resistência das juntas

As curvas P- δ para os diferentes valores de θ podem ser observadas na Figura 138. A redução do valor de θ é acompanhada por um aumento de carga máxima e deslocamento máximo atingidos. Os resultados vão de encontro ao esperado visto que a redução do ângulo resulta num maior comprimento total de camada adesiva, para além da modificação da distribuição de tensões.

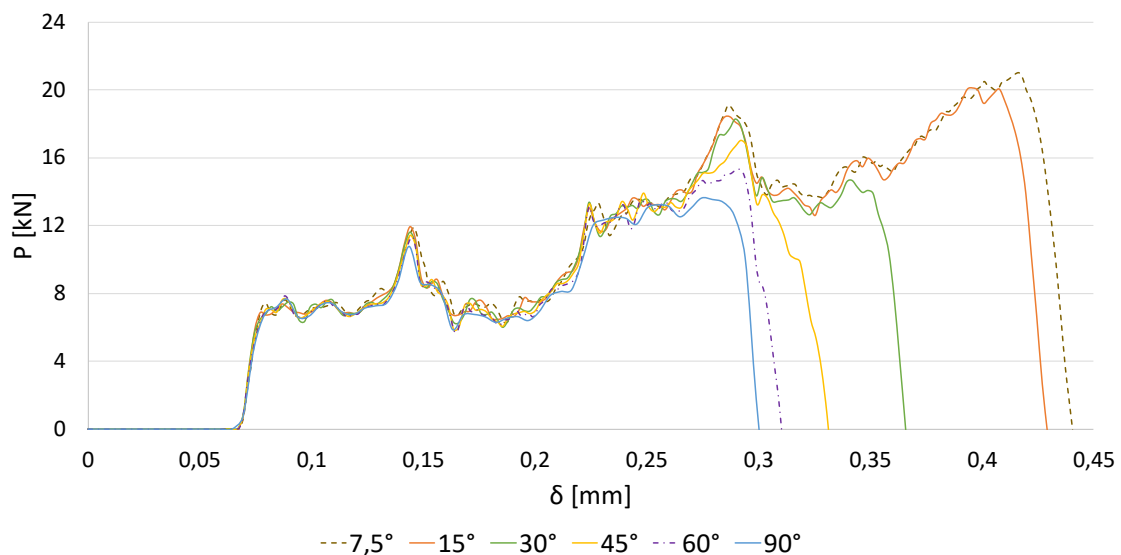


Figura 138 - Curva P- δ com o adesivo AV138 em função de θ

Os valores de carga máxima e deslocamento correspondente são apresentados na Figura 139. O valor de carga máxima atingida é 54% superior ao valor de referência (90°). Pode observar-se que os ensaios de 30°, 45° e 60° resultam num deslocamento para carga máxima semelhante, e superior ao ensaio realizado sem filete de adesivo (90°). Os restantes ensaios resultaram num aumento do deslocamento com a redução do valor de θ . As variações no deslocamento para a carga máxima resultam dos diferentes desempenhos na distribuição de tensões de corte (Figura 132).

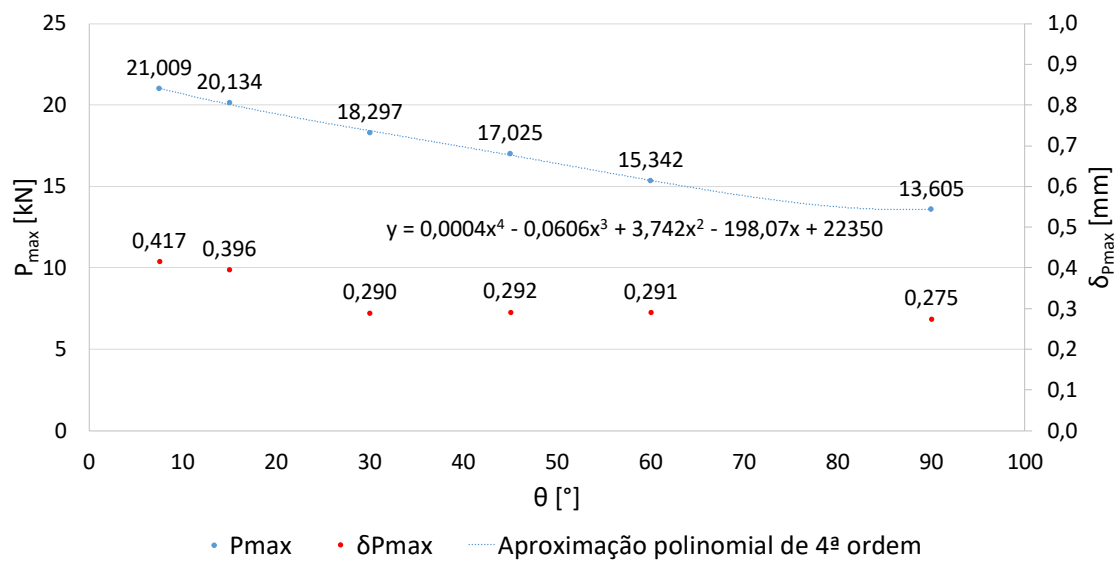


Figura 139 - Valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em função de θ

Tabela 25 - Energia absorvida com o adesivo AV138 em função de θ

θ [°]	E [J]	Diferença
7,5	4,57	+125%
15	4,30	+112%
30	3,08	+52%
45	2,51	+24%
60	2,22	+9%
90	2,03	-

Devido à maior carga suportada acompanhada de maior deslocamento máximo atingido, há um aumento de energia de impacto absorvida resultante da redução do valor de θ (Tabela 25). Com a alteração de um adesivo rígido para dúctil, DP8005, são obtidas as curvas P- δ da Figura 140. A tendência é idêntica ao caso anterior, com aumento de carga máxima e deslocamento máximo atingidos com a redução de θ .

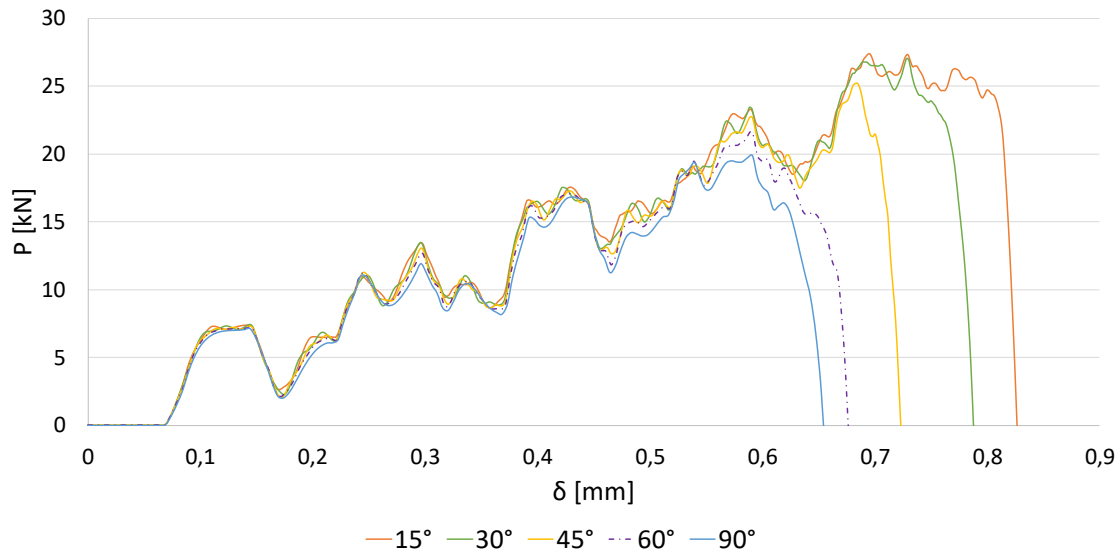


Figura 140 - Curva P- δ com o adesivo DP8005 em função de θ

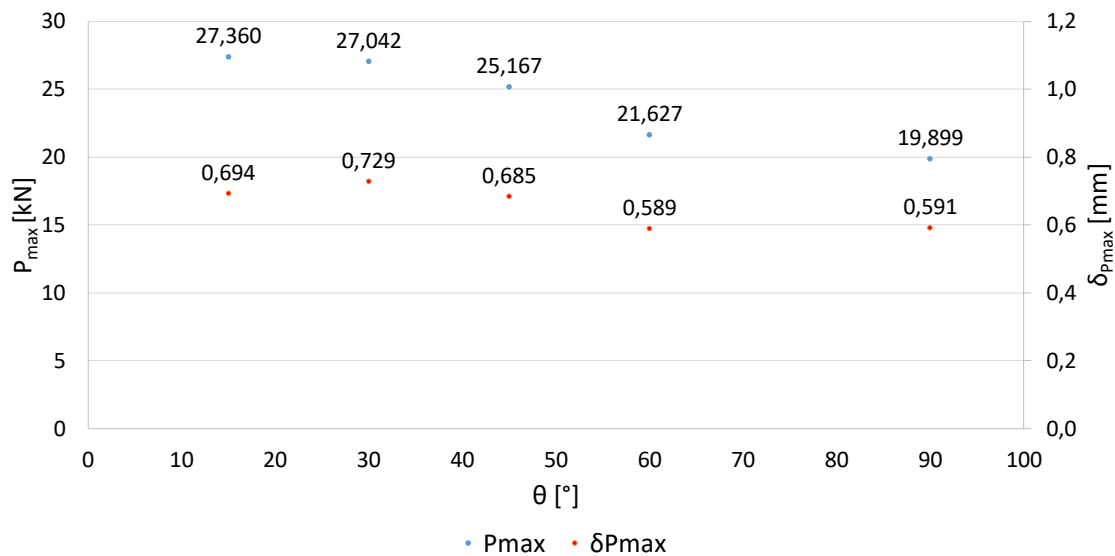


Figura 141 - Valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em função de θ

Pelos valores de carga máxima atingidos (Figura 141), verifica-se aumentos não tão significativos quando comparados com o adesivo AV138. Comparado com a JSS sem filete de adesivo, o aumento máximo na carga atingida é de 37%. Estes resultados são consequência de melhorias reduzidas na distribuição de tensões de arrancamento e da menor fragilidade deste adesivo.

Ocorre novamente aumento da energia absorvida com a redução de θ (Tabela 26), as reduzidas diferenças entre ensaios na distribuição de tensões de corte (Figura 134) não permitiram uma razão de aumento tão elevada quanto com o adesivo AV138, pela maior rigidez e fragilidade deste último, que o torna mais suscetível a alterações de P_{max} induzidas por variações do campo de tensões.

Tabela 26 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 em função de θ

θ [°]	E [J]	Diferença
15	11,59	+79%
30	10,35	+59%
45	8,54	+32%
60	7,17	+10%
90	6,49	-

Por último, as curvas P - δ com o adesivo XNR6852 E-2 com diferentes filetes de adesivo aplicados estão dispostas na Figura 142. Repete-se a tendência dos dois casos precedentes. Ambos os parâmetros, carga e deslocamento, aumentam com a redução do valor de θ .

O aumento de carga máxima atingida é aproximadamente linear com a redução do valor de θ (Figura 143), até ser obtido um valor 39% superior ao de referência (90°). O deslocamento ao qual a carga máxima é atingida sofre um aumento com a introdução de um filete adesivo. Com a redução do valor de θ , observa-se uma estagnação desse valor até se verificar um novo aumento para o menor valor de θ .

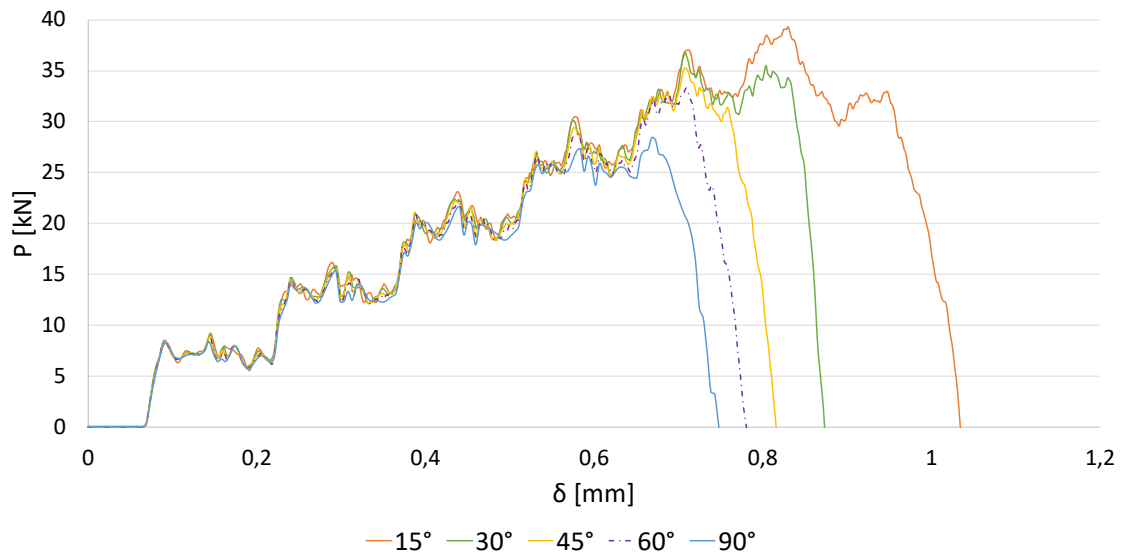


Figura 142 - Curva P-δ com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

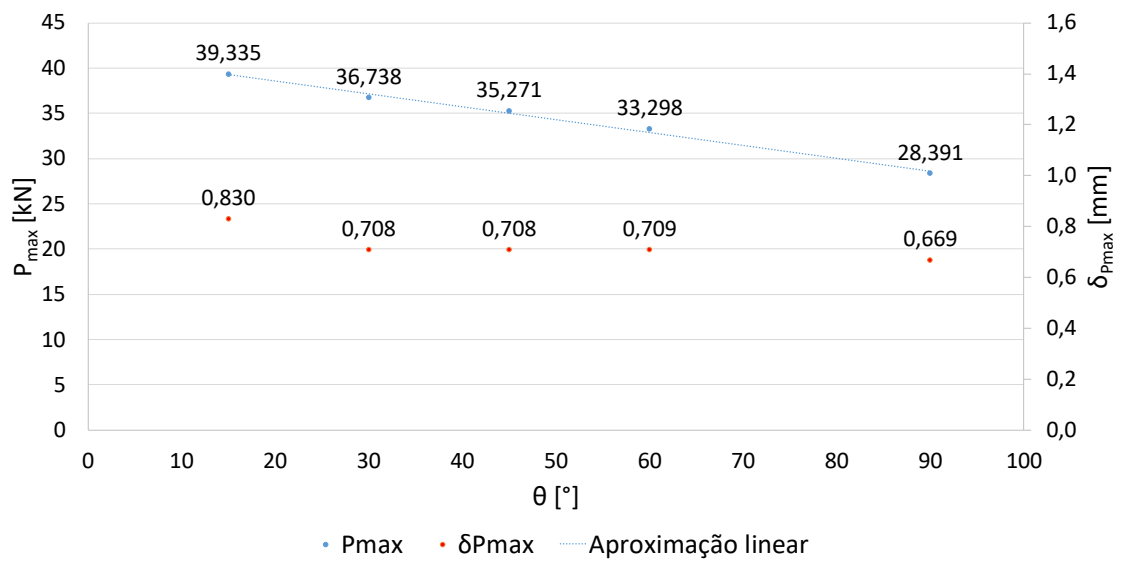


Figura 143 - Valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

Como seria de prever, dado o módulo de elasticidade intermédio entre os adesivos AV138 e DP8005, a aumento da energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 (Tabela 27) obtido com o incremento da camada adesiva proporcionado pelo filete de adesivo encontra-se entre os valores obtidos pelos dois outros adesivos.

Tabela 27 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 em função de θ

θ [°]	E [J]	Diferença
15	21,37	+94%
30	16,36	+48%
45	13,96	+27%
60	12,57	+14%
90	11,03	-

Verificou-se deformação plástica com todos os ângulos ensaiados com o adesivo XNR6852 E-2. Não ocorreu deformação plástica com os adesivos AV138 e DP8005.

Os ensaios com $\theta=7,5^\circ$ (Figura 144) e $\theta=15^\circ$ resultam numa deformação plástica dos aderentes após rotura da camada adesiva de 0,2%. Com $\theta=45^\circ$ ocorre 0,1% de deformação plástica e com $\theta=60^\circ$ obtém-se 0,08%. Sem filete de adesivo ($\theta=90^\circ$) é registada 0,02% de deformação permanente. Devido à reduzida plasticidade aplicada aos aderentes não se conclui que a mesma tenha reduzido o desempenho da JSS.

Figura 144 - Deformação plástica com o adesivo XNR6852 E-2 para $\theta=15^\circ$

As vantagens apresentadas pela implementação de filetes de adesivo, melhor distribuição de tensões e aumento da área de adesivo, surtem efeito com os três adesivos utilizados. A progressiva redução do valor de θ resulta em sucessivos aumentos na carga máxima atingida. Devido à menor capacidade de dispersão de tensões dos adesivos mais rígidos, a introdução de filetes de adesivo é mais eficaz quanto maior a rigidez do adesivo.

3.2.5 Combinação de alterações geométricas ótimas

Neste capítulo são testadas as combinações de otimizações geométricas singulares mais eficazes para cada um dos adesivos. Apenas são feitas combinações possíveis. Por exemplo, não é possível a implementação de filete de adesivo com chanfro exterior nos aderentes ou a combinação de chanfro interior e exterior. Os resultados obtidos são comparados com os resultados de validação, em que é utilizada uma JSS convencional, e os resultados da otimização singular mais eficaz. Neste capítulo, designa-se por configuração ótima aquela que teoricamente oferecerá maior potencial de resistência à junta adesiva.

Os parâmetros de malha, controlo de malha e atribuição de materiais são considerados de forma idêntica aos casos individuais. Devido ao facto de todas as alterações individuais terem sido executadas com $L_0=25$ mm, todas as combinações ótimas apresentam essa mesma dimensão.

3.2.5.1 Huntsman Araldite AV138

A otimização singular mais eficaz quando utilizado o adesivo AV138 é o filete de adesivo com $\theta=7,5^\circ$. Para a configuração ótima, foi utilizada a otimização singular mais eficaz com a adição de um chanfro interior nos aderentes no ângulo que se revelou mais eficaz com este adesivo, 15° , e com a espessura dos aderentes de 4 mm.

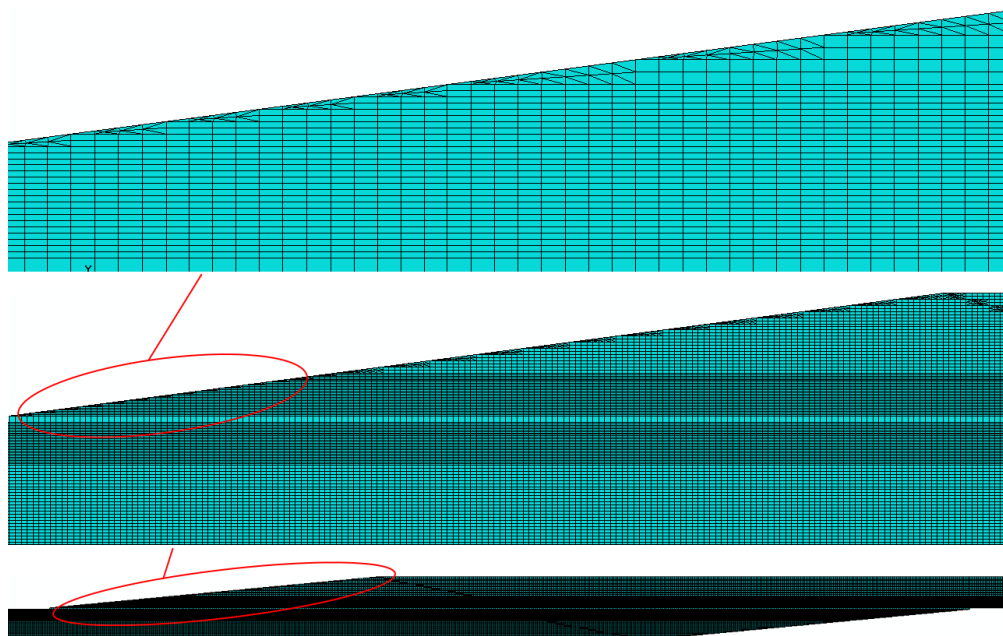


Figura 145 - Malha da configuração ótima para adesivo AV138

A malha criada para a configuração ótima está representada na Figura 145. O controlo de malha e atribuição de materiais seguiram o mesmo critério utilizado nas alterações individuais. Os elementos gerados e respetiva quantidade são apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Número de elementos da configuração ótima para o adesivo AV138

Configuração ótima	CPE4R	CPE3	COH2D4	Total
Elementos	82842	2236	454	85532

3.2.5.1.1 Distribuições de tensões

A distribuição de tensões de corte da configuração ótima com o adesivo AV138 é apresentada na Figura 146. Pelo facto de se tratarem de aderentes mais espessos – 4 mm – do que aqueles utilizados com apenas o filete de adesivo, na configuração ótima o filete de 7,5° resulta num comprimento de sobreposição efetivo de maior dimensão. A concentração de tensões de corte verifica-se numa zona mais interior da zona de sobreposição, ao sentido do comprimento, em relação aos resultados de comparação devido à introdução do chanfro interior dos aderentes. Os valores de pico atingidos são os mais elevados.

