



Estudo de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de impacto

PEDRO DANIEL ALMEIDA DA SILVA

julho de 2023

ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE IMPACTO

Pedro Daniel Almeida da Silva

1130068

2022/2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE IMPACTO

Pedro Daniel Almeida da Silva

1130068

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 Raúl Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação do Doutor José Joaquim Mota Machado

2023

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

AGRADECIMENTOS

Neste capítulo quero deixar um especial agradecimento ao meu orientador, o professor doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela orientação dada, pela disponibilidade e tempo entregue para ajudar e apoiar no desenvolvimento da tese.

Ao professor doutor Joaquim José Mota Machado, pelo conhecimento transmitido e sabedoria transmitida ao longo do desenvolvimento da tese.

À minha família, em especial aos meus pais que, pelas circunstâncias da vida, e nos momentos mais difíceis compreenderam, ajudaram e apoiaram para chegar até aqui no desenvolvimento do meu percurso académico.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto que, no meu percurso entre pausa e retoma do ciclo de estudos, transmitiu os conhecimentos necessários para desenvolver esta dissertação. Aos demais intervenientes que de uma forma direta ou indireta me ajudaram, o meu sincero obrigado.

RESUMO

A aplicação de adesivos estruturais vem ganhando cada vez mais espaço na indústria. Isso deve-se, sobretudo, ao facto de cada vez mais estudo serem feitos nesta área científica, o que permite chegar ao conhecimento de como se comportam estes componentes em certos meios e sob determinadas condições. Assim pode-se compreender porque é que os adesivos oferecem certas vantagens em relação aos métodos convencionais de união mecânica. Os substratos a ligar entre si, podem assumir diversas geometrias e serem de materiais distintos, dependendo da estrutura a ligar. Essas vantagens tornam os projetos de engenharia mais económicos e deixam as estruturas mais leves, ganhando tempo na montagem dos componentes. De entre os ramos de aplicação que mais utilizam estes tipos de ligação destacam-se a indústrias aeronáutica e automotiva. Essas indústrias investiram tempo e dinheiro para que estudos se fizessem na investigação dos adesivos e suas propriedades e, com isso, chegaram à conclusão que esta poderia ser uma solução viável para muitas aplicações nos seus respetivos ramos, quer na aeronáutica, automotiva e eletrónica.

O objetivo principal desta tese centra-se no estudo numérico de juntas adesivas sujeitas a esforços de impacto. No desenvolvimento estão incluídos o planeamento do trabalho, a abordagem da metodologia numérica para a modelação dos modelos de dano coesivo ao impacto com recurso ao *software* ABAQUS®, assim como um estudo numérico paramétrico realizado sobre a influência na resistência das juntas adesivas das variáveis geométricas principais, como o comprimento de sobreposição (L_0) e a espessura dos substratos (t_p), e o estudo com alterações geométricas, como a introdução de chanfros interiores (θ) e exteriores (α) nos substratos, e a introdução de um *fillet* de adesivo (β). São apresentados os gráficos com a distribuição das tensões normais σ_y e das tensões de corte τ_{xy} , assim como curvas P - δ , energia absorvida (E_{abs}) e carga máxima ($P_{máx}$) para todas as juntas ensaiadas.

Neste trabalho conclui-se que a resistência das juntas aumenta para adesivos rígidos, como é o caso dos adesivos Araldite® AV138 e Nagase® ChemtexXNR6852 E-2 e diminui para adesivos flexíveis, como é o caso do 3M® DP8005. Quando os parâmetros geométricos L_0 e β são incrementados, observa-se um aumento significativo da resistência da junta adesiva, tanto quanto a $P_{máx}$ como E_{abs} , uma vez que aumenta a área de secção resistente. Por sua vez, o incremento do parâmetro geométrico t_p aumenta ligeiramente o valor de $P_{máx}$ suportada pelas juntas, mas diminui o valor de E_{abs} essencialmente devido ao aumento da rigidez dos substratos. Os parâmetros θ e α não trazem benefício à resistência das juntas, levando à perda da capacidade de suportar carga pela junta ($P_{máx}$), bem como à perda da capacidade desta em absorver energia (E_{abs}), essencialmente devido à perda de rigidez quando θ e α diminuem.

PALAVRAS-CHAVE

Ligações Adesivas; Juntas Adesivas Tubulares; Adesivos Estruturais; Solicitações Estáticas e Dinâmicas; Modelos CZM; Métodos Numéricos.

ABSTRACT

The application of structural adhesives has been increasing space in the industry. This is mainly due to the fact that more and more studies are being carried out in this scientific area, which makes it possible to get to know how these components behave in certain environments and under certain conditions. Thus, it can be understood why adhesives offer certain advantages over conventional mechanical bonding methods. The adherends to be joined together can assume different geometries and be of different materials, depending on the structure to be joined. These advantages make engineering projects more economical and make structures lighter, saving time in assembling components. Among the fields of application that most use these types of connections, the aeronautical and automotive industries stand out. These industries invested time and money for studies to be carried out in the investigation of adhesives and their properties and, with that, it was concluded that this could be a viable solution for many applications in their respective fields, whether in aeronautics, automotive and electronics.

The main objective of this thesis focuses on the numerical study of adhesive joints subjected to impact loads. The development includes the planning of the work, the numerical methodology approach for modeling cohesive impact damage models using the ABAQUS® software, as well as a parametric numerical study carried out on the influence on the strength of the adhesive joints of the main variables, such as the overlap length (L_0) and adherends thickness (t_p), and the study of the geometrical changes, such as the introduction of inner (θ) and outer (α) chamfers on adherends, and the introduction of adhesive fillet (β). Graphics with the distribution of σ_y normal stresses and τ_{xy} shear stresses are presented, as well as P - δ curves, absorbed energy (E_{abs}) and maximum load (P_{max}) for all joints tested.

In this work, it was concluded that the strength of adhesive joints increases for stiff adhesives, as is the case of Araldite® AV138 and Nagase® ChemtexXNR6852 E-2 and decreases for flexible adhesives, as is the case of 3M® DP8005. When the geometric parameters L_0 and β are increased, a significant increase in the strength of the adhesive joint is observed, both in terms of P_{max} and E_{abs} , because it increases the resistant sectional area. In turn, increasing the geometric parameter t_p slightly increases the value of P_{max} supported by the joints, but decreases the value of E_{abs} , essentially due to the increase in the stiffness of the adherends. The θ and α parameters do not benefit the strength of the joints, leading to a loss of load-bearing capacity of the joint (P_{max}), as well as a loss of its ability to absorb energy (E_{abs}), essentially due to the loss of stiffness when θ and α decrease.

KEYWORDS

Adhesive Bonds; Tubular Adhesive Bonds; Structural Adhesives; Static and Dynamic Loadings; CZM Models; Numerical methods.

ÍNDICE

AGRADECIMENTOS.....	V
RESUMO	VII
ABSTRACT.....	IX
ÍNDICE.....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS.....	XXI
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia	2
1.4. Estrutura do relatório.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
2.1. Ligações adesivas.....	3
2.1.1. Enquadramento dos tipos de ligação.....	3
2.1.2. Fundamentos das ligações adesivas	5
2.1.3. Adesivos estruturais.....	6
2.1.4. Configurações típicas de junta	7
2.1.5. Ramos de aplicação.....	7
2.1.6. Tendências de futuro	9
2.2. Métodos de previsão de resistência de juntas adesivas	9
2.2.1. Solicitações estáticas.....	10
2.2.1.1. Mecânica dos meios contínuos	10
2.2.1.2. Mecânica da fratura	10
2.2.1.3. Modelos de dano coesivo.....	12
2.2.1.4. Mecânica do dano	13
2.2.1.5. Método de elementos finitos estendido.....	14
2.2.1.6. Estado-da-arte	14
2.2.2. Solicitações dinâmicas	16
2.2.2.1. Fadiga	16
2.2.2.2. Taxa de deformação variável e impacto	17
2.2.2.3. Análise modal	19
2.2.2.4. Estado-da-arte	20
2.3. Juntas adesivas tubulares.....	21
2.3.1. Contextualização de ligações tubulares.....	21
2.3.2. Aplicações de juntas tubulares	23

2.3.3. Geometrias de juntas tubulares.....	23
2.3.4. Considerações de fabrico e ensaio.....	24
2.3.5. Considerações de modelação numérica	25
2.3.6. Estado-da-arte.....	26
3. DESENVOLVIMENTO	29
3.1. Planeamento do trabalho.....	29
3.1.1. Objetivos específicos.....	29
3.1.2. Metodologia utilizada	30
3.1.3. Geometria e principais parâmetros geométricos	30
3.1.4. Requisitos e limitações do trabalho.....	32
3.1.5. Recolha de materiais.....	33
3.1.6. Modelação numérica	35
3.1.6.1. Juntas de sobreposição simples	35
3.1.6.2. Juntas tubulares	37
3.1.7. Fundamentos do MDC triangular.....	40
3.2. Validação da técnica MDC para modelação de impacto.....	42
3.2.1. Fabrico das juntas	42
3.2.2. Ensaios	42
3.2.3. Curvas $P-\delta$	44
3.2.4. Discussão de resultados	47
3.3. Estudo numérico paramétrico.....	48
3.3.1. Materiais utilizados.....	49
3.3.2. Modelação em ABAQUS®	50
3.3.2.1. Módulo Part.....	50
3.3.2.2. Módulo Property	51
3.3.2.3. Módulo Step	52
3.3.2.4. Módulo Load	54
3.3.2.5. Módulo Mesh	55
3.3.2.6. Módulo Job.....	58
3.3.2.7. Módulo Visualization.....	58
3.3.3. Estudos das variáveis geométricas principais	58
3.3.3.1. Comprimento de sobreposição	58
3.3.3.1.1. Distribuição de tensões.....	59
3.3.3.1.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida	65
3.3.3.1.3. Comparação de resultados	72
3.3.3.2. Espessura dos tubos	73
3.3.3.2.1. Distribuição de Tensões	74
3.3.3.2.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida	80
3.3.3.2.3. Comparação de resultados	86

3.3.4. Estudo de alterações geométricas	88
3.3.4.1. Fillet de adesivo	88
3.3.4.1.1. Distribuição de tensões	88
3.3.4.1.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida	94
3.3.4.1.3. Comparação de resultados	101
3.3.4.2. Chanfro interior	102
3.3.4.2.1. Distribuição de tensões	103
3.3.4.2.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida	109
3.3.4.2.3. Comparação de resultados	116
3.3.4.3. Chanfro exterior	117
3.3.4.3.1. Distribuição de tensões	118
3.3.4.3.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida	123
3.3.4.3.3. Comparação de resultados	129
3.3.5. Discussão e comparação de resultados	131
4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTUROS	137
4.1. Análise crítica	137
4.2. Limitações e trabalhos futuros	138
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	139

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplo genérico de uma junta adesiva (adaptado de [3]).	5
Figura 2 - Configurações típicas de junta (adaptado de [10]).	7
Figura 3 - Airbus A380 com materiais compósitos e peças ligadas com adesivos [6].	8
Figura 4 - Extensão da tecnologia adesiva à indústria eletrotécnica [6].	8
Figura 5 - Aplicação do critério de Leguillon (adaptado de [4, 20]).	12
Figura 6 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [4, 28]).	13
Figura 7 - Distribuição das tensões ao longo do adesivo em função do tempo (adaptado de [5, 49]).	18
Figura 8 - Energia absorvida em modo estático e dinâmico para dois adesivos (adaptado de [5, 51]).	18
Figura 9 - Formas da estrutura nos diferentes modos (adaptado de [5, 55]).	20
Figura 10 - Exemplos de perfis tubulares [58].	22
Figura 11 - Estrutura tubular da estação Gare do Oriente, em Lisboa [59].	22
Figura 12 - Representação genérica de uma ligação adesiva tubular [62].	22
Figura 13 - Aplicação das juntas adesivas tubulares às fuselagens dos aviões [63].	23
Figura 14 - Juntas cilíndricas comumente utilizadas: a) barras e b) tubos (adaptado de [2, 64]).	23
Figura 15 - Junta adesiva com extremidade quadrada (a) e com cone (b) (adaptado de [64]).	24
Figura 16 - Substrato tubular exterior com furo não passante [65].	24
Figura 17 - Modelo tubular 2D de junta com parâmetros geométricos e carregamento (adaptado de [66]).	25
Figura 18 - Modelação 3D de uma malha tubular: (a) vista isométrica do modelo completo e (b) zoom da região de sobreposição [67].	26
Figura 19 - Geometria da junta utilizada no ensaio experimental.	31
Figura 20 - Geometria da junta tubular usada no trabalho numérico.	32
Figura 21 - Junta SLJ paramétrica.	35
Figura 22 - Controlo da malha representativo das juntas SLJ.	36
Figura 23 - Detalhe da construção da malha na zona adesiva na SLJ.	36
Figura 24 - Fixação da junta para o ensaio.	37
Figura 25 - Junta Tubular Paramétrica.	38
Figura 26 - Controlo da malha nas juntas tubulares.	39
Figura 27 - Detalhe da malha na camada adesiva na junta tubular.	39
Figura 28 - Fixação da junta tubular.	40
Figura 29 - Modelo de dano coesivo triangular (adaptado de [78]).	41
Figura 30 - Máquina utilizada para ensaio de impacto (adaptado de [71]).	43
Figura 31 - Curva $P-\delta$ e linha de tendência obtida com o adesivo RTV106 [75].	44
Figura 32 - Valores de referência para o adesivo RTV106 [75].	44
Figura 33 - Curva $P-\delta$ obtida com o adesivo AV138 [75].	45
Figura 34 - Valores de referência para o adesivo AV138 [75].	45
Figura 35 - Curva $P-\delta$ obtida com o adesivo DP8005 [75].	46
Figura 36 - Valores de referência do adesivo DP8005 [75].	46

Figura 37 - Curva P - δ do adesivo XNR6852 E-2 [75].....	47
Figura 38 - Valores de referência para o adesivo XNR6852 E-2 [75].	47
Figura 39 - Desenho 2D da junta adesiva tubular em ABAQUS®.	51
Figura 40 – a) criação de materiais e b) atribuição dos materiais no ABAQUS®.	52
Figura 41 – a) <i>fields outputs</i> , b) configuração do <i>step</i> c) configuração dos <i>fields outputs</i> no ABAQUS®	53
Figura 42 – a) configuração da variável U2 e B) variável RF2 no ABAQUS®	54
Figura 43 - Definição das condições fronteira no ABAQUS®	55
Figura 44 - Aplicação da carga ao modelo no ABAQUS®	55
Figura 45 - Malhas para a) L_0 b) t_p c) <i>fillet</i> de adesivo d) chanfro interior e e) chanfro exterior.	56
Figura 46 - Definição de a) do tipo de elementos nos substratos e b) nos substratos.	56
Figura 47 - Redefinição da partição do adesivo para extrair as tensões.....	57
Figura 48 - Refinamento da malha para extração das tensões.....	57
Figura 49 – a) criação do <i>Job</i> e b) edição do <i>Job</i> no ABAQUS®	58
Figura 50 - Geometria base de teste para variação de L_0	59
Figura 51 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo AV138 em função de L_0	60
Figura 52 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função de L_0	61
Figura 53 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função de L_0	62
Figura 54 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função de L_0	63
Figura 55 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	64
Figura 56 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	65
Figura 57 - Curvas P - δ para o adesivo AV138 em função de L_0	66
Figura 58 - Valores de $P_{máx}$ para cada L_0 testado com o adesivo AV138.	66
Figura 59 - Modo de rutura da junta adesiva para $L_0=20$ mm.	67
Figura 60 - Plastificação parcial do substrato com $L_0=40$ mm.	67
Figura 61 - Curvas P - δ para o adesivo DP8005 em função de L_0	68
Figura 62 - Valores de $P_{máx}$ para cada L_0 testado com o adesivo DP8005.	69
Figura 63 - Modo de rutura da junta com $L_0=40$ mm.....	69
Figura 64 - Curvas P - δ para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	70
Figura 65 - Valores de $P_{máx}$ para cada L_0 testado com o adesivo XNR6852 E-2.	71
Figura 66 - Modo de rutura da junta para $L_0=40$ mm.	71
Figura 67 - Geometrias base de teste para variação de t_p	74
Figura 68 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo AV138 em função de t_p	75
Figura 69 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função de t_p	76
Figura 70 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função de t_p	77
Figura 71 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função de t_p	78
Figura 72 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p	79
Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p	80
Figura 74 - Curvas P - δ para o adesivo AV138 em função de t_p	81
Figura 75 - Valores de $P_{máx}$ para cada t_p testado com o adesivo AV138.	81
Figura 76 - Modo de rutura da junta com $t_p=4$ mm para o adesivo AV138.....	82
Figura 77 - Curvas P - δ para o adesivo DP8005 em função de t_p	83
Figura 78 - Valores de $P_{máx}$ para cada t_p testado com adesivo DP8005.	83
Figura 79 - Modo de rutura da junta com $t_p=4$ mm para o adesivo DP8005.	84

Figura 80 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p	85
Figura 81 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p	85
Figura 82 - Modo de rutura da junta com $t_p=4$ mm para o adesivo XNR6852 E-2.....	86
Figura 83 - Geometria de teste para <i>fillet</i> de adesivo.....	88
Figura 84 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo AV138 com <i>fillet</i>	89
Figura 85 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 com <i>fillet</i>	90
Figura 86 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo DP8005 com <i>fillet</i>	91
Figura 87 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 com <i>fillet</i>	92
Figura 88 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 com <i>fillet</i>	93
Figura 89 - Distribuição das tensões de τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 com <i>fillet</i>	94
Figura 90 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo AV138 com <i>fillet</i>	95
Figura 91 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo AV138 com <i>fillet</i>	95
Figura 92 - Modo de rutura para o adesivo AV138 com $\beta=7,5^\circ$	96
Figura 93 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo DP8005 com <i>fillet</i>	97
Figura 94 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo DP8005 com <i>fillet</i>	97
Figura 95 - Modo de rutura para o adesivo DP8005 com $\beta=30^\circ$	98
Figura 96 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo XNR6852 E-2 com <i>fillet</i>	99
Figura 97 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo XNR6852 E-2 com <i>fillet</i>	99
Figura 98 - Modo de rutura para o adesivo XNR6852 E- para $\beta=60^\circ$	100
Figura 99 - Geometria de base para ensaio do parâmetro chanfro interior.....	103
Figura 100 – Tensões σ_y para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ	104
Figura 101 - Tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ	105
Figura 102 - Tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ	106
Figura 103 - Tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ	107
Figura 104 - Tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ	108
Figura 105 - Tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ	109
Figura 106 - Curva $P-\delta$ do adesivo AV138 em função do parâmetro θ	110
Figura 107 - Valor de $P_{máx}$ para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ	110
Figura 108 - Modo de rutura para o adesivo AV138 para $\theta=15^\circ$	111
Figura 109 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ	112
Figura 110 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ	112
Figura 111 - Modo de rutura para o adesivo DP8005 para $\theta=15^\circ$	113
Figura 112 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ	114
Figura 113 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ	114
Figura 114 - Modo de rutura para o adesivo XNR6852 E-2 para $\theta=15^\circ$	115
Figura 115 - Geometria base para ensaio em função do parâmetro α	117
Figura 116 - Tensões σ_y para o adesivo AV138 em função do parâmetro α	118
Figura 117 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função do parâmetro α	119
Figura 118 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α	120
Figura 119 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α	121
Figura 120 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α	122
Figura 121 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α	123

Figura 122 - Curva P - δ para o adesivo AV138 em função do parâmetro α	124
Figura 123 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo AV138 em função do parâmetro α	124
Figura 124 - Modo de rutura do adesivo AV138 com $\alpha=15^\circ$	125
Figura 125 - Curvas P - δ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α	126
Figura 126 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α	126
Figura 127 - Modo de rutura para o adesivo DP8005 com $\alpha=15^\circ$	127
Figura 128 - Curvas P - δ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α	128
Figura 129 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α	128
Figura 130 - Modo de rutura do adesivo XNR6852 E-2 para $\alpha=15^\circ$	129
Figura 131 - Valores de $P_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo AV138. ...	132
Figura 132 - $\delta_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo AV138.	133
Figura 133 - Valores de $P_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo DP8005. .	134
Figura 134 - $\delta_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo DP8005.	135
Figura 135 - Valores de $P_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo XNR6852 E-2.	135
Figura 136 $\delta_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo XNR6852 E-2.	136

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Ligações permanentes e móveis.	4
Tabela 2 - Caracterização dos diferentes elementos de ligação.	4
Tabela 3 - Caracterização das ligações soldadas e adesivas.	4
Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [2].	5
Tabela 5 - Classificação dos adesivos estruturais [6, 7, 9].	6
Tabela 6 - Estudos recentes de juntas adesivas sob condições de carregamento estático.	15
Tabela 7 - Estudos de modelação sob condições dinâmicas.	20
Tabela 8 - Estudos sobre a aplicação de juntas adesivas tubulares.	26
Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos substratos utilizados no ensaio experimental [71].	33
Tabela 10 – Propriedades mecânicas dos adesivos utilizados no trabalho experimental [71].	34
Tabela 11 - Propriedades dos adesivos em função das velocidades de ensaio [71].	35
Tabela 12 - Designação dos parâmetros geométricos em estudo.	49
Tabela 13 - Propriedades mecânicas do aço DIN 55 Si7 [71].	49
Tabela 14 - Propriedades mecânicas dos adesivos utilizados no estudo numérico [71].	49
Tabela 15 - Valores da E_{abs} pelo adesivo AV138 em função de L_0	68
Tabela 16 - Valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 em função de L_0	70
Tabela 17 - Valores da E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0	72
Tabela 18 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para L_0 para os três adesivos.	72
Tabela 19 - Comparação de E_{abs} para L_0 para os três adesivos.	73
Tabela 20 - Comparação das tensões σ_y para L_0 para os três adesivos.	73
Tabela 21 - Comparação das tensões τ_{xy} para L_0 para os três adesivos.	73
Tabela 22 - Valores da E_{abs} pelo adesivo AV138 em função de t_p	82
Tabela 23 - Valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 em função de t_p	84
Tabela 24 - Valores de E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p	86
Tabela 25 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ em função de t_p	87
Tabela 26 – Comparação de E_{abs} em função de t_p	87
Tabela 27 - Comparação de σ_y para os três adesivos em função de t_p	87
Tabela 28 - Comparação de t_{xy} para os três adesivos.	88
Tabela 29 - Valores da E_{abs} para o adesivo AV138 em função de β	96
Tabela 30 - Valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 com <i>fillet</i>	98
Tabela 31 - Valores da E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 com <i>fillet</i>	100
Tabela 32 - Comparação dos três adesivos com valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para β	101
Tabela 33 - Comparação dos de E_{abs} em função de β	101
Tabela 34 - Comparação de σ_y para os três adesivos em função de β	102
Tabela 35 - Comparação de τ_{xy} para os três adesivos em função de β	102
Tabela 36- Valores da E_{abs} pela junta para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ	111
Tabela 37 - Valores de E_{abs} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ	113
Tabela 38 - Valores de E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ	115
Tabela 39 - Comparação dos três adesivos com valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para θ	116
Tabela 40 - Comparação dos três adesivos com valores de E_{abs}	116
Tabela 41 - Comparação dos valores de σ_y para os três adesivos em função de θ	117
Tabela 42 - Comparação dos valores de τ_{xy} para os três adesivos em função de θ	117

Tabela 43 - Valores da E_{abs} para o adesivo AV138 em função do parâmetro α	125
Tabela 44 - Valores de E_{abs} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α	127
Tabela 45 - Valores da E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α	129
Tabela 46 - Comparação dos três adesivos com valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para α	130
Tabela 47 - Comparação dos três adesivos com valores de E_{abs} para α	130
Tabela 48 - Comparação de σ_y em função de α para os três adesivos.	131
Tabela 49 - Comparação de τ_{xy} em função de α para os três adesivos.	131

LISTAS DE SIGLAS E SÍMBOLOS

Lista de Siglas

ARCAN	<i>Notched Plate Shear Method</i>
CDM	<i>Continuum Damage Model</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymers</i>
CLS	<i>Critical Longitudinal Strain</i>
CZM	<i>Cohesive Zone Models</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
DLJ	<i>Double Lap Joint</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FDM	<i>Finite Diference Method</i>
FFM	<i>Finite Fracture Mechanics</i>
GSIF	<i>Generalized Stress Intensity Factor</i>
IPP	Instituto Politécnico do Porto
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISSF	<i>Intensity of Singular Stress Fields</i>
MEF	Método dos Elementos Finitos
MPa	MegaPascal
SENB	<i>Single-Edge Notched Bending</i>
SERR	<i>Strain Energy Release Rate</i>
SIF	<i>Stress Intensity Factor</i>
SLJ	<i>Single Lap Joint</i>
TAST	<i>Thick Adherent Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
TLJ	<i>Tubular Lap Joint</i>
XFEM	<i>eXtended Finite Element Method</i>

Lista de Símbolos

b	Largura da Junta	mm
d	Distância entre a ponta da fenda e o nó atrás dela	mm
E	Módulo de <i>Young</i>	MPa
G	Módulo de Corte	MPa
G_{Ic}	Taxa de libertação de energia à tração	N/mm
G_{IIc}	Taxa de libertação de energia ao corte	N/mm
L	Comprimento	mm
L_0	Comprimento do Adesivo	mm
t_A	Espessura do Adesivo	mm

t_n	Tensão de rutura à tração	MPa
t_s	Tensão de rutura ao corte	MPa
t_p	Espessura do Aderente Base	mm
ν	Coefficiente de Poisson	-
ρ	Densidade do Material	Kg/m ³
σ_c	Tensão de corte	MPa
σ_{ced}	Tensão de cedência	MPa
σ_{cr}	Tensão de rotura ao corte	MPa
σ_r	Tensão de rotura	MPa
μs	microsegundo	μs
ms	milissegundo	ms
s	segundo	s
kN	kilo newton	kN
J	Joule	J

1. INTRODUÇÃO

1.1. Contextualização

As ligações adesivas, aplicadas cada vez mais nas mais variadas indústrias, como a aeronáutica, automóvel, eletrônica e até militar, vêm sendo cada vez mais uma alternativa aos métodos de ligação convencionais nos projetos de engenharia, nomeadamente as ligações aparafusadas e soldadas, trazendo consigo grandes vantagens às estruturas onde vão ser aplicadas, mas também desvantagens intrínsecas dos adesivos. Estas ligações permitem uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo do adesivo e reduzem a concentração local destas e permitem a união de diferentes materiais, os substratos, dentro da estrutura. Este tipo de união permite conceber ainda estruturas mais leves e, por isso, mais económicas. Além disso, as propriedades dos materiais constituintes dos adesivos permitem que estes se adaptem às superfícies irregulares, as rugosidades, dos aderentes. Contudo, as ligações adesivas apresentam também algumas desvantagens, uma vez que são pouco resistentes a esforços de arrancamento e necessitam que seja aplicada temperatura e pressão para que finalize o processo de cura do adesivo e este atinja as propriedades finais desejadas para o conjunto.

Os estudos que têm sido realizados pelas indústrias aeronáuticas, automóvel e pelos centros de investigação permitem conhecer melhor o comportamento das uniões adesivas quando solicitadas pelos agentes externos, nomeadamente os esforços aplicados e/ou fatores ambientais circundantes e, assim, prever o seu comportamento através de simulação e modelos de previsão.

Existem, atualmente, muitos métodos para prever a resistência de uma ligação adesiva. Os métodos analíticos convencionais permitem conhecer o comportamento das juntas adesivas no seu limite linear elástico, descartando o comportamento plástico ou, tornando o cálculo bastante complexo. Assim, quando a complexidade dos estudos para determinar o estado de tensão numa junta adesiva sob determinadas condições aumenta, torna-se inviável a aplicação de métodos analíticos de estudo, adotando-se os métodos numéricos, nomeadamente o método dos elementos finitos (MEF).

1.2. Objetivos

Este trabalho de dissertação consiste no estudo numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de impacto. Nele, são desenvolvidos os temas das ligações adesivas, realizando-se uma introdução histórica sobre os adesivos e os fundamentos para a sua aplicabilidade nas mais variadas indústrias modernas, bem como a descrição e classificação dos adesivos estruturais, passando pelas configurações típicas de juntas adesivas e as tendências de futuro que os adesivos têm para os ramos industriais.

Posteriormente são abordados os métodos de previsão de resistência, dando ênfase aos métodos de análise numérica e diferenciando-se as solicitações estáticas e dinâmicas, ambas sempre com o foco centrado numa abordagem numérica. Por fim, são estudadas em detalhe as juntas adesivas tubulares, onde serão a base para decidir as propriedades do material e geometria para o desenvolvimento futuro da dissertação.

1.3. Metodologia

O objetivo desta dissertação centra-se no estudo numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de impacto. Numa primeira abordagem, é realizada a validação da técnica numérica com recurso a *software* de modelação ABAQUS® por comparação com um modelo experimental, utilizando-se essa mesma metodologia numérica para realizar o estudo da influência das variáveis geométricas principais, L_0 e t_p , bem como para as alterações geométricas, nomeadamente a introdução de θ , α , e β .

1.4. Estrutura do relatório

Neste relatório é possível encontrar o conteúdo dividido em três capítulos principais, cada um deles repartido em subcapítulos que representam parte essencial na sua estrutura.

O primeiro capítulo é iniciado com a introdução ao trabalho, que compreende a contextualização para a realização do mesmo, os objetivos e a descrição da metodologia adotada para a sua elaboração, bem como uma descrição da estrutura da dissertação.

No segundo capítulo, dividido em três subcapítulos, é realizado o levantamento bibliográfico sobre do tema a desenvolver. No primeiro subcapítulo é abordado o tema das ligações adesivas, fazendo-se uma análise acerca deste tipo de ligações, o seu enquadramento e fundamento, o que são adesivos estruturais, as configurações típicas de junta e seus ramos de aplicação. No segundo subcapítulo são abordados os métodos de previsão de resistência. Neste, são estudadas as solicitações estáticas e as solicitações dinâmicas, sempre com foco na abordagem numérica. Nas solicitações estáticas são abordados os temas da mecânica dos meios contínuos, a mecânica da fratura, o modelo de dano coesivo (CZM), a mecânica do dano e o método dos elementos finitos estendido (XFEM). Nas solicitações dinâmicas são abordados os temas da fadiga, a taxa de deformação variável e impacto, a análise modal entre outros modelos. Por fim é apresentado o estado de arte tanto para as solicitações estáticas quer para as solicitações dinâmicas. No terceiro subcapítulo são abordadas as juntas adesivas tubulares em particular, como a sua contextualização e aplicação, geometrias e considerações de fabrico e ensaio e as considerações de modelação numérica bem como é apresentado o estado de arte sobre este tipo de junta.

No terceiro e último capítulo são discutidas as conclusões finais obtidas durante a realização do trabalho assim como as limitações sentidas.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo é elaborada a revisão bibliográfica acerca das ligações adesivas, dos métodos de previsão de resistência e das juntas adesivas tubulares.

2.1. Ligações adesivas

Desde os primórdios da história, a humanidade junta e desenvolve materiais para produzir utensílios úteis. Para aumentar a sua eficiência, muitos componentes pré-históricos, e até aos mais modernos, exigiam a montagem e união de vários elementos entre si, muitas vezes envolvendo materiais diferentes. As pontas de pedra forneciam massa para flechas, cujas hastes de madeira forneciam força e rigidez leves, que por sua vez eram equipadas com penas montadas na cauda para manter a estabilidade em voo. Cestos tecidos podiam reter água quando selados com alcatrão ou outras resinas naturais. Seja amarrando com fibras naturais, ou selando com resinas ou gomas, a humanidade sempre esteve envolvida na união de diversos materiais [1].

Com a modernização dos métodos de união, a variedade de tipos de uniões mecânicas aumentou, para incluir uma ampla gama de métodos, como a soldadura, as ligações aparafusadas e o uso de adesivos, para manter os componentes unidos. A união oferece a capacidade de ter estruturas muito maiores comparativamente aquelas fabricadas como uma única entidade. Ao combinar vários materiais, a estrutura resultante adquire características úteis de cada constituinte, muitas vezes tornando a estrutura final com características finais muito melhores. De fato, mesmo a vida na Idade da Pedra teria sido muito diferente sem o uso de uma variedade de métodos de união. Os fixadores mecânicos facilitam a inspeção: um rebite solto ou ausente pode ser facilmente visto e reparado, por exemplo. No entanto, fixadores mecânicos e soldaduras não são práticos em muitas aplicações. Um dos fatores-chave é simplesmente que a perfuração de um furo induz concentrações de tensão que enfraquecem os componentes a serem unidos. De facto, os componentes precisam ser mais espessos para suportar as tensões mais altas impostas pelos furos, especialmente furos carregados associados a fixadores mecânicos de suporte de carga [1].

2.1.1. Enquadramento dos tipos de ligação

Em engenharia mecânica conhecem-se comumente vários tipos de elementos de ligação. Estas ligações permitem a montagem de dois ou mais componentes entre si, criando um elo de ligação comum entre eles, formando elementos cada vez mais complexos, desde uma subestrutura simples até uma estrutura final complexa. Estas ligações podem subdividir-se em dois grandes grupos: as ligações permanentes e as ligações não-permanentes ou móveis. As ligações permanentes não permitem a desmontagem dos componentes ligados, enquanto as ligações móveis permitem que os componentes da união sejam separados sem causar dano aos componentes por ligados. É o caso das ligações feitas por parafusos, porcas e arruelas. As suas aplicações dependem do contexto do projeto e da sua aplicação e devem ser dimensionados e usados com muita habilidade uma vez que são, geralmente, os componentes mais frágeis de uma máquina. Na Tabela 1 estão resumidas as características, as vantagens e desvantagens das uniões permanentes e móveis, enquanto que na Tabela 2 estão caracterizados elementos de fixação móveis.

Tabela 1 - Ligações permanentes e móveis.

Tipo de Ligação	Característica	Vantagem	Desvantagem
Ligações permanentes	Permitem a desmontagem.	Maior continuidade na distribuição de tensões.	Desmontagem leva ao dano dos componentes.
Ligações móveis	Não permitem a desmontagem.	Permite que a ligação seja alvo de revisão.	Maior concentração de tensões.

Tabela 2 - Caracterização dos diferentes elementos de ligação.

Ligação	Aplicação	Características
Rebite	Fixação permanente de duas ou mais peças.	Formado por uma cabeça e um corpo cilíndrico.
Pino	União de peças articuladas.	Uma das peças pode se movimentar por rotação.
Cavilha	Une peças articuladas entre si.	Não permite a rotação das peças.
Contrapino ou Cupilha	Colocado num furo de um pino ou porca em castelo por forma a evitar desaperto durante a vibração.	É uma haste dobrada por forma a ter uma cabeça e duas pernas desiguais.
Parafuso e Porca	Talvez o tipo de ligação mecânica mais usado na indústria. Permitem a união de componentes através da ligação parafuso-arruela-porca.	O parafuso é formado por um corpo cilíndrico roscado e uma cabeça que pode assumir várias formas. A porca possui várias formas e é geralmente sextavada, com um furo central roscado.
Arruela	Dependendo do tipo, distribuem melhor a carga no Parafuso, usadas como espaçador ou dispositivo de bloqueio e para reduzir vibrações.	Disco metálico com um furo no centro.
Anel elástico	Usado para impedir o deslocamento de eixos ou limitar o movimento de uma peça sobre um eixo.	Anel metálico com uma abertura que é acoplada a uma ranhura.
Chaveta	Geralmente é aplicada para transmitir potência entre veios.	Tem um corpo em forma prismática ou cilíndrica com faces paralelas ou inclinadas em função do esforço que vai transmitir. Pode ser vista como elemento de fixação ou de potência.

Outros tipos de união de materiais também amplamente utilizadas nas mais diversas indústrias são as ligações soldadas e, claro, as ligações adesivas. Na Tabela 3 estão resumidas as características e aplicações destes tipos de união.

Tabela 3 - Caracterização das ligações soldadas e adesivas.

Tipo de Ligação	Aplicação	Características
Soldadura	Este tipo de união é aplicado desde pequenos componentes eletrónicos até grandes estruturas como carros, pontes e navios e construção civil.	É um processo de união permanente para materiais metálicos. Caracteriza-se pela fusão quase imediata e seguida pela solidificação dos materiais e está disponível numa ampla gama de técnicas e para diferentes tipos de materiais.
Adesiva	Este tipo de ligação é largamente aplicado desde dispositivos eletrónicos até às indústrias aeronáuticas, automóvel e naval e até mesmo militar.	Caracteriza-se pela união de dois componentes, designados substratos, por um adesivo.

2.1.2. Fundamentos das ligações adesivas

Os adesivos funcionam principalmente pelo processo de adesão e coesão. A adesão é a atração entre moléculas ou átomos de diferentes substâncias resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas. Já a coesão é a atração entre moléculas ou átomos da mesma substância. O adesivo é um material polimérico capaz de promover a união entre os substratos e com capacidade de resistir à sua separação através da combinação das forças adesivas e das forças coesivas. Os substratos correspondem aos componentes constituintes da junta a serem unidos. Quando os substratos se unem forma-se o filete, que representa a porção de adesivo que preenche o canto das extremidades da ligação. A montagem formada pelo adesivo, os substratos, o primário e a interfase associada é designada de junta adesiva [2]. Na Figura 1 encontra-se representada uma junta adesiva genérica.

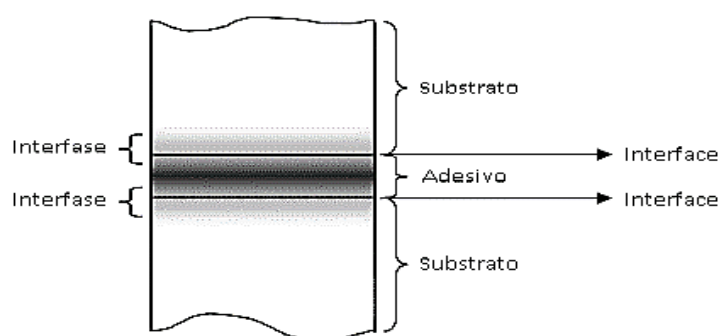


Figura 1 - Exemplo genérico de uma junta adesiva (adaptado de [3]).

Devido a restrições cada vez mais rigorosas, como ambientais e económicas por exemplo, várias indústrias procuram materiais leves, como o alumínio e compósitos. Sob estas condições, os adesivos oferecem algumas vantagens sobre outros métodos de união [4, 5]. Na Tabela 4 estão resumidas as vantagens e desvantagens das ligações adesivas.

Tabela 4 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas [2].

Vantagens	Desvantagens
Fornecer grande área de suporte de tensão.	As superfícies devem ser cuidadosamente limpas.
Excelente resistência à fadiga.	Para atingir as propriedades desejadas, pode ser necessário um longo tempo de cura.
Amortece a vibração e absorve o choque.	Limitados quando operação contínua a altas temperaturas (180 °C).
Minimiza ou previne a corrosão galvânica entre materiais diferentes.	No processo de cura podem ser necessários calor e pressão.
Une todas as formas e espessuras.	Podem ser necessários equipamentos como gabaritos e acessórios, que custam dinheiro.
Proporciona contornos suaves.	Pode ser necessário controlo de processo rígido.
A ligação adesiva pode combinar-se com diferentes tipos de materiais.	A inspeção da junta acabada é difícil.
Muitas vezes possui um custo mais baixo e são mais rápidos de realizar que a fixação mecânica.	Vida útil depende do meio ambiente.
Quando necessário, o calor não afeta os materiais aderentes.	Para construção da junta adesiva, é necessário ter em consideração o meio ambiente, saúde e segurança.
Possui uma boa relação peso-resistência.	Muitas vezes é necessária a formação do operador.

2.1.3. Adesivos estruturais

Segundo Cognard [6], a família de adesivos estruturais são os epóxicos, os poliuretanos, os fenólicos, as poliamidas e os acrílicos. Para outros autores, como Dillard [7], há ainda os silicones que podem ser classificados como sendo um adesivo estrutural de acordo com a composição química. Segundo Habenicht [8], os adesivos devem ser classificados como compostos orgânicos, por possuírem carbono constituinte das resinas. O carbono permite que outros elementos químicos se liguem a ele. Essa valência permite, em química, que diversas pontes de ligação sejam feitas com outros elementos químicos, formando cadeias diferentes, como as cadeias lineares, reticuladas ou anulares, sendo possível conceber adesivos diferenciados e com características mecânicas distintas [8]. Na Tabela 5 estão resumidas as características, vantagens e desvantagens dos adesivos estruturais.

Tabela 5 - Classificação dos adesivos estruturais [6, 7, 9].

Adesivo	Características	Vantagens	Desvantagens
Epóxido	Possuem boa resistência química, produzem poucas substâncias voláteis durante a cura e apresentam baixos valores de retração.	Aderem bem a uma ampla gama de materiais como metais, cerâmicas e a maioria dos polímeros, incluindo termoplásticos.	O mecanismo de cura requer temperaturas e misturas precisas de resina e endurecedor, uma vez que isso afeta a cura e faz perder propriedades.
Poliuretano	Adesivo em sistema de duas partes. Cura por processo de difusão.	Aderem a vários tipos de materiais como plásticos, vidro, pedra e metais. Produzem juntas resistentes ao impacto.	O processo de cura é relativamente lento.
Acrílico reativo	Adesivo em sistema de duas partes, nomeadamente uma resina viscosa e um ativador.	O processo de cura é rápido. Permite que os componentes sejam preparados minutos antes da montagem final.	São algo propensos a fissuras.
Acrílico temperado	Possuem alta resistência, e são mais flexíveis do que muitos epóxicos. A cura ocorre por química dos radicais livres.	Cura relativamente rápida. Precisam de pouca preparação de superfície e aderem bem a uma ampla gama de plásticos.	Exibem níveis de retração alto durante a cura o que leva à alteração das propriedades mecânicas.
Acrílico anaeróbico	Presentes na forma líquida de baixa viscosidade, pastas e sistemas tixotrópicos. Quando o oxigênio é removido, o processo de cura é melhor.	Possuem uma ampla gama de resistência a viscosidades diferentes. Podem ser endurecidos o que fornece resistência ao impacto.	Possuem uma taxa de cura bastante lento.
Ciano acrilato	Curam com a fina película de humidade que absorvem nas superfícies a serem coladas. Solidificam em segundos.	Aderem bem em materiais não porosos como plásticos e borrachas.	Cura requer que humidade da superfície seja neutra ou alcalina. Suscetíveis à fluência em temperaturas elevadas.
Fenólicos	São intensivamente utilizados na indústria aeronáutica.	Disponíveis em várias formas de aplicação. Mantêm uma boa integridade estrutural.	Libertam água durante a cura o que exige calor para remover a água.

Poliâmidas	São mais aplicados nas indústrias militar e aeroespacial.	Estáveis a temperaturas elevadas. Possível melhorar estabilidade térmica com partículas inorgânicas.	Perdem drasticamente a sua resistência térmica quando aplicados com metais como prata ou níquel no caso de adesivos condutores.
Silicone	Disponíveis em sistema de mono e bi-componente.	São flexíveis e funcionam bem a uma ampla gama de temperatura.	Processo de cura gera álcool ou ácido acético.

2.1.4. Configurações típicas de junta

As juntas adesivas caracterizam-se pelo tipo de união dos substratos. A seleção do tipo de junta a ser usada numa aplicação de engenharia tem de ter em conta dois fatores essenciais: o desempenho mecânico da junta e o seu custo de produção [11]. Na Figura 2 estão representadas as configurações de junta mais utilizadas.

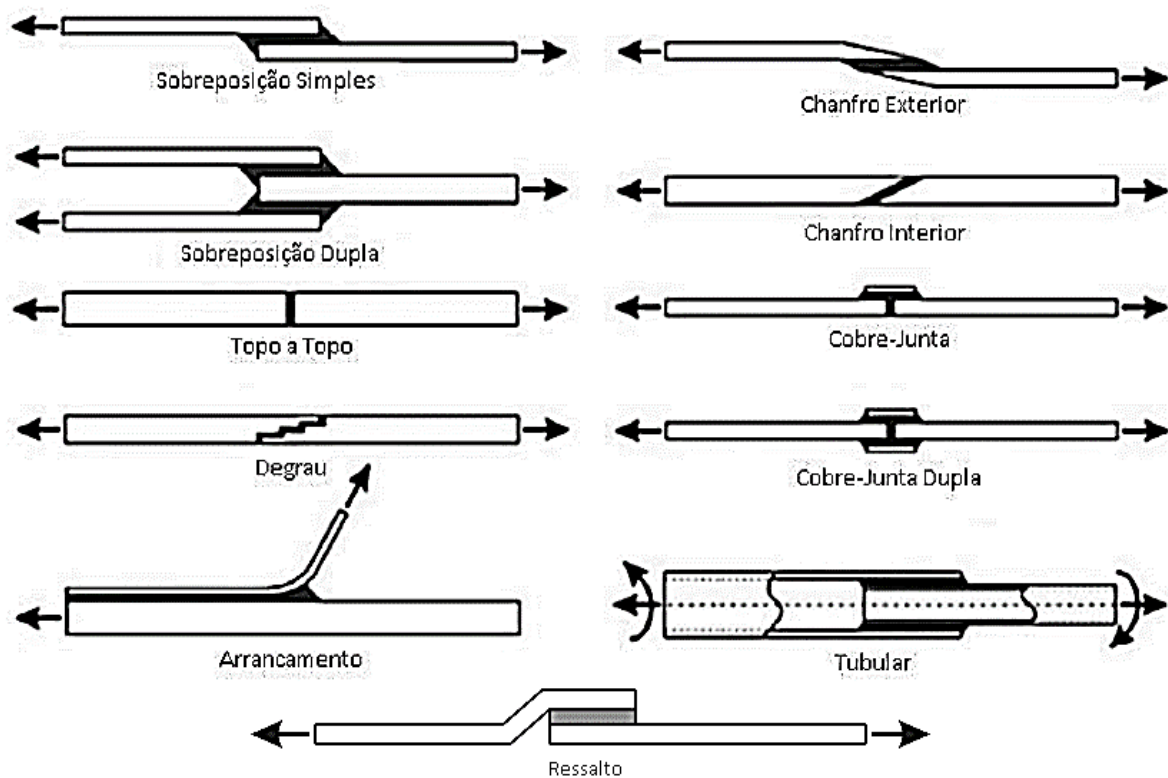


Figura 2 - Configurações típicas de junta (adaptado de [10]).

2.1.5. Ramos de aplicação

A aplicação de adesivos estruturais é extensa. Materiais metálicos, compósitos, plásticos e vidro precisam de adesivos estruturais, enquanto papel, embalagens, as artes gráficas e produtos sensíveis à pressão usam adesivos não estruturais, baseados em matérias-primas bastante diferentes materiais e técnicas [6]. Na Figura 3 está representado um avião Airbus A380 com indicação de vários constituintes colados na sua estrutura.

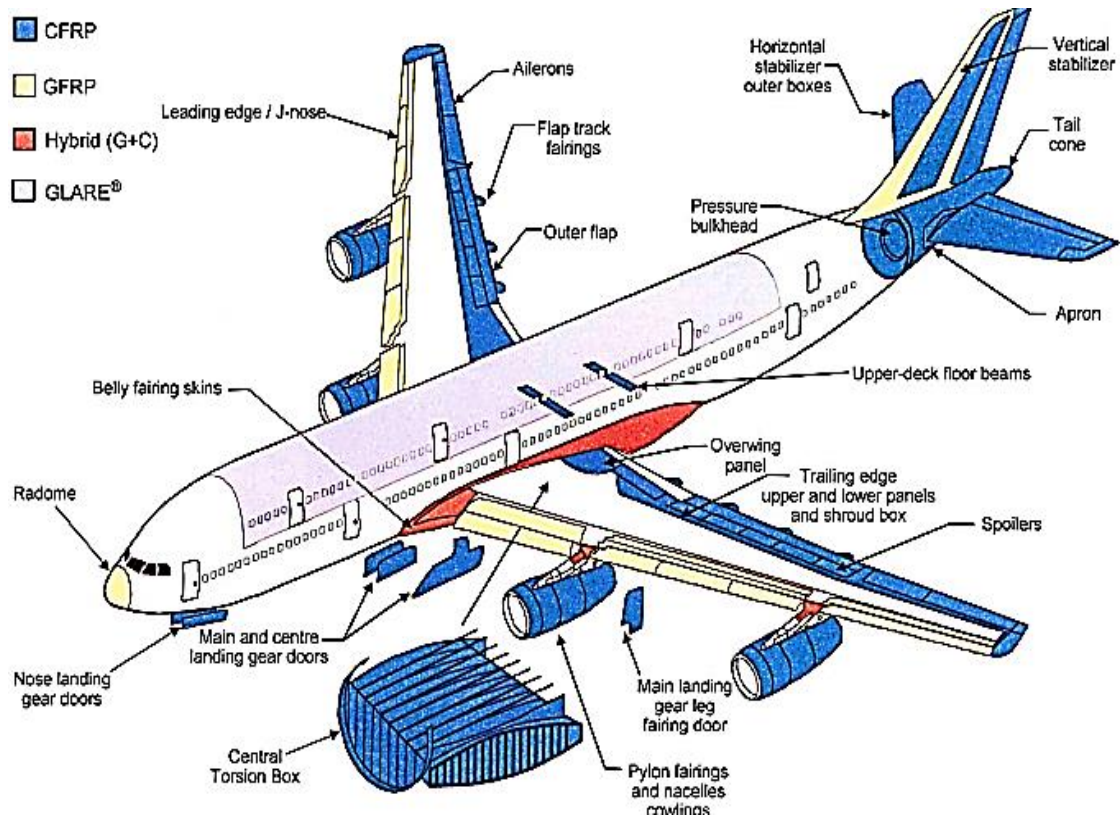


Figura 3 - Airbus A380 com materiais compósitos e peças ligadas com adesivos [6].

Os componentes eletrônicos, como mostrado na Figura 4, são tão pequenos que precisam apenas de mini gotículas de adesivos de fixação rápida para sua montagem e, embora cada peça de equipamento use apenas gramas (ou menos) de adesivos, quando multiplicados pelo enorme número de unidades produzidas, resultam num mercado muito significativo em termos monetários [6].

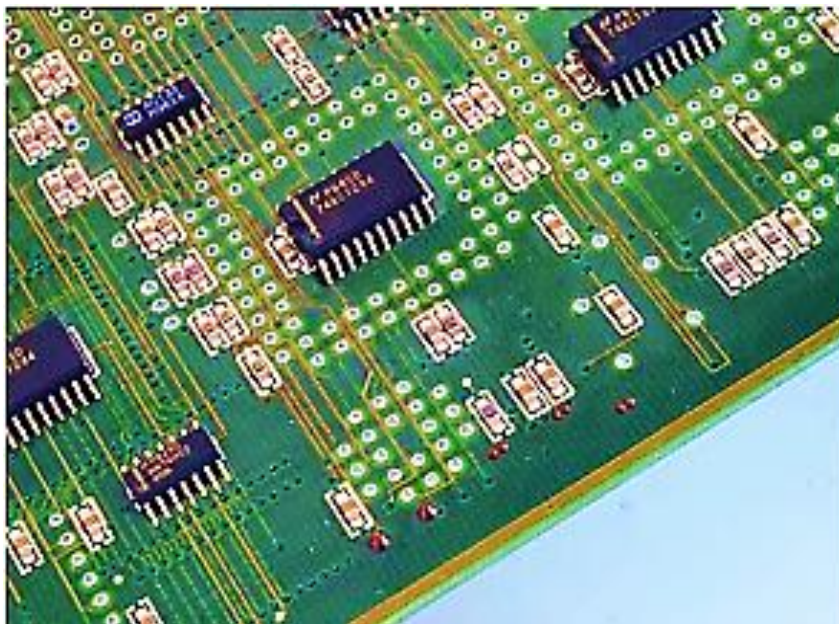


Figura 4 - Extensão da tecnologia adesiva à indústria eletrotécnica [6].

2.1.6. Tendências de futuro

Devido ao uso cada vez maior de adesivos e métodos de união associados em todas as áreas da indústria, muitas novas oportunidades e desafios existem para serem explorados. De particular interesse são as áreas relacionadas com novos materiais, como os compósitos e os nanomateriais, as áreas das tecnologias verdes, como os materiais naturais ou os pré-tratamentos ecológicos, a medicina, em dispositivos biônicos e ortética, na eletrônica, como a microtecnologia e a optoeletrônica, e mais exigentes aplicações estruturais em setores como aeroespacial, automotivo ou construção. Várias estratégias incluem a adição de nano-materiais ao adesivo para melhorar a adesão, a resistência e a força. Foi demonstrado que a adição de partículas de argila nanométrica em adesivos epóxido melhora significativamente o desempenho do adesivo em aplicações estruturais. A TWI® (*Joint Industry Projects*) desenvolveu um tal processo chamado *Comeld™*, para produzir uma junta graduada para suavizar a transição entre materiais diferentes, que utiliza tecnologia de feixe de energia para pré-tratar o metal na superfície e no volume de forma a formar macro características que podem interagir mais extensivamente dentro do layout de um compósito, permitindo assim uma transferência de carga maior e mais direcionada [11]. Nos campos da microtecnologia e da optoeletrônica, os adesivos geralmente oferecem a única maneira de unir componentes de diferentes materiais onde os efeitos do calor podem afetar criticamente o desempenho. Adesivos funcionais estão a ser desenvolvidos para ter propriedades correspondentes, a condutividade térmica, por exemplo, a uma determinada aplicação. Em eletrônica de consumo, adesivos curados de baixa viscosidade UV, estão a ser explorados para fabricar discos de DVD de camada dupla. A ligação adesiva faz uso extensivo de compostos sistemas de pré-tratamento, especialmente no setor aeroespacial, sendo que formas de pré-tratamentos alternativos para adesivos que funcionarão sem a necessidade de um pré-tratamento estão a ser desenvolvidos [11]. Para conhecer melhor o comportamento dos adesivos sob condições de carregamento dinâmico, novos estudos de fadiga e ao impacto têm de ser feitos. Consequentemente, o comportamento modal das juntas adesivas também precisa ser estudado para garantir que suas condições de trabalho estão fora das frequências ressonantes e avaliam suas capacidades de amortecimento [5].

2.2. Métodos de previsão de resistência de juntas adesivas

Neste capítulo pretende-se efetuar um estudo com o intuito de descrever e comparar os mais relevantes métodos para a previsão de resistência de juntas adesivas. Esses métodos podem ser divididos em métodos analíticos e numéricos. Em seus estudos que remontam ao ano de 1938, Volkersen [12], conseguiu um grande avanço no estudo de juntas adesivas. Ele parte do princípio que os materiais se comportam apenas elasticamente e que a deformação do adesivo ocorre apenas ao esforço de corte. Porém, esta abordagem torna-se mais complexa quando o adesivo se deforma plasticamente, quando os aderentes são materiais compósitos ou de materiais diferentes. Assim, o MEF, introduzido por Harris e Adams [13], torna-se o método mais utilizado. Estes métodos incorporam fatores como rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência do Filete. Para determinar as propriedades mecânicas dos adesivos são utilizados os testes experimentais. O módulo E , as tensões σ_{ced} e σ_r são obtidas carregando provetes de adesivos maciços. Para o módulo G , as tensões σ_c e σ_{cr} existe o teste TAST (*Thick Adherent Shear Test*), o teste ARCAN (*Notched Plate Shear Method*) e o *Napkin Ring Test*.

Para a obtenção das propriedades ao corte os testes ARCAN e o *Napkin Ring Test* são melhores, por possuírem tensão de corte constante ao longo do comprimento do adesivo e razão de triaxialidade 0, isto é, tensão de corte puro. Para determinar o G_{Ic} em modo I (*Critical Strain Energy release rate*) ou a taxa de libertação de energia de deformação crítica, vários testes podem ser empregados como o DCB (*Double-Cantilever Beam*), o TDCB (*Tapered Double-Cantilever Beam*) e o SENB (*Single-Edge Notched Bending*) [4].

2.2.1. Solicitações estáticas

As solicitações estáticas consistem na interação de uma junta adesiva a uma força externa a ela, em que a junta está sujeita a taxas de deformação muito baixas. São elas as solicitações por tração, compressão e de corte.

2.2.1.1. Mecânica dos meios contínuos

Os modelos da mecânica dos meios contínuos são utilizados, juntamente com uma análise MEF, para estudar e determinar as tensões máximas, a deformação e as energias de deformação ao longo da espessura média da camada adesiva e assim realizar a previsão de resistência da junta [4, 14].

Os critérios de previsão utilizados são a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o projeto de uma junta adesiva, esses valores são calculados e posteriormente comparados com os valores admissíveis inerentes aos materiais, estimando-se assim a resistência da ligação. Na análise de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [12], que considera que o adesivo entra no domínio plástico apenas sob esforço de corte. Assim, considera-se a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [15] usaram o critério da tensão principal máxima obtida por meio do MEF para prever a resistência de juntas adesivas, obtendo bons resultados. Para estes autores, a dimensão da malha utilizada na análise MEF é, devido à existência de singularidade de tensões nas extremidades de L_0 , um aspeto importante na análise das tensões e das deformações. Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados próximos dos obtidos experimentalmente [16]. Contudo, esses critérios podem, por não terem em consideração as concentrações de tensões em entalhes e ranhuras assim como a presença de defeitos no adesivo, ser bastante complexos sem que a previsão seja realista. De acordo com Harris e Adams [13], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda poderá suportar deformações elevadas antes da rotura final [4].

2.2.1.2. Mecânica da fratura

A mecânica da fratura é capaz de avaliar as particularidades das tensões ou deformações causadas por descontinuidades nos materiais que apresentam defeitos, como as fendas por exemplo, causadas por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento assumindo, assim, que estes não têm necessariamente um meio contínuo [4].

Outros fatores que propiciam a propagação dessas fendas são a aplicação de cargas lentas, por impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda deformações dependentes do tempo [17].

Em teoria, existe uma particularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180°. Essa particularidade aplica-se à singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Embora deixem de existir superfícies livres, a descontinuidade de tensões continua, nesses casos, a existir. Assim, a mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, estes defeitos se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. Os conceitos tradicionais da mecânica da fratura usados para determinar a propagação de fissuras incluem o SIF (Fator de Intensidade de Tensão) e a SERR (Taxa de Libertação de Energia de Deformação), que estão relacionados. Em condições de carregamento de modo misto e deformação plana, a relação é expressa pela expressão (1) [4]:

$$G = K_I^2 \frac{1-\nu^2}{E} + K_{II}^2 \frac{1-\nu^2}{E} \quad (1)$$

Sendo que K_I e K_{II} são os fatores SIF no modo I e II, respetivamente.

Existem várias técnicas para determinar o SIF ou o SERR, incluindo a J-integral [4, 18] ou a Técnica de Fechamento Virtual de Fenda [4, 19]. Em sua forma mais simples, uma integral de linha, a integral J , é definida pela seguinte expressão (2):

$$J = G = \int_{\Gamma} \left(w_{n1} - T_i \frac{dv_i}{dx} \right) d_s \quad (2)$$

Sendo Γ qualquer caminho a começar numa face da fissura e terminando na outra face da fissura, n o vetor unitário normal a esse caminho e W é dado pela expressão (3):

$$W = \frac{1}{2\sigma_{ij}\varepsilon_{ij}} \quad (3)$$

Sendo T_i dado pela expressão (4):

$$T_i = \sigma_{ij}n_{ij} \quad (4)$$

A técnica de fechamento virtual permite determinar o SERR relacionando as forças (F) na extremidade da fenda com os deslocamentos (u) no nó da fenda atrás dela pela seguinte fórmula (5):

$$G = \frac{Fu}{2bd} \quad (5)$$

Sendo b a largura da junta e d a distância entre a ponta da fenda e o nó atrás dela.

Leguillon [20] introduziu o critério de tensão-energia, atualmente designado *Finite Fracture Mechanics* (FFM), e foi usado em vários trabalhos de pesquisa realizados. Este critério é capaz de determinar o início da fissura e não requer a existência de um defeito inicial. Para iniciar uma fissura, um critério energético e um critério de tensão devem ser satisfeitos [4].

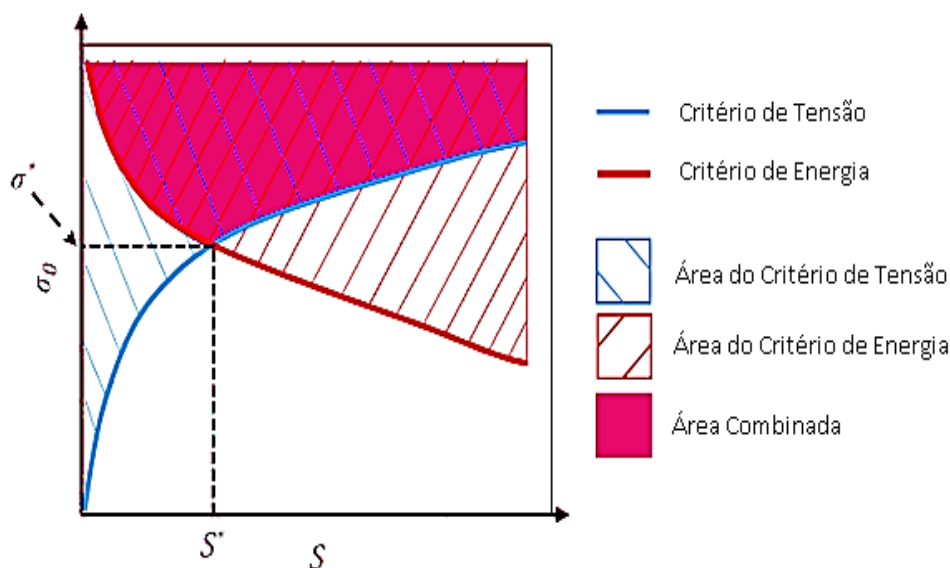


Figura 5 - Aplicação do critério de Leguillon (adaptado de [4, 20]).

O critério energético fornece um limite inferior para a iniciação da fissura, enquanto o critério de tensão fornece um limite superior. Este critério só é aplicável quando são utilizados adesivos frágeis. Para juntas do tipo *Single Lap Joint* (SLJ) coladas com adesivos frágeis, este critério foi capaz de avaliar com sucesso a influência de L_0 e da espessura de adesivo (t_A) na resistência da junta [21, 22], descobrindo que a resistência da junta aumentou com a diminuição de t_A e aumento de L_0 . A FFM também foi capaz de prever a força de juntas do tipo *Double Lap Joint* (DLJ) e de juntas de topo com precisão aceitável [23]. Em 2015, a FFM foi utilizada para determinar a correlação entre a rigidez do adesivo, rigidez do aderente e a t_p , e a resistência da junta para juntas do tipo SLJ [24]. Esta previu que o aumento da rigidez do adesivo não significava um aumento da resistência da junta, mas um aumento da rigidez do aderente e da t_p resultava num aumento notável da resistência da junta. O efeito do comprimento do aderente também foi estudado, mantendo-se constante L_0 , mostrando que aumentando L_0 resulta em diminuição da resistência, atingindo um valor constante para maiores de L_0 [4].

2.2.1.3. Modelos de dano coesivo

O conceito de modelo de dano coesivo (CZM) para estudar danos e propagação de fissuras em juntas adesivas tem sido muito estudado nos últimos anos [4], tendo tido início nos estudos de Barenblatt [25] para analisar fissuras em materiais frágeis e Dugdale [26] para estudar o escoamento em chapas de aço contendo fissuras. Estes autores deram início a métodos mais refinados para caracterizar danos em estruturas, ao descreverem o dano na zona de processamento da fratura na frente da fenda sob efeito de cargas estáticas. Estes modelos possibilitaram a análise do início de uma fenda e a sua propagação no interior ou na interface dos materiais ou, no caso dos materiais compósitos, da sua delaminação. Como demonstrado na Figura 6, o CZM pode ser implementado em elementos de mola ou, por convenção, em elementos coesivos [27].

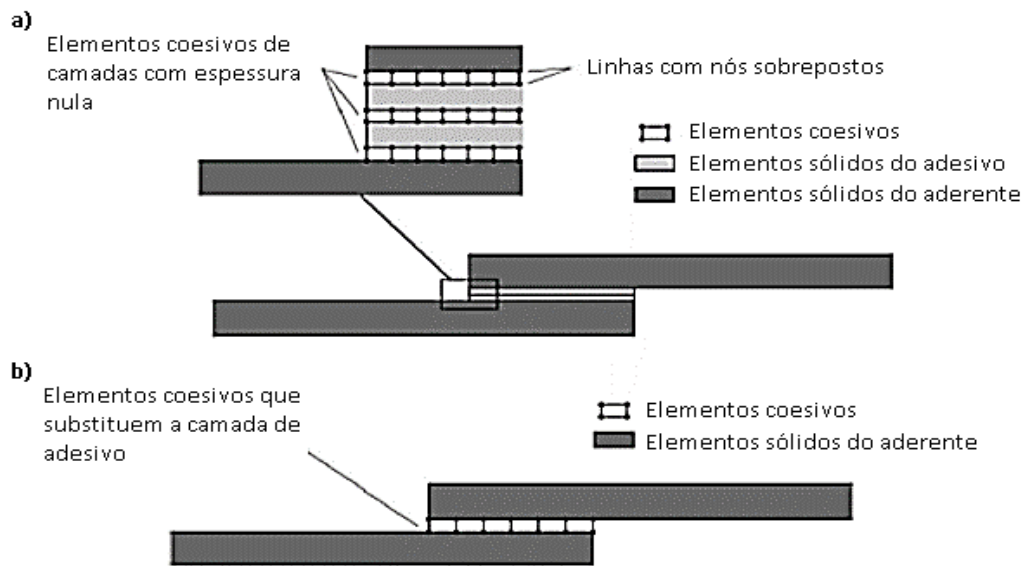


Figura 6 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [4, 28].

O CZM pode ser incorporado em *softwares* de análise MEF para, assim, simular o comportamento dos materiais sujeitos à fratura [29]. A vantagem do CZM reside no facto de ser possível introduzir zonas de propagação de dano em estruturas, para assim se poder avaliar o crescimento desse dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. Ao estabelecer leis coesivas de tração-separação modela-se interfaces ou regiões finitas. Essas leis coesivas são aplicadas entre os nós dos elementos coesivos correspondentes, e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou, no caso compósito, diferentes camadas (a aproximação local) [30], ou diretamente aplicadas entre dois materiais para simular uma camada de material fino, por exemplo para simular uma ligação adesiva (aproximação contínua) [31].