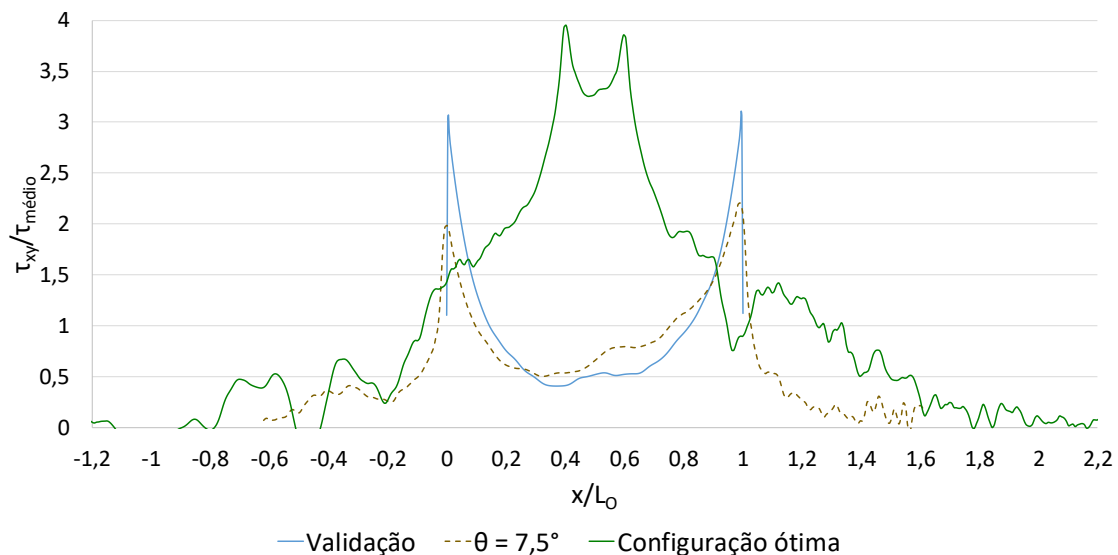


Figura 146 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração ótima do adesivo AV138

Na Figura 147 é apresentada a distribuição de tensões de arrancamento da configuração ótima com o adesivo AV138. O maior comprimento de sobreposição efetivo resulta em menor intensidade de tensões de arrancamento e maior proeminência de tensões de compressão, fruto da maior área de adesivo.

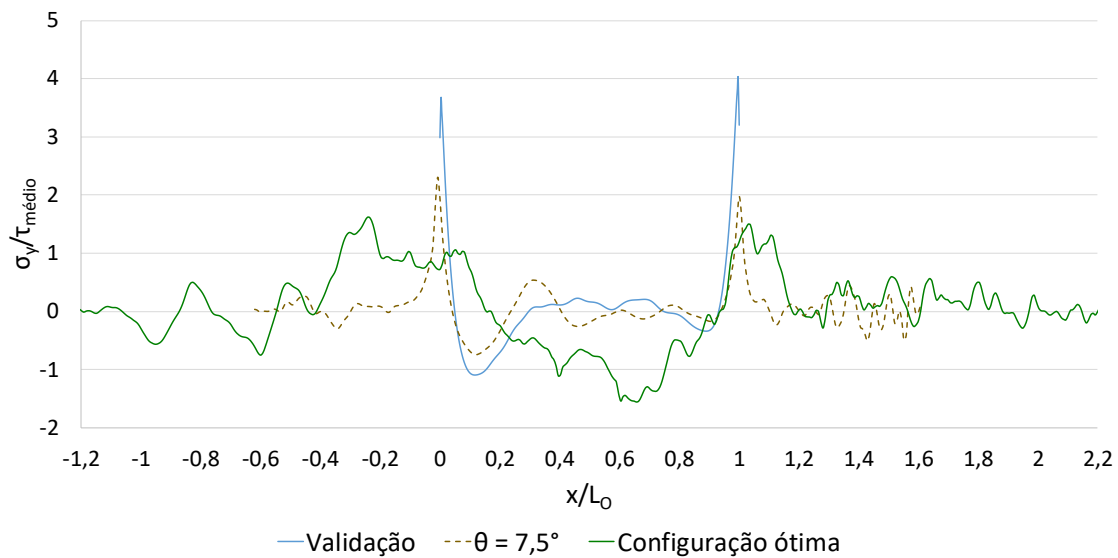


Figura 147 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração ótima do adesivo AV138

3.2.5.1.2 Resistência das juntas

A curva P- δ obtida para a configuração ótima com o adesivo AV138 é apresentada na Figura 148, onde esta é também comparada com o resultado de validação e $\theta=7,5^\circ$. O deslocamento máximo obtido é o mais reduzido dos três casos, ainda que semelhante ao resultado de validação. Para o mesmo valor de deslocamento, a carga é tipicamente mais elevada na configuração ótima, ainda que no seu valor máximo seja ultrapassada pela introdução singular do filete de adesivo.

Na Figura 149 são apresentados os valores de carga máxima atingida e respetivo deslocamento para a configuração ótima com o adesivo AV138. A configuração ótima não teve o efeito desejado, já que apresenta um desempenho 43% superior à JSS convencional, mas fica 7% abaixo da JSS com apenas o filete de adesivo com $\theta=7,5^\circ$. O deslocamento correspondente à carga máxima vê o seu valor diminuído em relação a ambos os casos de comparação, com um resultado especialmente distante da JSS com otimização singular. Conclui-se assim que o maior comprimento de sobreposição efetivo não é suficiente para anular os efeitos da pior distribuição de tensões de corte.

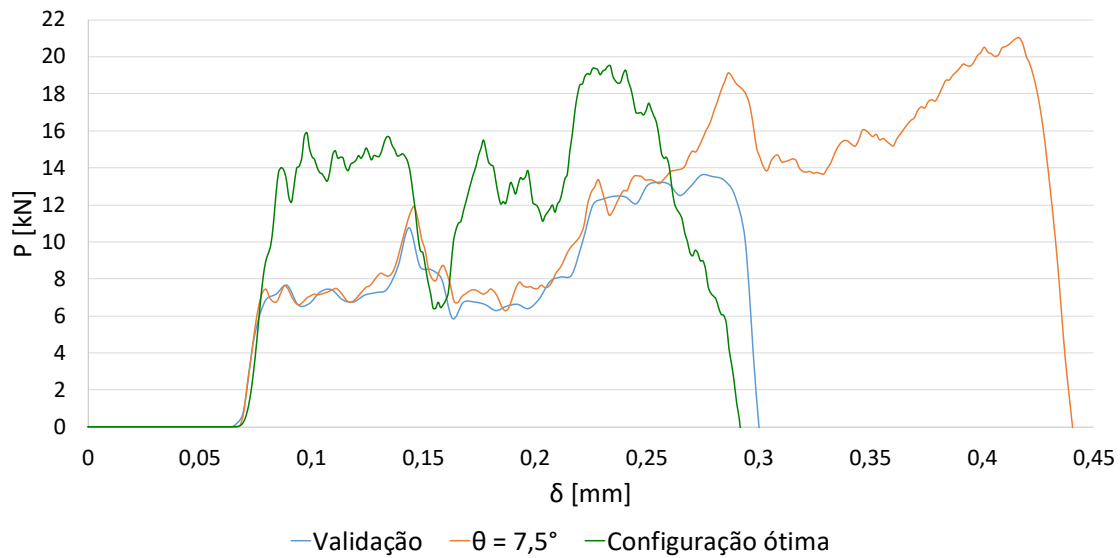


Figura 148 - Curva P- δ para configuração ótima com o adesivo AV138

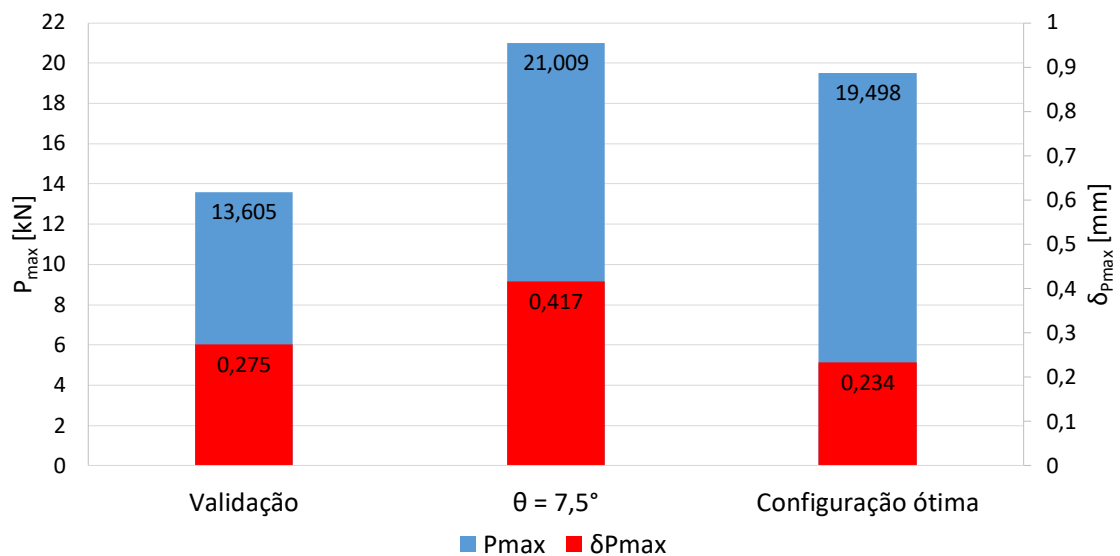


Figura 149 - Valores máximos obtidos para configuração ótima com o adesivo AV138

A comparação da energia absorvida pela configuração ótima com o adesivo AV138 é apresentada na Tabela 29, e pode ser comparada com a JSS convencional e com a otimização singular mais eficaz. Apesar do deslocamento máximo mais reduzido da configuração ótima, observa-se um aumento de energia de 39% em relação à JSS convencional, fruto da maior carga máxima suportada. Apesar de haver uma diferença de apenas 7% na carga máxima atingida, a otimização singular é capaz de absorver mais

86% de energia de impacto do que a configuração ótima, uma vez que o deslocamento atingido é mais elevado.

Tabela 29 – Energia absorvida com adesivo AV138 na sua configuração ótima

Tipo de JSS	E (J)	Diferença
Convencional	2,03	-
$\theta=7,5^\circ$	4,57	+125%
Configuração ótima	2,82	+39%

3.2.5.2 3M DP8005

O filete de adesivo com $\theta=15^\circ$ foi a otimização singular com maior incremento na carga máxima na JSS quando utilizado o adesivo DP8005. Através da comparação de todos os resultados, obtém-se como configuração ótima uma JSS com aderentes com 3 mm de espessura, $\beta=60^\circ$ e $\theta=15^\circ$.

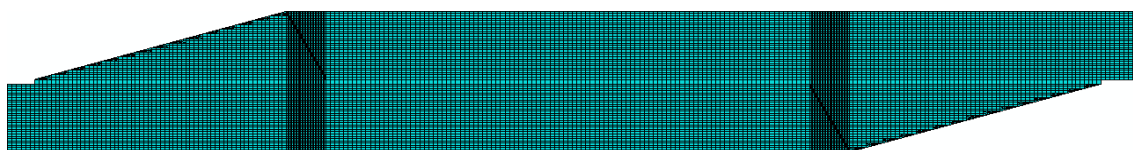


Figura 150 - Malha da configuração ótima para o adesivo DP8005

A malha criada para a configuração ótima está representada na Figura 150. O controlo de malha e atribuição de materiais seguiram o mesmo critério utilizado nas alterações individuais. Os elementos gerados e respetiva quantidade são apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Número de elementos da configuração ótima para o adesivo DP8005

Configuração ótima	CPE4R	CPE3	COH2D4	Total
Elementos	44130	780	288	45198

3.2.5.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 151 é apresentada a distribuição de tensões de corte para a configuração ótima com o adesivo DP8005. Pelo mesmo motivo enunciado para o adesivo AV138, a maior espessura dos aderentes com um filete de adesivo idêntico resulta num maior comprimento de sobreposição efetivo. A introdução de um chanfro interior move os picos de concentração de tensão para uma zona mais interior da junta, ainda que devido ao maior ângulo quando comparado com a configuração ótima do adesivo AV138 a distância seja menor. Não só os valores de pico são mais elevados na configuração ótima como a tensão de corte é mais elevada entre picos, zona que se encontra entre aderentes.

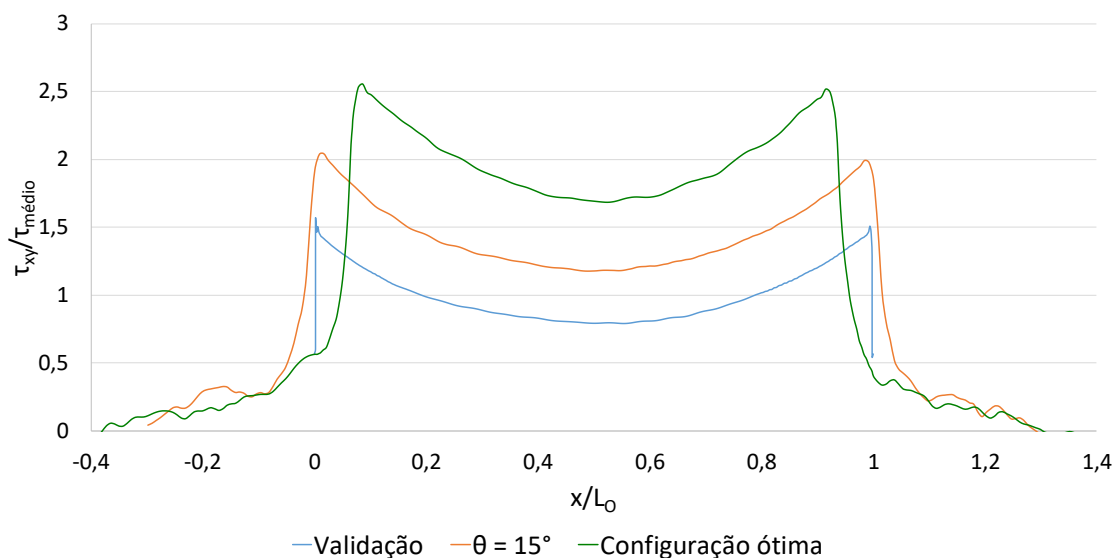


Figura 151 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração ótima do adesivo DP8005

A distribuição de tensões de arrancamento apresentadas na Figura 152 correspondem à configuração ótima com o adesivo DP8005. O perfil apresentado é semelhante aos casos apresentados para comparação, JSS convencional e filete de adesivo, ainda que haja tensões de compressão ao longo de uma menor distância e as tensões de arrancamento sejam superiores na zona adesiva entre aderentes.

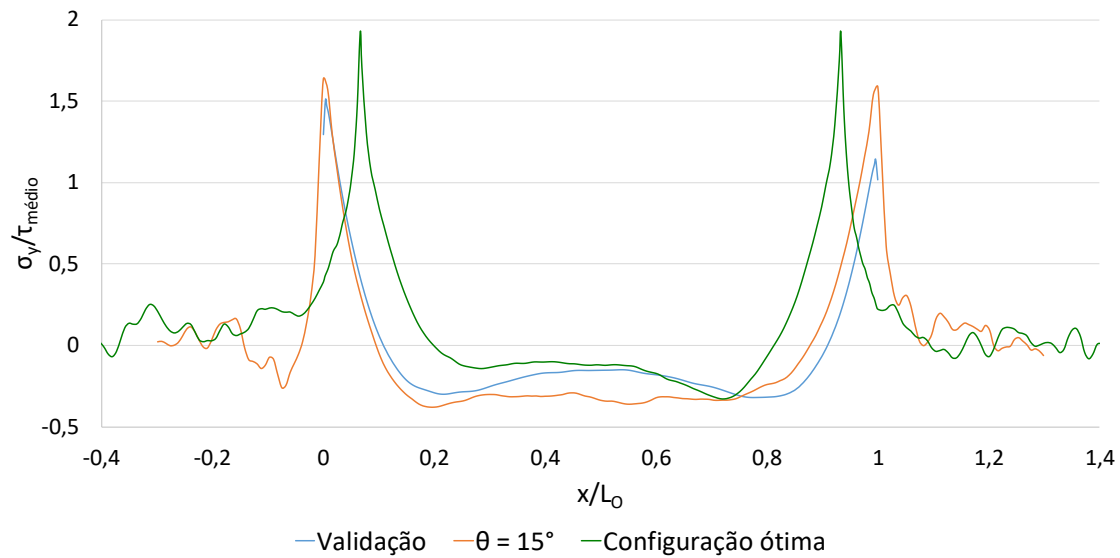


Figura 152 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração ótima do adesivo DP8005

3.2.5.2.2 Resistência das juntas

A curva P- δ obtida para a configuração ótima com o adesivo DP8005 é apresentada na Figura 153. Ao longo de toda a curva é possível verificar a obtenção de carga superior na configuração ótima ao longo de praticamente todo o ensaio até à rotura. O deslocamento máximo obtido situa-se entre a JSS convencional e a otimização singular mais eficaz.

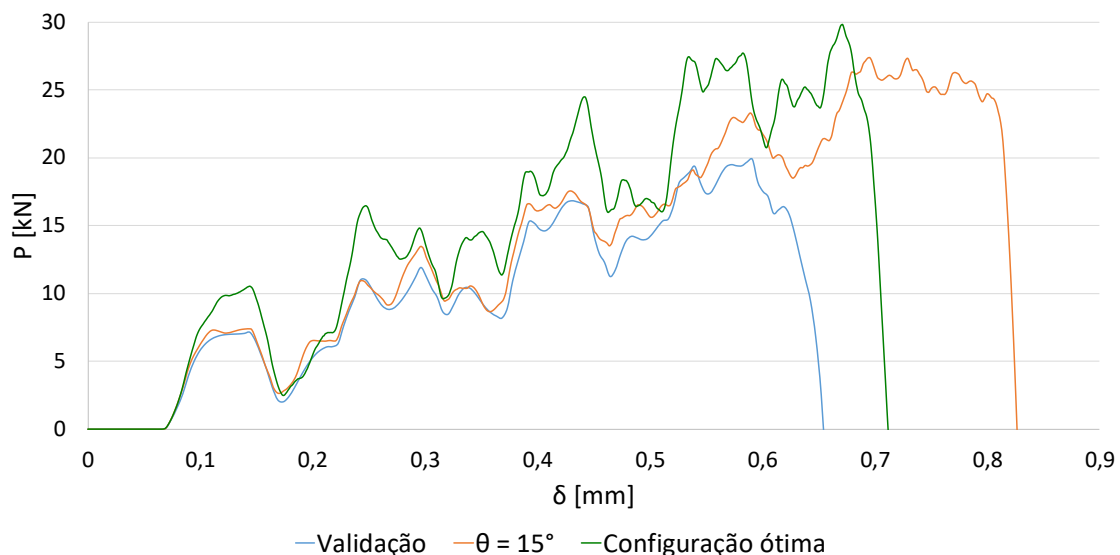


Figura 153 - Curva P- δ para configuração ótima com o adesivo DP8005

Os resultados de carga máxima atingidos na configuração ótima com o adesivo DP8005 podem ser consultados na Figura 154. A configuração ótima apresentou os resultados desejados, com um aumento de 49% sobre a JSS convencional de validação e em 9% a otimização singular mais eficaz. O deslocamento na carga máxima segue a mesma tendência do deslocamento de rotura, com a configuração ótima a apresentar o valor intermédio de deslocamento na carga máxima. Apesar da pior distribuição de tensões, o comprimento de sobreposição adicional proporcionado pela maior espessura dos aderentes melhorou o desempenho da junta adesiva.