2.2.1.4. Mecânica do dano

A Mecânica do dano é capaz de simular a degradação progressiva do material constituinte do adesivo, o que significa que este perde progressivamente a sua rigidez até atingir um ponto crítico de falha, onde cede por completo. Esta abordagem é capaz de determinar caminhos de fissuras arbitrárias ao contrário do modelo CZM, onde o caminho de fissuração é predeterminado pelos elementos coesivos [3].

As variáveis na Mecânica do Dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constituintes dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [32]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [33] ou do número de ciclos para análises de fadiga [34, 35]. Comparativamente aos CZM e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos CZM, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [36].

2.2.1.5. Método de elementos finitos estendido

O método dos elementos finitos estendido (XFEM) teve a sua origem nos trabalhos de Moës et al. [37] que através do desenvolvimento de um método baseado no MEF com um campo de deslocamentos enriquecido perto da falha. Este método é baseado na partição da unidade, que foi proposto pela primeira vez por Melenk e Babuška [38]. A aplicação deste método às juntas adesivas é recente, tendo sido empregado pela primeira vez aos problemas da mecânica geral da fratura. A principal vantagem do XFEM é que a propagação da fissura é independente da malha. O *software* de modelação numérica ABAQUS® permite prever o início da fissura com diferentes critérios. Existem, atualmente, seis critérios disponíveis. Nos critérios de tensão principal máxima (MAXPS) e deformação principal máxima (MAXPE), a fissura propaga-se na direção perpendicular à tensão principal máxima e quando a expressão (6) ocorre [5]:

$$1 = \left\{ \frac{\sigma_{m\acute{a}x}}{\sigma_{m\acute{a}x}^0} \right\} \text{ ou } 1 = \left\{ \frac{\varepsilon_{m\acute{a}x}}{\varepsilon_{m\acute{a}x}^0} \right\} \quad (6)$$

Onde $\sigma_{m\acute{a}x}^0$ é a tensão principal máxima admissível e $\varepsilon_{m\acute{a}x}^0$ é a deformação principal máxima admissível, sendo ambas características do material [5].

Nos critérios de tensão máxima (MAXS) e deformação máxima (MAXE) a fissura propaga-se horizontal ou perpendicularmente, definida pelo simulador, e inicia-se quando os critérios representados pelas expressões (7) [5]:

$$1 = \text{m\acute{a}x} \left\{ \frac{t_n}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \text{ ou } 1 = \text{m\acute{a}x} \left\{ \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\} \quad (7)$$

Onde t_n e t_s são as tensões normais e de corte, ε_n e ε_s representam as deformações normais e de corte e ε_n^0 e ε_s^0 são as deformações normais e de corte máximas permitidas [5].

Os critérios tensão quadrática (QUADS) e a deformação quadrática (QUADE) também promovem a propagação da fissura de forma horizontal ou perpendicular, sendo essa propagação definida pelo simulador, e a iniciação da fissura é definida pelas expressões (8) [5]:

$$1 = \left\{ \frac{t_n}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \text{ ou } 1 = \left\{ \frac{\varepsilon_n}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2 \quad (8)$$

Assim que o adesivo é danificado, de acordo com um dos critérios mencionados, esse dano progride através de um elemento, o que reduz progressivamente a sua capacidade de transportar a carga, seguindo, assim, uma lei de amolecimento do material, que relaciona a tração e a separação [5].

2.2.1.6. Estado-da-arte

Na Tabela 6 estão resumidos três casos de estudo efetuados e publicados em artigos científicos e publicados recentemente que aplicam os conceitos das juntas adesivas sob condições de carregamento estático.

Tabela 6 - Estudos recentes de juntas adesivas sob condições de carregamento estático.

Referência bibliográfica	Descrição do trabalho
<i>The theory of critical distances [18]</i>	<p>Neste trabalho são mostradas quatro abordagens diferentes, todas as quais usam L em conjunto com uma análise linear elástica: dois desses métodos são baseados em tensão, enquanto os outros dois são baseados em intensidade de tensão. O primeiro método é o método do ponto, onde uma análise de tensão elástica é realizada e a falha é considerada se a tensão for igual à tensão de cedência do material a uma certa distância do entalhe. O segundo método é o método da linha, onde a tensão é determinada pela média ao longo de uma linha a começar na raiz do entalhe. O terceiro método é o método da fissura imaginária, derivada da mecânica da fratura, onde imagina-se que existe uma fissura na raiz do entalhe e prevê-se que a falha ocorra quando a falha atingir a intensidade de tensão crítica. O quarto método é o da FFM, onde a condição de falha é derivada usando um balanço energético, mas assumindo uma quantidade finita de extensão da falha. Existe uma base mecânica firme para o FFM: este método assume que o crescimento da fissura não é suave e contínuo, mas ocorre de maneira descontínua, por meio de uma série de saltos, cujo tamanho é determinado pela microestrutura e comportamento de deformação do material. Conclui-se que os processos de fratura em materiais geralmente envolvem uma escala de comprimento característica, que é revelada em dados que mostram o efeito das concentrações de tensão, como fissuras e entalhes. A escala de comprimento L, definida em termos de tenacidade e resistência à fratura do material (ou seus parâmetros equivalentes em fadiga), pode ser usada em conjunto com a análise de tensão linear elástica para fazer previsões precisas desses dados, permitindo dois métodos, o método de ponto e método de linha. Dois métodos de mecânica da fratura, o método da fissura imaginária e o FFM, usam a mesma escala de comprimento e alcançam previsões semelhantes, permitindo-nos agrupar esses quatro métodos dentro do TCD.</p>
<i>Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints [29]</i>	<p>Este trabalho assume que os substratos são linearmente elásticos durante todo o processo de teste de fratura. Estritamente, o material do adesivo não é considerado como sendo linear durante o ensaio. A integral J é utilizada para considerar a separação coesiva e a dissipação plástica na camada adesiva. Um total de seis grupos provetes foram utilizados com espessuras médias de adesivo diferentes, cada grupo com 5 provetes. Verificou-se que todos os substratos permaneceram no regime elástico durante todo o processo de teste sem qualquer deformação plástica. Isso indica que todas as dissipações de energia foram contribuídas por fratura coesiva e dissipações plásticas na camada adesiva. Pelo uso de uma câmara observou-se que uma zona de branqueamento apareceu perto da ponta da fissura inicial e se torna mais visível à medida que a carga aumenta. Quando muitas microfissuras se fundiram e formam uma macro fissura, a fissura inicial começa a propagar-se com o aumento contínuo da carga.</p>
<i>Failure load prediction of single lap adhesive joints based on a new linear elastic criterion [39]</i>	<p>Neste trabalho foi utilizado o critério linear elástico, em conjunto com uma análise MEF, para prever a falha de uma junta adesiva de sobreposição simples, com diferentes comprimentos de sobreposição e um adesivo epóxico bi-componente, sujeitas a uma carga estática. O método utilizado é baseado na deformação longitudinal específica ao longo do plano médio do adesivo. A falha ocorre quando a deformação longitudinal ao longo do plano médio do adesivo atinge um valor crítico a uma distância crítica específica. A deformação</p>

longitudinal crítica e a distância crítica são os dois parâmetros principais do critério, e são obtidos experimentalmente. Assim, dois provetes com diferentes comprimentos de sobreposição são testados para extrair as constantes CLS. Uma análise MEF 2D com as cargas de falha permite determinar as tensões longitudinais ao longo da camada média do adesivo e, assim, determinar os parâmetros críticos do CLS para serem utilizados numa nova junta. A carga de rutura do provete é aquela que leva o provete a atingir os parâmetros críticos do CLS.

2.2.2. Solicitações dinâmicas

As solicitações dinâmicas são as aquelas cujo carregamento efetuado sob a junta é variável no decorrer do tempo da sua aplicação sob a estrutura. A análise numérica dinâmica foi dividida em três grupos principais: a fadiga, a análise modal e a taxa de deformação variável e impacto.

2.2.2.1. *Fadiga*

Mostovoy e Ripling [39] iniciaram nos anos 70 do século XX a aplicação de métodos numéricos para estudar a fadiga em juntas adesivas. Estes estudos permitiram que atualmente hajam três abordagens distintas para estudar a fadiga em juntas adesivos: a mecânica dos meios contínuos, a mecânica da fratura e os modelos CZM [5].

A mecânica dos meios contínuos é a abordagem mais simplista e permite uma primeira estimativa da resistência da junta. A sua utilidade permite determinar as regiões da junta com maior concentração de tensões ou simplesmente observar como as deformações se distribuem ao longo da junta. Esta estimativa é feita através do cálculo das tensões e das deformações no adesivo, em juntas sem considerar qualquer evolução do dano ou critério de propagação da falha. Existem ainda modelos que utilizam o critério energético. No trabalho de Esmaili et al. [40] existe uma comparação de diferentes modelos para juntas sujeitas à fadiga, considerando os critérios de fadiga nos aderentes de alumínio, que indicou que uma pré carga aumentou a vida da junta. O modelo SWT [41] (Smith-Watson-Topper) utilizado por Shahani e Pourhosseini [42] mostrou um erro máximo de 25% para um nível de carga de falha de 60%, o que indica que as previsões ficaram abaixo à vida experimental recomendada para o projeto. Wu et al. [43] combinaram a mecânica dos meios contínuos para determinar o início da fissura e a mecânica da fratura para determinar o crescimento da fissura após a iniciação. Os autores usaram o modelo MCB (Mason-Coffin-Basquin) para prever a resistência de juntas de sobreposição simples com diferentes L_0 e filetes de adesivo, concluindo que para L_0 menores poderá corresponder a mais ciclos para iniciar a fissura. A estes modelos acrescentam-se ainda a teoria das distâncias críticas proposta por Taylor [44], que identificou vários modelos que tentaram prever a resistência à fadiga baseada na tensão a uma distância crítica fixa [5].

A mecânica da fratura é utilizada para estudar a vida útil à fadiga de uma junta adesiva sujeita à fadiga com base no crescimento da fissura. O crescimento da fissura à fadiga pode ser estudado usando o fator de intensidade de tensão [45] (SIF) ou o seu equivalente, designada taxa de libertação de energia de deformação [46] (SERR). O SERR é mais utilizado do que o SIF e existem várias maneiras de o determinar. Chen et al. [47] previu a resistência de juntas em U calculando o SERR usando a integral J com auxílio do MEF e relacionando esse SERR com o SERR obtido em juntas de sobreposição simples e juntas em T. As previsões indicaram uma durabilidade da junta,

na zona de alto ciclo, superior à da vida experimental, mas muito próximas nas regiões de baixo ciclo. Outra forma de determinar o SERR é utilizar a técnica virtual de fechamento da fenda. Pascoe et al. [48] combinaram testes experimentais e numéricos para o efeito da espessura do adesivo sob carregamento à fadiga no modo I em ensaios DCB. Os autores concluíram que à medida que a fenda cresce, a espessura do adesivo não afetou o SERR de forma significativa, sendo que o SERR diminui para uma constante imposta pelo deslocamento e que a zona plástica e, por sua vez, a energia de deformação plástica aumenta. Outro estudo permitido pela mecânica da fratura é o das singularidades decorrentes dos cantos multimateriais afiados, através do cálculo do fator de intensidade de tensão generalizada (GSIF) e também conhecido como intensidade de campos de tensão singulares (ISSF). Estudos revelaram que o ISSF é independente da espessura do adesivo, mas são necessários mais testes para provar a universalidade desse fato [5].

Os modelos CZM são o método mais utilizado para a previsão de resistência de juntas adesivas sujeitas à fadiga. Os modelos CZM são uma técnica híbrida, que combina a teoria da mecânica dos meios contínuos e da mecânica da fratura, baseando-se na introdução de um propósito especial (os elementos coesivos) nos modelos dos caminhos de fratura especificados para promover o crescimento da falha em fadiga. Os modelos CZM definem uma lei coesa que relaciona uma certa tensão e deslocamento com o dano, sendo que o dano varia entre 0 (sem dano) e 1 (falha total) e, à medida que o dano aumenta, as propriedades do material degradam-se. Existem diversos tipos de leis coesivas classificadas quanto à sua forma que podem ser aplicadas, mas a mais comumente utilizada é a lei triangular, uma vez que é implementada em *software* MEF comercial. Contudo, a lei triangular não é indicada para adesivos frágeis, como muitos adesivos modernos são. Assim aplica-se a estratégia de simulação de ciclos, que não é mais do que aplicar uma carga constante à junta e considerar que ela foi aplicada num determinado número de ciclos degradando as propriedades mecânicas da junta. Assim consegue-se simular uma carga dinâmica e prever a resistência da junta sujeita à condição de fadiga [5].

2.2.2.2. Taxa de deformação variável e impacto

A taxa de deformação variável envolve comportamento dinâmico e requer integração numérica explícita. Atualmente, os estudos da taxa de deformação variável e impacto são divididos na mecânica dos meios contínuos, na mecânica do dano e nos modelos CZM [5].

A mecânica dos meios contínuos é utilizada para avaliar as tensões e as deformações em juntas adesivas. Existem ainda autores que utilizam esses dados para realizar um estudo da força aplicada, mas esses estudos apresentam a dificuldade acrescida, que é a singularidade nos cantos de interface presente na maioria das juntas adesivas. No entanto, em simulação numérica, esta abordagem é mais fácil de programar. Sob condições de carga de impacto, a tensão propaga-se como uma onda, o que leva a vários picos de tensão locais ao longo do adesivo. A Figura 7 representa a simulação em *software* Abaqus® da distribuição das tensões ao longo da distância do adesivo em função do tempo. Neste caso, a falha ocorre nas extremidades do adesivo, onde são atingidos os picos de tensão [5].

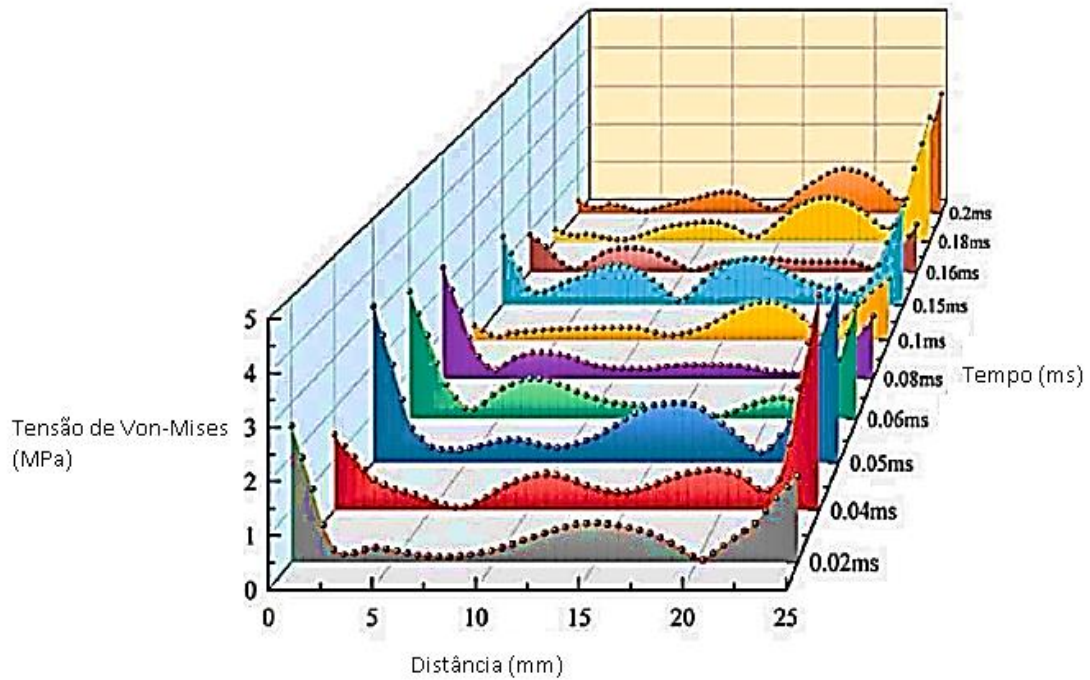


Figura 7 - Distribuição das tensões ao longo do adesivo em função do tempo (adaptado de [5, 49]).

A mecânica do dano é uma técnica que permite a simulação da degradação progressiva do material até à falha final através de um caminho arbitrário. Os estudos numéricos, realizados por Gollins et al. [50], foram capazes de prever com precisão a resistência ao impacto, quando comparados com os estudos experimentais [51], para diferentes velocidades de impacto e dois adesivos com diferentes módulos de Young, diferentes tensões de rendimento dinâmico e diferentes taxas de deformação plástica à fratura. Os autores concluíram que as juntas adesivas foram capazes de absorver mais energia e suportar cargas mais altas [5]. A diferença na energia absorvida é particularmente alta, como mostra a Figura 8.

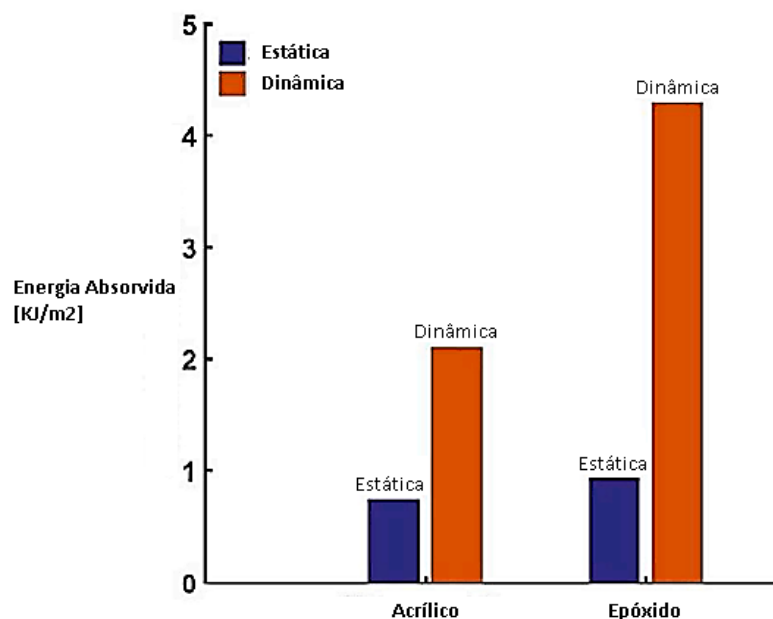


Figura 8 - Energia absorvida em modo estático e dinâmico para dois adesivos (adaptado de [5, 51]).

Os modelos CZM são, tal como no estudo à fadiga, os modelos mais comumente utilizados para estudar e prever a resistência de juntas adesivas sujeitas ao impacto. Em condições de impacto, os CZM são utilizados de maneira semelhante ao carregamento em modo estático, sendo que as propriedades utilizadas para definir as leis coesivas são dependentes da taxa de deformação. Assim sendo, os testes de caracterização de adesivos devem ser realizados sob diferentes taxas de deformação, pelo que as propriedades mecânicas extraídas em modo estático não são aplicáveis em modo de impacto (dinâmico). Assim, é importante definir e modelar corretamente as propriedades CZM. Quanto aos testes de caracterização, os testes DCB são utilizados para determinar as propriedades dinâmicas em modo I, enquanto os testes ENF são utilizados para determinar as propriedades no modo II. Estes testes apenas variam entre si na taxa de deformação. Muitos autores realizam testes em duas velocidades de carregamentos diferentes, e em seguida efetuam uma extrapolação logarítmica para obter as propriedades no modelo numérico, significando que as propriedades permanecem as mesmas durante toda a simulação. Este método não é o ideal, pois os polímeros apresentam variações nas propriedades mecânicas. Outros autores efetuam uma abordagem mais complexa, onde uma lei logarítmica é definida e as propriedades coesivas são atualizadas a cada passo de tempo de acordo com a taxa de deformação atual. Geralmente, as únicas propriedades CZM que são afetadas pelas taxas de deformação são t_n e t_s , que tendem a aumentar com o aumento da taxa de deformação, enquanto G_I , G_{II} , E e G não mudam com a taxa de deformação [5].

2.2.2.3. *Análise modal*

Outra necessidade de estudo para a previsão da resistência de juntas adesivas são as frequências de trabalho dos adesivos. A previsão precisa de frequências de vibração natural e formas de modo correspondentes é altamente relevante para garantir que as condições de trabalho das juntas adesivas estão fora das frequências naturais, o que pode levar a falhas prematuras. Além disso, os adesivos têm propriedades de amortecimento, reforçando a importância e necessidade dessas investigações. Os primeiros trabalhos focados na análise modal de juntas adesivas consistiam em modelos analíticos, como demonstram os trabalhos Saito e Tani [52] e os trabalhos de Rao e Crocker [53], para juntas SLJ, e os trabalhos de Miles e Reinhall [54] para duas camadas de metal coladas com um adesivo. Os modelos analíticos de análise modal ainda são comumente utilizados e desenvolvidos, e são frequentemente validados pelo MEF. Os modelos analíticos são, geralmente, mais rápidos de processar do que o MEF, porém, não são tão versáteis, e um determinado modelo analítico só é aplicável a um conjunto restrito de juntas, enquanto o MEF é aplicável a qualquer tipo de juntas. Nos trabalhos de Basri et al. [55] foram utilizados trabalhos experimentais e uma abordagem numérica para determinar as frequências naturais de uma estrutura compósita, constituída por um chapéu e uma placa coladas. Numa primeira abordagem, tanto o chapéu como a placa foram testadas separadamente, e as previsões numéricas apresentaram um erro máximo de 11%. Posteriormente, o modelo foi atualizado com base no teste inicial e o erro foi reduzido a um máximo de 4%. Por fim, toda a estrutura completa foi testada e, separadamente, um estudo paramétrico foi realizado, para avaliar a influência de vários parâmetros do modelo. As frequências naturais da estrutura foram calculadas com um erro máximo de 3% ao usar os parâmetros ajustados. Os modos das formas da estrutura previstas numericamente e experimentalmente estão representadas na Figura 9.

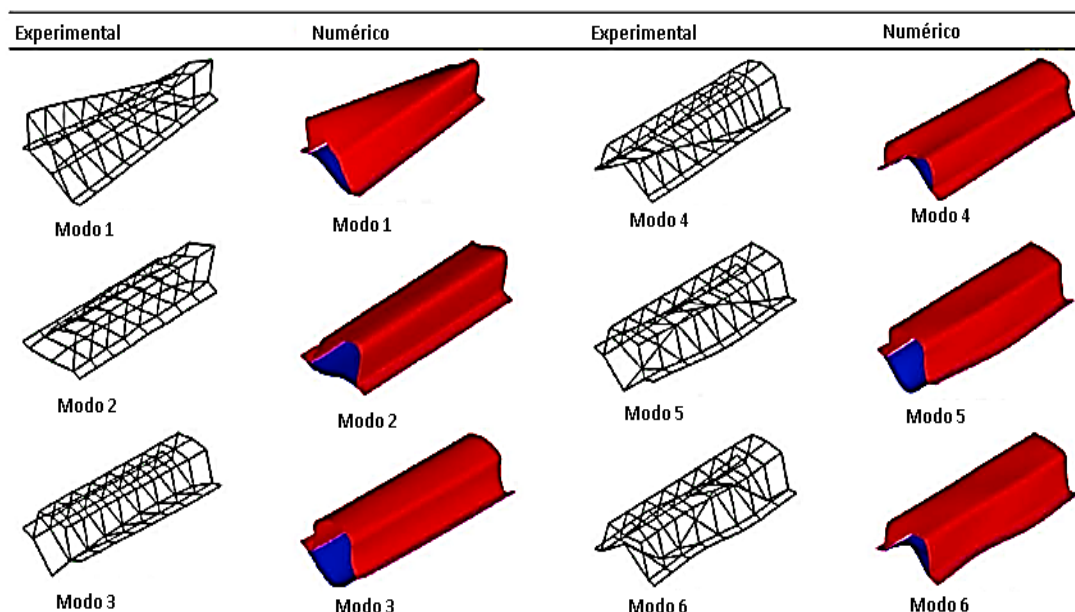


Figura 9 - Formas da estrutura nos diferentes modos (adaptado de [5, 55]).

A variação de parâmetros geométricos e/ou a variação das propriedades mecânicas também podem ser utilizadas para determinar as frequências naturais de vibração. É o caso do estudo de Apalak et al. [56] que, no seu trabalho numérico, demonstrou que mudanças nas propriedades mecânicas como o módulo (E), o coeficiente de Poisson (ν) e a densidade (ρ) não alteram as frequências naturais de forma significativa e que o mesmo se verifica quando se varia t_n . Quando se varia a forma geométrica dos substratos, esta resulta numa alteração considerável das frequências de vibração, que aumentaram para t_p maiores e diminuíram para t_p menores [5].

2.2.2.4. Estado-da-arte

Na Tabela 7 estão resumidos três casos de estudo que aplicam os conceitos da modelação sob condições dinâmicas.

Tabela 7 - Estudos de modelação sob condições dinâmicas.

Referência Bibliográfica	Descrição do trabalho
<i>Fatigue life estimation of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints using several multiaxial fatigue criteria [48]</i>	Neste trabalho é realizado um estudo de fadiga sobre o efeito do binário de aperto sobre juntas aparafusadas simples e híbridas com diferentes cargas longitudinais cíclicas. Um código ANSYS de elementos finitos não lineares foi usado para obter a distribuição das tensões e deformação nas placas da junta devido ao torque de aperto do parafuso e às cargas longitudinais aplicadas. A fadiga dos provetes foi prevista com seis diferentes critérios de fadiga multiaxial por meio da distribuição local da tensão e da deformação obtida a partir da análise de elementos finitos. De acordo com os resultados obtidos no ensaio dos provetes constituídos por uniões aparafusadas simples e uniões híbridas, as juntas híbridas apresentaram melhor vida à fadiga em comparação com as uniões aparafusadas simples. Aumentar o binário de aperto ou a força de fixação na junta leva a um aumento da resistência à fadiga das juntas aparafusadas de sobreposição dupla. À medida que o binário de aperto aumenta, grande parte da carga é transmitida por fricção, e o resto é transmitida por rolamento, o que explica a melhoria à fadiga. As tensões negativas em redor do

parafuso devido à compressão das placas ajudam a melhoria na vida à fadiga. Tais tensões negativas podem reduzir a quantidade total de tensões resultantes que causam iniciação e propagação de fissuras por fadiga na placa devido às cargas externas de aplicadas. Além disso, nas juntas híbridas não ocorre contato metálico direto entre as placas; portanto, a possível fadiga por atrito é eliminada.

Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings [57]

Neste trabalho foi realizado um estudo 3D MEF para juntas de sobreposição dupla de substratos compósitos semelhantes, sob cargas *quasi*-estáticas e de impacto, para estudar a influência geométrica e do material na distribuição de tensões de corte na camada de adesivo. A heterogeneidade estrutural ou geométrica independente do tempo. A diferença não muda de *quasi*-estática para caso de impacto. Pelo contrário, a heterogeneidade devido aos efeitos da propagação das ondas de tensão era muito alta no início da simulação e desaparece em alguns microssegundos. Apenas os efeitos estruturais influenciaram o estado de tensão na junta adesiva. Portanto, resultados próximos foram obtidos para casos *quasi*-estáticos e de impacto. Para o mesmo deslocamento imposto, a tensão de corte média foi aumentando com o aumento de t_p , E do adesivo e da fração volumétrica das fibras dos substratos. Foi diminuindo com o aumento de t_A e L_0 . Por outro lado, o coeficiente de homogeneidade aumentou com o aumento de L_0 e de E do adesivo. Foi diminuindo com o aumento de t_A e substratos e fração de volume de fibra.

Analytical and Experimental Study of the Vibration of Bonded Beams with a Lap Joint [59]

Neste trabalho é abordado um modelo teórico para estudar a vibração de flexão de um sistema de juntas sobrepostas. Primeiro, as equações de movimento na região da junta são derivadas matematicamente usando uma abordagem de cálculo diferencial. Os deslocamentos transversais da viga superior e inferior são considerados diferentes. O adesivo é considerado linearmente viscoelástico e o modelo Kelvin-Voigt é usado para representar esse comportamento. A força de corte na interface adesivo-viga é obtida a partir das equações simples do movimento de flexão das duas vigas. As equações de movimento resultantes são combinadas com as equações de vibração transversal das vigas nas regiões não unidas. Estes são posteriormente resolvidos como um problema de valor de contorno para obter os autovalores e autovetores do sistema. O modelo pode ser usado para prever as frequências naturais, taxas de amortecimento modal e formas de modo do sistema para vibração livre.

2.3. Juntas adesivas tubulares

Neste capítulo é abordado de forma genérica o tema relativo às juntas adesivas tubulares.

2.3.1. Contextualização de ligações tubulares

As ligações tubulares têm imensa expressão nos mercados industriais atuais. As ligações tubulares são constituídas por dois tubos unidos por um método elemento de união. O perfil tubular pode assumir diversas formas, desde secção quadrada, retangular ou cilíndrica, como mostra a Figura 10.

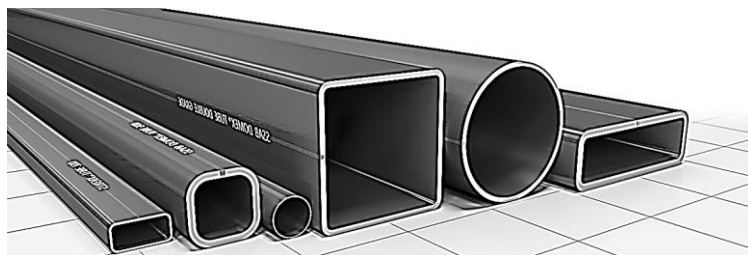


Figura 10 - Exemplos de perfis tubulares [58].

Do ponto de vista estrutural, a utilização de tubos como elemento principal conduz a estruturas arquitetónicas visualmente apelativas, como mostra a Figura 11.



Figura 11 - Estrutura tubular da estação Gare do Oriente, em Lisboa [59].

Este tipo de perfil oferece às estruturas tubulares resistência à compressão, tração, flexão e torção. Numa união adesiva, este tipo de união consiste em dois substratos em forma cilíndrica de diferentes diâmetros, ou cobre-junta, unidos por um filme de adesivo [60]. Como as juntas adesivas tubulares apresentam elevada relação resistência-peso, e capacidade de unir diferentes substratos, e com baixa espessura, é vantajoso usar estas juntas, em detrimento de outros tipos de ligações como elemento estrutural de ligação [60, 61]. Na Figura 12 está representada uma união adesiva tubular genérica.

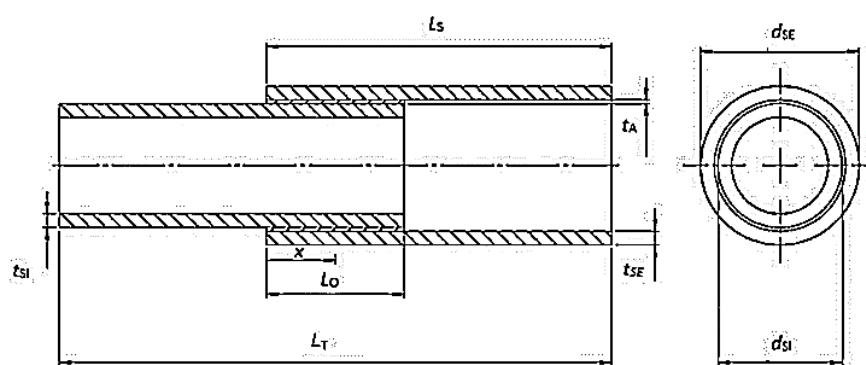


Figura 12 - Representação genérica de uma ligação adesiva tubular [62].

O carregamento pode ser axial ou de torção. No caso de a carga ser axial, há concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição, como em juntas de sobreposição com aderentes planos. No caso da torção, existe apenas o efeito de deformação diferencial [62].

2.3.2. Aplicações de juntas tubulares

As juntas adesivas tubulares são muito utilizadas em várias indústrias, como a do petróleo, da energia, nomeadamente do gás, no setor das águas, no setor automóvel, no setor aeronáutico, no setor da construção civil e até mesmo no setor aeroespacial. Nestas indústrias, são efetuadas as ligações dos perfis tubulares, o que lhes confere redução de peso estrutural, uma boa relação resistência/peso e capacidade para resistir à corrosão [62]. Na Figura 13 mostra a indústria aeronáutica, onde os adesivos são utilizados para unir estruturalmente a fuselagem dos aviões.

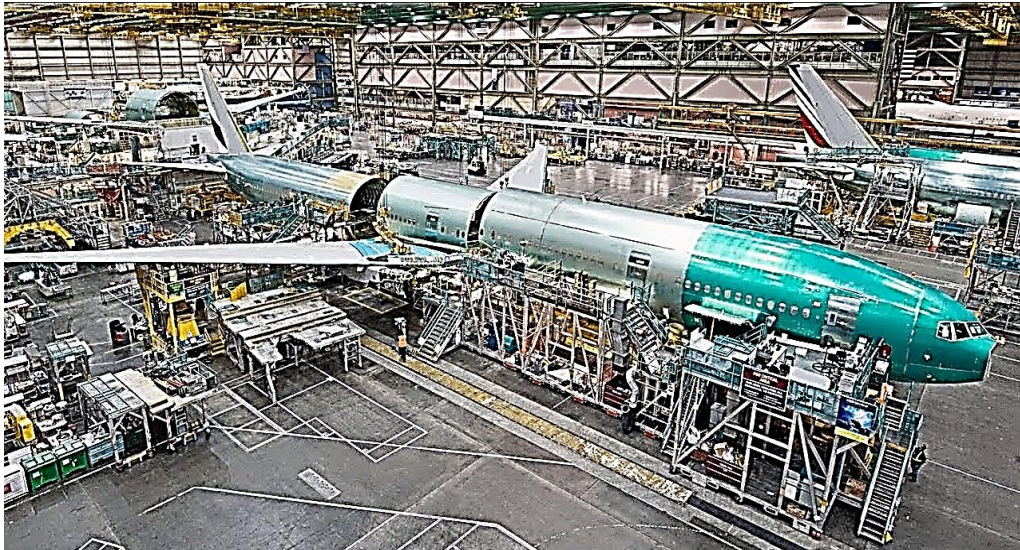


Figura 13 - Aplicação das juntas adesivas tubulares às fuselagens dos aviões [63].

2.3.3. Geometrias de juntas tubulares

Na Figura 14 estão representadas algumas configurações de juntas cilíndricas que são usualmente utilizadas para barras e tubos. Estas soluções são vantajosas, uma vez que possuem uma área de fixação do adesivo maior comparativamente a outras configurações e, assim, menor concentração de tensão de corte. Contudo, a maior parte das configurações de juntas tubulares apresentadas requerem maquinação de preparação, o que torna o processo de fabrico dispendioso [72].

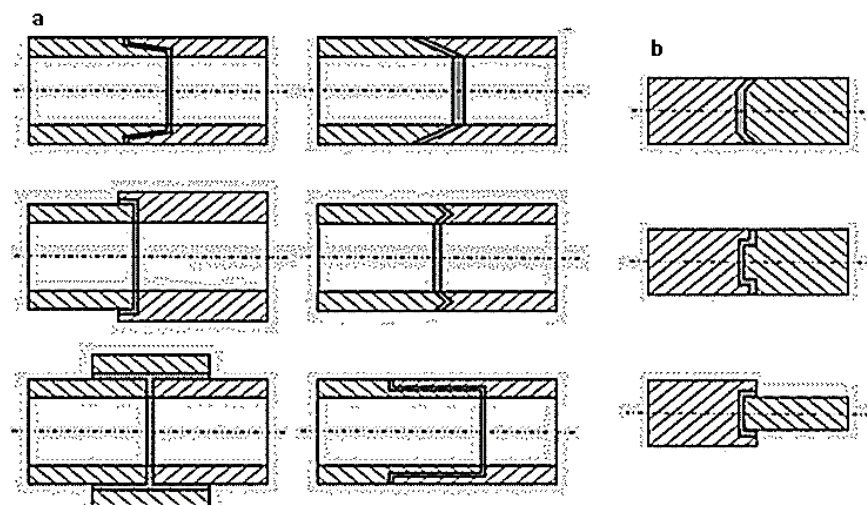


Figura 14 - Juntas cilíndricas comumente utilizadas: a) barras e b) tubos (adaptado de [2, 64]).

Na Figura 15 mostra uma junta adesiva tubular com *fillet* nos tubos constituintes dos substratos e sem *fillet*. Este *fillet* é conseguido através da maquinação dos substratos.

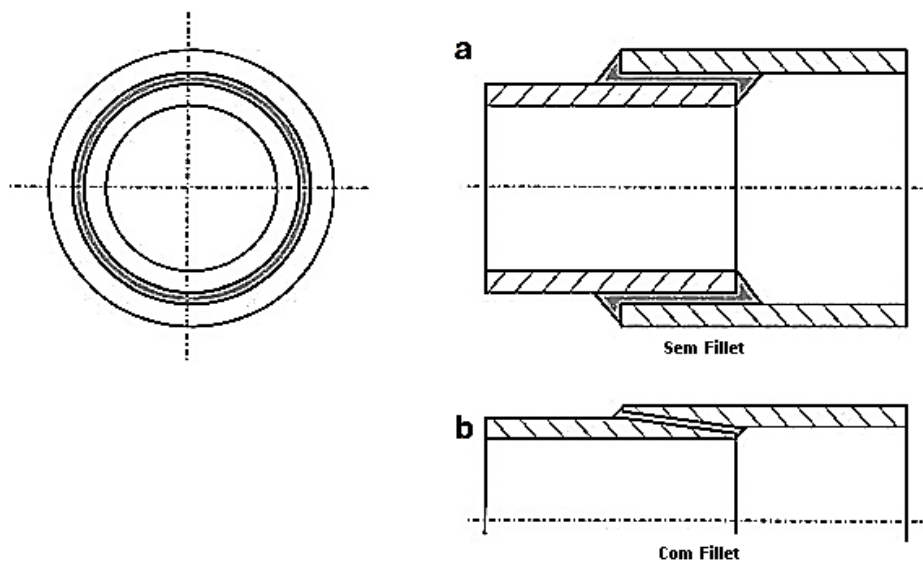


Figura 15 - Junta adesiva com extremidade quadrada (a) e com cone (b) (adaptado de [64]).

2.3.4. Considerações de fabrico e ensaio

Para construir uma junta adesiva, é recomendado maquinar o diâmetro dos tubos constituintes dos substratos pelo processo de torneamento até à cota final desejada para o tubo, através de várias passagens e, assim, obter a precisão e o acabamento superficial desejados. Além disso, de forma a melhorar o processo de colagem no caso dos tubos não passantes, é realizado um furo na zona não ligada do tubo exterior [62]. Este processo, representado na Figura 16, é imprescindível quando os furos dos tubos não são passantes, uma vez que eliminam pressão no seu interior que causaria mau posicionamento dos substratos durante o processo de fabrico.

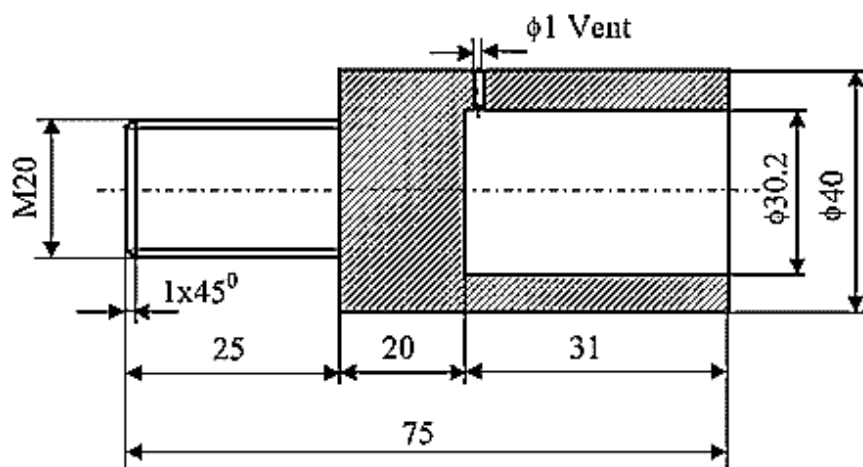


Figura 16 - Substrato tubular exterior com furo não passante [65].

2.3.5. Considerações de modelação numérica

Para a modelação numérica e previsão da resistência de juntas adesivas tubulares são utilizados *softwares* de modelação e simulação por computador, como é o caso do *software* ABAQUS®. Estes *softwares* permitem também analisar o comportamento das tensões nas diferentes etapas de carregamento. No caso das juntas tubulares, esta pode ser modelada em 2D para a análise das tensões ao corte ou de arrancamento, ou modelada em 3D, no caso de carregamento de torsão, por exemplo. No caso dos modelos 2D, representado na Figura 17, são utilizadas como formulações axissimétricas, isto é, apenas são representados o eixo de rotação e a secção da junta adesiva. Os substratos são modelados através de elementos sólidos que apresentam comportamentos elásticos e plásticos. O adesivo pode ser modelado com elementos idênticos para obtenção das distribuições de tensões ou previsão de resistência da junta por técnicas como a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura ou XFEM, ou com elementos coesivos no caso de modelação por CZM.

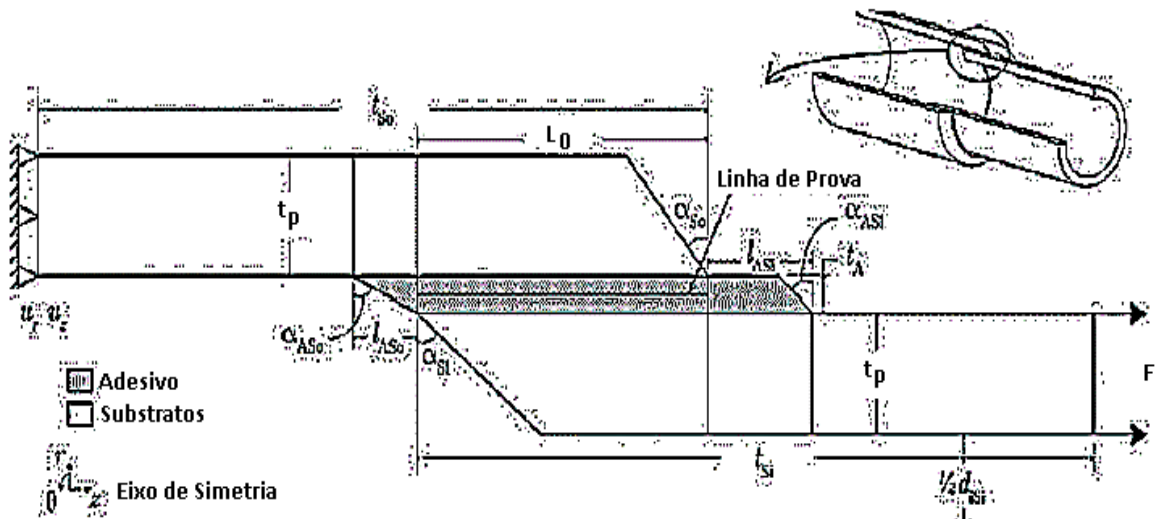


Figura 17 – Modelo tubular 2D de junta com parâmetros geométricos e carregamento (adaptado de [66]).

Numa análise 3D, os substratos e o adesivo podem ser modelados através de elementos sólidos tridimensionais usando a abordagem MEF. Para simular a rotura dos adesivos, é comum utilizar elementos coesivos, aplicando o modelo CZM triangular. Este modelo é particularmente apropriado para prever e estudar o comportamento das camadas finas de adesivo, na medida em que podem ser colocados elementos coesivos somente ao longo da camada de adesivo, ou em planos específicos dos substratos para simular roturas laminares, no caso de substratos em material compósito. No entanto, através do *software* ABAQUS®, pode também ser utilizado o XFEM, que é baseado no estabelecimento de funções de enriquecimento local para o dos deslocamentos perto extremidade da fenda e, assim, permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda. Este procedimento pode ser aplicado a todos os domínios do modelo (substrato e adesivo) ou só ao adesivo. Na Figura 18 está representada uma modelação 3D de uma estrutura tubular com a respetiva malha e em *zoom* da região de sobreposição.

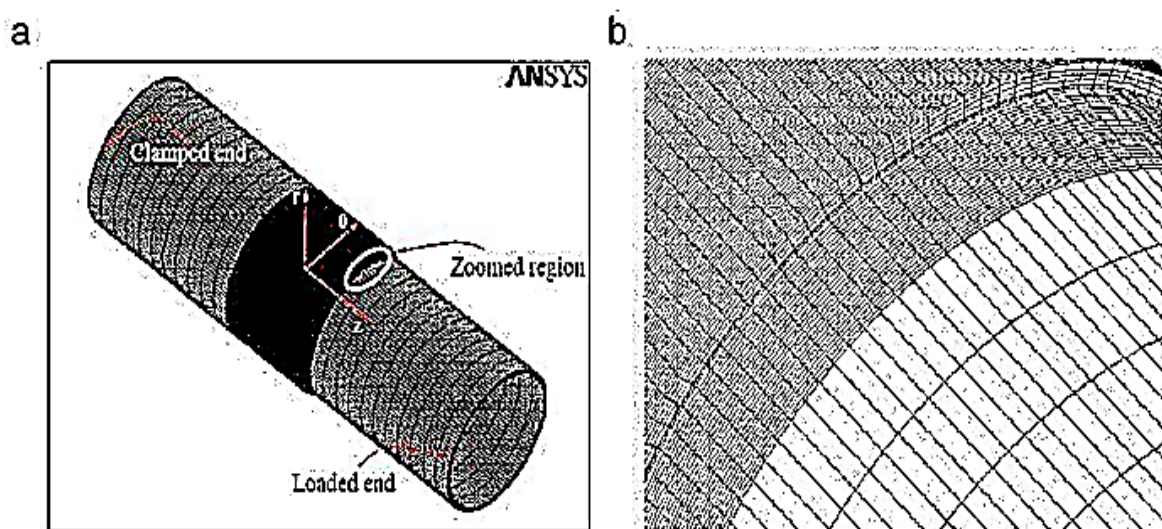


Figura 18 - Modelação 3D de uma malha tubular: (a) vista isométrica do modelo completo e (b) zoom da região de sobreposição [67].

2.3.6. Estado-da-arte

Na Tabela 8 estão representados estudos recentes e relevantes à modelação numérica de juntas adesivas tubulares.

Tabela 8 - Estudos sobre a aplicação de juntas adesivas tubulares.

Referência bibliográfica	Descrição do trabalho
<i>Numerical analysis geometrical modification combinations of the tensile strength of tubular adhesive joints [68]</i>	Este trabalho realizado visou estudar o desempenho de uma junta adesiva tubular à tração, com substratos de alumínio, unidos pelo adesivo Araldite® 2015. Foram considerados diferentes parâmetros geométricos, como chanfros e filetes na camada adesiva. Os resultados das juntas com filetes de adesivo nas extremidades apresentaram redução significativa nas tensões de corte (60%), mas que não se traduziu no aumento da resistência devido à plastificação dos substratos.
<i>Modelling of tubular adhesively bonded joints by the Extended Finite Element Method [60]</i>	O objetivo deste estudo foi determinar, através do XFEM, a resistência de juntas adesivas tubulares com diferentes L_0 sujeitas à tração. Os resultados mostraram um aumento da concentração de tensões com o aumento do L_0 . Para adesivos frágeis observaram-se incrementos de resistência inferiores comparativamente a adesivos mais dúcteis. O XFEM mostrou previsões inferiores aos resultados experimentais em adesivos extremamente dúcteis, como é o caso do SikaForce® 7752.
<i>Impact loading analysis of tubular adhesive joints [69]</i>	Neste estudo, foi simulada a resistência ao impacto de uma junta tubular, com substratos de alumínio AW6082-T651 unidos pelo adesivo Araldite® AV138, com um CZM triangular. O método utilizado consistiu na aplicação de um campo de velocidade numa massa artificial, numa das extremidades da junta, e simular a aplicação de uma energia de impacto de 40 J. O aumento de L_0 de 10 para 20mm mostrou influenciar positivamente a resistência da junta em 43,7%. A tendência apareceu também na dissipação de energia da junta. O aumento da espessura do substrato constituinte do tubo exterior acima de 4mm, aumentou o pico de tensões de corte.

Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling [70]

Neste trabalho é comparado o desempenho de 3 adesivos estruturais aplicados a substratos tubulares de alumínio sujeitos à tração. Para análise de tensões de arrancamento e corte é utilizado o MEF e para prever a resistência é utilizado o CZM. Foram consideradas variações de L_0 e chanfros nos limites dos substratos. Os resultados mostraram que o CZM prevê o comportamento de adesivos pouco dúcteis, como com erro inferior a 10%, enquanto adesivos dúcteis, como com erro até 20%. Os chanfros de um ângulo médio de 15° melhoraram globalmente a resistência da junta, sendo que para pequenos ângulos, a capacidade de transportar a carga aplicada foi mais reduzida.

3. DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo é iniciado o desenvolvimento do estudo numérico, sendo explorado os conceitos estudados e aplicando-os ao caso de estudo desta tese. Em termos gerais é realizado o planeamento do trabalho a realizar, passando pela validação numérica da técnica do modelo de dano coesivo para a modelação de impacto e o estudo numérico paramétrico em concreto.

3.1. Planeamento do trabalho

O trabalho desenvolvido nesta tese de mestrado usa uma abordagem numérica computacional por MEF para simular e estudar o comportamento de juntas tubulares sujeitas a esforços de impacto. Para isso foram recolhidas informações acerca dos materiais a utilizar no âmbito deste estudo, nomeadamente na seleção dos materiais dos substratos e dos adesivos. Seguidamente foram definidas as geometrias assumidas pelos substratos e o tipo de material que serão alvo do estudo e, assim, recolher a informação necessária, nomeadamente as respetivas propriedades mecânicas, necessárias para introdução no *software* ABAQUS®, para que este possa efetuar os cálculos numéricos necessários à obtenção das soluções. De forma a assegurar a veracidade do modelo numérico, recorre-se a um trabalho experimental realizado para efetuar a comparação dos resultados e, assim, validar o modelo numérico de dano coesivo utilizado e a convergência de resultados. Ambos os modelos são apresentados neste subcapítulo.

3.1.1. Objetivos específicos

Neste trabalho recorre-se a um método numérico e computacional para estudar e simular o comportamento de juntas adesivas tubulares sujeitas a um determinado esforço de impacto e, assim, validar a técnica dos modelos de dano coesivo para este estudo. Para isso recorre-se à ferramenta de simulação por elementos finitos ABAQUS®, realizando-se o estudo de juntas compostas por substratos em aço de liga e diferentes tipos de adesivos com diferentes parâmetros mecânicos, sendo demonstrados os ensaios realizados, as curvas $P-\delta$ obtidas pelo *software* e a respetiva resistência da junta. Posteriormente é realizada a discussão dos resultados obtidos pela análise numérica e comparada com um modelo experimental para, desta forma, validar o método numérico de análise por modelos de dano coesivo para a modelação ao impacto.

Numa fase avançada procedeu-se a um estudo numérico paramétrico, abordando-se a influência do comprimento de sobreposição na resistência da junta, o modo de rutura, a análise de tensão e a energia de rutura, bem como a influência da espessura dos tubos na resistência da junta, o seu modo de rutura e a energia de rutura. Posteriormente são abordadas as alterações geométricas e suas implicações na resistência da junta, entre as quais o filete de adesivo e os chanfros interior e exterior na superfície dos substratos.

Por fim são realizadas uma discussão e uma comparação dos resultados obtidos, realçando a implicação de cada uma das variáveis em análise na resistência final da junta.

3.1.2. Metodologia utilizada

A metodologia utilizada na elaboração desta tese para simular e estudar a resistência de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de impacto são os modelos de dano coesivo, aplicados à simulação por método dos elementos finitos através da modelação numérica em *software* ABAQUS®. Para validar a veracidade dos resultados obtidos pelo simulador é necessário recorrer aos trabalhos experimentais realizados, como o trabalho de Silva [71] e, assim, efetuar uma comparação dos resultados obtidos entre o método experimental e o método numérico. Como foi demonstrado no capítulo 2.2.1.3 deste trabalho, os CZM são aplicados de maneira semelhante ao carregamento estático, e as propriedades utilizadas para definir as leis coesivas são dependentes da taxa de deformação. Por esta razão, os testes de caracterização de adesivos devem ser realizados sob diferentes taxas de deformação, pelo que as propriedades mecânicas extraídas em modo estático não são aplicáveis em modo de impacto (dinâmico). Assim, é importante definir e modelar corretamente as propriedades CZM. Quanto aos testes de caracterização, os testes DCB são utilizados para determinar as propriedades dinâmicas em modo I, enquanto os testes ENF são utilizados para determinar as propriedades no modo II. Estes testes apenas variam entre si na taxa de deformação. Muitos autores realizam testes em duas velocidades de carregamentos diferentes, como Ebadi-Rajoli et al. [72] e em seguida efetuam uma extrapolação logarítmica para obter as propriedades no modelo numérico, significando que as propriedades permanecem as mesmas durante toda a simulação. Este método não é o ideal, pois os polímeros apresentam variações nas propriedades mecânicas. Moreira et al. [73] e De Moura e Moreira [74] efetuaram uma abordagem mais complexa, onde uma lei logarítmica é definida e as propriedades coesivas são atualizadas a cada passo de tempo de acordo com a taxa de deformação atual. Geralmente, as únicas propriedades CZM que são afetadas pelas taxas de deformação são t_n e t_s , que tendem a aumentar com o aumento da taxa de deformação, enquanto G_{Ic} , G_{IIc} , E e G não mudam com a taxa de deformação.

3.1.3. Geometria e principais parâmetros geométricos

Neste capítulo são definidas as geometrias principais das juntas de sobreposição simples utilizadas para validar o modelo numérico por comparação com o modelo experimental similar, bem como as juntas tubulares usadas no estudo concreto ao esforço de impacto. No trabalho realizado por Silva [71] foram produzidas *SLJ* seguindo as normas ASTM D1002 e ISO 4587 para realizar os ensaios experimentais. No trabalho realizado por Valente [75], essas geometrias foram utilizadas para validar um modelo numérico computacional de análise da resistência de juntas adesivas sujeitas ao impacto, por comparação com um modelo experimental e análise de resultados. Assim, em ambos os trabalhos, os autores tiveram em consideração uma *SLJ* constituída por dois substratos com as mesmas dimensões de 120 mm de comprimento, possuindo um comprimento de sobreposição (L_0) de 25 mm, e tendo em consideração uma espessura de adesivo de 0,2 mm. A espessura dos substratos utilizados foi de 2 mm. Na Figura 19 estão representadas em desenho as geometrias assumidas pelas juntas utilizadas no ensaio experimental.

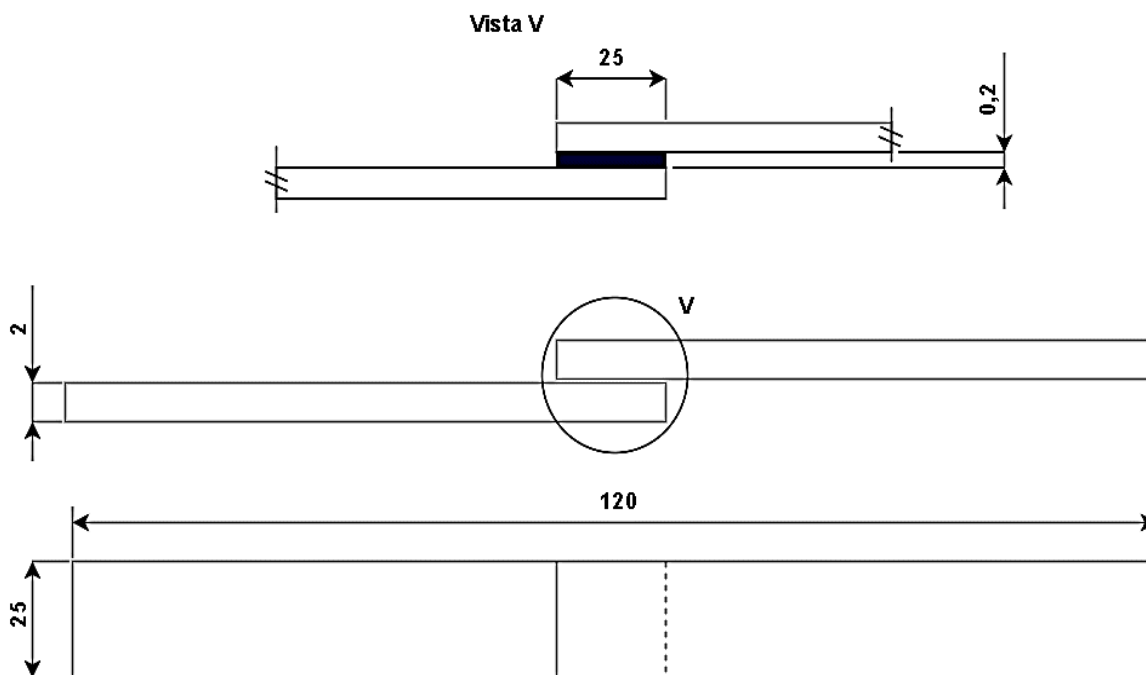


Figura 19 - Geometria da junta utilizada no ensaio experimental.

Da mesma forma, torna-se necessário definir as geometrias das juntas tubulares usadas na elaboração do estudo ao esforço de impacto. Transportando o conhecimento adquirido, as juntas tubulares são compostas por dois tubos ligados por um adesivo. O comprimento de sobreposição (L_0) utilizado neste trabalho possui 20 mm de comprimento, com o comprimento dos substratos a fixarem-se nos 60 mm, para um comprimento total do provete de 100 mm. Por serem tubos colados com um adesivo num comprimento definido (L_0), estes encaixam-se um no outro, o que leva a considerar diâmetros interno e externo diferentes. Assim sendo, foram definidos 16 mm de diâmetro interno para o substrato constituinte do tubo interior e 20,4 mm de diâmetro externo para o substrato constituinte do tubo externo. A espessura dos substratos é de 2 mm cada tubo. Os 0,4 mm de diferença devem-se ao uso de 0,2 mm da espessura da camada adesiva. Na Figura 20 está representada junta tubular e a respetiva geometria.

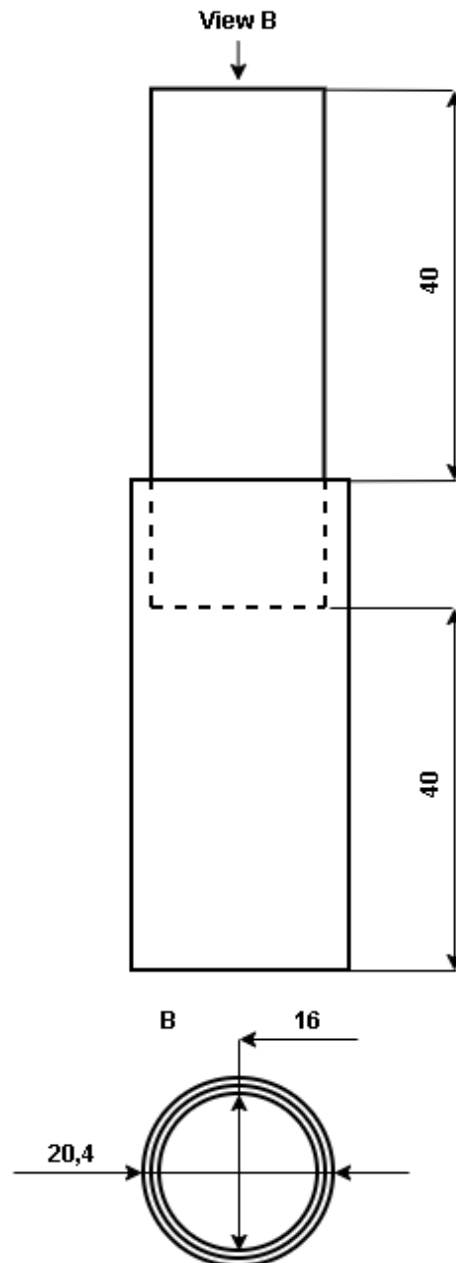


Figura 20 - Geometria da junta tubular usada no trabalho numérico.

3.1.4. Requisitos e limitações do trabalho

Em muitos casos, os testes para caracterizar as propriedades mecânicas de juntas adesivas pode ser impraticável ou levar a custos muito altos. Assim, o uso da simulação numérica computacional tem sido vista como uma solução para estudar, simular e prever o comportamento de juntas adesivas para situações reais. Contudo, as propriedades mecânicas dos materiais nem sempre são totalmente fornecidas pelos fabricantes nas respectivas fichas técnicas. Assim sendo, é essencial o estudo das curvas $P-\delta$ dos adesivos, as quais permitem determinar o módulo de Young (E), a resistência à tração e a resistência à falha, bem como a distribuição de tensão específica e, assim, selecionar os critérios de falha adequados. Os testes em juntas adesivas são os mais

representativos das situações reais, no entanto, devido a variáveis como o processo de cura, a espessura da camada adesiva e preparação da superfície dos substratos, a distribuição da tensão ao longo de L_0 pode não ser perfeitamente uniforme e, conseqüentemente, resultar numa falha diferente ao esperado numa situação real.

O domínio de ferramentas computacionais tem vindo a solucionar vários problemas para soluções em engenharia que, no caso concreto das juntas adesivas, aliadas aos testes mecânicos de caracterização de adesivos permitem estudar, simular e prever com cada vez mais assertividade o comportamento destas juntas.

O *software* de simulação por elementos finitos ABAQUS® permite a introdução desses características para um caso de estudo concreto. De raiz, permite o desenho e construção paramétrica da junta, passando pela introdução de apoios e cargas que se aproximem e simulem com a mais realidade possível um determinado caso de estudo. Também permite total controlo sobre a malha, nomeadamente quanto ao tipo e refinamento, de forma a detalhar os resultados obtidos na zona da malha refinada.

3.1.5. Recolha de materiais

No trabalho realizado por Silva [71], os substratos constituintes do trabalho experimental foram produzidos em aço DIN 55 Si7, um material com elevada resistência mecânica para garantir que, no decorrer do ensaio, estes não entrem em deformação plástica de forma prematura eliminando-se, assim, o efeito plástico dos substratos para o ensaio ou, de outra forma, garantindo que a rutura da junta ocorre na zona do adesivo responsável pela resistência máxima da junta. Na Tabela 9 estão resumidas as propriedades mecânicas dos substratos constituintes do ensaio experimental.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas dos substratos utilizados no ensaio experimental [71].

Propriedade	Valor
E (GPa)	210
σ_y (MPa)	1078
σ_f (MPa)	1600
ε_y (%)	6
ν	0.3
ρ (g/cm ³)	7.8

Nesse mesmo trabalho, os adesivos utilizados no ensaio experimental tinham em consideração a sua ductilidade. A ductilidade indica o grau de deformação que um determinado material suporta até ocorrer a sua fratura. Além disso, o modo de falha e a existência de deformação plástica também são fatores utilizados para caracterizar a ductilidade de um adesivo. De um modo simplista, materiais com baixa capacidade de deformação são considerados materiais frágeis, enquanto materiais com elevada capacidade de deformação são considerados materiais dúcteis. Para observar o comportamento de cada um destes adesivos, Silva [71] utilizou dois adesivos com elevada ductilidade e dois adesivos frágeis. As suas propriedades mecânicas são obtidas realizando diferentes tipos de ensaios. Os testes à tração permitem obter o módulo de elasticidade (E) e a tensão coesiva à tração (t_n), sendo que a tensão coesiva ao corte (t_s) é obtida através dos ensaios TAST. Relativamente às energias de rutura, os ensaios DCB permitem obter a

energia de rutura à tração (G/c), enquanto que os ensaios ENF permitem obter a energia de rutura ao corte (GII_c). Para efeitos de cálculo dos resultados são ainda necessárias a densidade (ρ) e o coeficiente de Poisson (ν). As propriedades mecânicas dos adesivos estão resumidas na Tabela 10.

Tabela 10 – Propriedades mecânicas dos adesivos utilizados no trabalho experimental [71].

Tipo de adesivo	Dúcteis		Frágeis	
Adesivo	RTV 106	DP 8005	AV138	XNR6852 E-2
E	1.6	590	4890	1742
G	0.86	159	1560	645.2
t_n	2.3	6.3	41	42.9
t_s	1.97	8.4	30.2	28.7
GI_c	2.73	1.1	0.35	N/A
GII_c	5	6	4.91	18
ρ	1.07	1.06	1.7	1.5
ν	-	0.3 a	0.35 b	0.4 c

*a valor estimado; b valor fornecido pelo fabricante; c valor típico para adesivos epóxicos.

O Momentive® RTV106 é um adesivo dúctil, composto essencialmente por um silicone monocomponente e auto-nivelante que vulcaniza à temperatura ambiente. A elevada flexibilidade a baixa temperatura, assim como o bom desempenho a temperaturas elevadas e a sua resistência ao meio ambiente e agentes químicos são as suas principais características sendo ainda um bom isolante elétrico. É, geralmente, utilizado a selar elementos sujeitos a elevadas temperaturas ou nos quais seja necessário um bom isolamento elétrico.

O 3M® DP8005 é um adesivo dúctil composto por acrílico estrutural. Apresenta cura muito rápida, atingindo boa resistência mecânica em poucos minutos. Como adesivo estrutural serve para substituir certas ligações mecânicas, 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.

O Araldite® AV138 é um adesivo frágil produzido pela Huntsman® e bi-componente. Esta 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.

Por fim, foi utilizado nesse 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, assim como para a indústria aeroespacial para aplicação em fibras. 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 e possui boa resistência ao arrancamento.

Por ser feito um estudo em modo de impacto, isto é, dinâmico, torna-se necessário definir as propriedades mecânicas dos adesivos em função da velocidade de ensaio. Nessas condições, as propriedades foram determinadas no trabalho realizado por Silva [71], e estão resumidas na Tabela 11.

Tabela 11 - Propriedades dos adesivos em função das velocidades de ensaio [71].

Adesivo	Velocidade	t_n	t_s	G_{Ic}	G_{IIc}
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

*valores estimados (não havia possibilidade de se realizar o teste experimental)

A necessidade de se obter as propriedades mecânicas dos adesivos em modo dinâmico é essencial, uma vez que os adesivos apresentam características viscoelásticas, isto é, comportamento que depende da velocidade de carregamento.

3.1.6. Modelação numérica

Neste capítulo são apresentadas as modelações numéricas das juntas de sobreposição simples utilizadas no trabalho de Silva [71], com o objetivo de validar os resultados experimentais do seu trabalho, e das juntas tubulares que serão utilizadas para realizar o estudo de impacto.