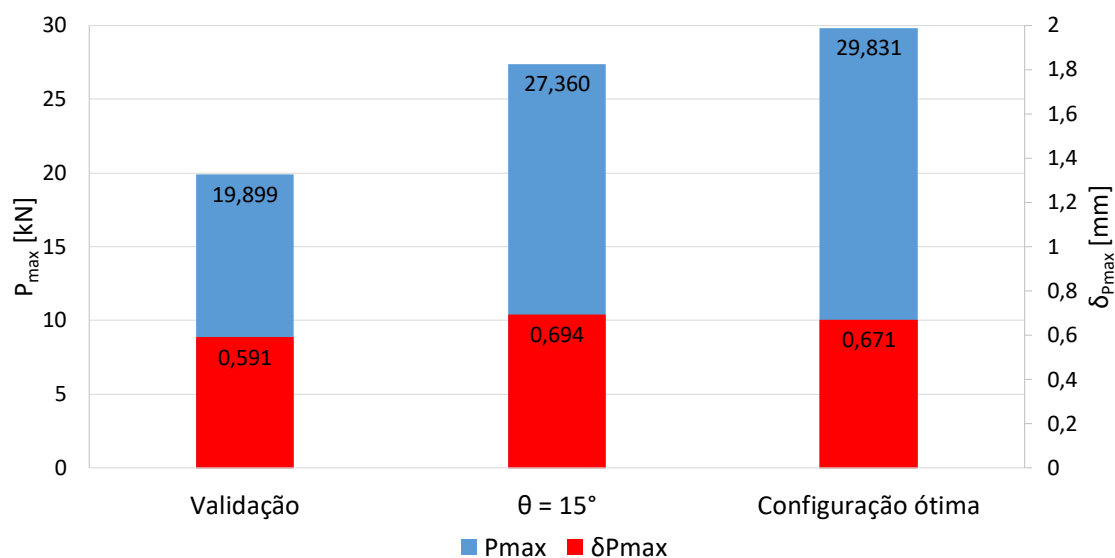


Figura 154 - Valores máximos obtidos para a configuração ótima com o adesivo DP8005

Apesar de se registar o melhor desempenho com a configuração ótima (Tabela 31), o valor de energia absorvida com o adesivo DP8005 é inferior àquele registado pela otimização singular mais eficaz devido ao menor deslocamento atingido. Ainda assim, existe um grande aumento no valor obtido em relação à JSS convencional.

Tabela 31 - Energia absorvida com o adesivo DP8005 na sua configuração ótima

Tipo de JSS	E [J]	Diferença
Convencional	6,49	-
$\theta=15^\circ$	11,59	+79%
Configuração ótima	10,29	+59%

3.2.5.3 Nagase Chemtex XNR6852 E-2

Com o adesivo XNR6852 E-2 a alteração geométrica singular mais eficaz é o filete de adesivo com $\theta=15^\circ$. Através dos resultados individuais obtém-se uma configuração ótima com aderentes com 4 mm de espessura, $\beta=45^\circ$ e $\theta=15^\circ$.

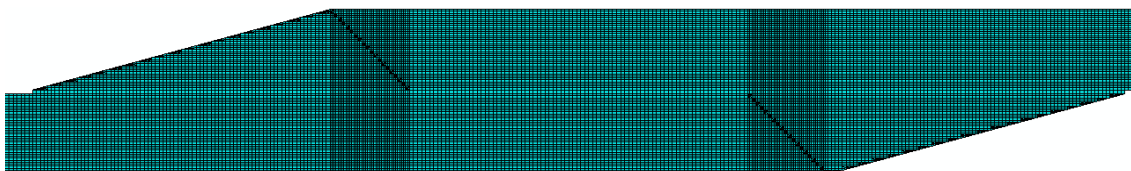


Figura 155 - Malha da configuração ótima para o adesivo XNR6852 E-2

A malha criada para a configuração ótima está representada na Figura 155. O controlo de malha e atribuição de materiais seguiram o mesmo critério utilizado nas alterações individuais. Os elementos gerados e respetiva quantidade são apresentados na Tabela 32.

Tabela 32 - Número de elementos da configuração ótima para o adesivo XNR6852 E-2

Configuração ótima	CPE4R	CPE3	COH2D4	Total
Elementos	59480	1040	325	60845

3.2.5.3.1 Distribuições de tensões

Na Figura 156 é apresentada a distribuição de tensões de corte para a configuração ótima com o adesivo XNR6852 E-2. Repete-se o facto de o filete de adesivo aliado à maior espessura dos aderentes resultar num maior comprimento de sobreposição efetivo. A influência da configuração ótima na distribuição de tensões de corte é semelhante aos resultados obtidos com o adesivo DP8005, com a diferença de neste caso o aumento das tensões de corte entre picos – zona adesiva entre aderentes – sofrer um aumento considerável. Este aumento resulta das tensões mais reduzidas nas extremidades dos aderentes, que resulta numa tensão de corte média mais baixa.

Para a configuração ótima com o adesivo XNR6852 E-2, a distribuição das tensões de arrancamento está representada na Figura 157. Ao contrário do sucedido com o adesivo DP8005, os picos de concentração de tensões de arrancamento são mais reduzidos do

que nos casos apresentados para comparação. Observa-se também uma maior importância de tensões de compressão no centro da camada adesiva.

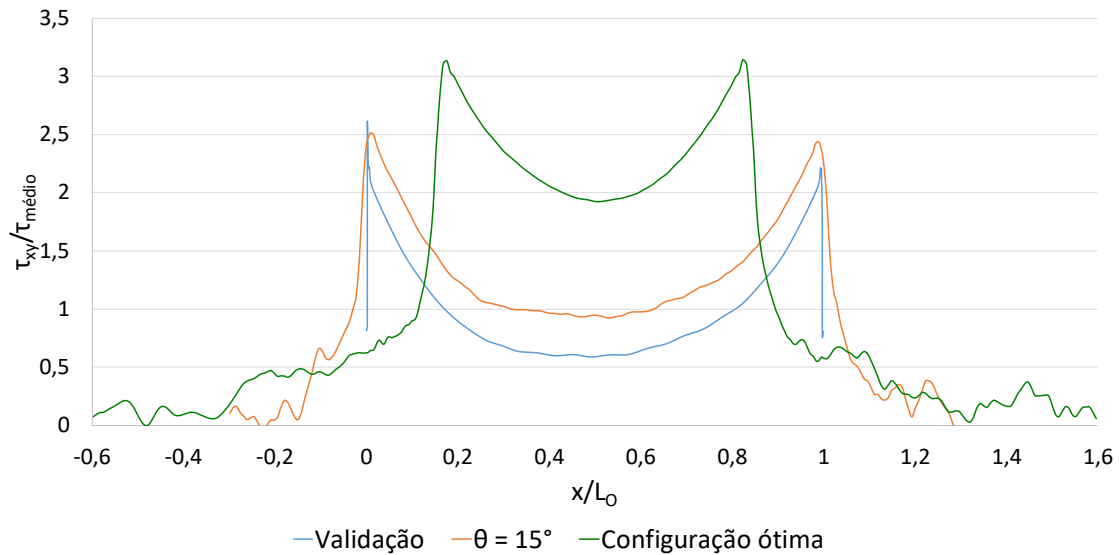


Figura 156 - Distribuição de tensões τ_{xy} para a configuração ótima do adesivo XNR6852 E-2

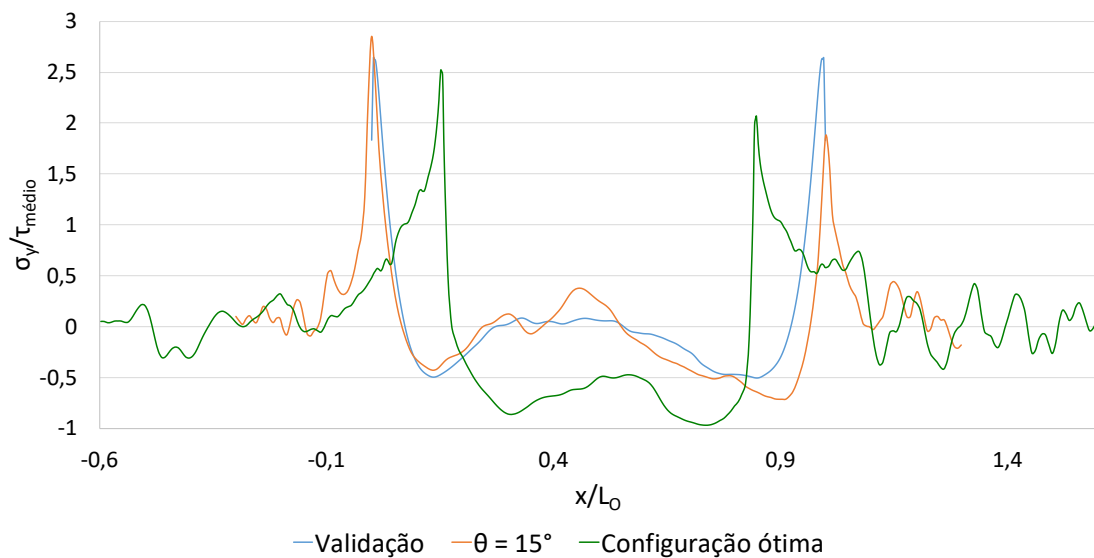


Figura 157 - Distribuição de tensões σ_y para a configuração ótima do adesivo XNR6852 E-2

3.2.5.3.2 Resistência das juntas

A curva P- δ obtida para a configuração ótima com o adesivo XNR6852 E-2 é apresentada na Figura 158. A configuração ótima atinge o deslocamento máximo de maior valor,

comparando com a JSS convencional e com a alteração geométrica singular mais eficaz. A carga máxima, antes da rotura, é mais elevada também na configuração ótima ao longo do ensaio.

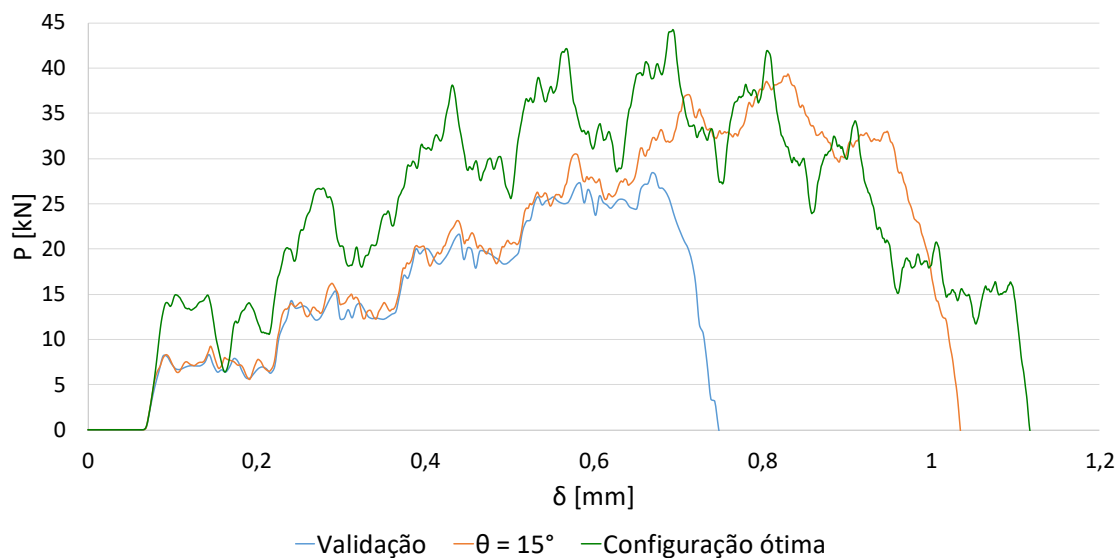


Figura 158 - Curva P- δ para configuração ótima com o adesivo XNR6852 E-2

Os valores máximos obtidos com o uso do adesivo XNR6852 E-2 na sua configuração ótima podem ser consultados na Figura 159. A carga máxima obtida foi 56% e 13% mais elevada do que o resultado de validação e o resultado do filete de adesivo de 15° , respetivamente. O deslocamento na carga máxima é semelhante à JSS convencional, ainda que tenha ficado 16% aquém da alteração geométrica singular mais eficaz. O melhor desempenho na distribuição de tensões de arrancamento e o maior comprimento de sobreposição efetivo foram responsáveis pelo incremento na carga máxima suportada pela junta adesiva.

No caso do adesivo XNR6852 E-2, a configuração ótima revelou ser a mais eficaz não só na carga máxima obtida como também na energia absorvida (Tabela 33). Com um aumento de apenas 13% na carga máxima, mas com o deslocamento máximo mais elevado, a configuração ótima é capaz de superar o valor da configuração singular em comparação em 48%.

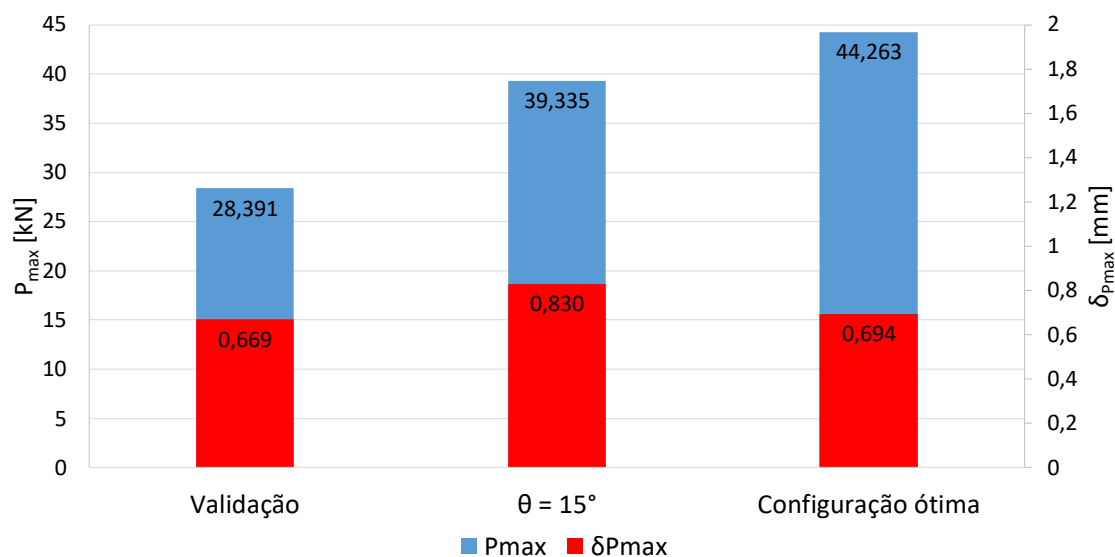


Figura 159 - Valores máximos obtidos para a configuração ótima com o adesivo XNR6852 E-2

Tabela 33 - Energia absorvida com o adesivo XNR6852 E-2 na sua configuração ótima

Tipo de JSS	E [J]	Diferença
Convencional	11,03	-
$\theta=15^\circ$	21,37	+94%
Configuração ótima	26,68	+142%

3.2.6 Modelo numérico 3D

Este capítulo destina-se à análise de resultados com modelação 3D para comparação com os resultados da modelação 2D. Foram realizados ensaios com os três adesivos e para os aderentes foi considerada possibilidade de deformação plástica para os dois tipos de modelação. Enquanto na simulação 2D é assumida uma distribuição uniforme de tensões ao longo dos 25 mm de largura, com a modelação 3D é possível observar a tendência dessas distribuições ao longo da largura.

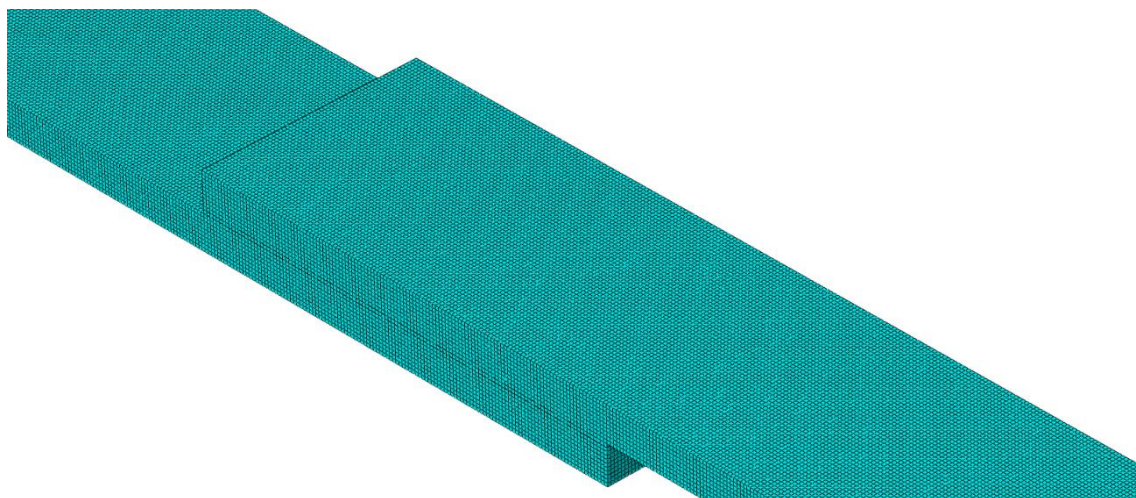


Figura 160 - Malha do modelo 3D

De modo a reduzir o tempo de execução das análises o modelo 3D foi realizado com condição de simetria longitudinal, pelo que apenas foi modelada metade da largura dos aderentes e camada adesiva. Todas as condições de ensaio – energia, condições fronteira, materiais e método de modelação – foram mantidas em relação ao capítulo 3.1, com a exceção dos elementos, que foram alterados para elementos tridimensionais ainda que da mesma tipologia. A malha utilizada (Figura 160) é idêntica longitudinalmente, e transversalmente contabiliza 63 elementos. Os elementos utilizados e respetiva quantidade são apresentados na Tabela 34.

Tabela 34 - Número de elementos por tipo na modelação 3D

Modelação 3D	C3D8R	COH3D8	Total
Elementos	834750	7875	842625

3.2.6.1 *Huntsman Araldite AV138*

3.2.6.1.1 Distribuições de tensões

Na Figura 161 é apresentada a distribuição 3D de tensões de corte com o adesivo AV138. Verifica-se uma concentração de tensões junto às extremidades livres do limite da camada adesiva correspondente a 0 mm de sobreposição. Identifica-se também uma redução das mesmas em torno da zona central. À exceção dos limites longitudinais da camada adesiva, não se observa uma variação significativa de concentração de tensões de corte transversalmente.

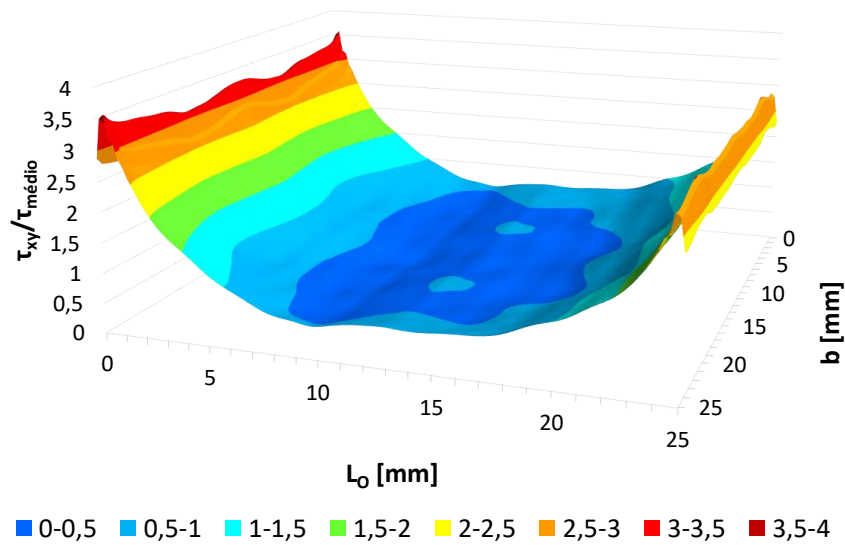


Figura 161 - Distribuição 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138

A Figura 162 representa a distribuição 3D de tensões de arrancamento com o adesivo AV138. Ao longo de toda a camada adesiva observa-se uma diminuição de tensão de arrancamento junto dos limites laterais. No limite da camada adesiva correspondente a 0 mm esse efeito é ainda mais notório. Existe também uma pequena redução de tensões de arrancamento ao longo de uma grande porção da linha central.