3.1.6.1. Juntas de sobreposição simples

No trabalho realizado por Valente [75] todo o estudo numérico foi desenvolvido com recurso ao *software* ABAQUS®. Para validar e comparar os resultados experimentais obtidos por Silva [71], as juntas de sobreposição simples foram desenvolvidas em desenho paramétrico 2D no *input* do *software* está representada na Figura 22. Para o seu estudo foram retirados alguns parâmetros do *software*, como o parâmetro *RF* (*Reaction Forces*), o qual representa a força de reação em cada instante, em combinação com o parâmetro *U*, que entrega o respetivo deslocamento nesses mesmos instantes. Posto isto, é possível retirar e construir as curvas $P-\delta$ do modelo.



Figura 21 - Junta SLJ paramétrica.

No desenvolvimento da malha foram utilizados dois tipos de elementos. Na camada adesiva foi utilizado um controlo da malha do tipo *sweep*, representado a amarelo na Figura 22, com elementos do tipo *4-node two-dimensional cohesive element* (COH2D4). Relativamente aos substratos, os corpos tiveram um controlo da malha do tipo estruturado, representados a verde

na Figura 22 com elementos do tipo *4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration* (CPE4R).



Figura 22 - Controle da malha representativo das juntas SLJ.

Relativamente à malha, esta foi construída utilizando elementos quadriláteros de 0,2 mm de espessura, igual à espessura da camada adesiva (t_a). Conforme representado na Figura 23, a malha definida nas zonas da camada adesiva, onde é prevista que a rutura da junta ocorra, é mais refinada, isto é, possui elementos de malha mais pequenos que as zonas dos substratos, de forma a que os resultados finais da análise sejam os mais corretos possíveis.

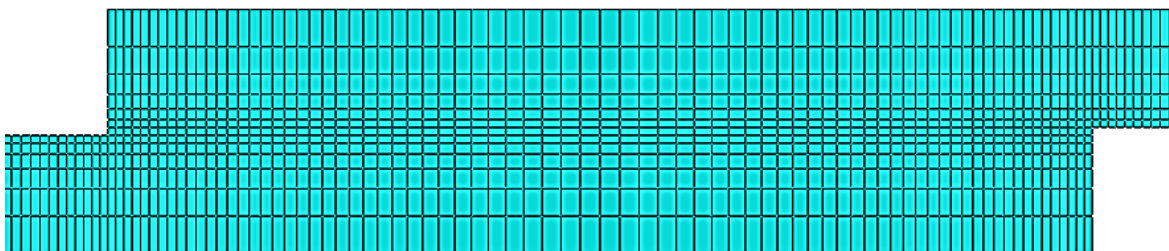


Figura 23 - Detalhe da construção da malha na zona adesiva na SLJ.

No que diz respeito à fixação da junta para o teste, foi considerado um encastramento no substrato inferior e uma restrição de movimento em y no substrato superior, conforme representado na Figura 24.

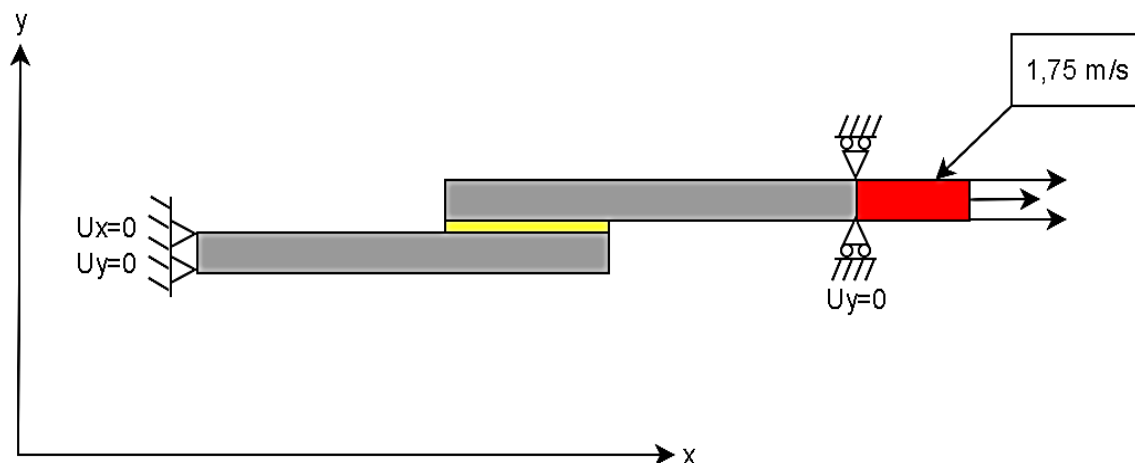


Figura 24 - Fixação da junta para o ensaio.

Conforme se pode verificar na Figura 24 a vermelho, foi criada uma massa animada de uma velocidade de 1,75 m/s, com a finalidade de simular o impacto de um corpo na junta adesiva tubular. A massa definida em ABAQUS® foi calculada usando a fórmula da energia cinética, para uma energia de impacto equivalente à energia gerada num ensaio experimental de 40 J, sendo escolhido um material de elevada densidade para um comprimento da massa de 25 mm, espessura de 2 mm e largura de 20,4 mm igual ao diâmetro do tubo do substrato exterior. Com estes três parâmetros foi calculado o volume da zona vermelha representada na Figura 24, e selecionado um material com ρ superior. Em ABAQUS este valor entra em toneladas por milímetro cúbico, sendo utilizado um ρ para a massa de 7,3893E-6.

3.1.6.2. Juntas tubulares

Neste trabalho é realizado o estudo numérico de juntas tubulares sujeitas ao esforço de impacto. As juntas tubulares elaboradas em *software* ABAQUS® tiveram como pressupostos a parametrização *axisymmetric*, simulando um eixo de revolução da junta em torno do seu eixo neutro, sendo esta definida como sendo do tipo deformável e com a característica básica do tipo *wire*. Na elaboração do desenho teve-se ainda em consideração uma massa, que simula a massa utilizada no ensaio de impacto. Na Figura 25 está representada a junta tubular paramétrica.



Figura 25 - Junta Tubular Paramétrica.

Tal como nas juntas de sobreposição simples, para o controlo da malha foram utilizados dois tipos de elementos. Na camada adesiva foi utilizado um controlo da malha do tipo *sweep*, representado a amarelo na Figura 26, com elementos do tipo *4-node two-dimensional cohesive element* (COH2D4). Relativamente aos substratos, os corpos tiveram um controlo da malha do tipo estruturado, representados a verde na Figura 26 com elementos do tipo *4-node bilinear plane strain quadrilateral, reduced integration* (CPE4R).

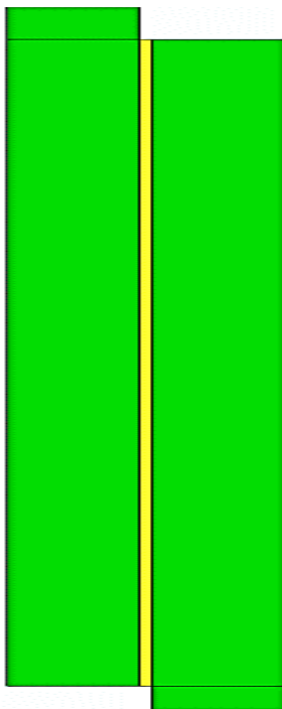


Figura 26 - Controlo da malha nas juntas tubulares.

Relativamente à malha, esta foi construída utilizando elementos quadriláteros de 0,2 mm de espessura, igual à t_a . Conforme representado na Figura 27, a malha definida nas zonas da camada adesiva, onde é prevista que a rutura da junta ocorra, é mais refinada, isto é, possui elementos de malha mais pequenos que as zonas dos substratos, de forma a que os resultados finais da análise sejam os mais corretos possíveis.

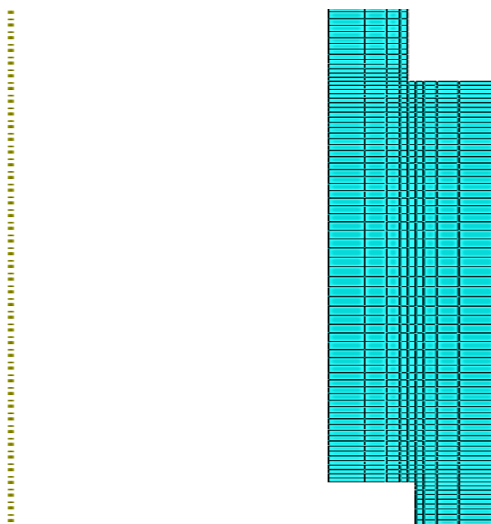


Figura 27 - Detalhe da malha na camada adesiva na junta tubular.

No que diz respeito à fixação da junta para o teste, foi considerado um encastramento no substrato constituinte do tubo interior que restringe, no caso 2D, os deslocamentos segundo x e y , e uma restrição que impede o deslocamento segundo x no substrato correspondente ao tubo exterior, conforme representado na Figura 28.

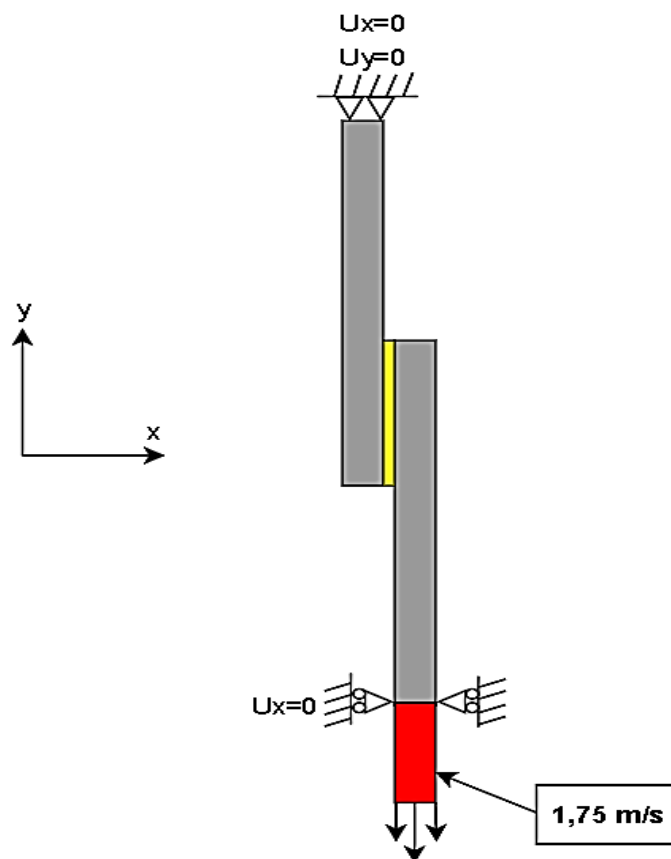


Figura 28 - Fixação da junta tubular.

3.1.7. Fundamentos do MDC triangular

Por ser um método simplista, com obtenção de resultados precisos sem recurso a vários tipos de parâmetros a serem determinados, o modelo de dano coesivo é o mais utilizado para simular e testar a resistência de juntas para a maioria das situações reais [76]. Os índices n e s representam, respetivamente, os modos de rutura à tração e ao corte.

Conforme se pode ver na Figura 29, o MDC triangular faz distinção de dois modos: modo de rutura em modo puro, e modo de rutura em modo misto. A rutura em modo puro é caracterizada pela propagação do dano ocorrer num conjunto específicos de nós homólogos quando os valores das tensões são anulados pela lei coesiva respetiva. Na rutura em modo misto são combinados fatores energéticos e critérios de tensões para combinar critérios de tração e de corte [77].

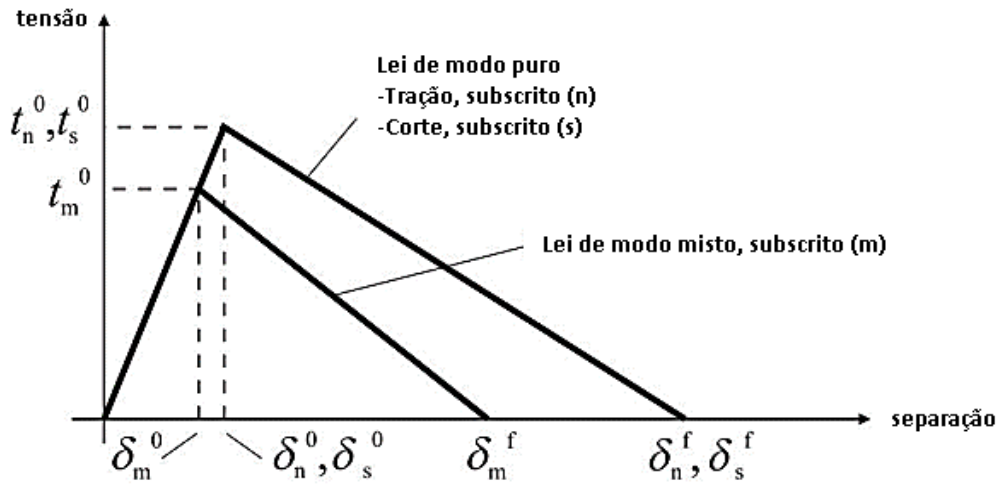


Figura 29 - Modelo de dano coesivo triangular (adaptado de [78]).

Segundo Campilho et al. [79], os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente direta de deformação e de uma deformação de corte, que são calculados recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre substratos 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:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} \varepsilon \quad (9)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição dependente 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. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (10)$$

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 [77]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (11)$$

Conforme ilustrado na Figura 29, quando a tensão t_m^0 é atingida, seguindo a lógica dada pela Equação (11), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de GI_c e GII_c .

3.2. Validação da técnica MDC para modelação de impacto

3.2.1. Fabrico das juntas

No trabalho de Silva [71], os provetes para os ensaios consistiam em juntas de sobreposição simples (SLJ) com dois comprimentos de sobreposição (L_o) de 25 e 50 mm, comprimentos esses frequentemente usados na indústria automóvel. Este tipo de configuração de junta é relativamente simples de fabricar e pode fornecer resultados fiáveis no que diz respeito à resistência da junta, considerando a combinação do substrato e o adesivo. Nos primeiros provetes produzidos, o material utilizado nos substratos era um aço macio, mas uma vez que os substratos cediam em quase todas as configurações das SLJ testadas, os resultados não demonstravam todo o potencial dos adesivos utilizados, com falhas prematuras das juntas devido à alta concentração de forças de arrancamento, criadas devido à plastificação do aço. No entanto, todas as configurações pré-definidas de adesivos produzidas com substratos em aço macio foram testadas em condições estáticas para comparar os resultados e investigar a influência dos substratos na resistência final da junta. Assim, de forma garantir que os resultados obtidos fossem provenientes principalmente pela resistência dos adesivos, foi utilizado um aço de alta resistência para evitar a plastificação dos substratos e, conseqüentemente, falhas prematuras da junta [71].

Para a produção dos substratos de 2 mm de espessura, estes foram maquinados em uma liga de aço DIN 55 Si7 e bombardeados com jatos de areia sob a superfície L_o do adesivo. Posteriormente, essa superfície foi desengordurada com acetona para garantir uma limpeza adequada antes da aplicação do adesivo [71].

3.2.2. Ensaio

No trabalho experimental realizado por Silva [71], vários testes distintos foram realizados para caracterizar previamente os adesivos e extrair as suas propriedades mecânicas. Para extrair a taxa de libertação de energia crítica de deformação em modo I (G_{Ic}), o teste DCB seguindo a norma ASTM D3433 numa máquina universal INSTRON® com uma célula de carga de 30 kN foi utilizado. Para determinar o módulo de Young (E) dos adesivos, os testes de carga longitudinal foram empregados, através das curvas tensão-deformação. Para esse teste, uma máquina universal INSTRON® modelo 3367 foi utilizada.

Para os testes de impacto, foi utilizado o equipamento de teste Rosand® *Instrumented Falling Weight Impact Tester type 5 HV*, e está representada na Figura 30. O teste de provetes ao impacto neste equipamento consiste na queda de um peso com uma massa definida que, por sua vez, transfere a energia de impacto para o provete em teste.

O substrato superior é fixado numa garra através de um parafuso. Para assegurar que cargas excêntricas se desenrolem durante o teste, um calço é utilizado para garantir um correto alinhamento vertical. Ao substrato inferior é fixado o peso de prova, através do uso de um parafuso e um calço. Esse peso fixado ao provete desliza através de uma guia, de modo a garantir o correto alinhamento da massa no momento do impacto.

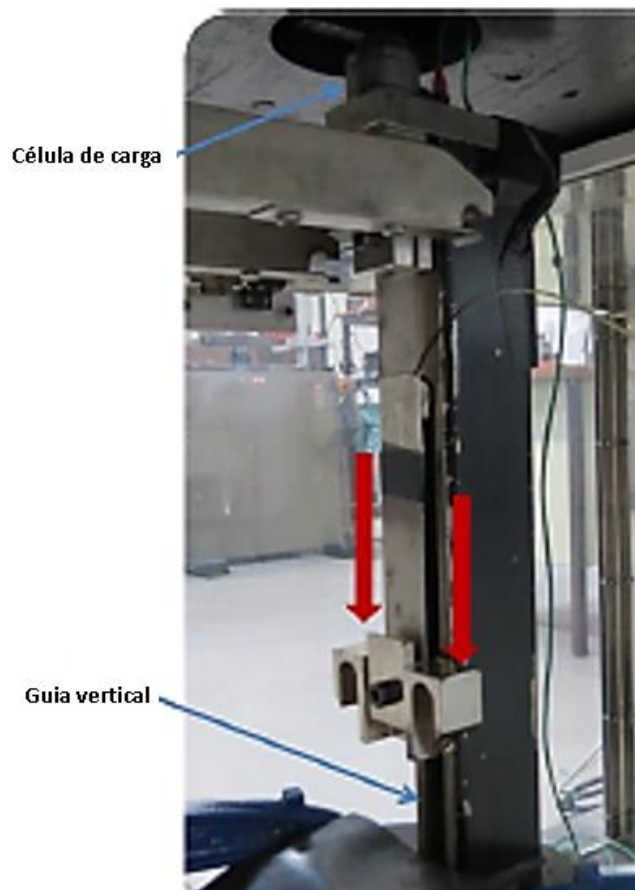


Figura 30 – Máquina utilizada para ensaio de impacto (adaptado de [71]).

Através de um sistema de retenção fixado ao substrato superior, a carga de impacto transmitida como consequência da queda do peso é registrada numa célula de carga.

Com a finalidade de averiguar a veracidade dos ensaios experimentais e modelos numéricos realizados por Silva [71], um peso foi adicionado ao substrato exterior do modelo numérico utilizado (representado a vermelho na Figura 28). Assim, obtém-se como energia de referência ao impacto de 40 J. A massa de impacto utilizada na máquina foi de 26 kg. Assim, para realizar a análise numérica com o ABAQUS®, torna-se necessário calcular a velocidade da massa no momento do impacto. Utilizando a fórmula da energia cinética torna-se possível, para uma energia de 40 J, calcular a velocidade (v) correspondente.

$$E_c = \frac{1}{2} \cdot m \cdot v^2 \quad (12)$$

Efetuada o cálculo, é possível obter uma velocidade de impacto de 1,75 m/s.

De salientar que no *software* ABAQUS®, a massa de impacto tem de ser virtualmente criada pelo utilizador. Assim, a massa ilustrada a vermelho na Figura 28 foi definida com a mesma espessura dos substratos (2 mm) e um comprimento total de 25 mm. Estas dimensões foram calculadas sabendo a densidade (ρ) do aço DIN 55 Si7 e a espessura do adesivo.

3.2.3. Curvas $P-\delta$

De forma a validar os resultados obtidos pelo modelo numérico realizado em software ABAQUS®, o trabalho realizado por Silva [71] e os seus resultados serão tidos como os resultados de referência. Inicialmente, é apresentada e analisada a curva $P-\delta$ obtida com os resultados do adesivo RTV106 [75].

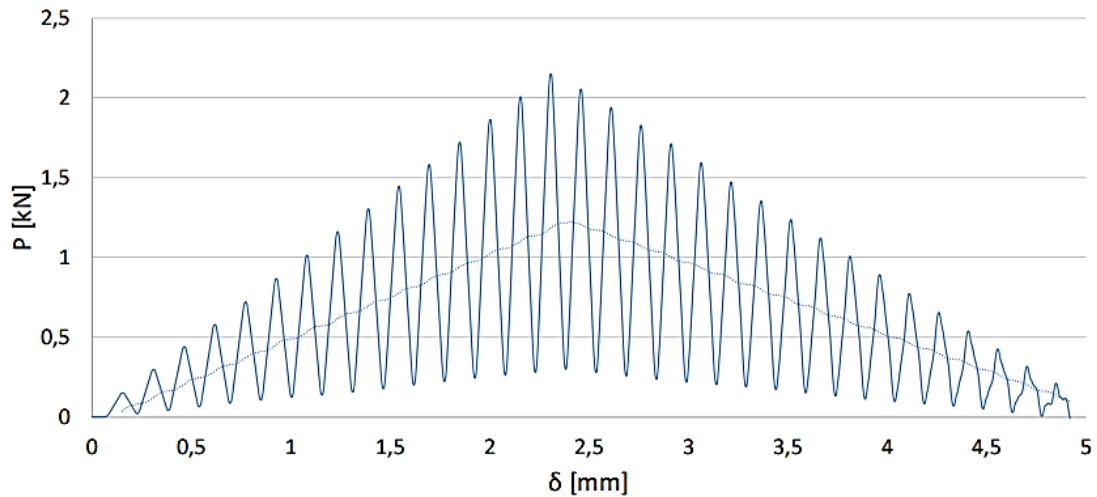


Figura 31 - Curva $P-\delta$ e linha de tendência obtida com o adesivo RTV106 [75].

Conforme apresentado na Figura 31, para o adesivo RTV106, o resultado numérico mostra uma grande variação da carga sendo, por esse motivo, muito díspar à curva de referência numérica. Contudo, a introdução de uma linha de tendência, o perfil das curvas fica muito idêntico à curva de referência numérica. Relativamente ao deslocamento máximo observado, este é idêntico em ambos os casos, e também coincide com o deslocamento da referência numérica, assim como o deslocamento correspondente à carga máxima ($P_{máx}$) [75].

Em relação ao valor de $P_{máx}$ obtido para cada caso, todos os resultados numéricos registaram valores bastante abaixo da média dos resultados experimentais, como se verifica na Figura 32.

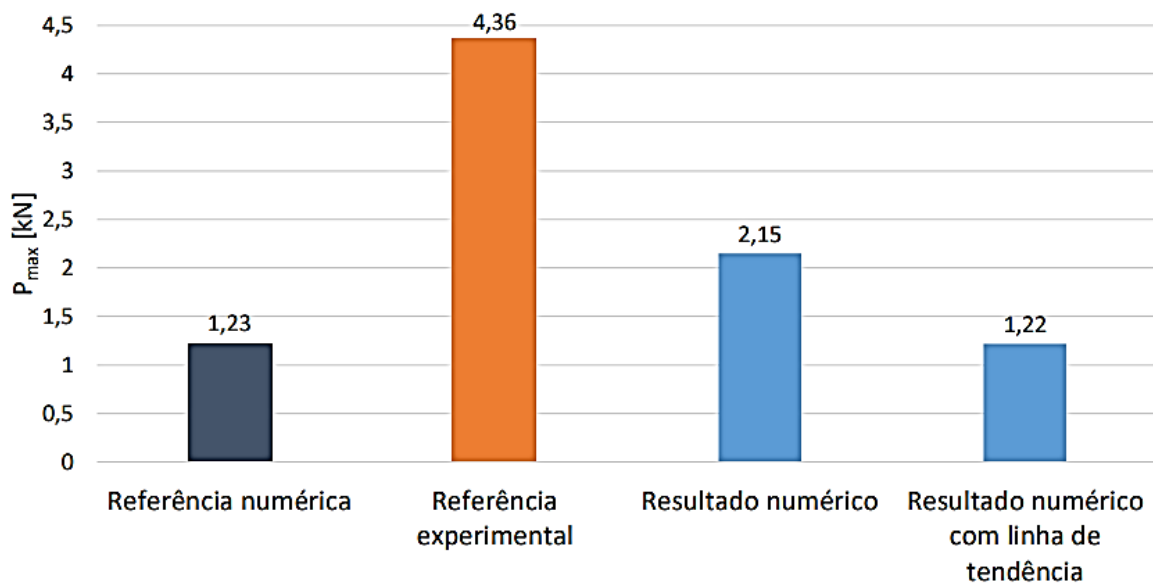


Figura 32 - Valores de referência para o adesivo RTV106 [75].

Nas primeiras análises, ficou evidente uma grande diferença relativamente às curvas de referência numérica e do resultado numérico. Assim, as propriedades de referência utilizadas, nomeadamente o valor da (t_n), foi arbitrado, e o valor (t_s) foi ajustada para cumprir a mesma proporção dos valores obtidos experimentalmente, empregando uma velocidade de ensaio mais reduzida. Em adição, o valor da (G_{IIc}) foi também reduzido, de forma a aproximar ao valor da (G_{Ic}). Esses valores estão resumidos na Tabela 10. Na Figura 33 é representada a curva P - δ obtida com o adesivo AV138 [75].

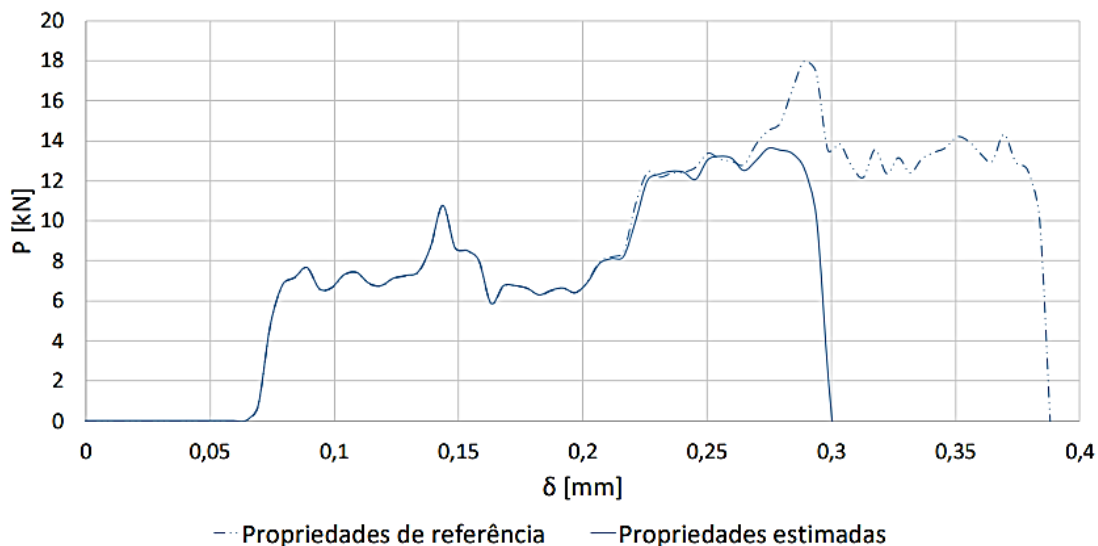


Figura 33 - Curva P - δ obtida com o adesivo AV138 [75].

Os valores de $P_{máx}$ obtidos utilizando os valores das propriedades de referência não coincide com o resultado obtido na referência numérica, em que apresentou um valor 25 % superior. Com todos os parâmetros anteriormente descritos ajustados, o valor de $P_{máx}$ obtido no resultado numérico foi 6% menor do que o valor obtido na referência numérica, e teve uma diferença de cerca de 16% para a referência experimental. Em suma, as alterações introduzidas resultaram numa maior aproximação do modelo numérico às referências experimentais, como mostra a Figura 34 [75].

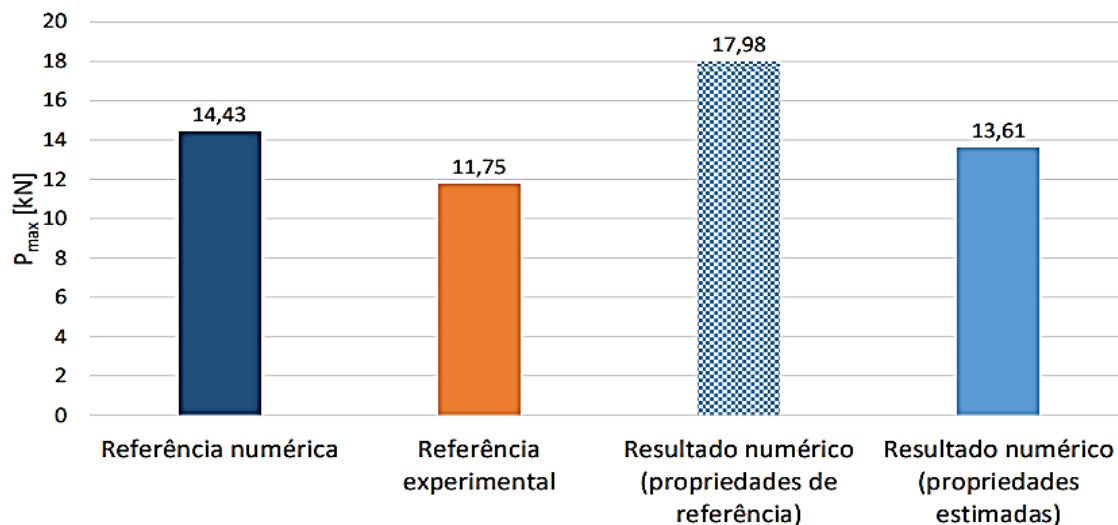


Figura 34 - Valores de referência para o adesivo AV138 [75].

O adesivo DP8005 obteve bons resultados e mostrou-se que a curva $P-\delta$ era muito semelhante ao perfil de referência [71], apresentando, contudo, algumas irregularidades na curva. A grande diferença está no deslocamento máximo obtido, o qual apresenta valores bastante inferiores ao deslocamento obtido na referência experimental, muito embora esteja em linha com o gráfico da referência numérica, conforme mostra a Figura 35 [75].

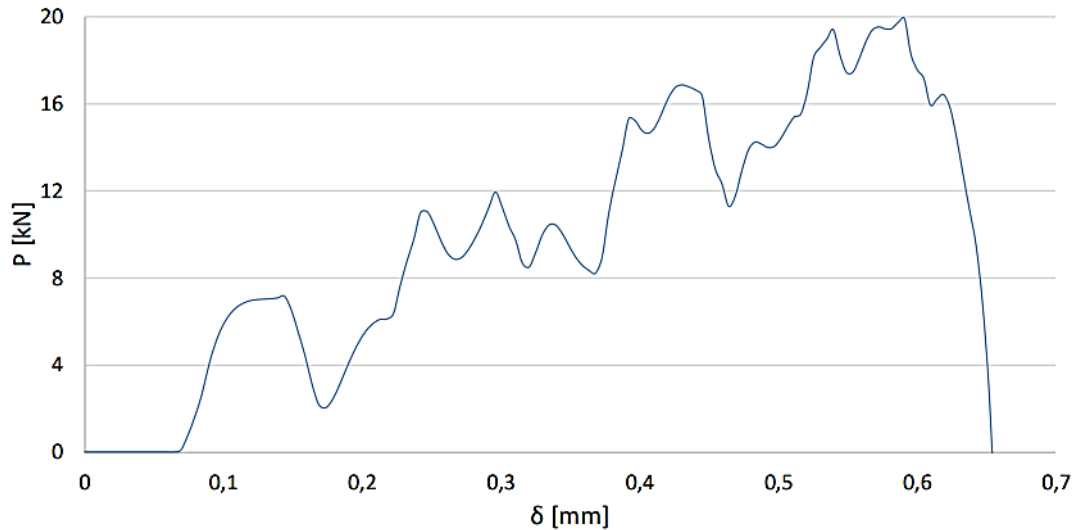


Figura 35 - Curva $P-\delta$ obtida com o adesivo DP8005 [75].

Quanto ao valor de $P_{máx}$, o resultado numérico mostrou um valor muito semelhante ao da referência numérica, variando apenas cerca de 1%. De salientar que o valor obtido experimentalmente ficou cerca de 15% abaixo dos valores numéricos, conforme se ilustra na Figura 36 [75].

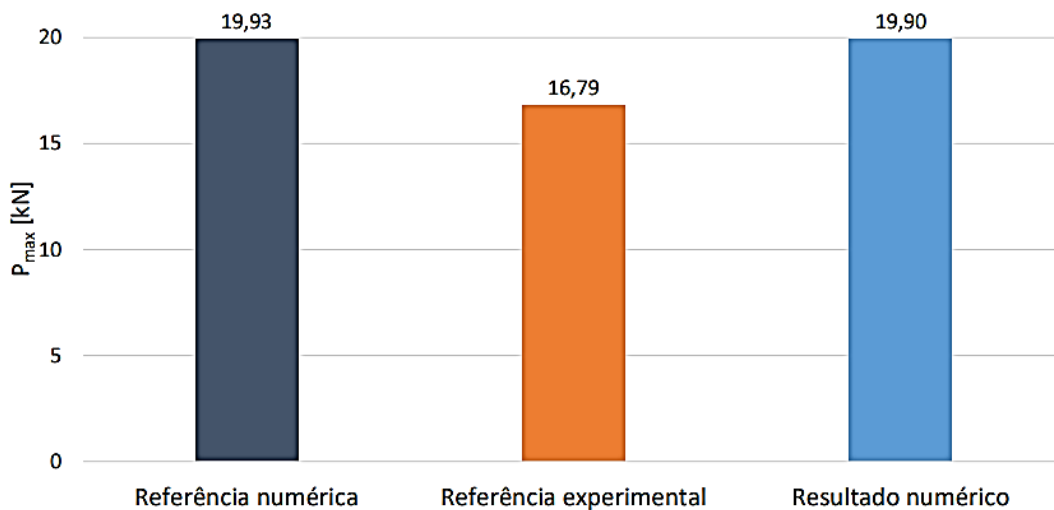


Figura 36 - Valores de referência do adesivo DP8005 [75].

Por último, para o adesivo XNR6852 E-2, a curva $P-\delta$ teve um comportamento semelhante à do adesivo DP8005. O deslocamento correspondente a $P_{máx}$ e o deslocamento máximo foram semelhantes ao da referência numérica [71, 75].

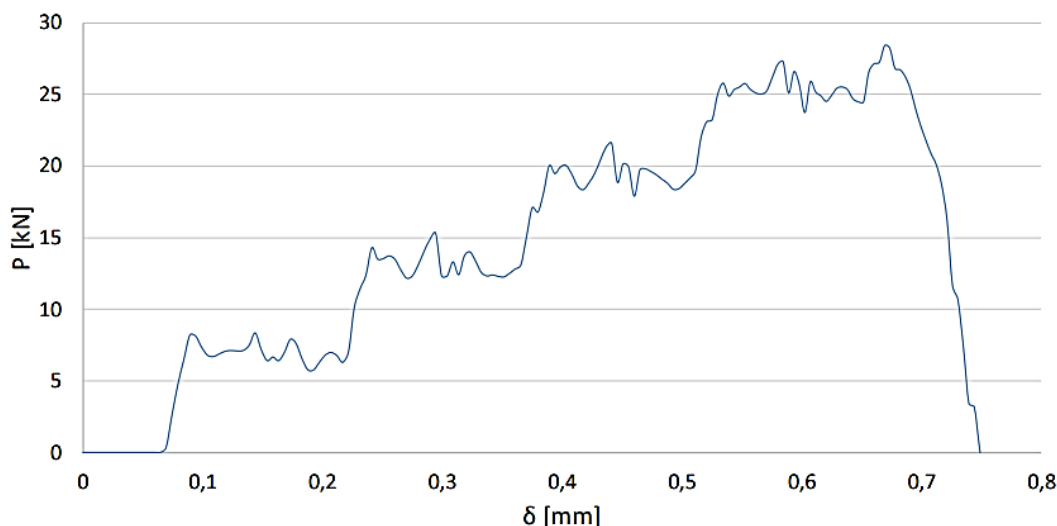


Figura 37 - Curva P - δ do adesivo XNR6852 E-2 [75].

Também de forma semelhante ao adesivo DP8005, o deslocamento máximo e deslocamento para a $P_{máx}$ registados na referência experimental foram bastante superiores. Para a $P_{máx}$ verificou-se uma diferença de 5% do resultado numérico em relação ao resultado da referência numérica e um aumento de 51% em relação à referência experimental, conforme se pode verificar na Figura 38 [75].

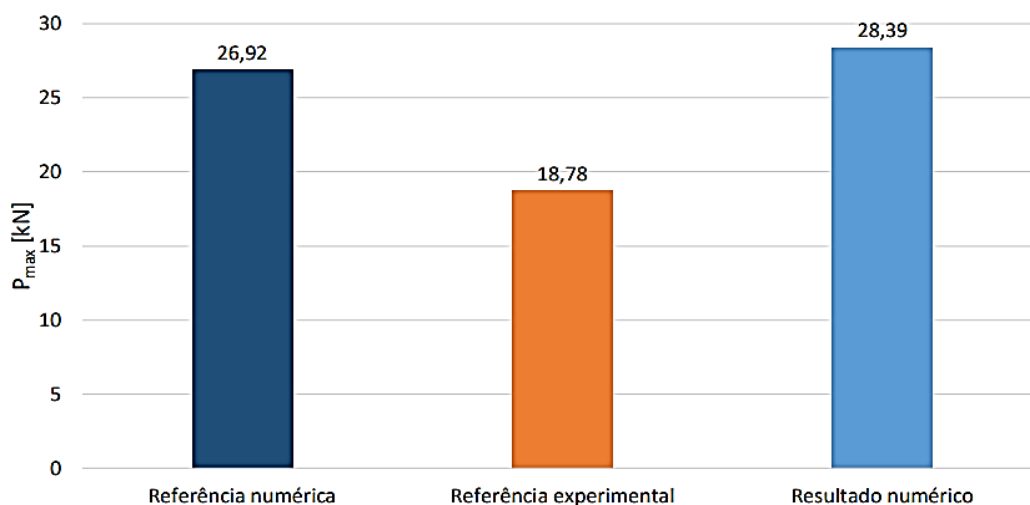


Figura 38 - Valores de referência para o adesivo XNR6852 E-2 [75].

3.2.4. Discussão de resultados

Nas curvas P - δ mostradas anteriormente, é visível algum deslocamento inicial sem que seja registada força de reação no encastramento. Esse fenómeno é também observável nos ensaios dinâmicos realizados por Varajão [80] e Araújo et al. [81], na componente numérica realizada com *software* ABAQUS®. O mesmo fenómeno foi verificado por Liao et al. [82], o qual realizou modelações numéricas utilizando os *softwares* ANSYS® e LS-DYNA®. Esse fenómeno mostrado nas curvas P - δ é provocado por efeitos de inércia associados à aplicação de uma carga dinâmica.

Em função dos resultados obtidos, a disparidade dos resultados obtidos através do modelo de validação com o adesivo RTV106 não vai ser considerado. Apesar da introdução de uma linha de

tendência a referência numérica ter ficado mais próxima, os valores numéricos foram muito distintos dos do trabalho experimental realizado por Silva [71], valores esses que servem como referência. A disparidade entre os resultados deve-se ao facto de se terem empregado as propriedades do adesivo para um caso estático (Tabela 10) durante um estudo dinâmico o que é errado, uma vez que os plásticos apresentam propriedades visco-plásticas e visco-elásticas.

Relativamente ao adesivo AV138, numa primeira fase não foi possível replicar os resultados obtidos da referência numérica. De forma a aproximar os resultados obtidos da análise com os resultados obtidos por Silva [71], o valor das propriedades mecânicas do adesivo, como a t_n , t_s , GI_c e GII_c foram ajustadas. Devido aos resultados obtidos com os valores de referência a uma velocidade de impacto de 1,75 m/s, conclui-se que as extrapolações dos valores obtidos para esta velocidade não são válidas para este adesivo. Utilizando as propriedades estimadas indicadas na Tabela 11, o modelo já pôde ser validado.

Quanto ao adesivo DP8005, verificou-se que a $P_{máx}$ obtida para o resultado numérico foi cerca de 19% superior à obtida pela referência experimental. Tal facto pode dever-se à impossibilidade de replicar experimentalmente as condições do ensaio numérico. Contudo, o uso da malha uniforme sem a utilização do efeito *bias* usado por Silva [71] também pode explicar a imprecisão nos resultados. Uma outra possibilidade para a disparidade de resultados é a de ter sido utilizada uma frequência de registo de dados diferente no *history output* do *software*. Além disso, nos ensaios numéricos é considerada total homogeneidade dos materiais, espessura de adesivo perfeitamente constante, aplicação de adesivo sem bolhas de ar e perfeito alinhamento, que são parâmetros que não são 100% perfeitamente realizáveis experimentalmente. Além disso, a existência de folgas e a deformação elástica dos componentes da máquina de ensaio e ainda a precisão da célula de carga, podem influenciar tanto $P_{máx}$ como o deslocamento obtido, de maneira a que a deformação obtida pelo método experimental seja superior à obtida pelo modelo numérico.

Finalmente, para o adesivo XNR6852 E-2, obteve-se a maior proximidade aos resultados da referência numérica, com um valor 5% superior para o primeiro. Quanto à diferença de 51% para a referência experimental no valor de $P_{máx}$, resulta de fatores iguais aos do adesivo DP8005. 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.

3.3. Estudo numérico paramétrico

Neste capítulo é realizado um estudo numérico paramétrico para determinar a influência da alteração de certos parâmetros geométricos na resistência final da junta adesiva. Entre estes parâmetros destacam-se o comprimento de sobreposição e a espessura dos substratos. Posteriormente é realizado um estudo numérico de variáveis complementares e suas variações na resistência final da junta adesiva, nomeadamente da introdução de *fillets* de adesivo e a

introdução de chanfros interiores e exteriores nos substratos. Esses parâmetros e respectivas designações podem ser encontradas na Tabela 12.

Tabela 12 - Designação dos parâmetros geométricos em estudo.

Parâmetro geométrico	Designação
Comprimento de sobreposição	L_o (mm)
Espessura dos substratos	t_p (mm)
Ângulo de Fillet de adesivo	β (°)
Ângulo de Chanfro interior	α (°)
Ângulo de Chanfro exterior	θ (°)

3.3.1. Materiais utilizados

Neste capítulo são definidos os materiais utilizados no desenvolvimento de todo o estudo numérico. Como foi dito anteriormente, o material escolhido para os substratos foi o aço DIN 55 Si7. Este aço foi escolhido para, no decorrer do estudo numérico através do *software* ABAQUS®, evitar a deformação plástica dos substratos e garantir que a rutura ocorre somente pelo adesivo. Na Tabela 13 podem-se encontrar as propriedades mecânicas do material, necessárias para a introdução no *software*.

Tabela 13 - Propriedades mecânicas do aço DIN 55 Si7 [71].

Propriedade	Valor
E (GPa)	210
σ_y (MPa)	1078
σ_f (MPa)	1600
ϵ_y (%)	6
ν	0.3
ρ (g/cm³)	7.8

Os adesivos utilizados no desenvolvimento deste estudo numérico, são os mesmos da validação do modelo numérico anteriormente apresentado. De ressaltar que para este estudo foi retirado o adesivo RTV106 por ser um adesivo demasiado flexível para o estudo, levando a que os baixos valores de propriedades como o módulo E , bem como as tensões t_n e t_s , levariam a falhas prematuras das juntas e, por isso, a resultados não comparáveis com os restantes adesivos. Assim, foi definido para este estudo o uso de um adesivo dúctil e dois adesivos frágeis. Tendo em conta o ensaio dinâmico de impacto, os valores das propriedades mecânicas da Tabela 11 ajustados para o estudo necessárias estão resumidos na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades mecânicas dos adesivos utilizados no estudo numérico [71].

Tipo de adesivo	Dúctil	Frágeis	
Adesivo	DP 8005	AV138	XNR6852 E-2
E (MPa)	590	4890	1742
G (MPa)	159	1560	645,2
t_n (MPa)	27,5	70,2	53,7
t_s (MPa)	36,7	51,7	45,8
G_{Ic}	1,1	0,35	1,68
G_{IIc}	6	4,90	18
P (g/cm³)	1,06	1,7	1,5
ν	0,3 a	0,35 b	0,4 c

3.3.2. Modelação em ABAQUS®

Para o estudo numérico paramétrico realizado foi utilizado o *software* ABAQUS® versão de 2021 da Dassault Systemes. Este *software* baseia-se em modelos de elementos finitos e engloba três etapas até à obtenção dos resultados: o pré-processamento, a obtenção da solução e o pós-processamento. O pré-processamento permite a criação do modelo em estudo até a definição da malha de elementos finitos e envolve as seguintes etapas:

1. *Part*;
2. *Property*;
3. *Assembly*;
4. *Step*;
5. *Load*;
6. *Mesh*;
7. *Job*.

3.3.2.1. Módulo Part

No módulo *Part* são definidas as geometrias da junta, através de desenho no ambiente de trabalho do ABAQUS®. Aqui são desenhadas as geometrias como uma junta adesiva maciça e definidas as suas dimensões, tendo em conta no desenho a espessura do adesivo. Neste trabalho são analisadas as juntas tubulares, pelo que são definidos elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós nos substratos (CAX4 no *software*) e elementos coesivos axissimétricos (COHAX4R no *software*) na camada adesiva. A junta tubular é do tipo *axissymmetric* por ter um eixo de revolução, em torno do qual é definido o diâmetro da junta a analisar. É ainda necessário definir neste módulo o tamanho da massa que irá simular o impacto, animada com uma velocidade pré-definida. Por convenção, foi definido um comprimento de 25 mm e a mesma espessura de 2 mm dos substratos. Na Figura 39 está desenhada e indicadas as dimensões da junta adesiva tubular em formato 2D em *software* ABAQUS®. O passo final neste módulo consiste em criar partições, que não é mais do que dizer ao *software* que partes são definidas como substratos e que partes são constituídas por adesivo.

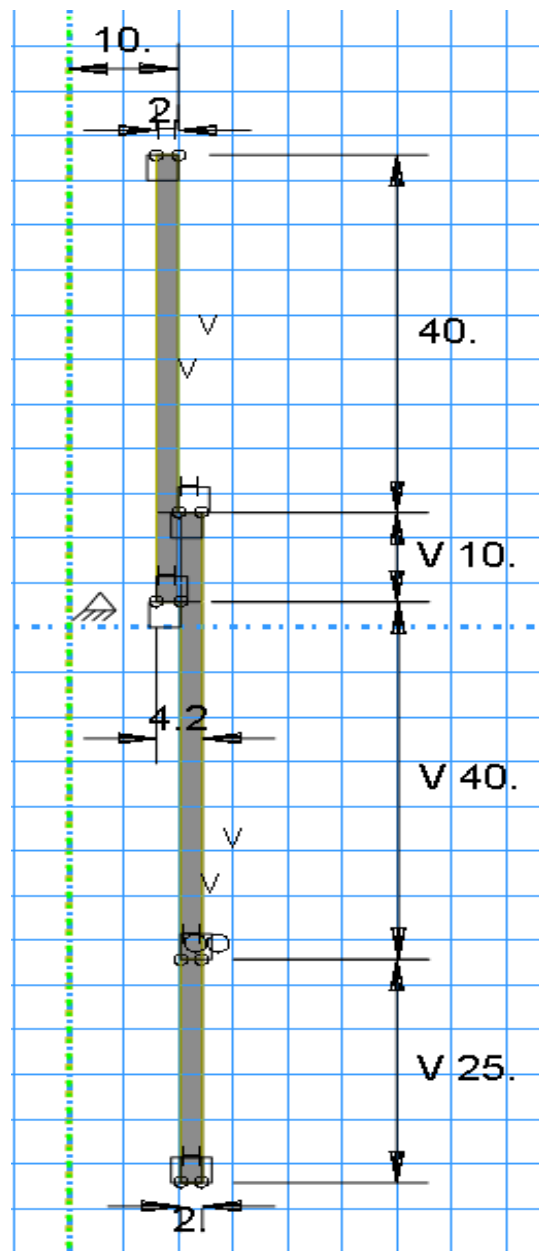


Figura 39 - Desenho 2D da junta adesiva tubular em ABAQUS®.

3.3.2.2. Módulo Property

No módulo *Property* são criados os materiais caso não existam na biblioteca do ABAQUS®, e definidas as respetivas propriedades mecânicas, sendo atribuídos os materiais criados a cada uma das partições correspondentes. O substrato em aço DIN 55 Si7 é definido tendo em conta a sua rigidez e plasticidade. Já os adesivos são definidos por aproximação contínua, a qual inclui a lei coesiva triangular, e incluem a rigidez do adesivo, a densidade (ρ), o elemento de iniciação do dano *Quad Damage* e o elemento de propagação do dano, designado de *power law* de expoente 1. A massa é definida como tendo um comportamento elástico e o seu ρ . Na Figura 40 está representada a criação dos materiais necessários para o estudo numérico (*material manager*), bem como a respetiva atribuição às secções correspondentes (*section manager*). Para este estudo

numérico foram utilizados os adesivos da Tabela 14, sendo cada um criado com as propriedades mecânicas correspondentes.

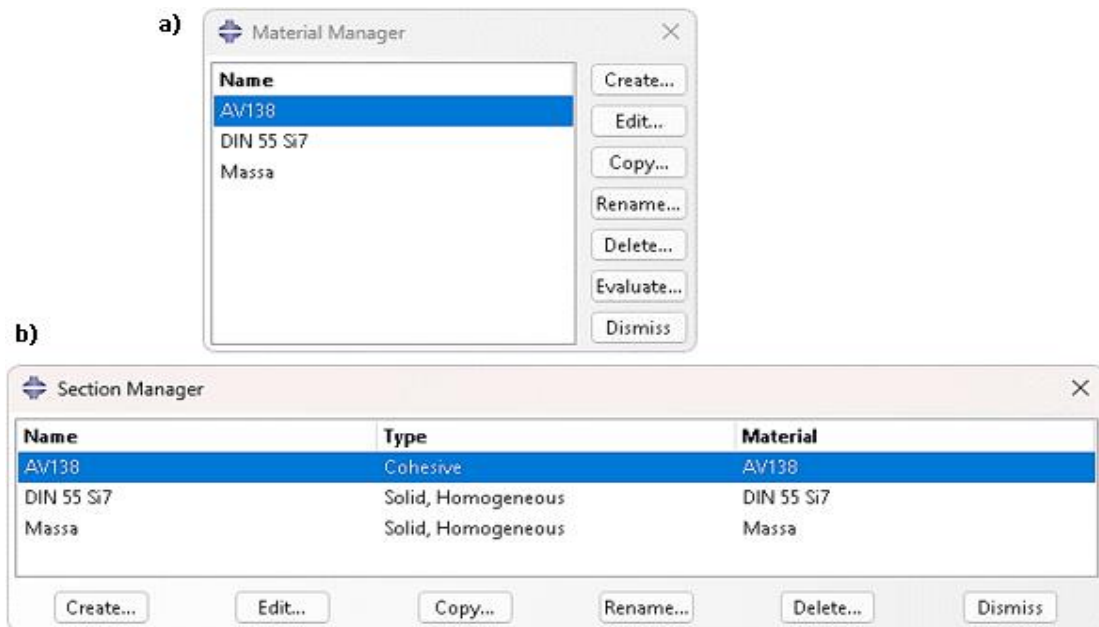


Figura 40 – a) criação de materiais e b) atribuição dos materiais no ABAQUS®.

Como anteriormente foi dito, esta massa serve apenas para simular energia de impacto, sendo que não deve interferir na resistência da junta. Por este motivo, é considerado um módulo de Young (E) de valor muito elevado (500000 MPa) com um valor típico para o coeficiente de Poisson (ν). Efetuados alguns estudos chegou-se a um valor que garante a separação dos substratos com cerca 40 J. É com a fórmula da energia cinética e esta energia que se vai calcular o ρ da massa para uma velocidade de impacto de 1,75 m/s calculada no Capítulo 3.2.2. O cálculo está representado na Equação (13):

$$E = \frac{1}{2}mv^2 \Leftrightarrow 40 = \frac{1}{2}m(1,75)^2 \Leftrightarrow m = 26,12 \text{ kg} \quad (13)$$

Para calcular o volume da massa é apresentada a Equação (14):

$$V = ((\pi \cdot 12,2^2) - (\pi \cdot 10,2^2)) \cdot 25 = 3518,58 \text{ mm}^3 \quad (14)$$

O ρ da massa é obtido através da Equação (15):

$$\rho = \frac{m}{V} = \frac{26,12}{3518,58} = 0,00743 \frac{\text{kg}}{\text{mm}^3} \quad (15)$$

3.3.2.3. Módulo Step

No módulo *Step* são criadas as condições e definidos os parâmetros para a computação da simulação. Para este estudo foi criado um *step* do tipo *Dynamic/Explicit*, uma vez que se trata de um ensaio dinâmico. Para todos os ensaios que mais à frente são apresentados foi definido um tempo de ensaio de 0,0005 s. Para os campos dos *history outputs manager* foram definidas em específico as variáveis U2, a qual representa o deslocamento da junta segundo a direção y , e a variável RF2, a qual representa a força de reação no encastramento criado (descrito no módulo *Load*), com um intervalo de registo de valores a cada 500 ms para a representação gráfica das curvas $P-\delta$. Além das variáveis U2 e RF2, são necessárias definir outras variáveis no menu *field*

output manager, como as tensões, deformações e deslocamentos nos elementos globais da junta, bem como a variável PEEQ, a qual dá a deformação dos elementos da junta no final do ensaio e o modo de rutura. Estas configurações estão representadas na Figura 41 e Figura 42.

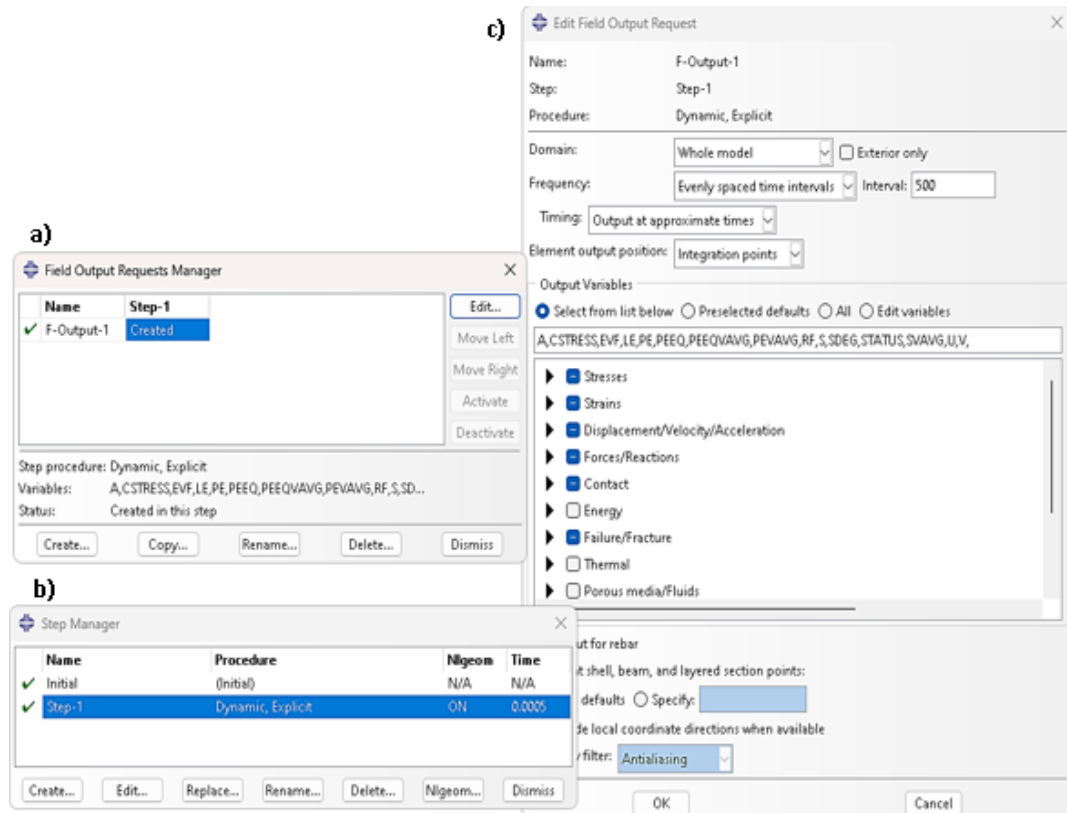


Figura 41 – a) *fields outputs*, b) configuração do *step* c) configuração dos *fields outputs* no ABAQUS®.

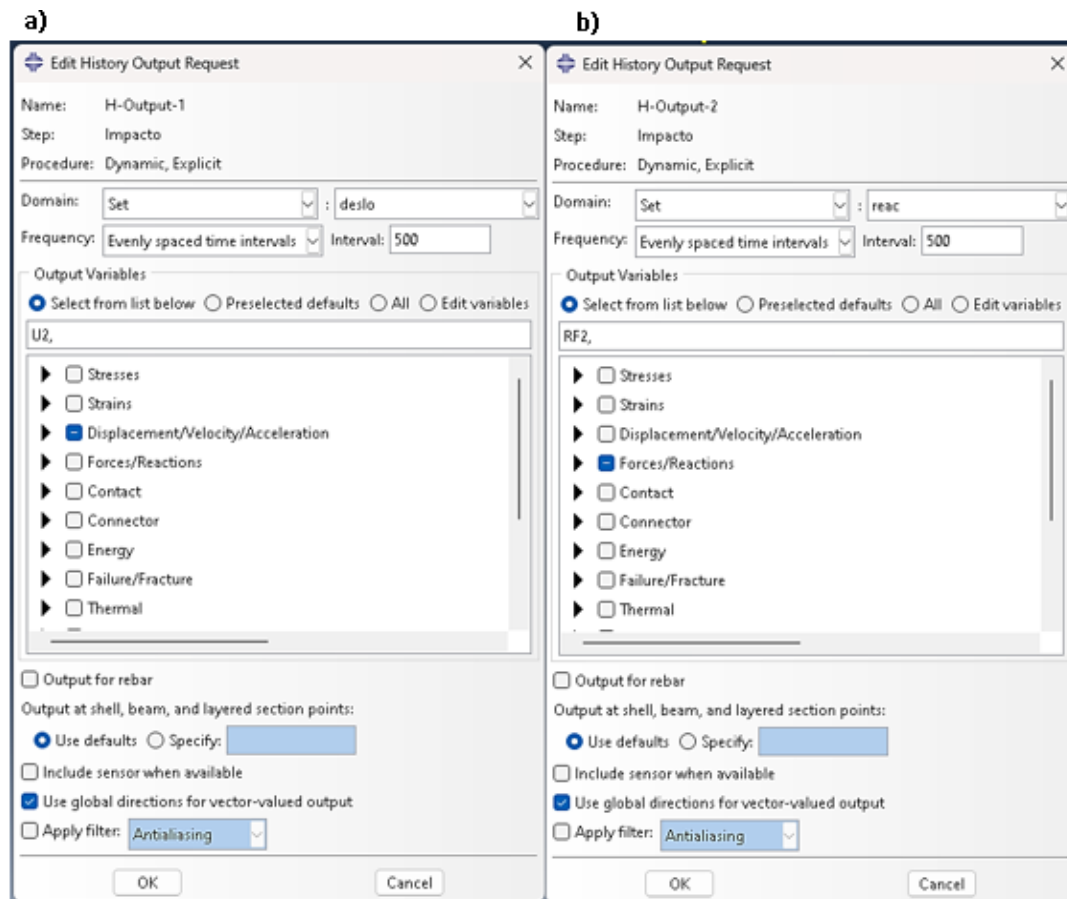


Figura 42 – a) configuração da variável U2 e B) variável RF2 no ABAQUS®.

3.3.2.4. Módulo Load

No módulo *Load*, são definidas as condições fronteira do modelo a analisar. As condições fronteira definidas para este estudo numérico são a fixação da junta e a carga aplicada. Para este caso de estudo em concreto foi aplicada uma condição do tipo *Displacement/Rotation* na aresta indicada no substrato interior, que impede a translação segundo o eixo *Y*, conforme indicado na Figura 43.

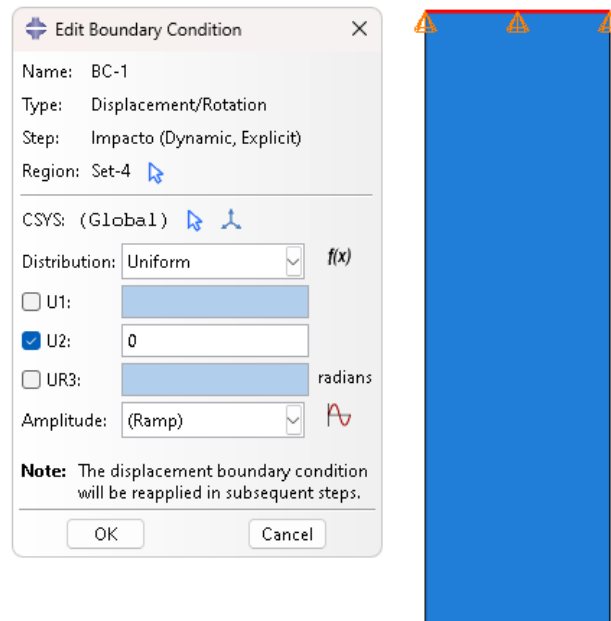


Figura 43 - Definição das condições fronteira no ABAQUS®.

Definidas as condições fronteira, o próximo passo é aplica a força ao modelo. Para este estudo foi imposta uma *Predefined Field* do tipo *Velocity* à massa, conforme mostra a Figura 44, de forma a simular um efeito de impacto, com a velocidade pré-definida de 1,75 m/s. No *software* a velocidade deve entrar em mm/s com sinal da orientação dos eixos.

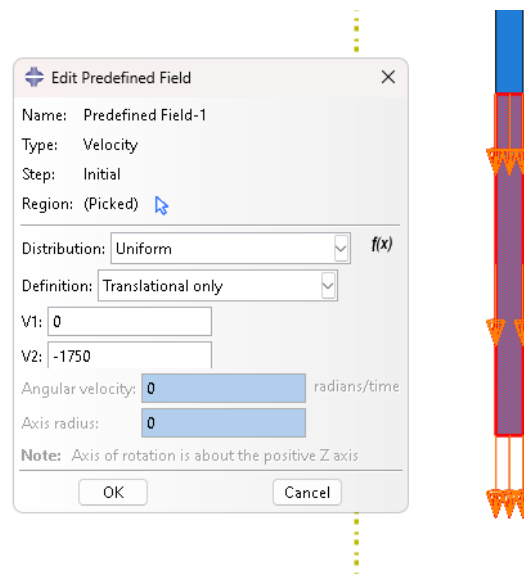


Figura 44 - Aplicação da carga ao modelo no ABAQUS®.

3.3.2.5. Módulo Mesh

No módulo *Mesh* é feita a discretização do modelo em elementos finitos. Tendo em conta que se escolheu um material para os substratos para que a rutura ocorra pelo adesivo, foi definida nesta fase um refinamento da malha na camada adesiva muito superior, em detrimento da zona dos substratos, para observar a evolução na xona de interesse para o estudo numérico. Estas malhas constituem as análises para extrair as curvas $P-\delta$ para todos os parâmetros geométricos e estão ilustradas na Figura 45.

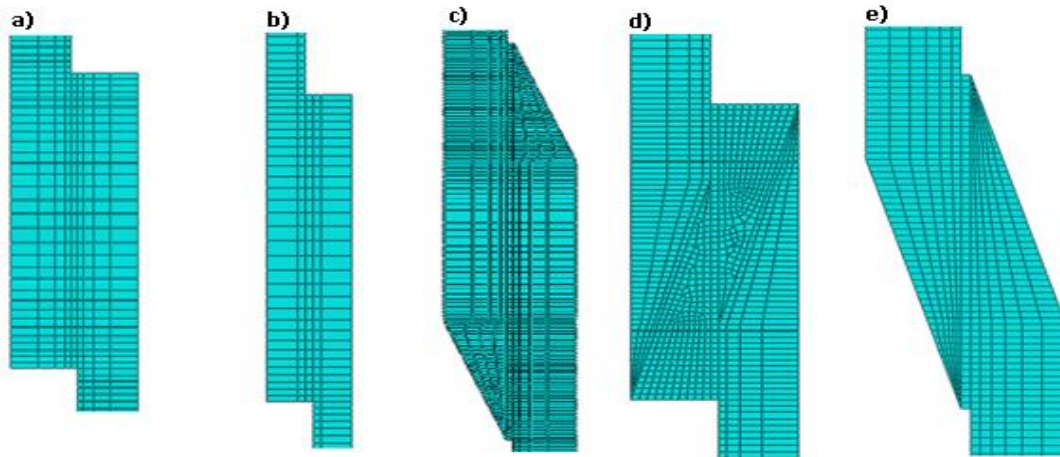


Figura 45 - Malhas para a) L_0 b) t_p c) *fillet* de adesivo d) chanfro interior e) chanfro exterior.

Além da definição da malha, foram definidos os tipos de elementos que constituem a malha e controlo da mesma. Para os substratos foram definidos elementos do tipo *Explicit* da família *Axissymmetric Stress*, isto é, axissimétricos bilineares deformáveis de 4 nós (CAX4R - *4-node bilinear axisymmetric quadrilateral*) e do tipo *cohesive* na camada adesiva, isto é, elementos coesivos axissimétricos de 4 nós (COHAX4 - *4-node axisymmetric cohesive element*) com uma viscosidade específica de $1E-5$. Relativamente ao controlo de malha, foram definidos elementos quadráticos do tipo *Structured* nos substratos e do tipo *Sweep* na camada adesiva. A definição realizada em ABAQUS® pode ser vista na Figura 46.