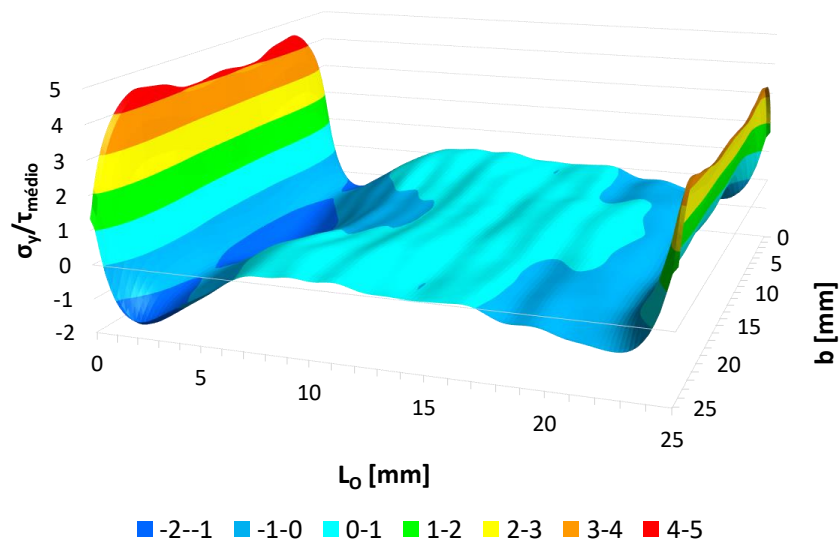


Figura 162 - Distribuição 3D de tensões σ_y com o adesivo AV138

Na Figura 163 é feita a comparação da distribuição de tensões de corte 2D com as camadas central e externa 3D com o adesivo AV138. Não se observam variações significativas entre as três representações ao longo do comprimento da camada adesiva. Numa extremidade a concentração de tensões de corte 2D é equivalente à camada externa 3D, na extremidade oposta é equivalente à camada central 3D.

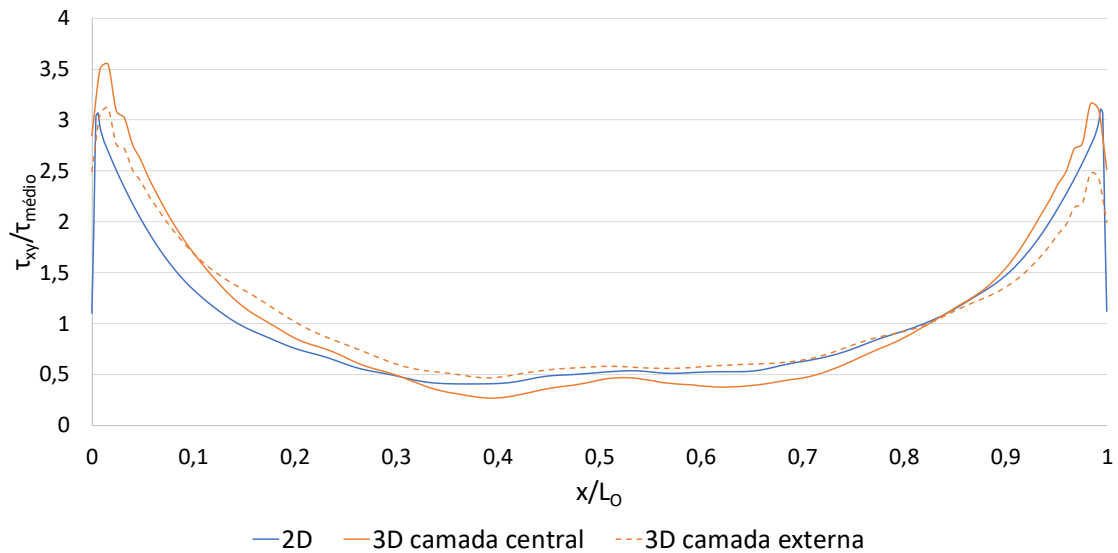


Figura 163 - Comparação 2D vs. 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138

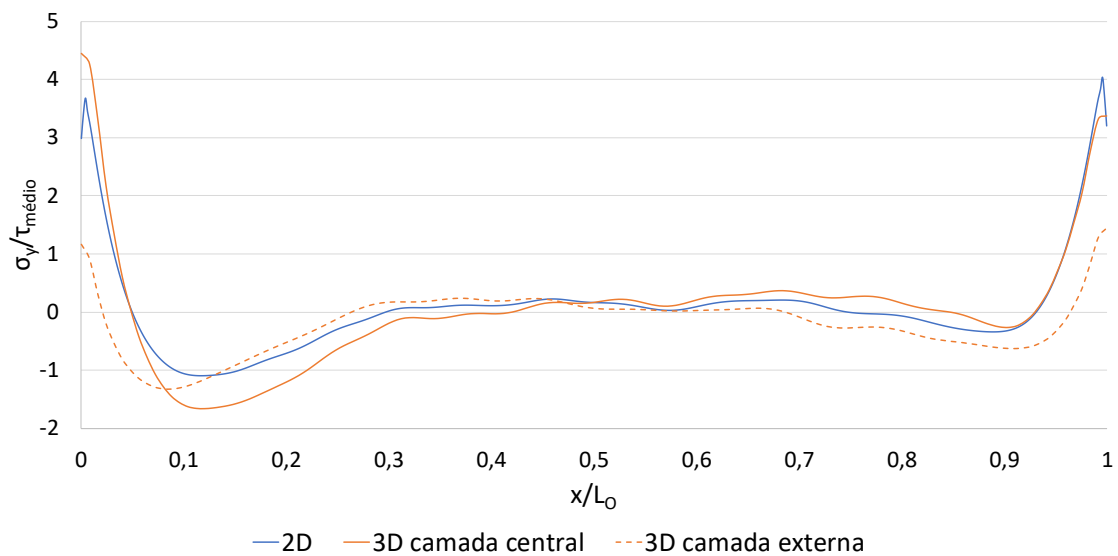


Figura 164 – Comparação 2D vs. 3D de tensões σ_y com o adesivo AV138

Na Figura 164 é feita a mesma comparação para a distribuição de tensões de arrancamento. Neste caso já é possível diferenciar os resultados, com o resultado 2D a equiparar-se à camada central 3D. A tendência observada nos resultados 3D é aqui evidenciada.

3.2.6.1.2 Resistência da junta

A curva P- δ obtida pelas diferentes modelações com o adesivo AV138 está representada na Figura 165. A modelação 3D exibe um perfil muito semelhante, ainda que apresentando maior deslocamento e carga máxima. Assemelha-se a uma translação do gráfico.

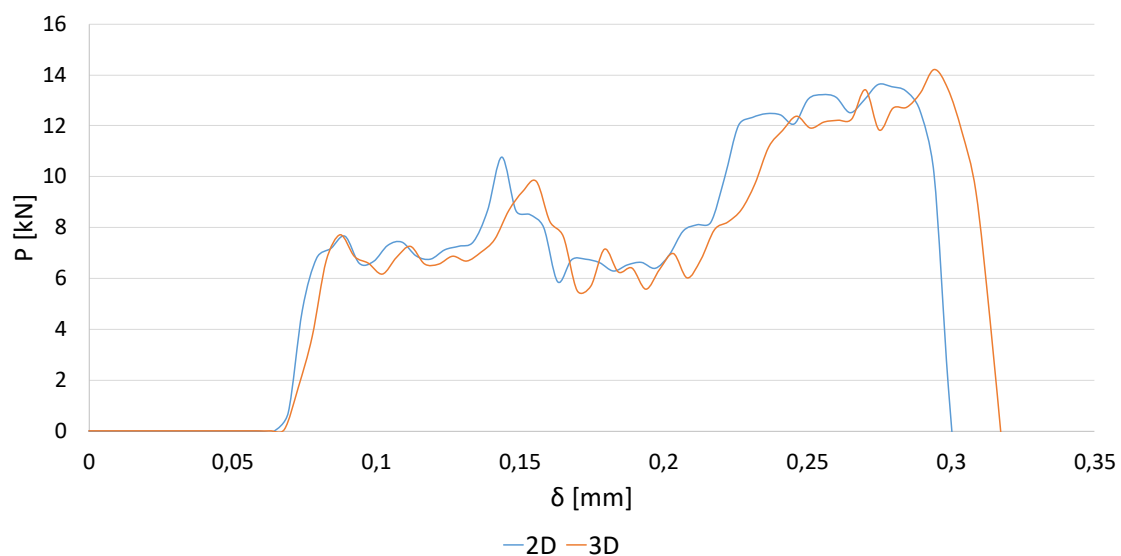


Figura 165 - Comparação de curva P- δ entre modelos numéricos 2D e 3D com o adesivo AV138

A Figura 166 apresenta os registos de carga máxima e deslocamento respetivo para o adesivo AV138. Com a modelação 3D obtém-se uma carga máxima 4,5% superior com um aumento de 1,1% de deslocamento.

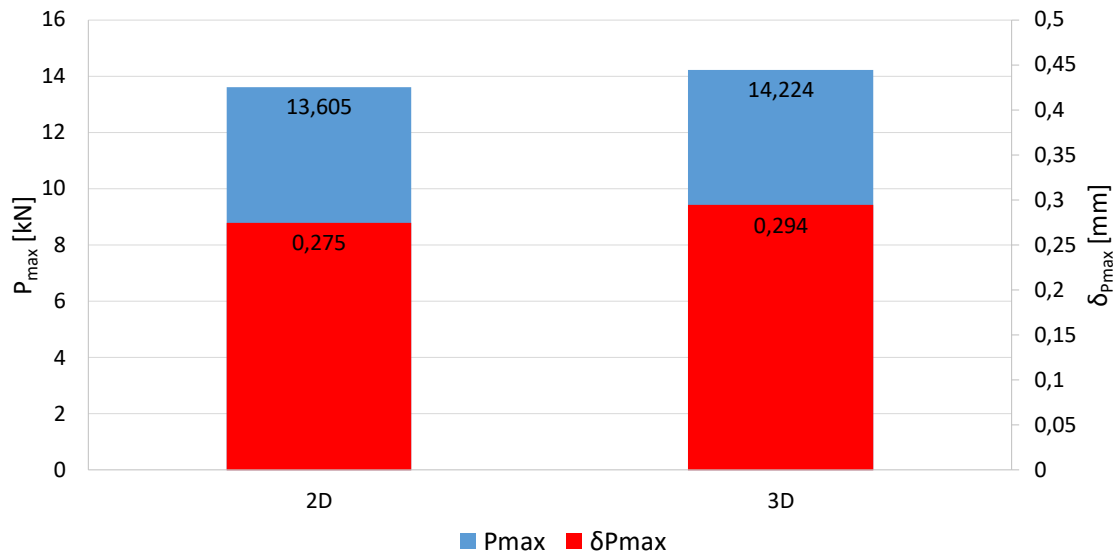


Figura 166 - Comparação entre 2D e 3D dos valores máximos obtidos com o adesivo AV138

3.2.6.2 3M DP8005

3.2.6.2.1 Distribuições de tensões

Na Figura 167 mostra a distribuição 3D de tensões de corte com o adesivo DP8005. Observam-se as mesmas concentrações nas extremidades livres no início do adesivo, ainda que em menor escala, comparando com o adesivo AV138, devido à menor rigidez do adesivo. Não se observa, no entanto, o efeito de concentração na camada no central.

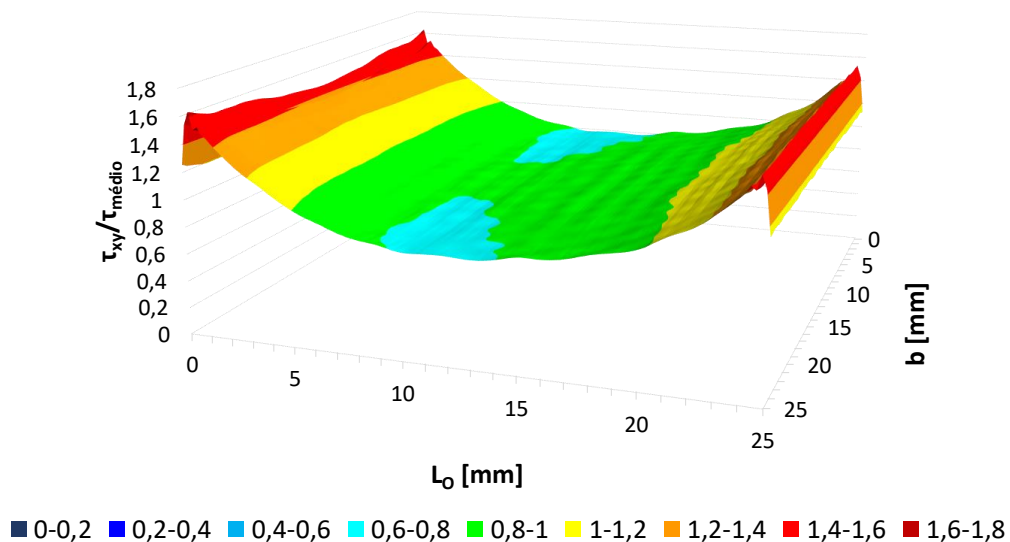


Figura 167 - Distribuição 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005

A representação tridimensional da distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo DP8005 (Figura 168) revela o mesmo efeito observado com o adesivo AV138, em que as tensões de arrancamento sofrem um decréscimo junto das laterais livres. Devido à menor rigidez, este efeito é menos pronunciado com o adesivo DP8005.

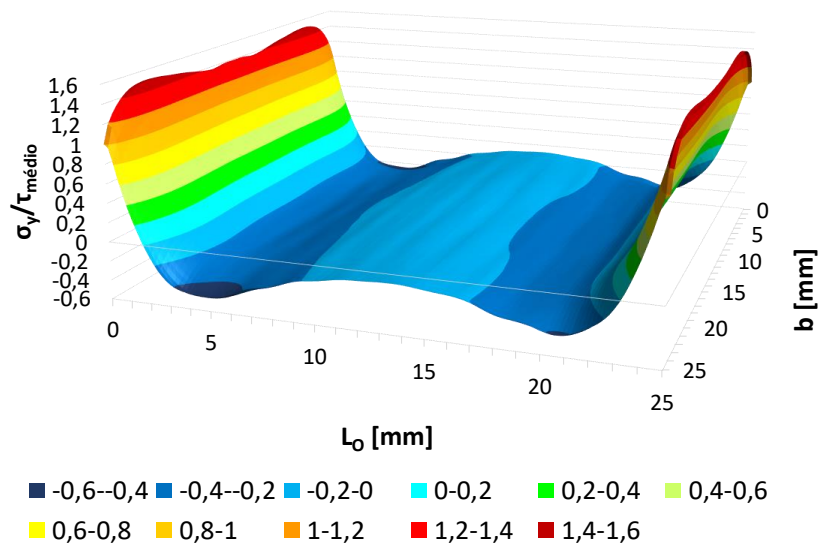


Figura 168 - Distribuição 3D de tensões σ_y com o adesivo DP8005

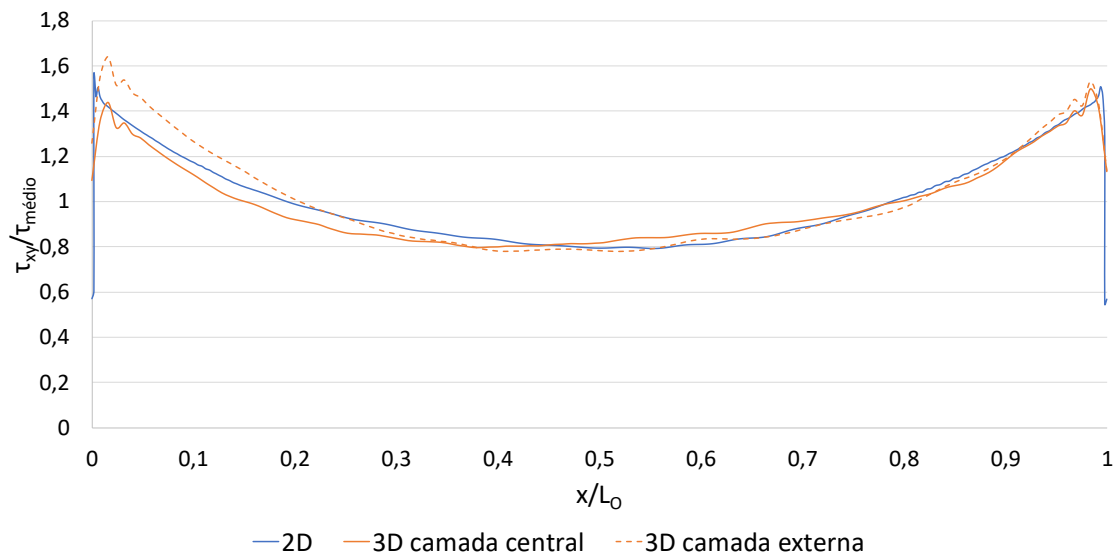


Figura 169 - Comparação 2D vs. 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005

A comparação de resultados 2D e 3D para a distribuição de tensões de corte com o adesivo DP8005 é apresentada na Figura 169. Os perfis das curvas são muito semelhantes ao longo das 3 diferentes curvas. No início da camada adesiva, o resultado 2D apresenta um pico de concentração de tensões de valor intermédio aos dois resultados 3D. De entre os resultados 3D, a diferença dos picos de concentração de tensão resulta do efeito já observado na distribuição 3D.

A mesma comparação é apresentada na Figura 170 para a distribuição de tensões de arrancamento. Como verificado com o adesivo AV138, o resultado obtido por modelação bidimensional representa de forma mais fidedigna a camada central da modelação 3D.

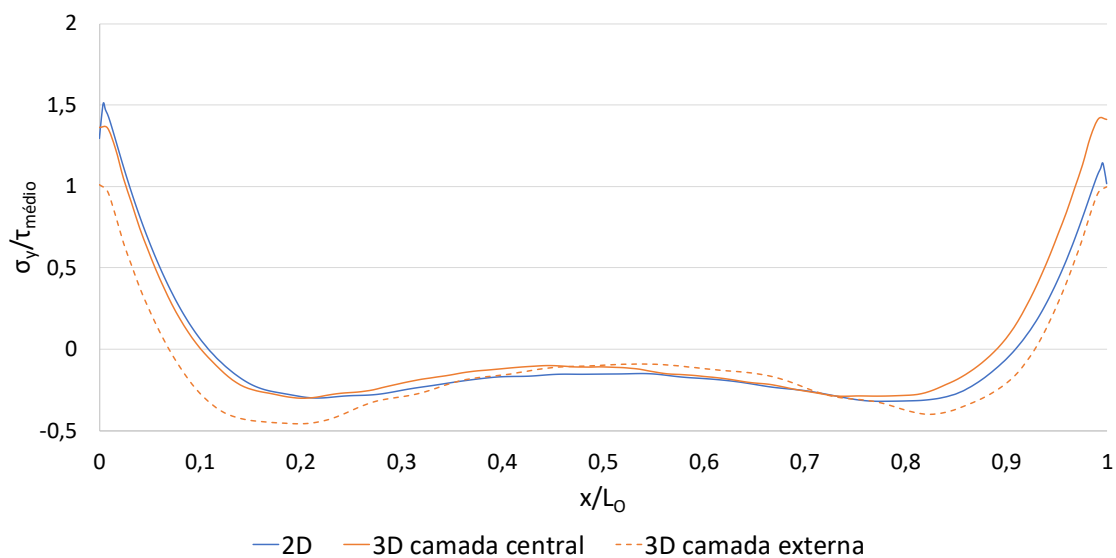


Figura 170 - Comparação 2D vs. 3D de tensões σ_y com o adesivo DP8005

3.2.6.2.2 Resistência da junta

As curvas P- δ obtidas pelos dois tipos de modelação com o adesivo DP8005 é apresentada na Figura 171. Repete-se a análise feita aos resultados com o adesivo rígido em que a modelação resulta num pequeno aumento na carga máxima atingida assim como o deslocamento máximo obtido.