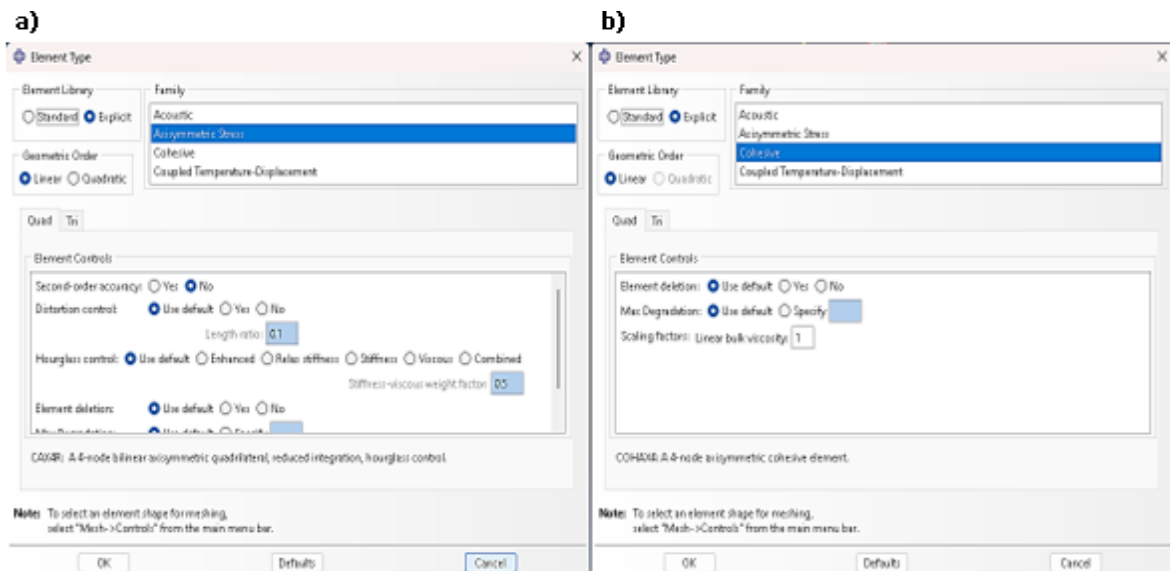


Figura 46 - Definição de a) do tipo de elementos nos substratos e b) nos substratos..

Para se conseguir analisar a distribuição das tensões ao longo da camada adesiva em regime elástico, os modelos numéricos desenvolvidos no *software* ABAQUS® foram reformulados. Em primeiro lugar, foram definidas as propriedades do adesivo para comportamento elástico, de acordo com a Tabela 14, para ensaio ao impacto, onde foi necessário entregar ao *software* o módulo de Young (E), o coeficiente de Poisson (ν) e densidade (ρ). Relativamente à partição correspondente ao adesivo, este foi alterado, passando de *Cohesive* para *Solid/Homogeneous*, conforme ilustrado na Figura 47.

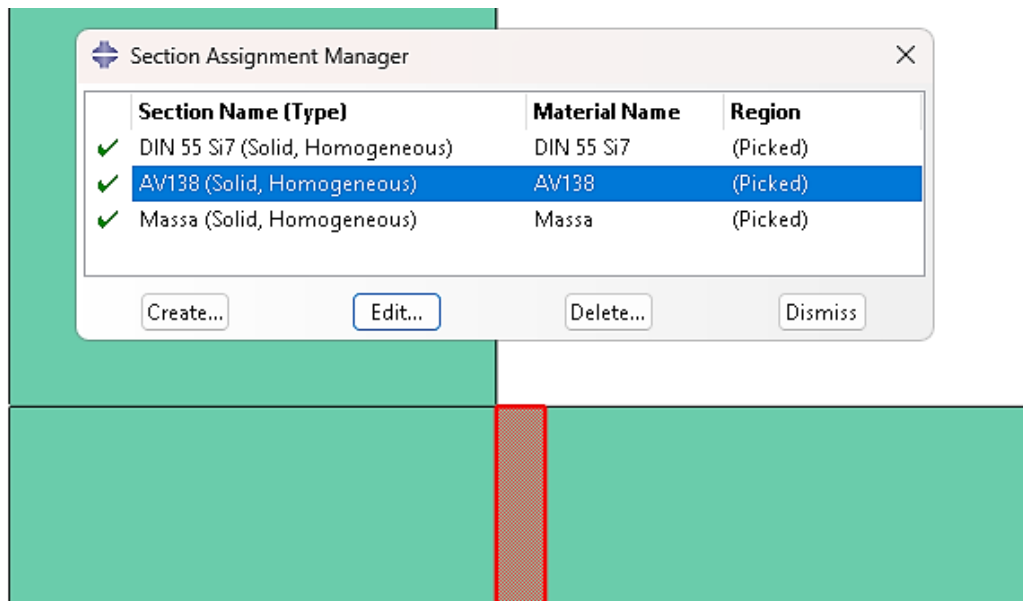


Figura 47 - Redefinição da partição do adesivo para extrair as tensões.

Quanto às alterações na malha, esta foi refinada 10 vezes conforme se pode ver na Figura 48, sendo atribuídas sementes com um tamanho de 0,02 mm à camada adesiva, ou seja, 10 elementos, e um *single bias* na direção da camada adesiva, no que diz respeito aos substratos, de forma a obter precisão nos resultados. Para a evolução do dano foram escolhidos elementos *Quad Damage* do tipo *Structured*.

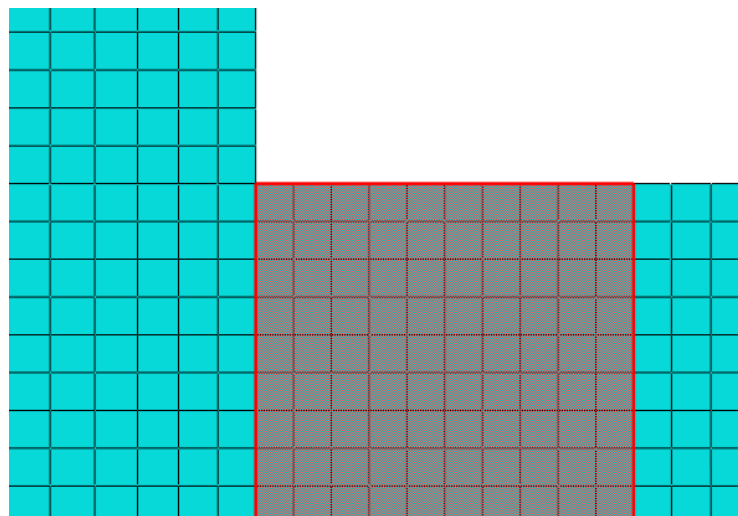


Figura 48 - Refinamento da malha para extração das tensões.

Para a extração e análise de tensões, no módulo *Step* foi definido, para todos os modelos, que a simulação ocorre a um *step time* de 0,0005 s. Para a extração das tensões, foi definido o comprimento normalizado (*normalized distance*), o qual representa o quociente entre uma posição qualquer “X” desde a extremidade do substrato e ao longo da camada adesiva e o comprimento total de sobreposição (L_0). Para a construção gráfica das tensões, foram normalizadas tanto as tensões de corte τ_{xy} , como as tensões normais σ_y pela tensão de corte média $\tau_{méd}$, para o L_0 correspondente.

3.3.2.6. Módulo Job

No módulo *Job* é iniciada a simulação para a obtenção dos resultados. Neste módulo deve ser inserida a capacidade computacional, de acordo com o computador disponível, desejada para a simulação. Entre as opções disponíveis, o comando *Monitor* permite verificar a evolução da simulação ao longo dos incrementos temporais anteriormente definidos. Quando a simulação é terminada, no campo *Results* são apresentados os resultados da mesma. Para este estudo numérico é possível observar um *Job* criado na Figura 49.

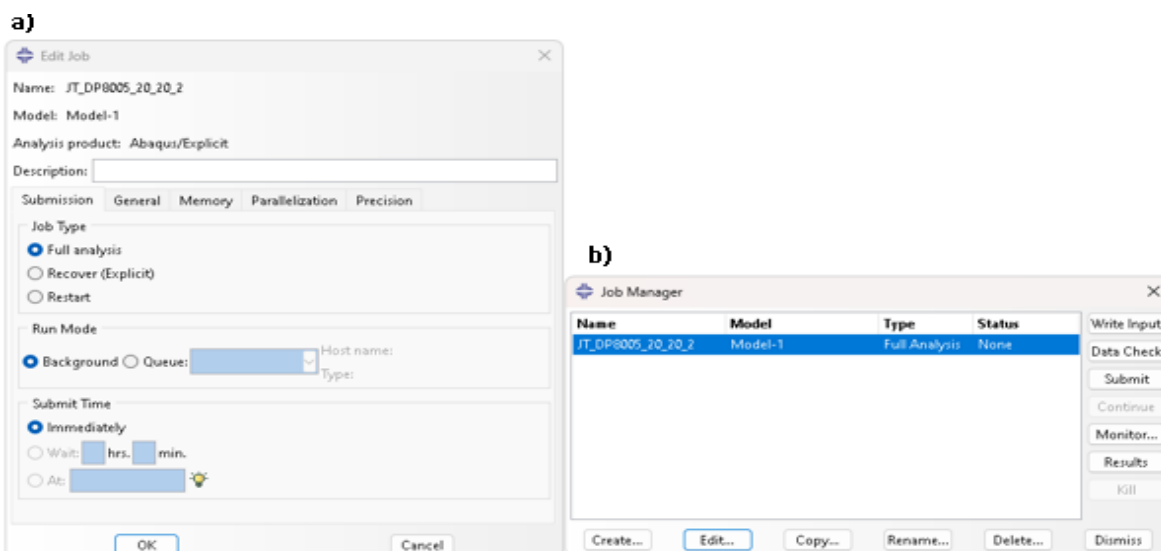


Figura 49 – a) criação do *Job* e b) edição do *Job* no ABAQUS®.

3.3.2.7. Módulo Visualization

No módulo *Visualization* é realizado o pós-processamento, onde é possível a visualização da estrutura deformada, das tensões e das deformações durante todas as fases de carregamento da junta. Para este caso de estudo são extrapolados os resultados para folhas de cálculo *Excel*, para construir as curvas $P-\delta$ através de gráficos de dispersão, começando por retirar as reações obtidas na condição fronteira definida, seguido do deslocamento na extremidade do corpo.

3.3.3. Estudos das variáveis geométricas principais

Neste subcapítulo, é analisado numericamente a influência das variáveis geométricas principais na resistência final da junta, nomeadamente do comprimento de sobreposição e da espessura dos tubos. Para cada estudo das variáveis tornou-se necessário definir a geometria de base, correspondente aos parâmetros inalterados em cada estudo. Assim sendo, para o comprimento de sobreposição foi definido o valor base de 10 mm, enquanto para a espessura dos substratos foi definido o valor base de 2 mm.

3.3.3.1. Comprimento de sobreposição

O primeiro parâmetro geométrico a ser estudado é o comprimento de sobreposição (L_0). O L_0 corresponde ao comprimento de ligação dos dois substratos (representados a verde na Figura 50).

O L_0 base é de 10 mm, a ser estudado juntamente com alterações para 20 mm e 40 mm, para os três adesivos indicados na Tabela 14. A amarelo na Figura 50 está representada a camada adesiva.

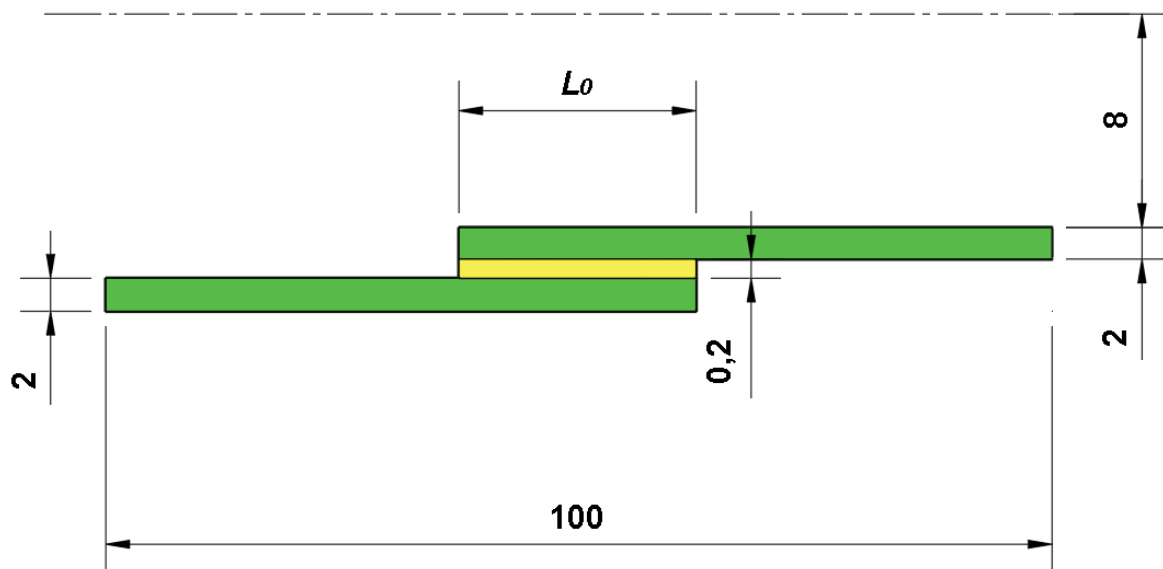


Figura 50 - Geometria base de teste para variação de L_0 .

3.3.3.1.1. Distribuição de tensões

Conforme se pode observar na Figura 51, os picos de maior concentração de tensões normais σ_y , para o adesivo AV138, situam-se nas zonas que correspondem às extremidades da camada adesiva, uma vez que os picos apresentam valor absoluto superior da relação entre $\sigma_y/\tau_{méd.}$. Denota-se ainda que estes picos de tensão são maiores para L_0 superiores. Como era expectável, o aumento de L_0 aumenta consideravelmente a resistência da junta adesiva, tornando-a capaz de suportar maiores concentrações de tensões até à rutura. Percebe-se ainda pela Figura 51 que não existe simetria na distribuição de tensões entre as duas extremidades da junta, pois trata-se de um ensaio dinâmico, o que leva a um comportamento instável das curvas apresentadas devido às ondas de tensão de impacto e, conseqüentemente, a gradientes diferentes de tensão resultantes da curvatura e/ou da deformação transversal da junta, o que resulta em esforços de tração distintos. Pela Figura 51, denota-se ainda que o aumento de L_0 provoca uma maior oscilação destas tensões ao longo de L_0 , resultantes de uma dispersão maior ao longo de L_0 das ondas de impacto.

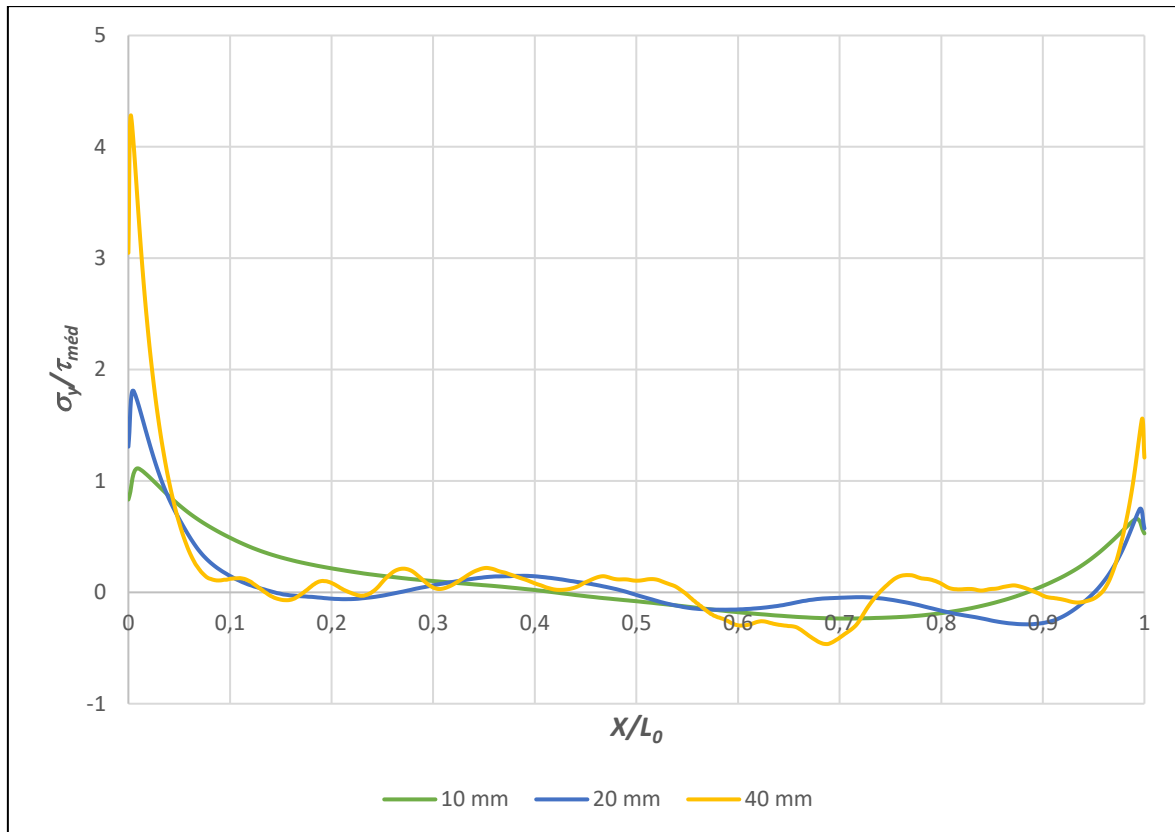


Figura 51 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo AV138 em função de L_0 .

Na Figura 52 estão representadas as curvas de tensão τ_{xy} ao longo de L_0 para o adesivo AV138. Tal como para as tensões normais σ_y , as tensões de corte apresentam um pico maior nas zonas que correspondem às extremidades da camada adesiva. Denota-se também que o valor absoluto dessas tensões é superior para valores de L_0 maiores. O aumento de L_0 aumenta a resistência global da junta, uma vez que aumenta a capacidade de absorção da energia de impacto e, consequentemente, o aumento das tensões aumenta a capacidade de transportar a carga ao longo de L_0 . Ao longo da camada adesiva, as juntas com $L_0=10$ mm e $L_0=20$ mm não apresentam grande diferença, aparentando ser bastante uniformes, mas o aumento considerável para um $L_0=40$ mm apresenta uma maior oscilação no gradiente de tensões.

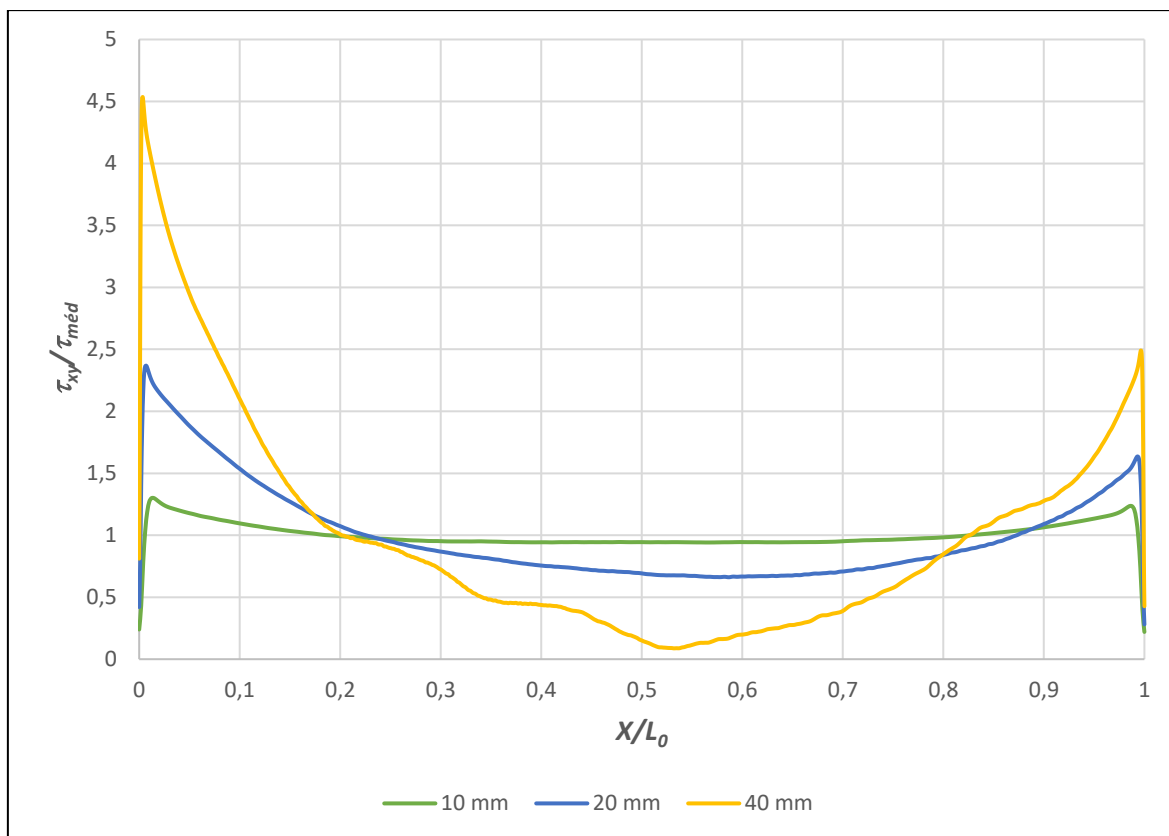


Figura 52 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função de L_0 .

Na Figura 53 estão representadas as curvas com a distribuição das tensões normais σ_y , para o adesivo DP8005, ao longo da camada adesiva para todos os L_0 . Como é possível observar, os picos de maior concentração de tensões encontram-se nas extremidades da camada adesiva, com esses picos de tensão a serem maiores para valores de L_0 superiores. Tal como para o adesivo AV138, o aumento de L_0 aumenta a área adesiva da junta, conferindo-lhe maior rigidez global e maior capacidade para absorver energia no esforço de impacto. Para um $L_0=20$ mm, os picos de tensão são cerca de 30% maiores do que em relação ao $L_0=10$ mm, e para o $L_0=40$ mm esses picos de tensão são cerca de 104% maiores do que em relação ao $L_0=10$ mm, e cerca de 57% superiores do que em relação ao $L_0=20$ mm. Relativamente à zona central da camada adesiva, esta não apresenta grande uniformidade, sobretudo para valores de L_0 superiores, com a existência de tensões de tração e compressão sobretudo para o $L_0=40$ mm. Em termos de valor absoluto, os picos de tensão apresentam valores inferiores ao adesivo AV138, uma vez que o adesivo DP8005 apresenta uma rigidez bastante inferior ao adesivo AV138.

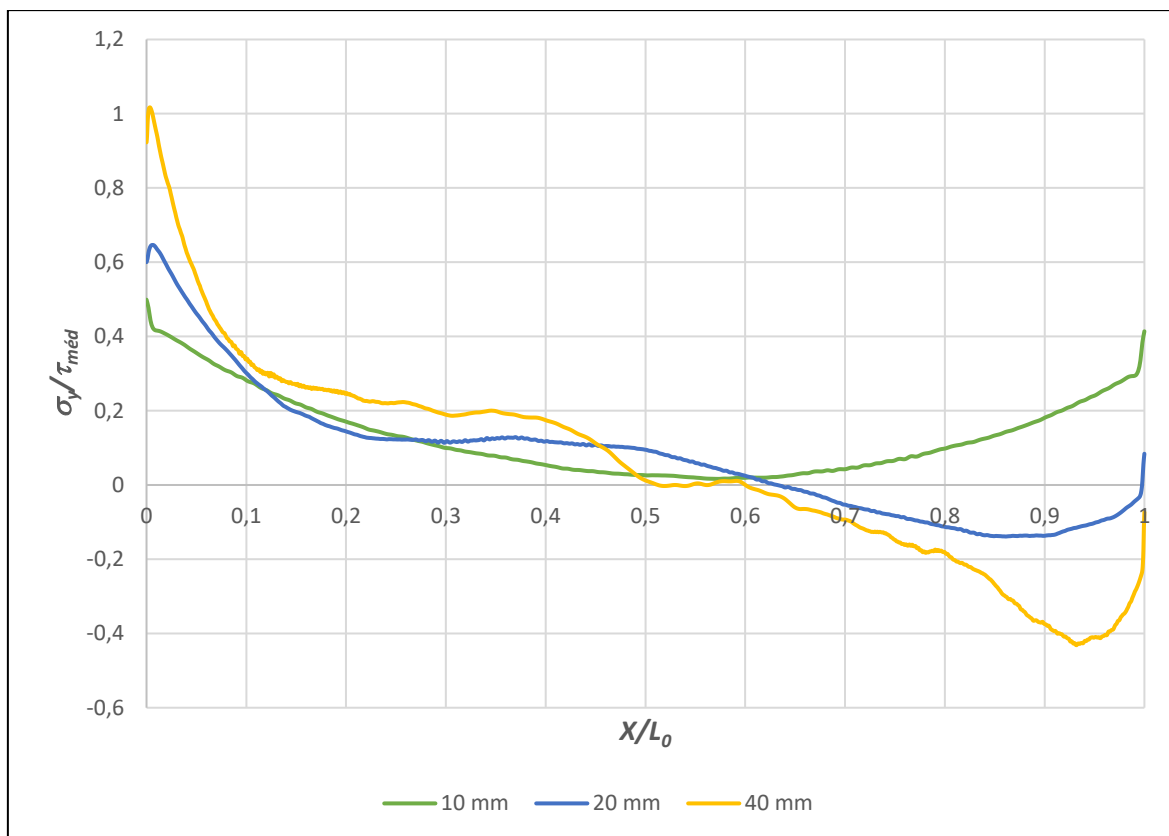


Figura 53 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função de L_0 .

Na Figura 54 estão representadas as curvas de tensão de corte τ_{xy} na zona da camada adesiva e para todos os L_0 ensaiados com o adesivo DP8005. Como é possível observar pela representação gráfica da Figura 54, e tal como para o adesivo AV138, os picos de maiores concentrações de tensões situam-se nas zonas das extremidades da camada adesiva, não existindo grande diferença, quer no comportamento, quer no valor dessas tensões, para os $L_0=10$ mm e $L_0=20$ mm, existindo, contudo, uma maior variação para um $L_0=40$ mm. De forma semelhante ao adesivo AV138, a distribuição de tensões é assimétrica, por se tratar de uma junta tubular onde os dois substratos apresentam diâmetros e, por isso, áreas diferentes. Assim como no adesivo AV138, os picos de tensão de corte são menores para todos os L_0 testados, devido à menor rigidez do adesivo DP8005. Por igual motivo, a distribuição de tensões τ_{xy} ao longo da camada adesiva é mais uniforme para este adesivo do que para o adesivo AV138.

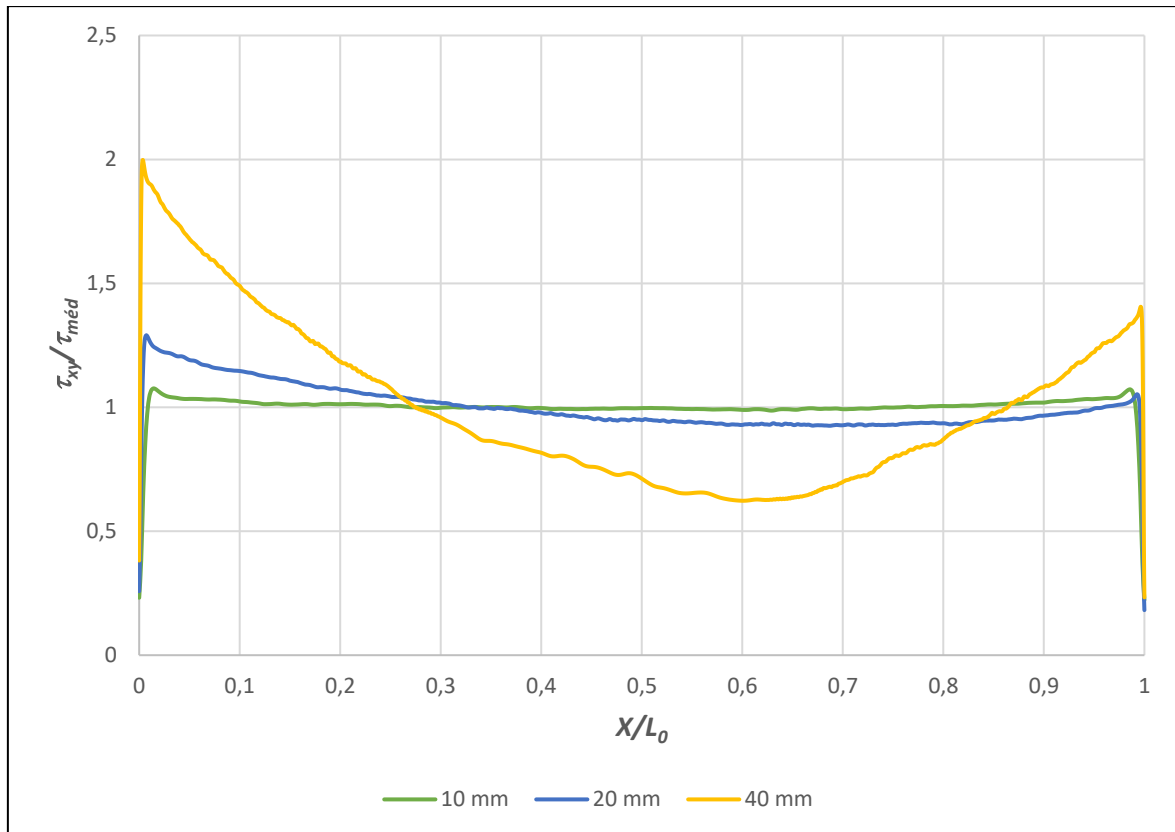


Figura 54 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função de L_0 .

A distribuição das tensões σ_y para com o adesivo XNR6852 E-2 está ilustrada na Figura 55. Da mesma forma que se verificou para os adesivos AV138 e DP8005, para todos os L_0 ensaiados, os picos de maiores concentrações de tensões situam-se nas extremidades da camada adesiva. A junta adesiva com um $L_0=20$ mm obteve picos de tensão cujo valor absoluto foram cerca de 39% superior ao da junta com $L_0=10$ mm, enquanto a junta com um $L_0=40$ mm obteve um valor máximo absoluto cerca de 136% superior ao da junta com um $L_0=10$ mm e cerca de 70% superior ao da junta com um $L_0=20$ mm. Assim, a junta com um $L_0=10$ mm, apresenta a menor concentração de tensões nas extremidades, e é a que apresenta uma distribuição das tensões mais uniforme ao longo da camada adesiva. De igual modo aos dois adesivos testados anteriormente, verifica-se uma assimetria na distribuição das tensões, essencialmente devido ao facto de os dois tubos possuírem diferentes diâmetros e, assim, diferentes áreas.

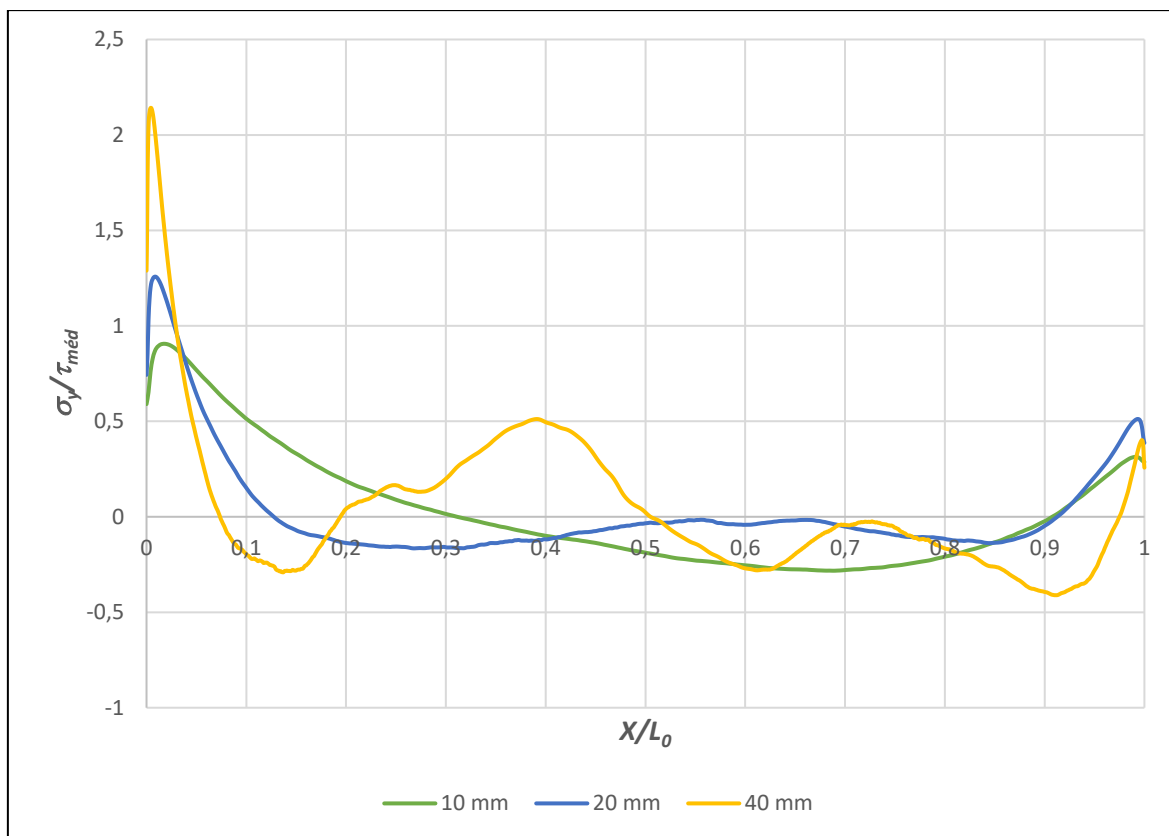


Figura 55 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0 .