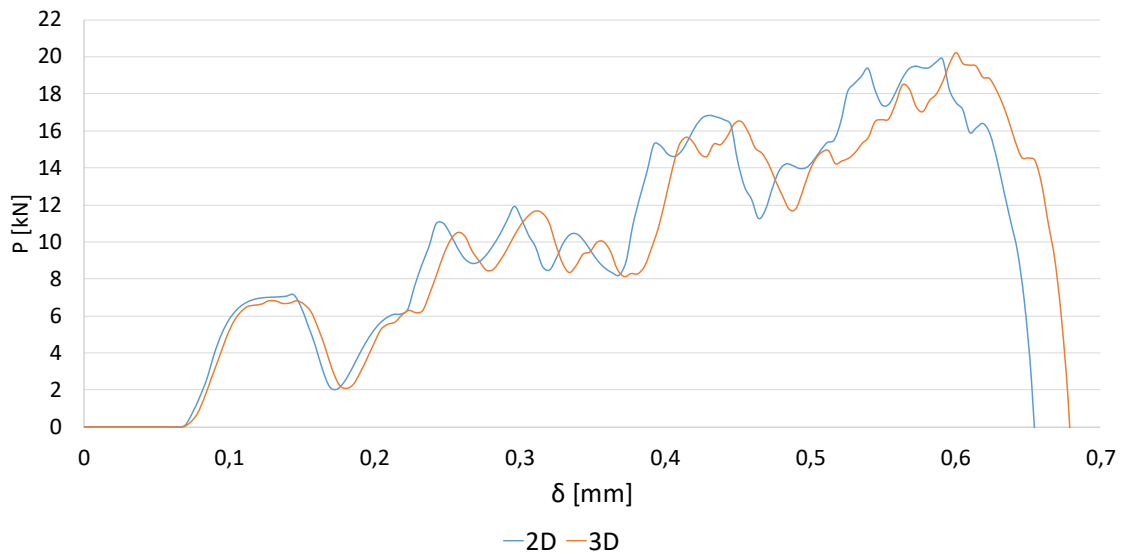


Figura 171 - Comparação de curva P-δ entre modelos numéricos 2D e 3D com o adesivo DP8005

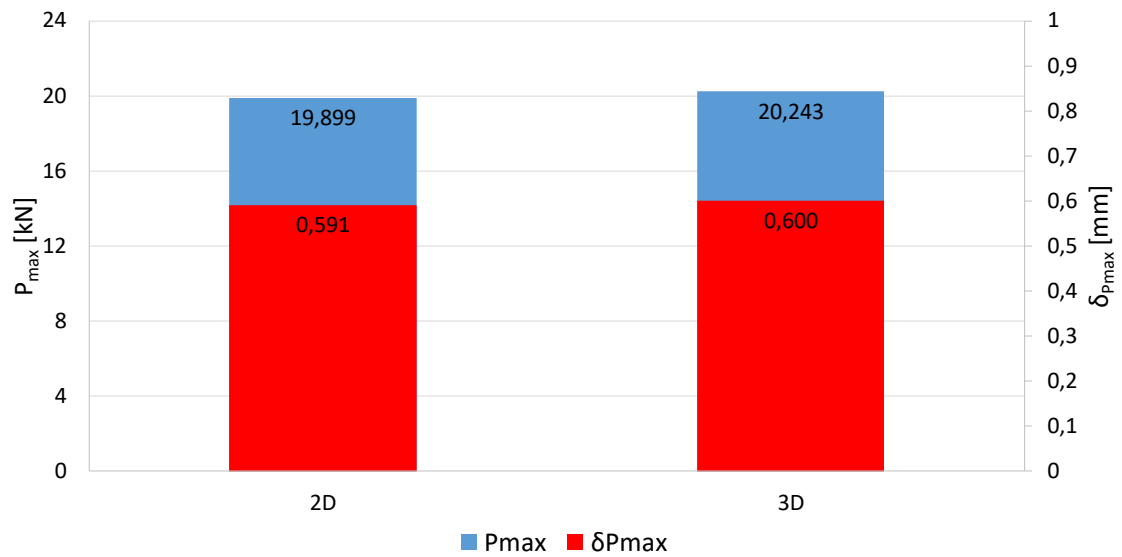


Figura 172 - Comparação entre 2D e 3D dos valores máximos obtidos com o adesivo DP8005

A carga máxima obtida e respetivo deslocamento com o adesivo DP8005 são apresentados na Figura 172. A carga máxima, com modelação tridimensional, aumenta 1,7% para um aumento de deslocamento de 1,5%.

3.2.6.3 Nagase Chemtex XNR6852 E-2

3.2.6.3.1 Distribuições de tensões

A Figura 173 contém a representação 3D da distribuição de tensões de corte com o adesivo XNR6852 E-2. No extremo da camada adesiva – $L_0=0$ mm – a transição transversal da concentração de tensões é mais acentuada do que nos outros dois adesivos testados. A maior disparidade deve-se ao facto de existir um maior alívio de tensões de corte na zona central desse extremo da camada adesiva.

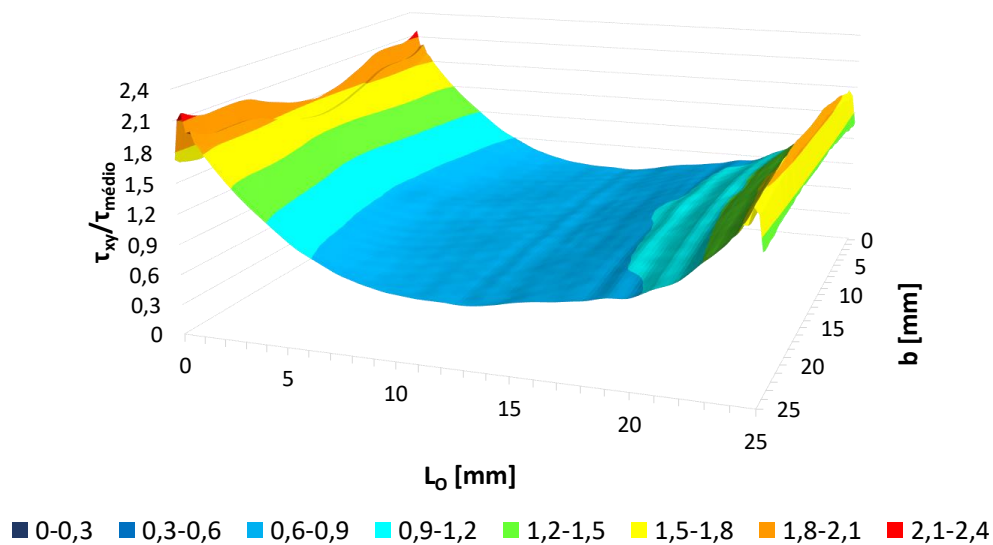


Figura 173 - Distribuição 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2

A representação 3D da distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo XNR6852 E-2 pode ser analisada na Figura 174. A tendência da distribuição de tensões (redução de magnitude nas laterais) é idêntica à dos outros dois adesivos, sendo que a redução regista magnitude intermédia entre aquelas que se observam com os adesivos AV138 ou DP8005. Este resultado vai de encontro ao expectável, visto que se trata do adesivo com rigidez intermédia.

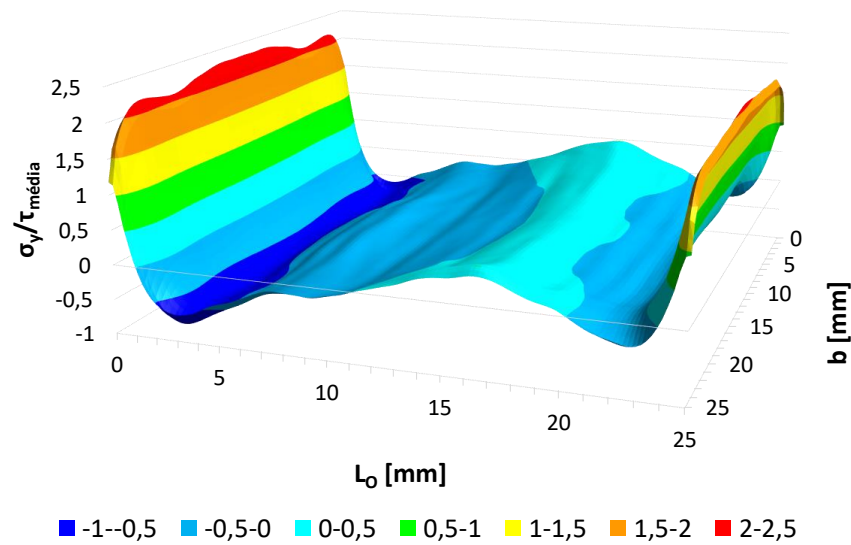


Figura 174 - Distribuição 3D de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2

Na Figura 175 é feita a comparação das curvas tridimensionais com a bidimensional da distribuição de tensões de corte com o adesivo XNR6852 E-2. Os picos de concentração de tensões na modelação 2D são os mais elevados em ambas as extremidades da camada adesiva. Apesar de haver maior semelhança entre os resultados da modelação bidimensional e os resultados da camada externa, não é possível considerar que o resultado 2D seja representativo de nenhuma das camadas.

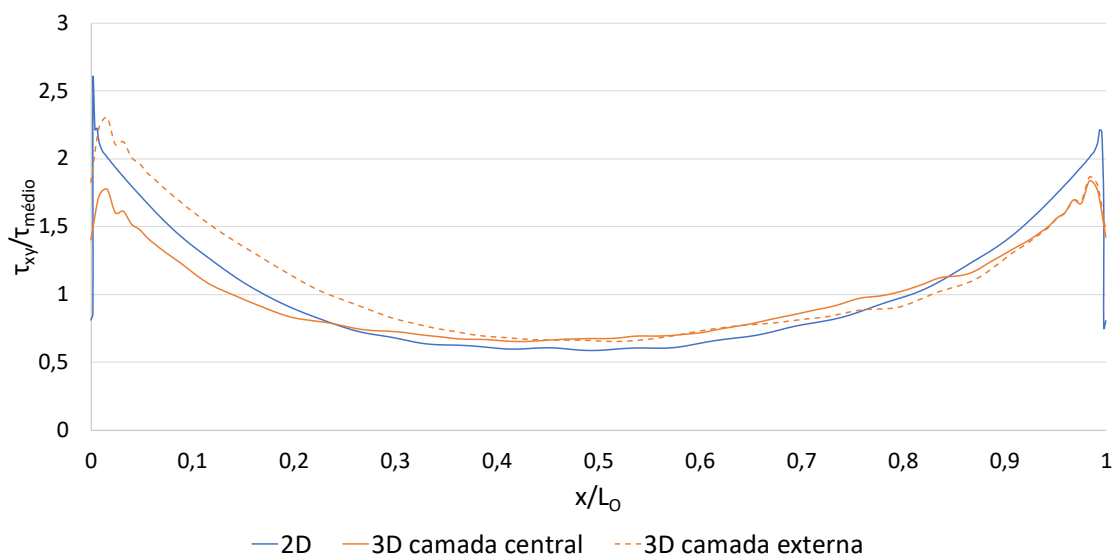


Figura 175 - Comparação 2D vs. 3D de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2

Na comparação da distribuição de tensões de arrancamento 2D e 3D com o adesivo XNR6852 E-2, apresentada na Figura 176, é possível observar uma vez mais um elevado grau de semelhança entre a camada central e o resultado 2D. Como é possível ver na análise 3D das tensões de arrancamento, a camada externa sofre uma redução significativa dos picos de tensão de corte em relação à camada interna.

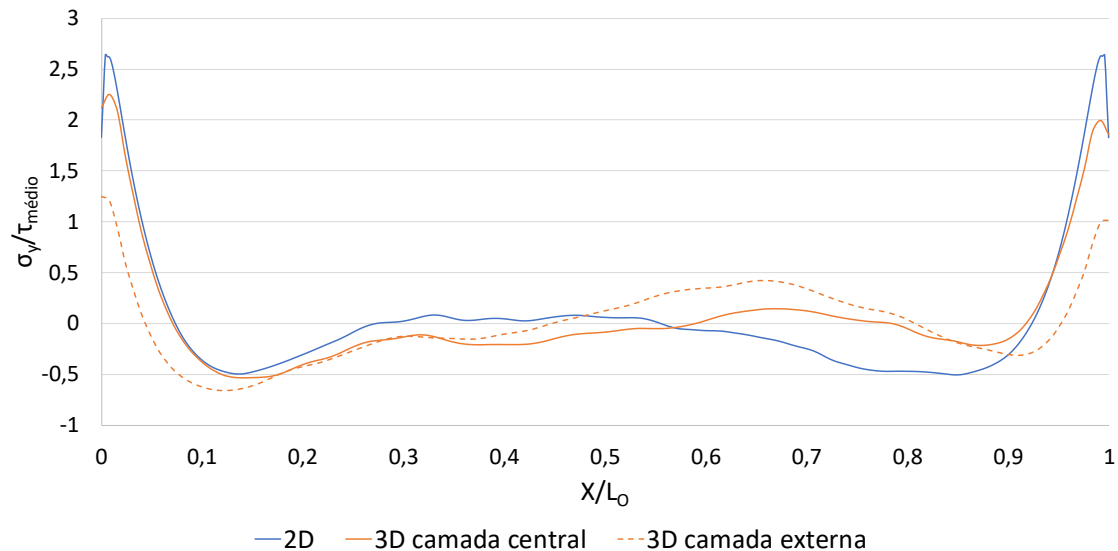


Figura 176 - Comparação 2D vs. 3D de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2

3.2.6.3.2 Resistência da junta

As curvas P- δ com os dois tipos de modelação utilizados para o adesivo XNR6852 E-2 são expostos na Figura 177. Mantém-se a tendência observada nos outros adesivos, já que existe um aumento de carga máxima e deslocamento.

Na Figura 178 podem ver-se os valores de carga máxima e deslocamento correspondente com o adesivo XNR6852 E-2. O aumento da carga máxima é de 4,4% com a modelação 3D, enquanto o deslocamento correspondente sofre um aumento de 4,2%.

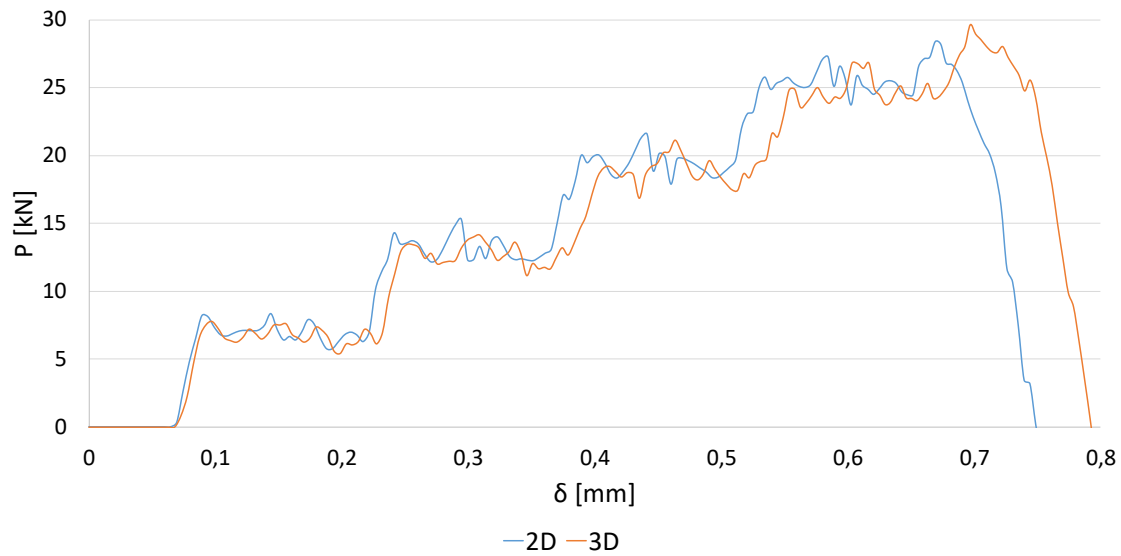


Figura 177 - Comparação de curva P- δ entre modelos numéricos 2D e 3D com o adesivo XNR6852 E-2

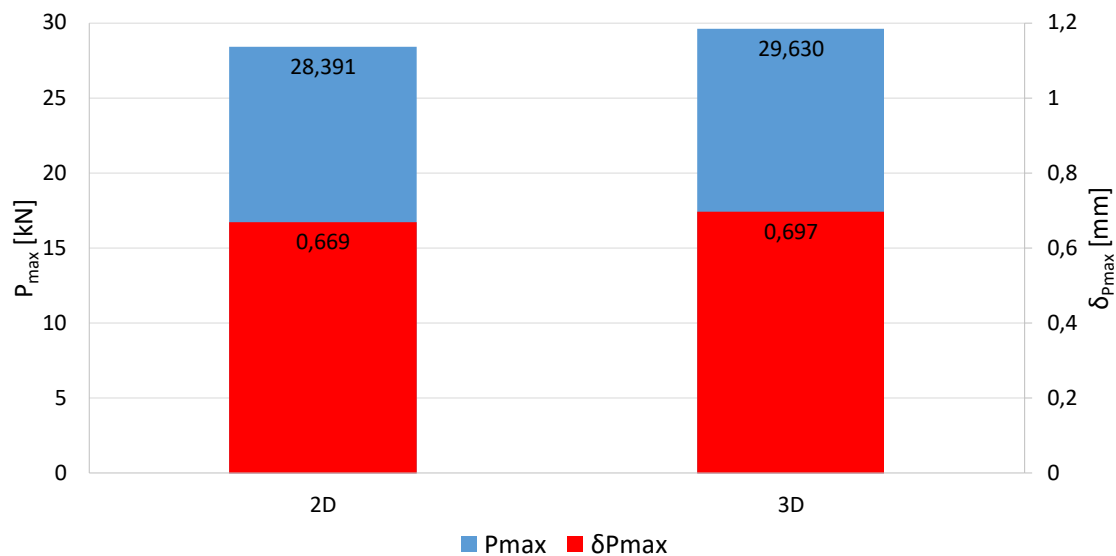


Figura 178 - Comparação entre 2D e 3D dos valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2

3.2.7 Alteração de material dos aderentes

Os resultados obtidos em ensaios de impacto são não só influenciados pelas propriedades dos adesivos como também pelas propriedades dos aderentes. Este capítulo destina-se a estudar os efeitos da alteração dos aderentes, introduzindo dois novos materiais. Os materiais utilizados foram selecionados de modo a introduzir um material de menor rigidez, e conseqüentemente maior ductilidade, e outro com rigidez

mais elevada do que o aço utilizado. As condições de ensaio utilizadas são as mesmas utilizadas para validação e ensaios. A geometria utilizada é também a de validação, ou seja, uma JSS convencional sem nenhuma alteração geométrica.

Tabela 35 - Propriedades dos aderentes de alumínio [112]

Aderente	AW6082 T651
E [GPa]	70,07
σ_y [MPa]	261,67
σ_f [MPa]	324
ϵ_f [%]	21,7
ν	0,33
ρ [g/cm ³]	2,7

Como material menos rígido foi selecionado o alumínio AW6082 T651 (Tabela 35) e como material de elevada rigidez foi escolhido o pré-impregnado Texipreg HS 160 RM, constituído por fibras de carbono reforçadas com resina epóxida (Tabela 36). A modelação foi feita considerando um *lay-up* unidirecional, com as fibras orientadas longitudinalmente no sentido do carregamento.

Tabela 36 – Propriedades elásticas da CFRP [79]

Compósito		Texipreg HS 160 RM			
E ₁ [MPa]	1,09e5	ν_{12}	0,342	G ₁₂ [MPa]	4315
E ₂ [MPa]	8819	ν_{13}	0,342	G ₁₃ [MPa]	4315
E ₃ [MPa]	8819	ν_{23}	0,380	G ₂₃ [MPa]	3200

As propriedades coesivas interlaminares do CFRP podem ser consultadas na Tabela 37, em que os valores apresentados correspondem às propriedades a 2 m/s. Apesar de serem propriedades a uma velocidade superior à velocidade de ensaio – 1,75 m/s – a reduzida diferença não deverá exercer grande influência no resultado. Pela indisponibilidade de propriedades da camada intralaminar, serão utilizadas as mesmas

propriedades da camada interlaminar. Isto significa que, em situações reais, seria necessária uma perfeita homogeneização da resina no interior das fibras. Com estes pressupostos, é possível realizar ensaios contabilizando apenas as propriedades das fibras. Mantendo estas propriedades pode ser feita a introdução de uma camada interlaminar em cada um dos aderentes ou, para além das suposições de modelação anteriores, adicionar ainda uma camada intralaminar em ambos os aderentes. As dimensões das camadas interlaminar e intralaminar podem ser vistas na Figura 179.

Tabela 37 - Propriedades interlaminares da CFRP [79]

Compósito	Camada Interlaminar
E [MPa]	108000
G [MPa]	4315
t_n [MPa]	40
t_s [MPa]	35
G_{IC} [N/mm ²]	0,39
G_{IIC} [N/mm ²]	0,82
ρ [g/cm ³]	1,227

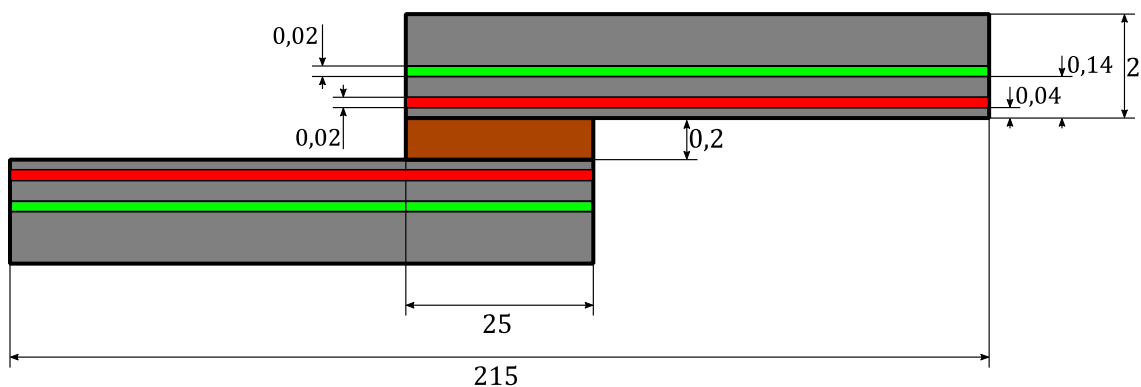


Figura 179 – Geometria e dimensões das JSS com camadas interlaminar (verde) e intralaminar (vermelho)

3.2.7.1 Huntsman Araldite AV138

3.2.7.1.1 Distribuição de tensões

Na Figura 180 são expostas as distribuições de tensões de corte com o adesivo AV138 em diferentes aderentes. O material em que há maior intensidade de concentração de tensões de corte é o alumínio. A elevada flexão sofrida pelos aderentes quando solicitados ao impacto amplifica o efeito de concentração de tensões nos limites da camada adesiva. As diferenças observadas entre a utilização de aderentes em aço ou CFRP, ainda que globalmente haja um melhor desempenho com aderentes de aço, são reduzidas. Os resultados em CFRP são os que apresentam maior simetria ao longo de L_0 .

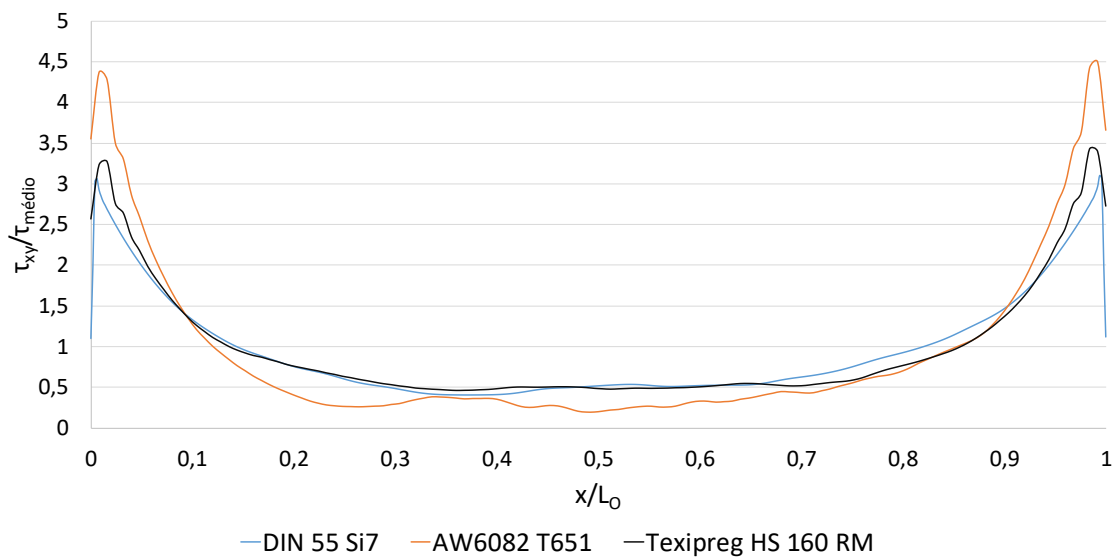


Figura 180 - Comparação de distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo AV138 em diferentes aderentes

A distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo AV138 está representada na Figura 181. Tal como verificado na distribuição de tensões de corte, os picos de concentração de tensões de arrancamento mais elevados pertencem aos resultados do alumínio e os menores aos resultados com aço. Existe novamente uma maior simetria nos resultados em aderentes em CFRP devido à sua elevada rigidez.

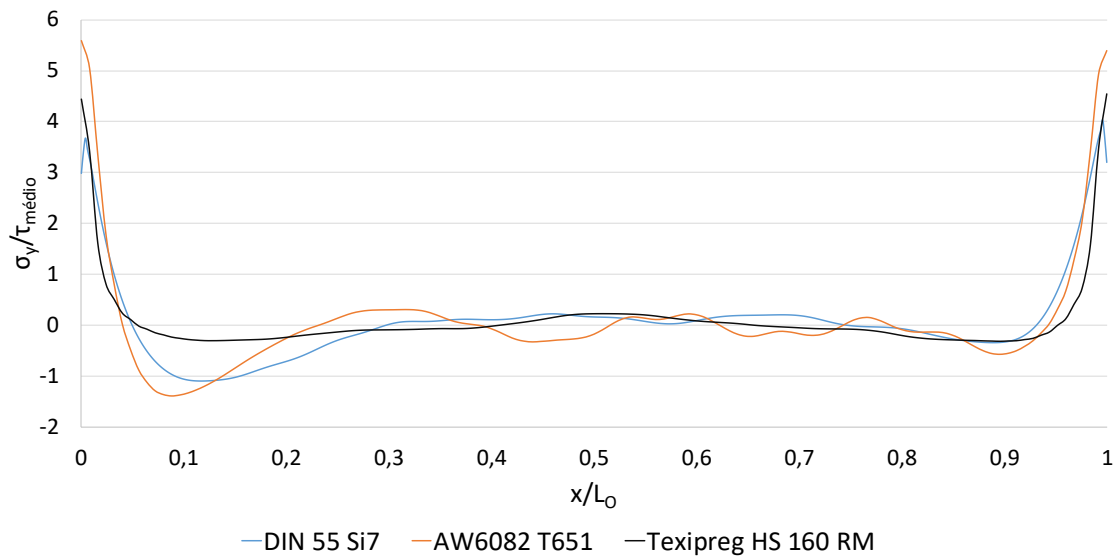


Figura 181 - Comparação de distribuição de tensões σ_y com o adesivo AV138 em diferentes aderentes

3.2.7.1.2 Resistência da junta

As curvas P- δ resultantes dos ensaios em diferentes aderentes com o adesivo AV138 podem ser consultadas na Figura 182.

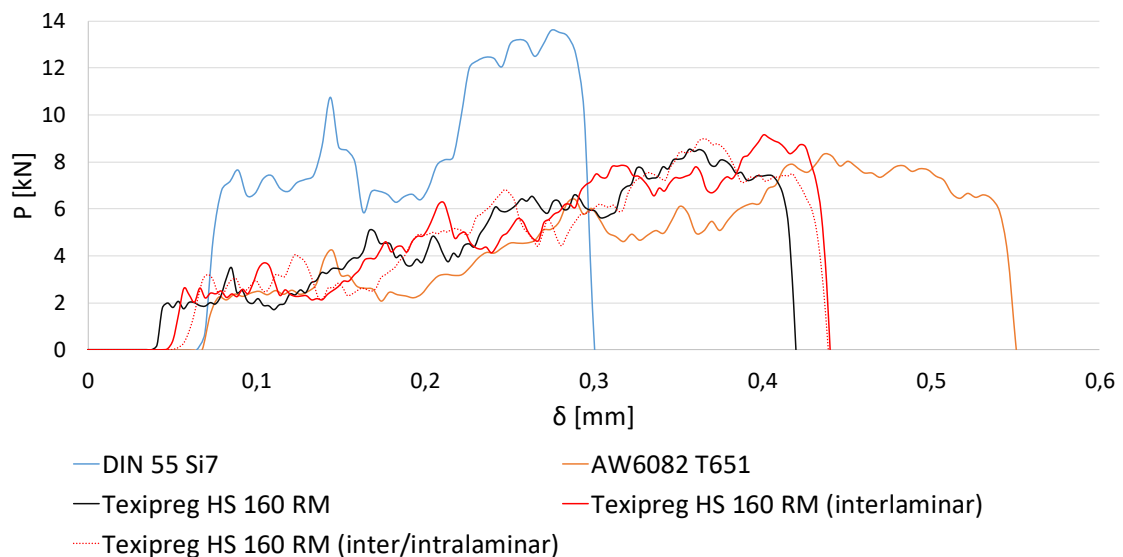


Figura 182 - Curva P- δ para o adesivo AV138 em diferentes aderentes

Existe uma redução da carga máxima com os novos materiais dos aderentes introduzidos, sendo os valores próximos entre alumínio e diferentes ensaios com CFRP

no que diz respeito à carga máxima atingida. Devido à menor rigidez, o deslocamento máximo obtido é significativamente superior com aderentes de alumínio, sem que ocorra deformação plástica. Entre os resultados de aço e alumínio encontram-se os resultados de CFRP, com o deslocamento máximo obtido a ser mais reduzido quando são apenas consideradas as propriedades das fibras e mais elevado e idêntico entre os resultados em que são introduzidas as camadas interlaminar e intralaminar.

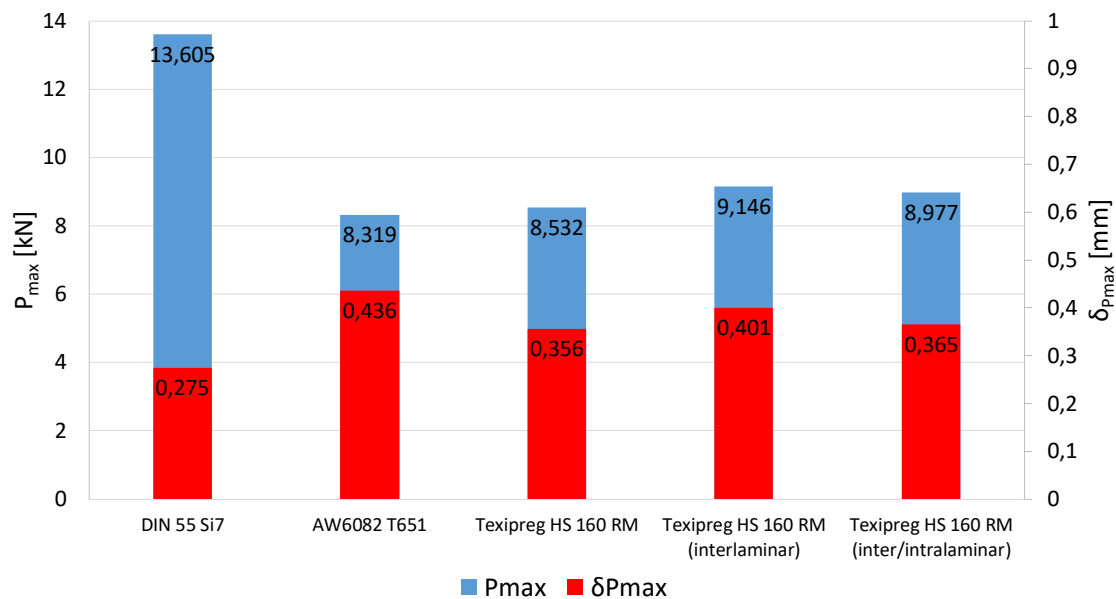


Figura 183 - Comparação de valores máximos obtidos com o adesivo AV138 em diferentes aderentes

Os valores da carga máxima e deslocamento correspondente com o adesivo AV138 em diferentes aderentes podem ser consultados na Figura 183. Em relação aos resultados em aderentes de aço, a carga máxima atingida é reduzida em 39%, enquanto o deslocamento correspondente aumenta 59%. O resultado obtido resulta da maior ductilidade e pior distribuição de tensões. O ensaio em que apenas são contabilizadas as propriedades das fibras do compósito resultam numa redução da carga máxima de 37% em relação ao aço e um aumento de 3% em relação ao alumínio. O deslocamento correspondente à carga máxima aumenta 29% em relação ao aço e fica 18% abaixo do valor obtido nos resultados com aderentes de alumínio. Ocorre deformação plástica, ainda que apenas de 0,1%, nos aderentes de alumínio (Figura 184). A introdução de camadas interlaminares ou interlaminares e intralaminares resulta em todos os casos em rotura pela camada adesiva. A introdução de camadas interlaminares ou interlaminares introduz um elemento com maior elasticidade no compósito pelo que, utilizando como referência os resultados com apenas as propriedades das fibras, há um

aumento na carga máxima atingida de 7% quando introduzidas camadas interlaminares e 5% quando introduzidas ambas as camadas. O deslocamento correspondente aumenta 13% e 3% com camadas interlaminares ou ambas as camadas, respetivamente.

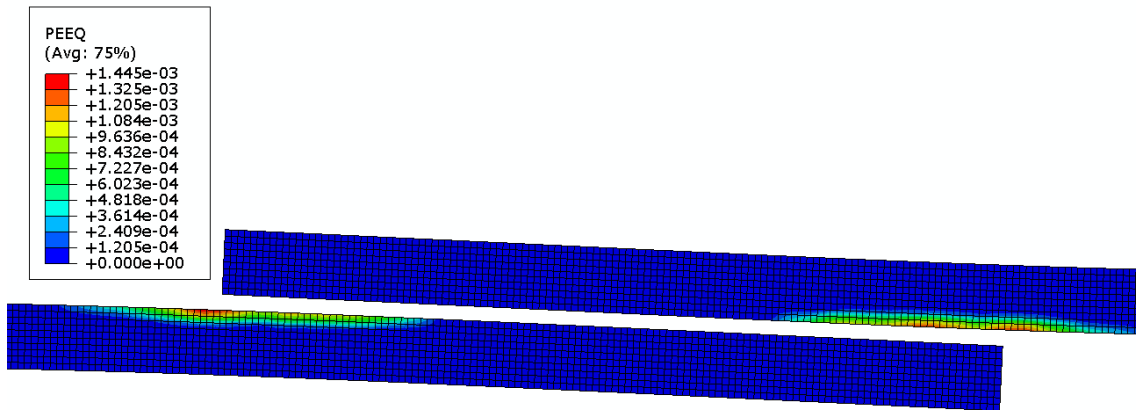


Figura 184- Deformação plástica nos aderentes de alumínio com o adesivo AV138

3.2.7.2 3M DP8005

3.2.7.2.1 Distribuição de tensões

A Figura 185 contém a representação das distribuições de tensões de corte com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes.

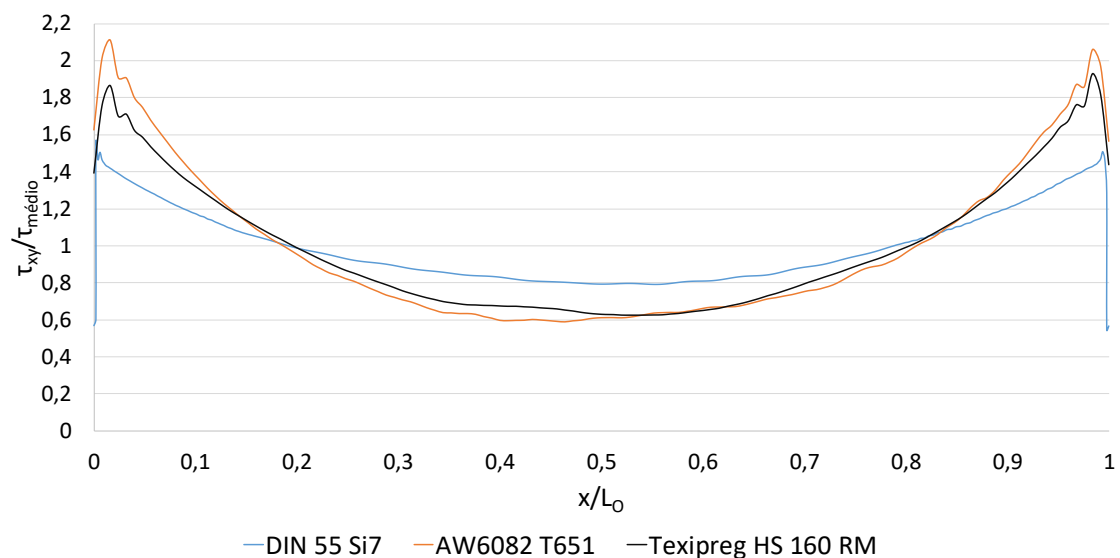


Figura 185 - Comparação de distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes

Tal como com o adesivo AV138, mantém-se o melhor desempenho com os aderentes em aço e o pior desempenho com aderentes de alumínio. Neste caso, no entanto, há um aumento significativo dos picos de concentração de tensões com a CFRP em relação aos aderentes de aço.

As distribuições de tensões de arrancamento em diferentes aderentes com o adesivo DP8005 seguem as curvas apresentadas na Figura 186. Os comportamentos invertem-se, com os aderentes em compósito a serem responsáveis pela maior influência do efeito de concentração de tensões, seguidos dos aderentes de alumínio. Os aderentes em aço permanecem com o melhor desempenho apresentado.

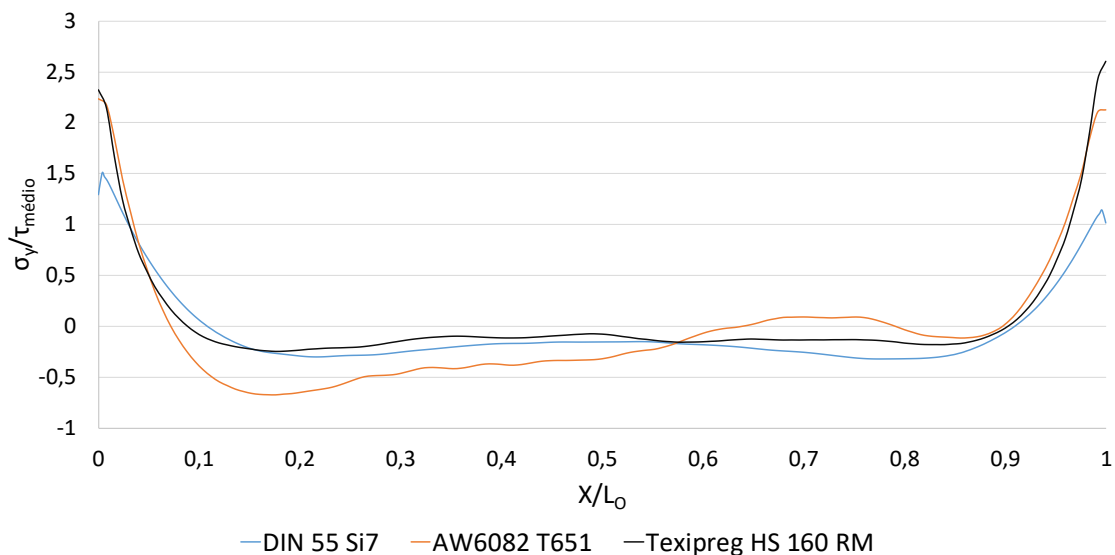


Figura 186 - Comparação de distribuição de tensões σ_y com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes

3.2.7.2.2 Resistência da junta

As curvas P- δ com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes encontram-se representadas na Figura 187. Analisando apenas a carga máxima obtida, os aderentes em aço apresentam o resultado mais elevado, seguido das curvas dos aderentes em CFRP, em que todas as curvas apresentam um perfil semelhante, e por último os aderentes de alumínio. O deslocamento máximo obtido é vastamente superior com aderentes de alumínio, com os aderentes em aço a apresentarem o menor resultado. Os resultados intermédios correspondem aos diferentes ensaios com aderentes em compósito, todos eles com deslocamentos obtidos virtualmente idênticos.

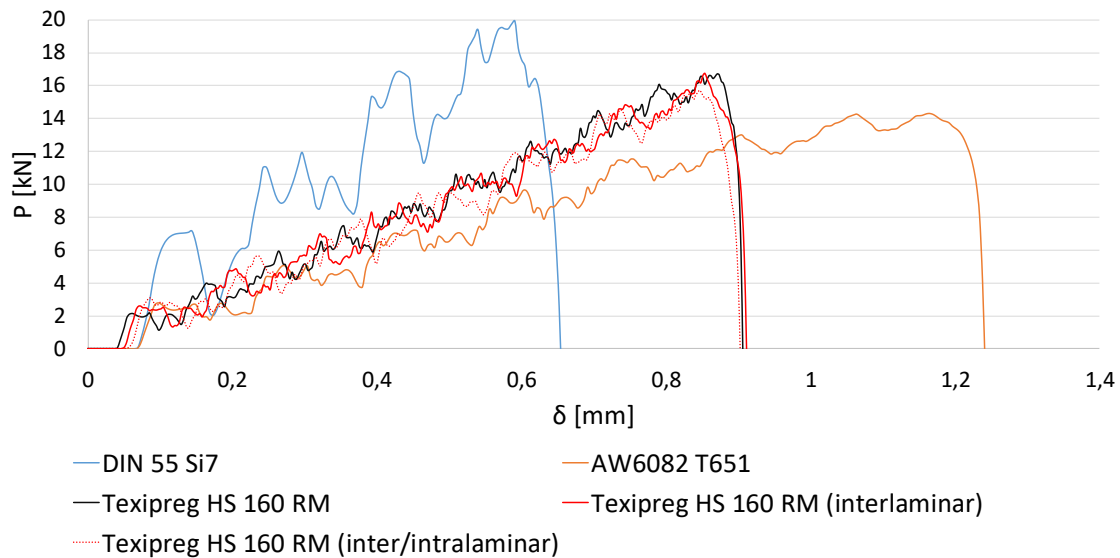


Figura 187 - Curva P- δ para o adesivo DP8005 em diferentes aderentes

A análise dos valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes pode ser feita com o auxílio da Figura 188. A utilização de aderentes de alumínio resulta numa redução de 28% na carga máxima e um aumento de 97% no deslocamento correspondente. Ocorre deformação plástica nos aderentes (4%, exibida na Figura 189), com um valor superior à apresentada com o adesivo AV138. Considerando apenas as propriedades das fibras de carbono, a redução na carga máxima é de 16% em relação aos aderentes de aço e existe um aumento de 17% em relação aos aderentes de alumínio. A menor redução em relação ao aço e o aumento relativamente ao alumínio resultam da maior ductilidade do adesivo DP8005, que permite minimizar os efeitos da rigidez muito elevada do material compósito. O deslocamento correspondente à carga máxima é 47% superior ao aço e 25% menor do que no alumínio. A introdução de camadas interlaminares não introduz diferenças significativas, com 3% de aumento na carga máxima e 2% de redução no deslocamento. Adicionando ambas as camadas, interlaminares e intralaminares, ambos os parâmetros medidos sofrem redução. Em relação ao resultado em camadas coesivas no compósito, há uma redução de 6% e 3% na carga máxima e deslocamento correspondente, respetivamente. Em todos os casos ocorre rotura pela camada adesiva.

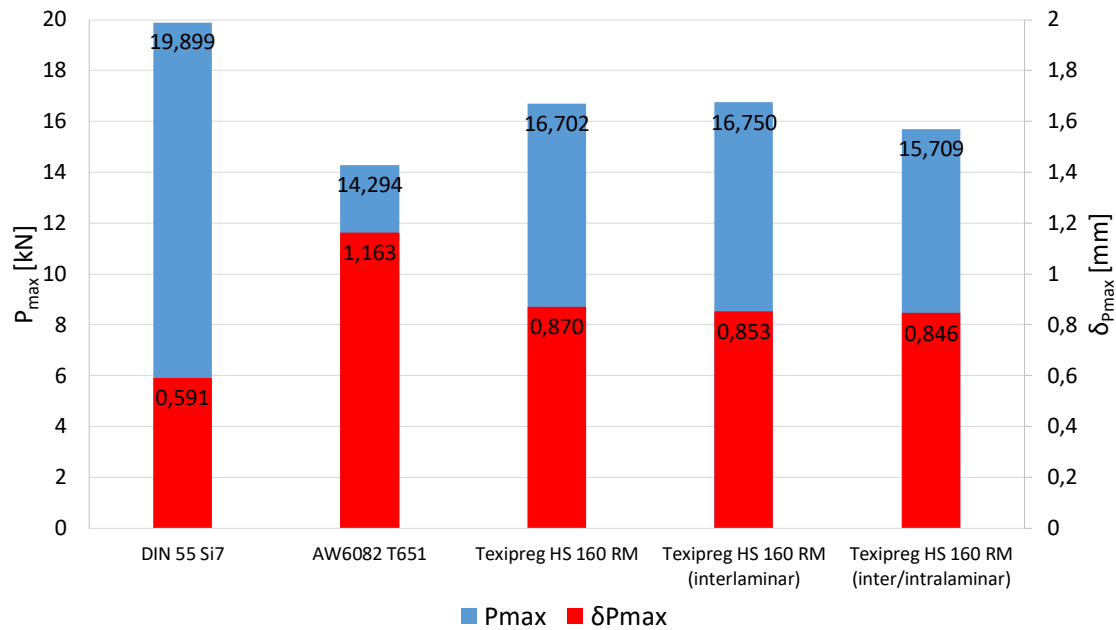


Figura 188 - Comparação de valores máximos obtidos com o adesivo DP8005 em diferentes aderentes

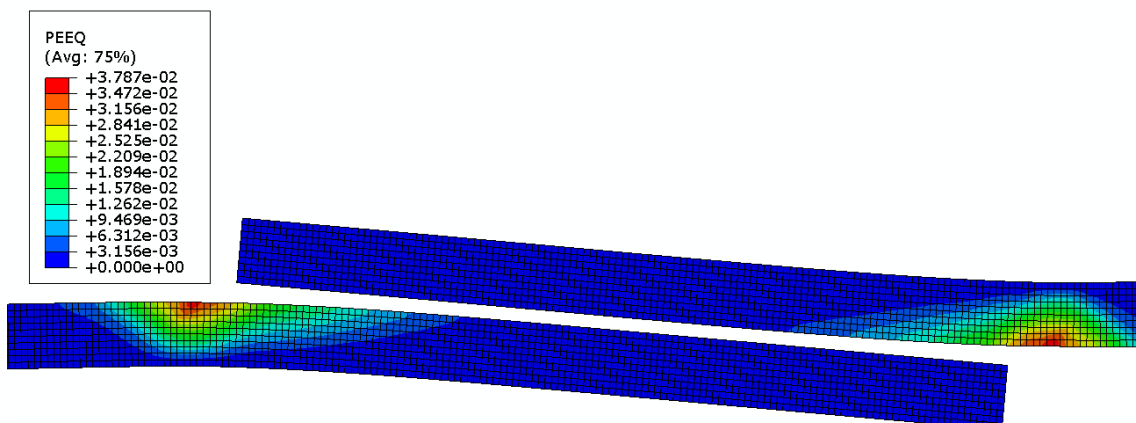


Figura 189 - Deformação plástica nos aderentes de alumínio com o adesivo DP8005

3.2.7.3 Nagase Chemtex XNR6852 E-2

Com a utilização do adesivo XNR6852 E-2, o adesivo com maior tenacidade, em paralelo com a utilização de aderentes de alumínio, não ocorre rotura da camada adesiva com apenas 40 J de energia de impacto. Deste modo, a energia de impacto foi aumentada em múltiplos de 40 J até à ocorrência de rotura. O valor mínimo necessário é de 440 J. De modo a poder manter as propriedades utilizadas não foi alterada a velocidade de impacto pois tal alteração teria influência na taxa de deformação. A alteração de energia

de impacto foi feita com a massa, sendo necessária uma massa 11 vezes superior (286 kg). Para efeitos de comparação foram realizados ensaios nestas mesmas condições com aderentes de aço.

3.2.7.3.1 Distribuição de tensões

Na Figura 190 encontram-se representadas as distribuições de tensões de corte com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes. A alteração de energia de impacto em aderentes de aço resulta em diferenças diminutas, com maior variação e menor intensidade de tensões de corte nos extremos da camada adesiva com 440 J. Com aderentes em compósito ou alumínio há maior efeito de concentração de tensões, com pior desempenho total dos aderentes de alumínio devido ao maior pico apresentado na extremidade por onde se inicia a rotura.

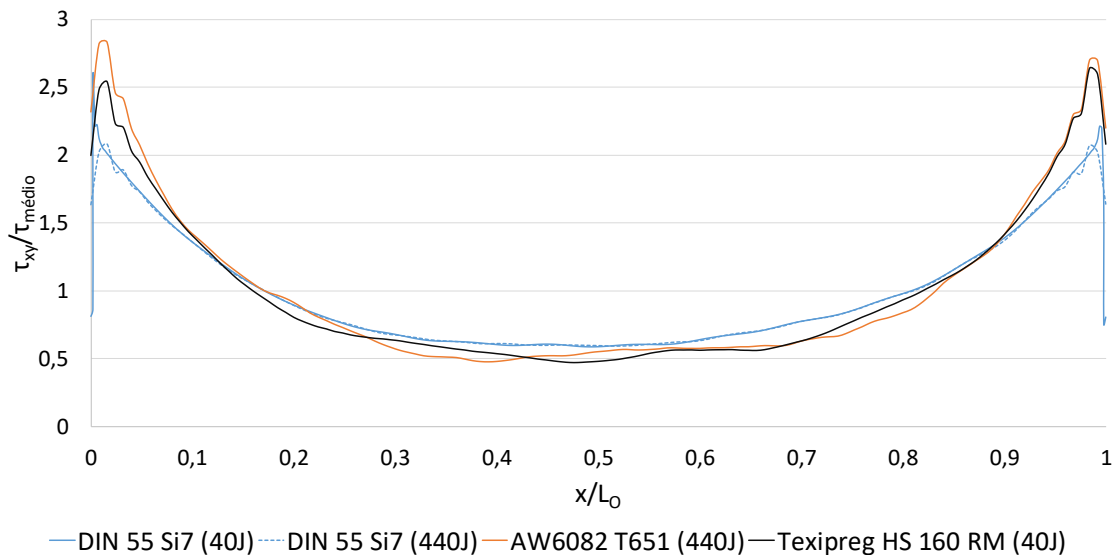


Figura 190 - Comparação de distribuição de tensões τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes

A distribuição de tensões de arrancamento com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes é apresentada na Figura 191. É impercetível a diferença na distribuição de tensões com a alteração de energia de impacto em aderentes de aço, que voltam a apresentar o melhor desempenho. Os picos de concentração de tensões são mais elevados com os outros materiais, sendo o valor máximo atingido com aderentes de alumínio na extremidade da camada adesiva por onde se inicia o impacto.

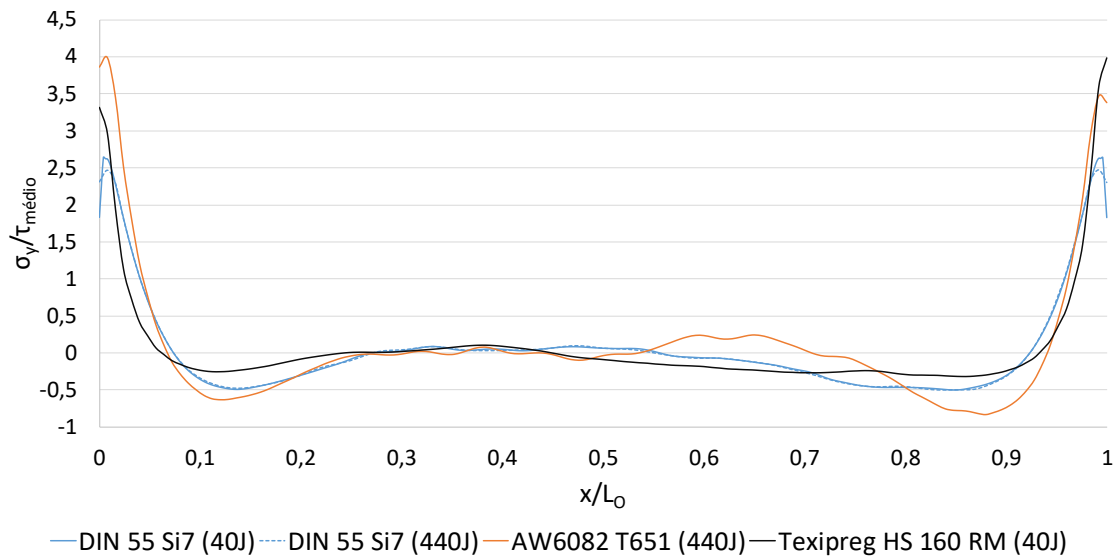


Figura 191 - Comparação de distribuição de tensões σ_y com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes

3.2.7.3.2 Resistência da junta

Na Figura 192 são apresentadas as curvas P- δ com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes. Com a apresentação destes resultados, identifica-se uma menor resistência máxima dos aderentes de alumínio. O deslocamento máximo obtido é também substancialmente superior.

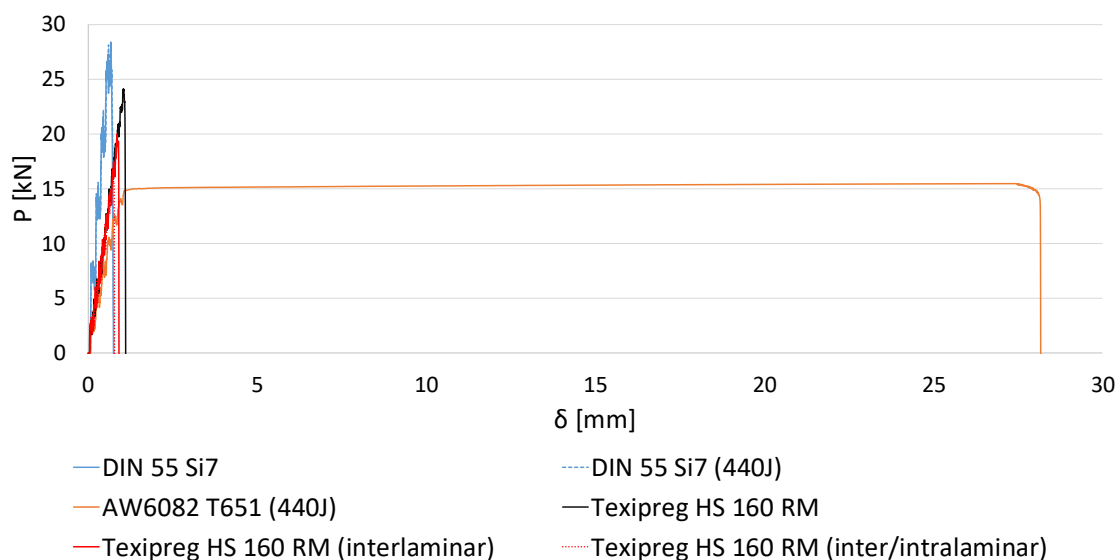


Figura 192 – Curva P- δ para o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes

São disponibilizados os resultados sem os ensaios com energia de 440 J em aço e alumínio na Figura 193. A carga máxima é obtida com os aderentes em aço, com os quais é obtido o menor deslocamento máximo. Nos resultados com aderentes em CFRP, quanto maior o número de camadas internas menor a resistência e o deslocamento.

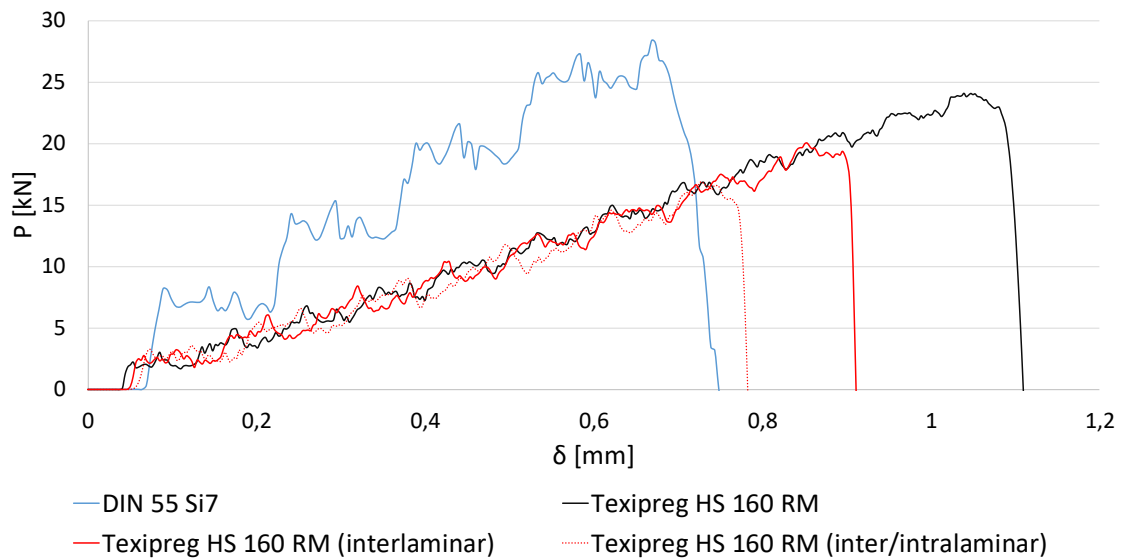


Figura 193 – Curva P-δ para o adesivo XNR6852 E-2 em aderentes de aço e CFRP

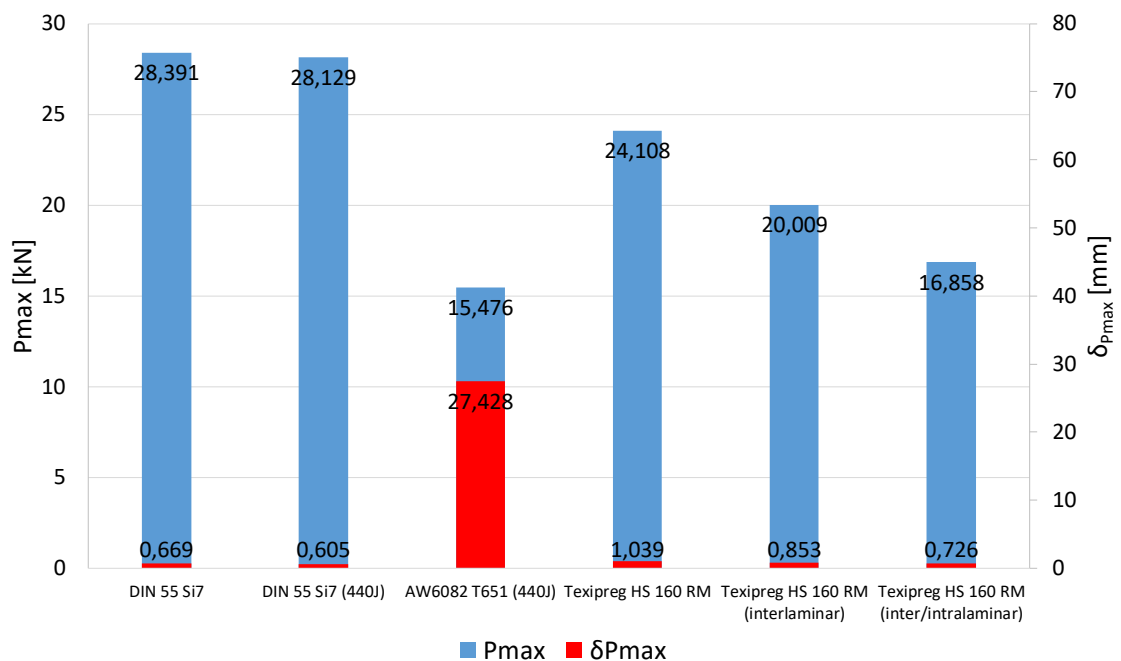


Figura 194 - Comparação de valores máximos obtidos com o adesivo XNR6852 E-2 em diferentes aderentes

A Figura 194 identifica a carga máxima atingida em cada um dos ensaios assim como o deslocamento correspondente à carga máxima quando utilizado o adesivo XNR6852 E-2. O aumento de energia de impacto em aderentes de aço resulta numa redução de 1% e 10% na carga e deslocamento atingidos, respetivamente. Fazendo a comparação direta entre os resultados dos ensaios realizados com a energia de impacto aumentada em 11 vezes, o ensaio com aderentes de alumínio vê a carga máxima ser reduzida em 45% e o deslocamento aumentado em 4434%. A deformação plástica obtida foi extrema, com 15% (Figura 195). Ao invés de ocorrer deformação plástica na área envolvente dos extremos da camada adesiva, os aderentes de alumínio sofrem deformação plástica ao longo do seu comprimento fora da camada de sobreposição. Os 215 mm iniciais entre extremos dos aderentes terminam o ensaio com 243 mm de distância, o que representa um aumento de 13%. Existe também uma redução de resistência quando utilizados aderentes em CFRP, previsível após análises de distribuição de tensões. Comparando com os resultados de referência em aço, quando consideradas apenas as fibras do material compósito observa-se uma redução de 15% na carga máxima atingida e um aumento de 55% no deslocamento. As camadas internas do material compósito limitam o desempenho da JSS com o uso deste adesivo. Com a introdução de camadas interlaminares a rotura ocorre pela camada interlaminar do aderente superior, aderente móvel ao qual está ligado o peso responsável pelo impacto. A redução é de 17% e 18% na carga e deslocamento, respetivamente. Com a permanência das camadas interlaminares, a adição de camadas intralaminares transpõe o local de rotura para a camada interlaminar do aderente superior. O local de rotura deve-se ao facto de ambas as camadas internas do compósito terem as mesmas propriedades com maior proximidade entre a camada adesiva – centro da JSS – e a camada intralaminar. A redução na carga e deslocamento são de 30% em ambos os parâmetros quando feita a comparação com os resultados apenas das fibras.

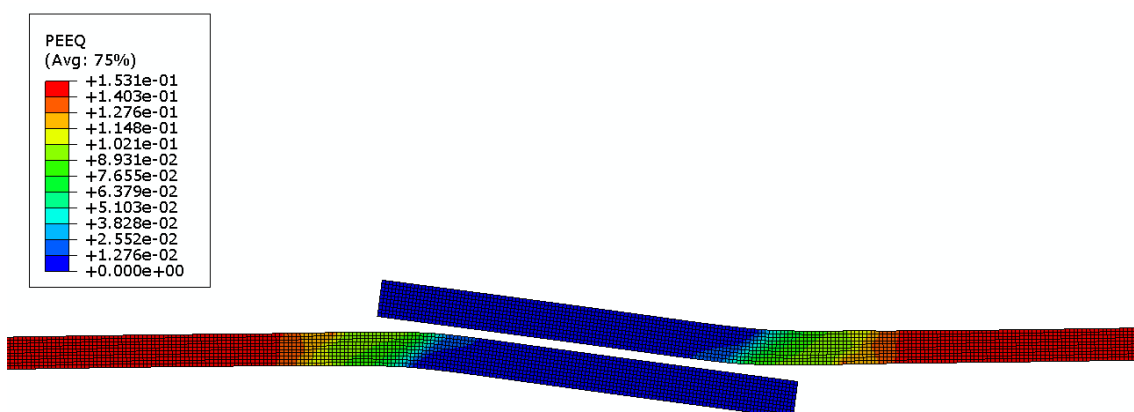


Figura 195 - Deformação plástica nos aderentes de alumínio com o adesivo XNR6852 E-2

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

O modelo numérico utilizado nesta dissertação foi validado com sucesso com três adesivos. Os adesivos utilizados, com propriedades distintas, foram utilizados para estudo de alterações geométricas em JSS para estudar a sua influência em situações de impacto.

O aumento de comprimento de sobreposição tem a influência esperada, com o aumento de área resultante a resultar num aumento de resistência. Não se verifica um aumento de resistência linearmente proporcional ao aumento de comprimento com nenhum dos adesivos, sendo o adesivo XNR6852 E-2 o que mais beneficia com o aumento do comprimento de sobreposição até ao valor máximo atribuído. Os resultados obtidos com a variação de espessura dos aderentes variam em função das propriedades dos mesmos, não sendo possível estabelecer a mesma espessura como ideal para todos os casos.

A introdução de chanfros exteriores nos aderentes resulta em tendências lineares nos dois adesivos mais rígidos, AV138 e XNR6852 E-2. Com o adesivo mais dúctil, DP8005, há um aumento de resistência significativo com o valor angular mais reduzido. A rigidez dos adesivos prova ter influência quando introduzidos chanfros interiores nos aderentes. Quanto maior a rigidez do adesivo, maior a eficácia quando utilizados ângulos de menor valor. A utilização de filetes de adesivo é a alteração geométrica com maior eficácia. O aumento da área efetiva da camada adesiva aliada à redução do efeito de concentração de tensões resulta em maior resistência com todos os adesivos utilizados.

Em função dos resultados obtidos com alterações de parâmetros e geometrias efetuadas individualmente foram construídas, mantendo os 25 mm de comprimento de sobreposição, as configurações teoricamente ótimas para cada um dos adesivos. A combinação de alterações resulta em aumento de resistência exceto com o adesivo AV138. A pior distribuição de tensões resulta num resultado inferior a alterações singulares.

Foi realizada a modelação 3D apenas em JSS convencional de modo a verificar as diferenças com a modelação bidimensional utilizada. Todos os resultados de resistência

e descolamento de carga máxima obtidos com o modelo 3D foram superiores, mas com aumentos inferiores a 5%. A análise de distribuição de tensões demonstra a elevada representatividade da distribuição de tensões de arrancamento 2D relativamente à camada central do modelo 3D.

Por último foram atribuídos diferentes materiais aos aderentes. A resistência máxima é obtida com a utilização de aderentes em aço. A utilização de aderentes de alumínio resulta em deformação plástica com todos os adesivos, que atinge grandes proporções com o adesivo mais tenaz. A elevada flexão durante a transmissão de impacto limita também o desempenho dos adesivos. A elevada rigidez dos aderentes em CFRP é também prejudicial, especialmente quando combinada com adesivos de elevada rigidez. Com o adesivo XNR6852 E-2 ocorre rotura pelas camadas internas dos aderentes em compósito.

Como sugestão para trabalhos futuros, sugere-se a determinação de propriedades dos adesivos ao impacto numa gama de velocidades de ensaio mais alargada. Um maior número de resultados poderá permitir estabelecer uma tendência para algumas propriedades e potencialmente apresentar uma mais valia ao invés da extrapolação linear de propriedades. O estudo da evolução do MDC com a taxa de deformação tem também elevada importância para a simulação de cenários de impacto. Seria também relevante a realização de ensaios experimentais com combinações de alterações geométricas para comparação com os resultados obtidos nesta dissertação.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Silva, M.R.G., *Impact Of Mixed Adhesive Joints For The Automotive Industry*. 2015, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
2. Adams, R.D., *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. 2005: Elsevier Science.
3. Petrie, E., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2007: McGraw-Hill Education.
4. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011: Springer Berlin Heidelberg.
5. Del Real, J., et al., *Influence of silanisation parameters with γ -methacryloxypropyltrimethoxysilane on durability of aluminium/acrylic adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2008. 22(13): p. 1461-1475.
6. Silva, L.F.M.d., A.G.d. Magalhães, and M.F.S.F.d. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto, Portugal: Publindústria.
7. Banea, M.D., et al., *Effect of material on the mechanical behaviour of adhesive joints for the automotive industry*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2017. 31(6): p. 663-676.
8. Dillard, D.A. and A.V. Pocius, *Adhesion Science and Engineering: The Mechanics of Adhesion*. 2002: Elsevier.
9. Cognard, P., *Adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. 2004: Elsevier.
10. Su, N., R. Mackie, and W. Harvey, *The effects of ageing and environment on the fatigue life of adhesive joints*. *International journal of adhesion and adhesives*, 1992. 12(2): p. 85-93.
11. Pocius, A.V. and D.A. Dillard, *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. 2002: Elsevier.
12. Automotive, D. 05/09/2017]; Available from: <http://www.dow.com/en-us/transportation>.
13. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013.
14. Chaves, F.J., et al., *Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review*. *The Journal of Adhesion*, 2014. 90(12): p. 955-992.

15. Lang, T. and P. Mallick, *Effect of spew geometry on stresses in single lap adhesive joints*. International Journal of Adhesion and adhesives, 1998. 18(3): p. 167-177.
16. Shishesaz, M. and N. Bavi, *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. 27(11): p. 1197-1225.
17. da Silva, L.F., *Design rules and methods to improve joint strength*, in *Handbook of Adhesion Technology*. 2011, Springer. p. 689-723.
18. Pires, I., et al., *Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. 23(3): p. 215-223.
19. Ashrafi, M., et al., *Adhesively bonded single lap joints with non-flat interfaces*. International journal of adhesion and adhesives, 2012. 32: p. 46-52.
20. Sancaktar, E. and S.R. Simmons, *Optimization of adhesively-bonded single lap joints by adherend notching*. Journal of adhesion science and technology, 2000. 14(11): p. 1363-1404.
21. Standardization, I.O.f., *ISO 527-2:2012, Plastics -- Determination of tensile properties -- Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. 2012.
22. Da Silva, L.F., et al., *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: John Wiley & Sons.
23. International, A., *ASTM D5379/D5379M-12 Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. 2012.
24. International, A., *ASTM D897 -08(2016) Standard Test Method for Tensile Properties of Adhesive Bonds*. 2016.
25. Standardization, I.O.f., *ISO 11003-2:2001 Adhesives -- Determination of shear behaviour of structural adhesives -- Part 2: Tensile test method using thick adherends*. 2001.
26. International, A., *ASTM D3983 - 98(2011) Standard Test Method for Measuring Strength and Shear Modulus of Nonrigid Adhesives by the Thick-Adherend Tensile-Lap Specimen*. 2011.
27. International, A., *ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strenght of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. 2010, ASTM International.
28. Standardization, I.O.f., *ISO 4587:2003, Adhesives -- Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*. 2003.
29. International, A., *ASTM D4896-01(2016) Standard Guide for Use of Adhesive-Bonded Single Lap-Joint Specimen Test Results*. 2016.

30. International, A., *ASTM D1876-08(2015) Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)*. 2015.
31. International, A., *ASTM D903 - 98(2010) Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds*. 2010.
32. Standardization, I.O.f., *ISO 25217:2009 Adhesives -- Determination of the mode 1 adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens*. 2009.
33. International, A., *ASTM D3433-99(2012) Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012.
34. International, A., *ASTM D950-03(2011) Standard Test Method for Impact Strength of Adhesive Bonds*. 2011.
35. Adamvalli, M. and V. Parameswaran, *Dynamic strength of adhesive single lap joints at high temperature*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. 28(6): p. 321-327.
36. Dean, G., G. Lord, and B. Duncan. *Comparison of the measured and predicted performance of adhesive joints under impact*. in *NPL Report CMMT (A) 206 APPENDIX 1 FINITE ELEMENT ANALYSIS PERFORATED SINGLE-LAP JOINT NPL Report CMMT (A) 206*. 1999. Citeseer.
37. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. *Luftfahrtforschung*, 1938. 15(1/2): p. 41-47.
38. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *Journal of Strain Analysis*, 1974. 9(3): p. 185-196.
39. Harris, J. and R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1984. 4(2): p. 65-78.
40. Sosa, J.C. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, 2012. 72(7): p. 788-791.
41. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. *Journal of applied mechanics*, 1944. 11(1): p. A17-A27.
42. Panigrahi, S. and B. Pradhan, *Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites*. *Journal of Reinforced plastics and Composites*, 2007. 26(2): p. 183-201.
43. Hart-Smith, L.J., *Stress analysis: a continuum mechanics approach*. *Developments in Adhesives*, 1973.

44. 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.
45. Williams, M., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. 49(2): p. 199-204.
46. Fernlund, G. and J. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints: Part 1: Analytical method*. International journal of adhesion and adhesives, 1991. 11(4): p. 213-220.
47. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. 23(3): p. 622-636.
48. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. 71(15): p. 2125-2142.
49. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. 47(18): p. 2445-2458.
50. Yang, Q. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. 110(2): p. 175-187.
51. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of fatigue, 2010. 32(7): p. 1146-1158.
52. Daudeville, L. and P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. 25(1-4): p. 547-555.
53. Voyiadjis, G.Z. and P.I. Kattan, *Damage mechanics*. 2005: CRC Press.
54. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. 77(7): p. 1073-1090.
55. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: John Wiley & Sons.
56. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. 45(5): p. 601-620.
57. Dolbow, J. and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International journal for numerical methods in engineering, 1999. 46(1): p. 131-150.

58. Machado, J., E. Marques, and L.F. da Silva, *Adhesives and adhesive joints under impact loadings: An overview*. The Journal of Adhesion, 2017: p. 1-32.
59. Sato, C.a. and K. Ikegami, *Dynamic deformation of lap joints and scarf joints under impact loads*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000. 20(1): p. 17-25.
60. Khan, A.S., O. Lopez-Pamies, and 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.
61. Iwamoto, T., T. Nagai, and 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 and Structures, 2010. 47(2): p. 175-185.
62. Cowper, G.R. and P.S. Symonds, *Strain-hardening and strain-rate effects in the impact loading of cantilever beams*. 1957, Brown Univ Providence Ri.
63. Goglio, L., et al., *High strain-rate compression and tension behaviour of an epoxy bi-component adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 2008. 28(7): p. 329-339.
64. Johnson, G.R. and W.H. Cook, *Fracture characteristics of three metals subjected to various strains, strain rates, temperatures and pressures*. Engineering fracture mechanics, 1985. 21(1): p. 31-48.
65. Morin, D., et al., *Identification of a new failure criterion for toughened epoxy adhesive*. Engineering fracture mechanics, 2010. 77(17): p. 3481-3500.
66. Chiu, W. and R. Jones, *Unified constitutive model for thermoset adhesive, FM73*. International journal of adhesion and adhesives, 1995. 15(3): p. 131-136.
67. Zgoul, M. and A. Crocombe, *Numerical modelling of lap joints bonded with a rate-dependent adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 2004. 24(4): p. 355-366.
68. Crocombe, A., *Modelling and predicting the effects of test speed on the strength of joints made with FM73 adhesive*. International journal of adhesion and adhesives, 1995. 15(1): p. 21-27.
69. Carlberger, T. and U. Stigh, *An explicit FE-model of impact fracture in an adhesive joint*. Engineering fracture mechanics, 2007. 74(14): p. 2247-2262.
70. May, M., H. Voß, and S. Hiermaier, *Predictive modeling of damage and failure in adhesively bonded metallic joints using cohesive interface elements*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. 49: p. 7-17.
71. Clarke, M., et al., *Application of the design of experiments procedure to the behaviour of adhesively bonded joints with plastically deformable adherends to*

- enable further understanding of strain rate sensitivity*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. 44: p. 226-231.
72. Avendaño, R., et al., *Impact loading of single lap joints of dissimilar lightweight adherends bonded with a crash-resistant epoxy adhesive*. Journal of Engineering Materials and Technology, 2016. 138(4): p. 041019.
 73. Yokoyama, T. and H. Shimizu, *Determination of impact shear strength of adhesive joints with the split Hopkinson bar*. Key Engineering Materials, 1998: p. 317-322.
 74. Al-Zubaidy, H., X. Zhao, and R. Al-Mahaidi, *Effect of impact tensile load on strength of CFRP bonded steel plate joints*. Procedia Engineering, 2011. 14: p. 1312-1317.
 75. Kemiklioglu, U., et al., *Strength comparison of ductile and brittle adhesives under single and repeated impacts*. Applied Adhesion Science, 2015. 3(1): p. 15.
 76. Harris, J. and R. Adams, *An assessment of the impact performance of bonded joints for use in high energy absorbing structures*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C: Journal of Mechanical Engineering Science, 1985. 199(2): p. 121-131.
 77. Liao, L., et al., *3-D FEM stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints subjected to impact tensile loads*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. 31(7): p. 612-619.
 78. Hazimeh, R., et al., *Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015. 56: p. 24-31.
 79. Araújo, H.A.M., et al., *Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry*. Composite Structures, 2017. 171: p. 549-561.
 80. Systèmes, D., *Abaqus Documentation*. 2014.
 81. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. 85(6): p. 351-376.
 82. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. 50(7): p. 1701-1736.
 83. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. 77(2): p. 111-140.
 84. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. 39(10): p. 2827-2855.

85. 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.
86. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. 39(17): p. 4367-4383.
87. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. 141(1): p. 147-161.
88. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. 45(5): p. 1497-1512.
89. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. 65(13): p. 1948-1958.
90. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and 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.
91. *56Si7 Material Data Sheet*. 2017, Ovako.
92. *Momentive RTV100 Series Technical Data Sheet*. 2012.
93. *3M Scotch-Weld Structural Plastic Adhesive Technical Data*. 2016.
94. *Huntsman Araldite AV138/HV998 Technical Data Sheet*. 2014.
95. *DENATITE™ Epoxy Resin Series*. Available from: <http://nagaseamerica.com/product/denatite-epoxy-resin-series/>.
96. Marques, E., et al., *Effect of Low Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Energy of a Room Temperature Vulcanizing Silicone Adhesive*. 2016.
97. da Silva, L., et al., *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.
98. da Silva, L.F.M., et al., *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.
99. 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.

100. Mata, R.A., *Impact of adhesive joints for the automotive industry at low and high temperatures*. 2014, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
101. Varajão, J., *Impact of CFRP adhesive joints for the automotive industry*. 2015.
102. Nunes, S.L.S., et al., *Comparative Failure Assessment of Single and Double Lap Joints with Varying Adhesive Systems*. *The Journal of Adhesion*, 2015. 92(7-9): p. 610-634.
103. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
104. Fernandes, T.A., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: experimentation and advanced techniques for strength prediction*. *The Journal of Adhesion*, 2015. 91(10-11): p. 841-862.
105. Reis, P., F. Antunes, and J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. *Composite structures*, 2005. 67(1): p. 125-133.
106. Team, R.C., *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. 2017, R Foundation for Statistical Computing.
107. Team, R., *RStudio: Integrated Development Environment for R*. 2016, RStudio, Inc.
108. Borchers, H.W., *pracma: Practical Numerical Math Functions*. 2017.
109. Sancaktar, E. and P. Nirantar, *Increasing strength of single lap joints of metal adherends by taper minimization*. *Journal of adhesion science and technology*, 2003. 17(5): p. 655-675.
110. You, M., et al., *A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. 28(1): p. 71-76.
111. Belingardi, G., L. Goglio, and A. Tarditi, *Investigating the effect of spew and chamfer size on the stresses in metal/plastics adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2002. 22(4): p. 273-282.
112. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011. 31(5): p. 363-372.