A distribuição das tensões de corte τ_{xy} com o adesivo XNR6852 E-2 é apresentada na Figura 56. Mais uma vez, e da mesma forma que se verificou para os adesivos AV138 e DP8005 analisados anteriormente, a junta com um $L_0=10$ mm apresenta menores concentrações de tensões. A junta com um $L_0=40$ mm foi a que teve maiores picos de tensão. A junta com um $L_0=20$ mm obteve picos de tensão cerca de 23% superiores ao da junta com $L_0=10$ mm, enquanto que a junta com $L_0=40$ mm teve picos de tensão cerca de 126% superiores ao valor máximo atingido pela junta com $L_0=10$ mm, e cerca de 84% em relação à junta com $L_0=20$ mm. Além de apresentar menores concentrações de tensões nas extremidades, a junta com $L_0=10$ mm apresenta também uma distribuição das tensões mais uniforme na zona da camada adesiva. Mais uma vez, verifica-se uma assimetria na distribuição das tensões principalmente devido à diferença de diâmetro dos dois substratos e, assim diferentes áreas.

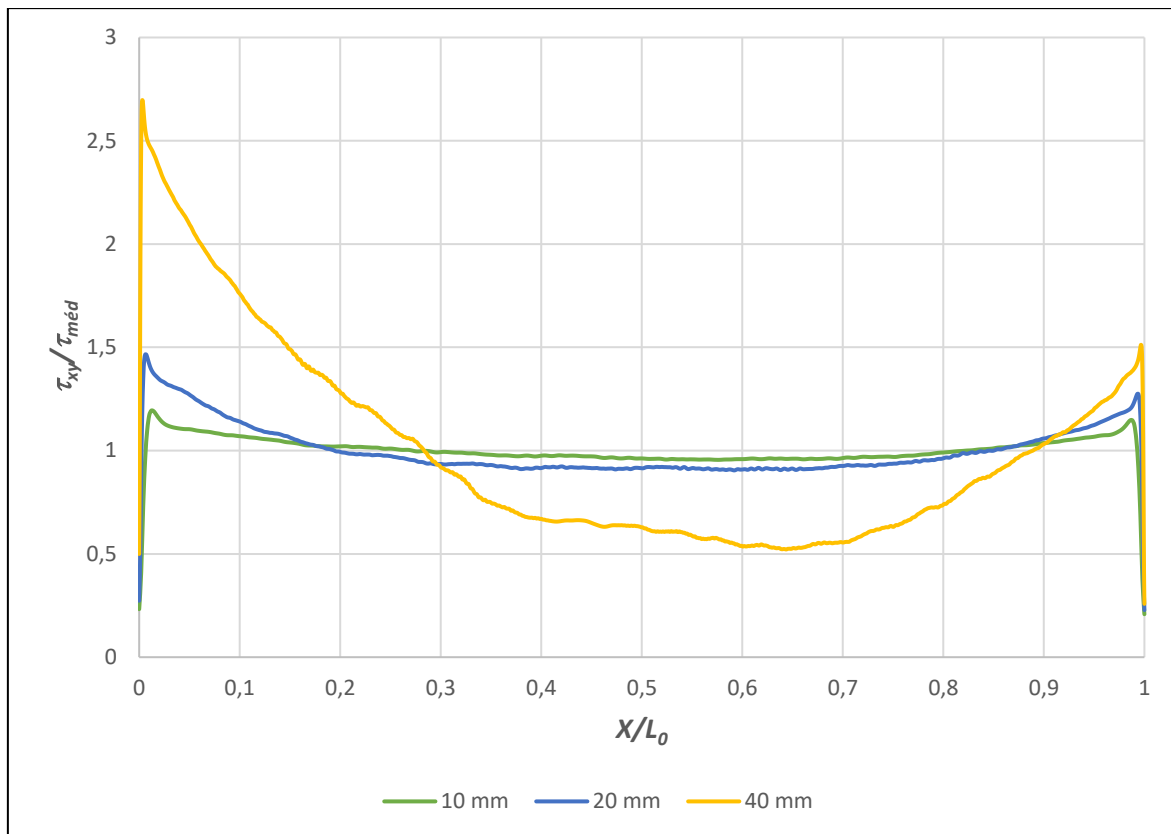


Figura 56 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0 .

3.3.3.1.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida

De forma a se conseguir avaliar a resistência das juntas, foram testadas juntas com diferentes L_0 fazendo recurso a três adesivos diferentes. Na Figura 57 estão representadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo AV138. Conforme se pode ver, o pico mais alto das curvas corresponde à carga máxima atingida ($P_{máx}$), aumenta quando L_0 aumenta, bem como o deslocamento (δ) suportado pela junta antes de ocorrer a rutura. Por este adesivo possuir propriedades mecânicas muito elevadas, dadas as condições de ensaio, é necessário referir que para o $L_0=40$ mm não ocorreu a rutura da junta. Assim, foi necessário aumentar a energia de rutura ou, no caso, o valor de ρ da massa de impacto. Assim, a massa de impacto para este L_0 foi duplicada, mantendo-se as condições de ensaio, o que permitiu aplicar uma energia de impacto de 80 J. Para se compreender melhor o efeito na resistência da junta provocado pelo aumento de L_0 , na Figura 58 estão representados os valores da carga máxima ($P_{máx}$) suportada pela junta, para cada um dos valores de L_0 testados com o adesivo AV138. Conforme se pode verificar, e em consonância com a revisão bibliográfica apresentada no Capítulo 2.2.1.2, o aumento de L_0 significa um aumento da área colada com adesivo, resultando numa maior capacidade da junta em suportar a carga de impacto aplicada e, assim, num aumento da resistência global da junta, o que é equivalente a referir um aumento de $P_{máx}$ e do deslocamento (δ) até à rutura.

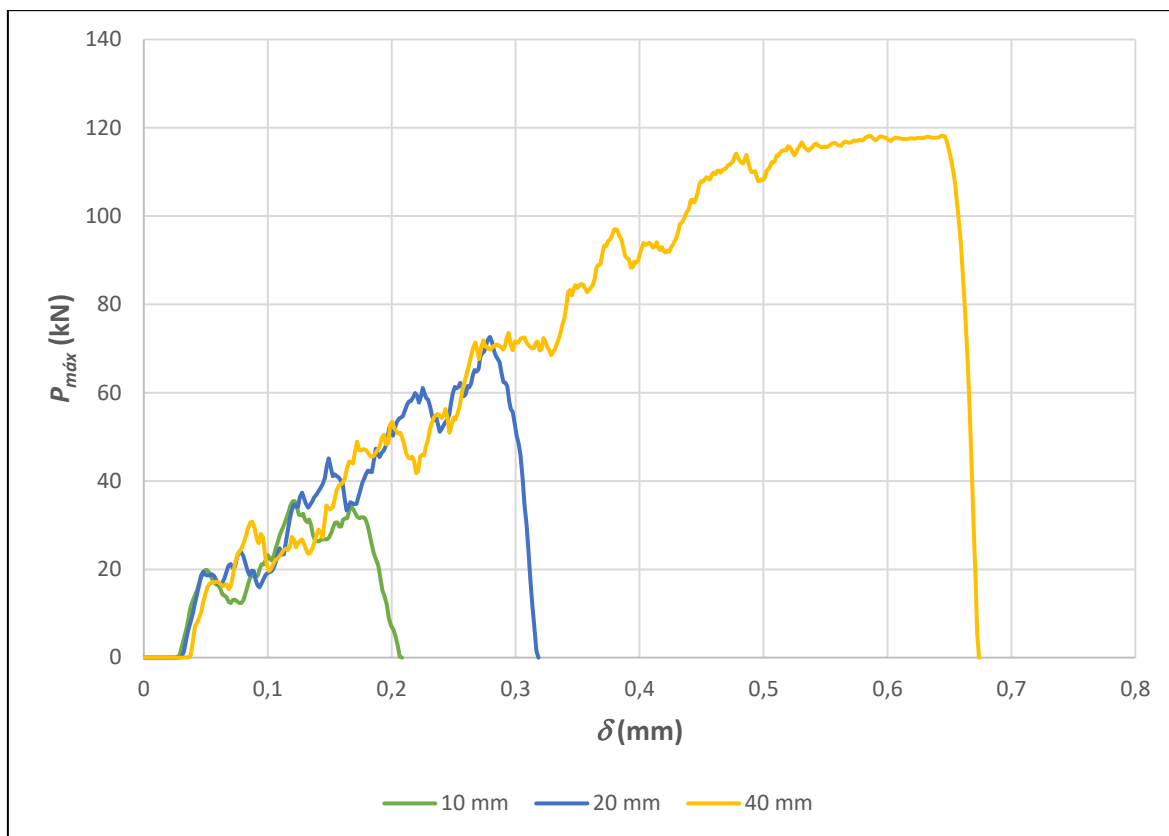


Figura 57 - Curvas P - δ para o adesivo AV138 em função de L_0 .

Apesar da maior resistência à medida que L_0 é incrementado, começam a surgir concentrações de tensões τ_{xy} , as quais resultam num aumento mais gradual e menos significativo de $P_{máx}$. Assim, ao analisar a Figura 58, é possível observar que o aumento de $P_{máx}$ não tem uma tendência linear e que, à medida que L_0 aumenta, os declives das retas variam, denotando-se uma diferenciação maior entre o $L_0=20$ mm e o $L_0=40$ mm.

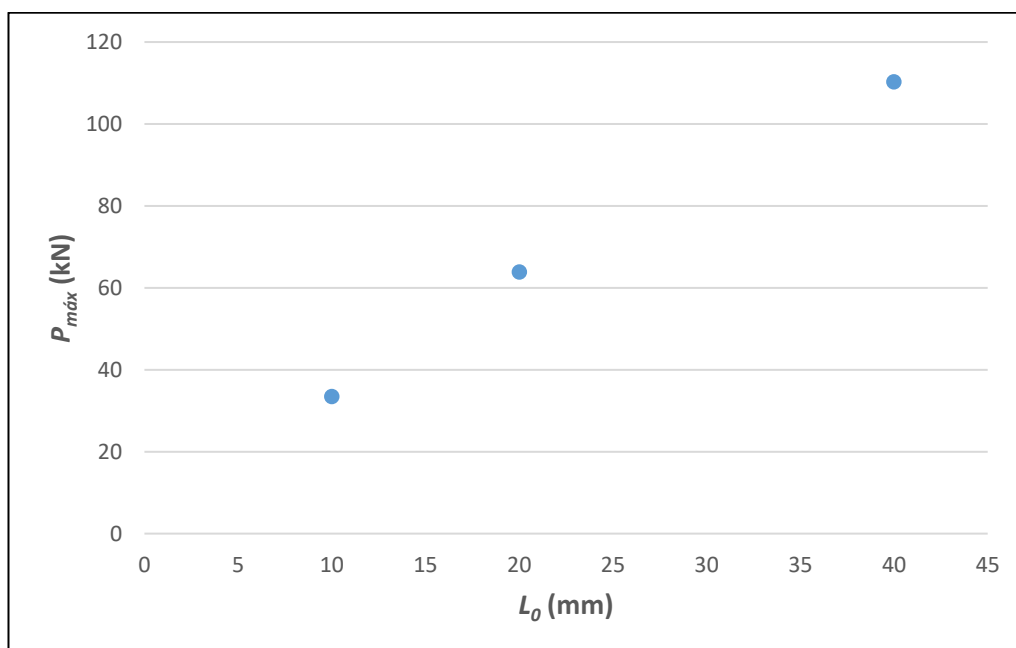


Figura 58 - Valores de $P_{máx}$ para cada L_0 testado com o adesivo AV138.

Quanto aos modos de rutura desenrolados com o adesivo AV138, notou-se que todos eles e para todos os L_0 testados ocorreram pela camada adesiva, conforme ilustrado pela Figura 59.

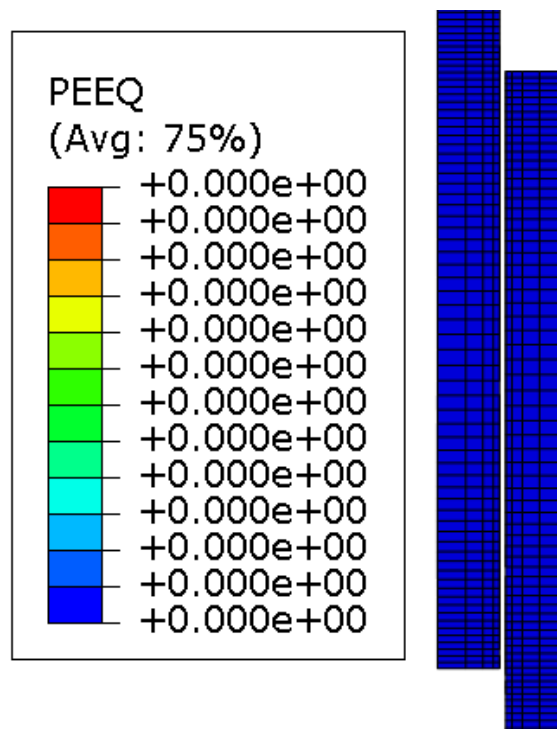


Figura 59 - Modo de rutura da junta adesiva para $L_0=20$ mm.

De referir que, para o $L_0=40$ mm, devido à maior área colada e à rigidez deste adesivo, houve plastificação do substrato interior em cerca de 0,3%, conforme se pode ver na Figura 60. Apesar disso, a rutura deu-se pela camada adesiva.

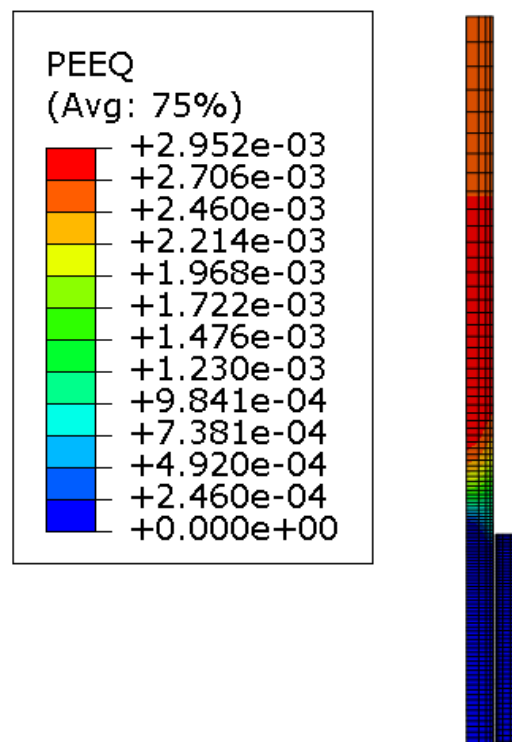


Figura 60 - Plastificação parcial do substrato com $L_0=40$ mm.

As relações das energias absorvidas ou de rutura pelas juntas em relação à junta com $L_0=10\text{mm}$ encontram-se resumidas na Tabela 15. Como se pode ver resumidamente, a E_{abs} teve um crescimento acentuado com a variação de L_0 . O maior crescimento de energia registado foi o da junta com $L_0=20\text{ mm}$ para $L_0=40\text{ mm}$ (+325,6%), sendo que a junta com $L_0=10\text{ mm}$ para $L_0=20\text{ mm}$ teve um aumento de +193,6%. Estes aumentos de E_{abs} devem-se ao aumento das áreas das curvas $P-\delta$ de cada um dos adesivos, em especial à área que corresponde à junta com $L_0=40\text{ mm}$, visto que, para esta junta, a energia de ensaio foi aumentada para 80 J. Verifica-se que o aumento de L_0 implica uma maior capacidade de absorção de energia por parte da junta adesiva.

Tabela 15 - Valores da E_{abs} pelo adesivo AV138 em função de L_0 .

L_0 (mm)	E_{abs} (J)	Comparação
10	3,9	-
20	11,3	+193,6%
40	48,3	+1149,7%

Dando continuidade ao desenvolvimento do trabalho, o próximo adesivo testado com a variação de L_0 foi o adesivo DP8005. É possível observar as curvas $P-\delta$ para todos os valores de L_0 testados numericamente na Figura 61. Com um comportamento semelhante ao que se verificou para o adesivo AV138, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ admitido pela junta, bem como o deslocamento máximo permitido, aumentam à medida que L_0 é incrementado. Assim como o comportamento do adesivo AV138, o aumento de L_0 implica uma maior resistência da junta adesiva.

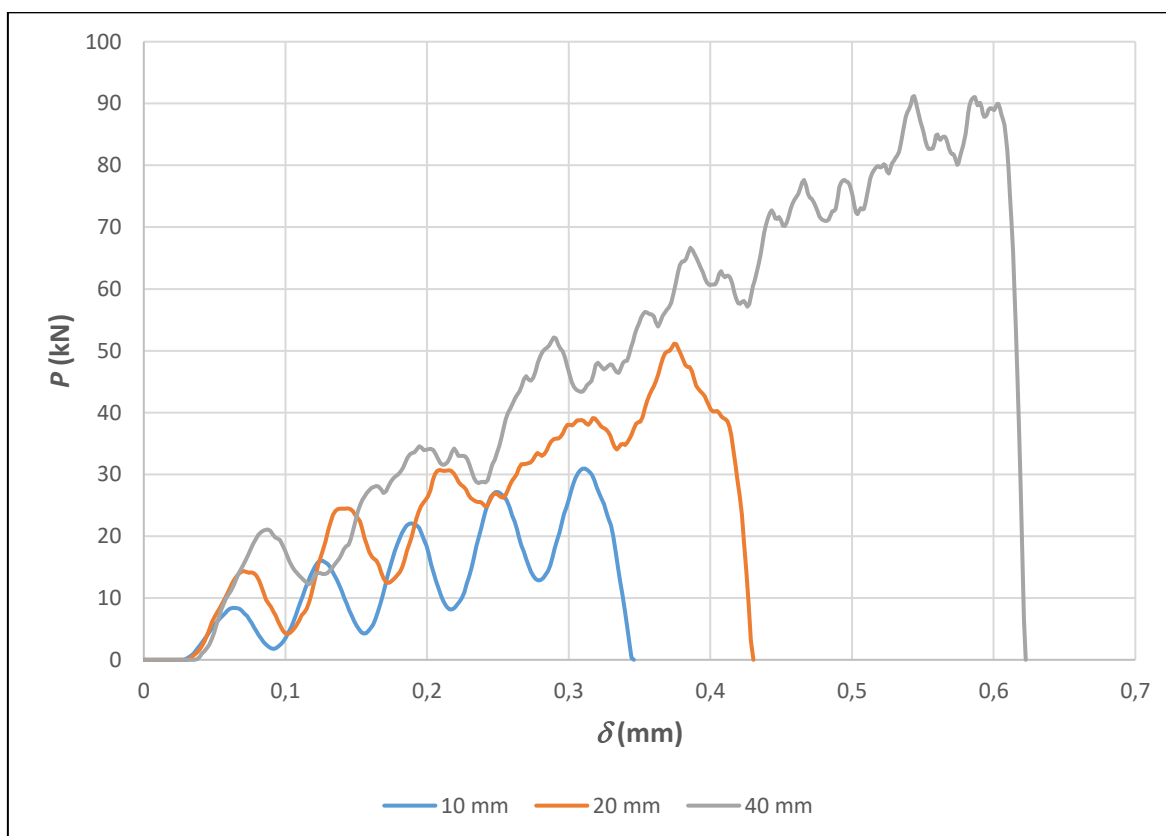


Figura 61 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo DP8005 em função de L_0 .

Da mesma forma, o deslocamento associado à rutura não apresenta uma tendência linear. Na Figura 62 está representado um gráfico com os valores de $P_{m\acute{a}x}$ registados para cada L_0 testado. Igualmente ao observado para o adesivo AV138, o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ não apresenta uma tendência

linear. De realçar que foram testados provetes com $L_0=20$ e $L_0=40$ mm, sendo não é possível, numa primeira instância, dizer que a $P_{m\acute{a}x}$ apresente linearidade em proporção com o aumento de L_0 .

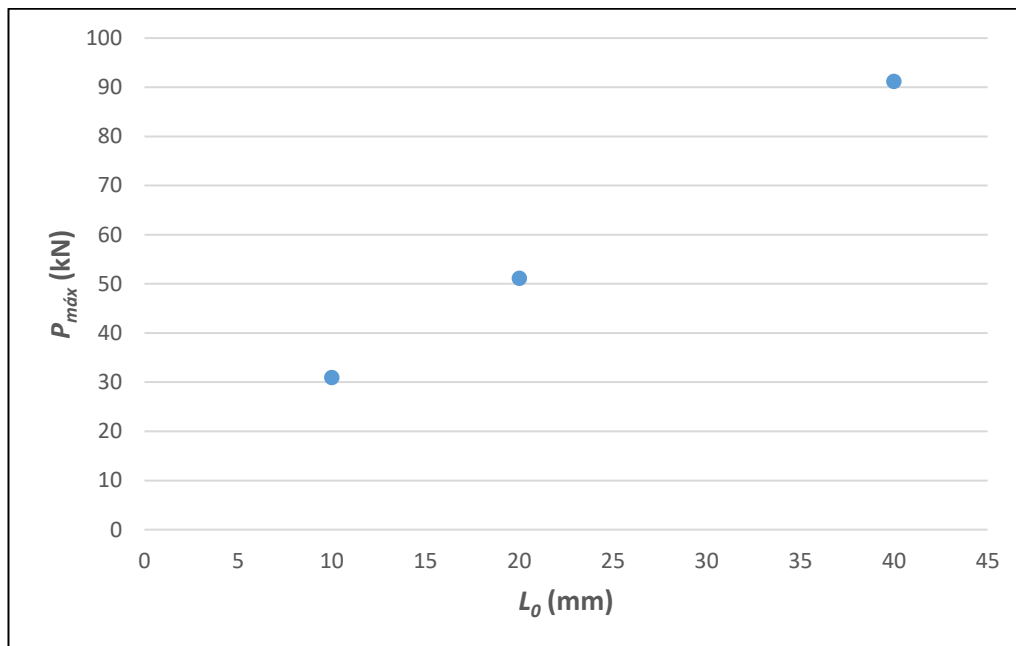


Figura 62 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada L_0 testado com o adesivo DP8005.

Relativamente ao modo de rutura no caso do adesivo DP8005, este teve uma rutura coesiva do adesivo, conforme se pode ver pela Figura 63, não existindo qualquer plastificação dos substratos em qualquer um dos L_0 ensaiados.

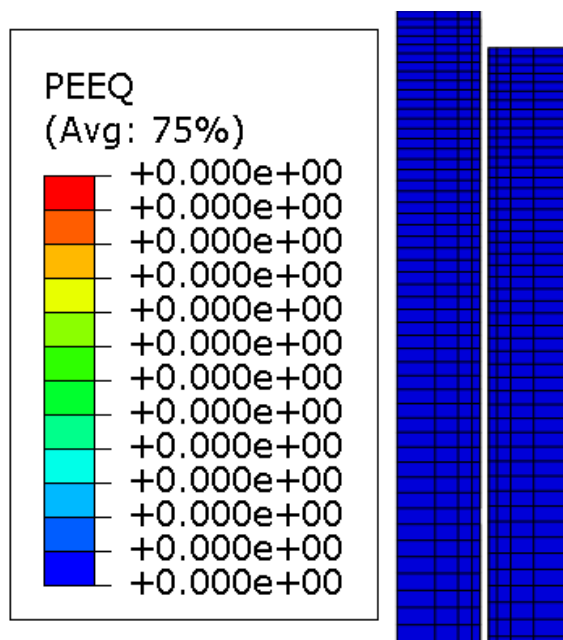


Figura 63 - Modo de rutura da junta com $L_0=40$ mm.

Para o adesivo DP8005, é possível observar na Tabela 16 que o maior aumento da capacidade de absorção de energia foi o da junta com $L_0=40$ mm em relação à junta com $L_0=20$ mm (+180,6%), sendo que a junta com $L_0=20$ mm teve um aumento de +139% em relação à junta com $L_0=10$ mm. Em termos relativos, a junta com $L_0=40$ mm teve um aumento de +570,7% em relação à junta com

$L_0=10$ mm. Para o adesivo DP8005 também se verifica que a E_{abs} aumenta com o aumento de L_0 , assim como se verificou para o adesivo AV138.

Tabela 16 - Valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 em função de L_0 .

L_0 (mm)	E_{abs} (J)	Comparação
10	4,3	-
20	10,3	+139%
40	28,9	+570,7%

Para o adesivo XNR6852 E-2, testado com a variação dos valores de L_0 , são apresentadas as curvas $P-\delta$ na Figura 64. Como os dois adesivos testados anteriormente, a resistência global das juntas testadas com o adesivo XNR6852 E-2 também aumenta quando L_0 aumenta. Da mesma forma, a carga máxima admitida pela junta antes da rutura também é superior, bem como o deslocamento máximo admitido.

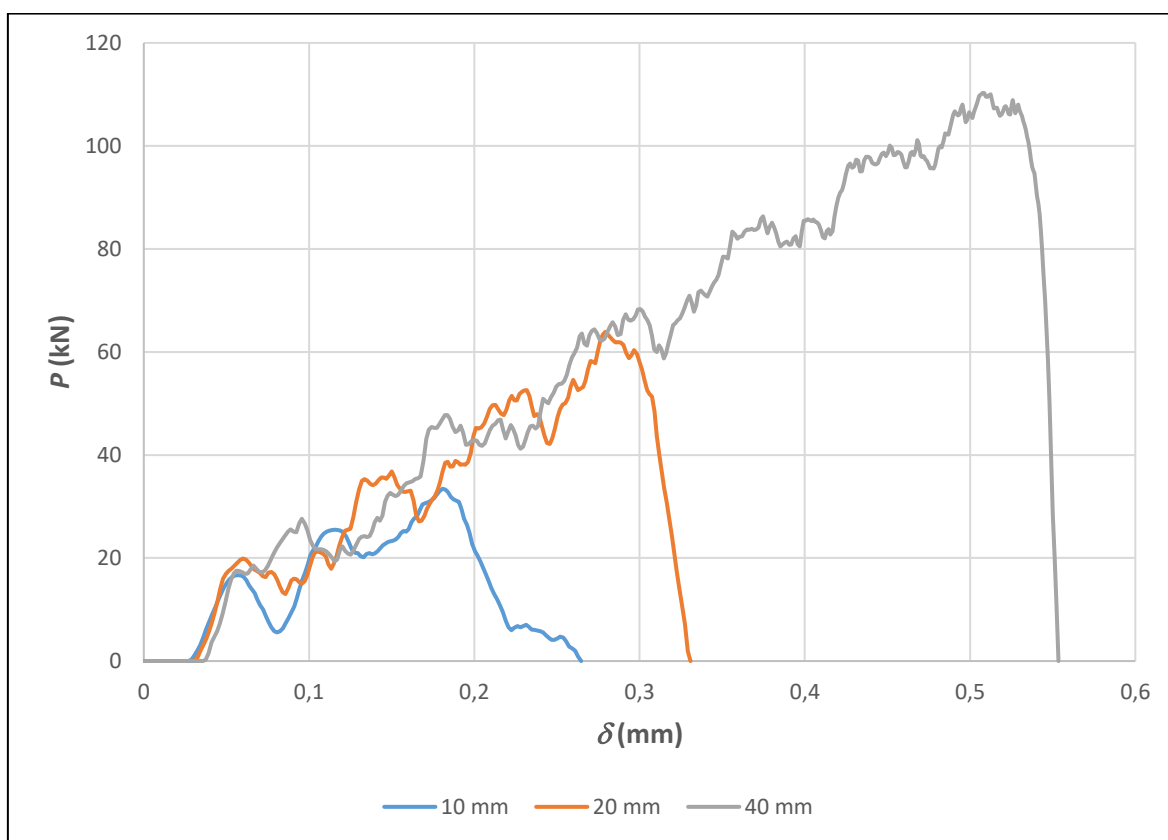


Figura 64 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0 .

Na Figura 65 está representado um gráfico com os valores de $P_{máx}$ registados para cada L_0 testado. Igualmente ao que se observou com os adesivos AV138 e DP8005, o aumento de $P_{máx}$ aumenta com o aumento de L_0 .

Tabela 17 - Valores da E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de L_0 .

L_0 (mm)	E_{abs} (J)	Comparação
10	3,8	-
20	10,3	+169,4
40	31,8	+726,9

3.3.3.1.3. Comparação de resultados

Para comparar melhor os resultados obtidos nos ensaios relativos a L_0 , na Tabela 18 estão resumidos os valores da carga máxima de rutura ($P_{máx}$) e a variação percentual ($\Delta P_{máx}$) para os três adesivos utilizados.

Tabela 18 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para L_0 para os três adesivos.

L_0 (mm)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)
10	35,44	-	30,938	-	33,454	-
20	62,637	+104,96%	51,14	+65,3%	63,89	+90,98%
40	118,22	+233,59%	91,21	+194,82%	110,29	+229,67%

O adesivo AV138 obteve os valores mais elevados de $P_{máx}$ para as condições de ensaio descritas. Tendo todas as juntas, ensaiadas nas mesmas condições, obtido os valores resumidos, fica fácil de perceber que as propriedades mecânicas resumidas na Tabela 14 influenciam os resultados para cada um dos adesivos. O adesivo AV138 possui as propriedades mecânicas mais elevadas e, apesar de ser um adesivo frágil, obteve nos testes os valores de $P_{máx}$ mais elevados seguido do XNR6852 E-2, cujos valores de $P_{máx}$ são ligeiramente mais baixos, mas não refletem uma linearidade com o valor das suas propriedades mecânicas, cujos valores são bem mais baixos do que adesivo AV138. Contudo, a desvantagem destes adesivos é que não permitem uma deformação tão elevada, característica que pode ser importante consoante a aplicação. Por último surge o adesivo DP8005, que obteve valores de $P_{máx}$ mais baixos, mas é um adesivo que suporta uma maior deformação. Relativamente ao comprimento de sobreposição (L_0), fica claro pelos resultados obtidos que este parâmetro geométrico influencia bastante na resistência final da junta. O aumento de L_0 implica um aumento da área adesiva que, associada a uma força de impacto dada pela massa e velocidade do objeto, implica uma maior capacidade de suportar tensões mais altas antes ocorrer a rutura.

Na Tabela 19 estão resumidos os valores das E_{abs} pelos três adesivos, bem como a respetiva variação percentual (ΔE_{abs}) para cada um dos valores de L_0 utilizados nos ensaios. Para um $L_0=10$ mm, os três adesivos absorveram valores de energia similares, sendo que para o adesivo AV138 o valor de ΔE_{abs} aumenta mais do que os adesivos DP8005 e XNR6852 E-2 com o aumento de L_0 . Assim, para um $L_0=20$ mm, o aumento no valor de E_{abs} é de +193,6% para o adesivo AV138, sendo de +139% para o adesivo DP8005 e de +169,4% para o XNR6852 E-2. Para o $L_0=40$ mm, este aumento passa para +1149,7% no caso do adesivo AV138 e de +570,7% para o DP8005, sendo de +726,9% para o XNR6852 E-2. Estes valores de E_{abs} refletem os valores das respetivas propriedades mecânicas, com o aumento de E_{abs} a ser maior para o adesivo AV138, que tem as propriedades mecânicas mais altas, seguido do adesivo XNR6852 E-2 e do DP8005, este último que tem as propriedades mais baixas.

Tabela 19 - Comparação de E_{abs} para L_0 para os três adesivos.

L_0 (mm)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)
10	3,9	-	4,3	-	3,8	-
20	11,3	+193,6%	10,3	+139%	10,3	+169,4
40	48,3	+1149,7%	28,9	+570,7%	31,8	+726,9

Na Tabela 20 estão resumidas as comparações das tensões σ_y para os três adesivos utilizados neste estudo, onde se observa que o adesivo rígido AV138 apresentou o maior valor de $\sigma_y/\tau_{méd}$ para qualquer valor de L_0 , uma vez que as propriedades mecânicas como módulo E e G , bem como as tensões t_r e t_s deste adesivo são mais elevadas do que as do adesivo XNR6852 E-2 e DP8005. Quanto à influência de L_0 , o valor máximo de σ_y aumenta com o aumento de L_0 .

Tabela 20 - Comparação das tensões σ_y para L_0 para os três adesivos.

L_0 (mm)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}$ (%)	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}$ (%)	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}$ (%)
10	1,11	-	0,50	-	0,91	-
20	1,81	+62,8%	0,65	+29,5%	1,26	+38,8%
40	4,28	+136,7%	1,02	+57,4%	2,14	+136,4%

Na Tabela 21 estão resumidos os valores das tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para os três adesivos utilizados neste estudo, onde se pode observar que, da mesma forma que se verificou para as tensões σ_y , também para as tensões τ_{xy} foi o adesivo AV138 que, devido à sua elevada rigidez, atingiu os maiores picos de tensões, seguido do adesivo XNR6852 E-2 e do DP8005. Para as tensões τ_{xy} , os picos máximos também aumentam com o aumento de L_0 .

Tabela 21 - Comparação das tensões τ_{xy} para L_0 para os três adesivos.

L_0 (mm)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}$ (%)	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}$ (%)	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}$ (%)
10	1,30	-	1,08	-	1,19	-
20	2,37	+82%	1,29	+65,3%	1,47	+22,8%
40	4,54	+91,6%	2,00	+194,82%	2,70	+229,67%

3.3.3.2. Espessura dos tubos

Neste capítulo é apresentado o estudo numérico em ABAQUS® de influência da espessura dos substratos na resistência global da junta, sendo apresentadas as tensões τ_{xy} e σ_y instaladas para os três adesivos. De forma a simplificar as análises, as espessuras foram variadas nos dois substratos, em vez de somente em um, conforme se pode observar no desenho da junta 2D representado na Figura 67. As espessuras dos substratos (t_p) adotadas para realizar este estudo foram de 1, 2, 3 e 4 mm, sendo que todos tiveram um L_0 base de 10 mm.

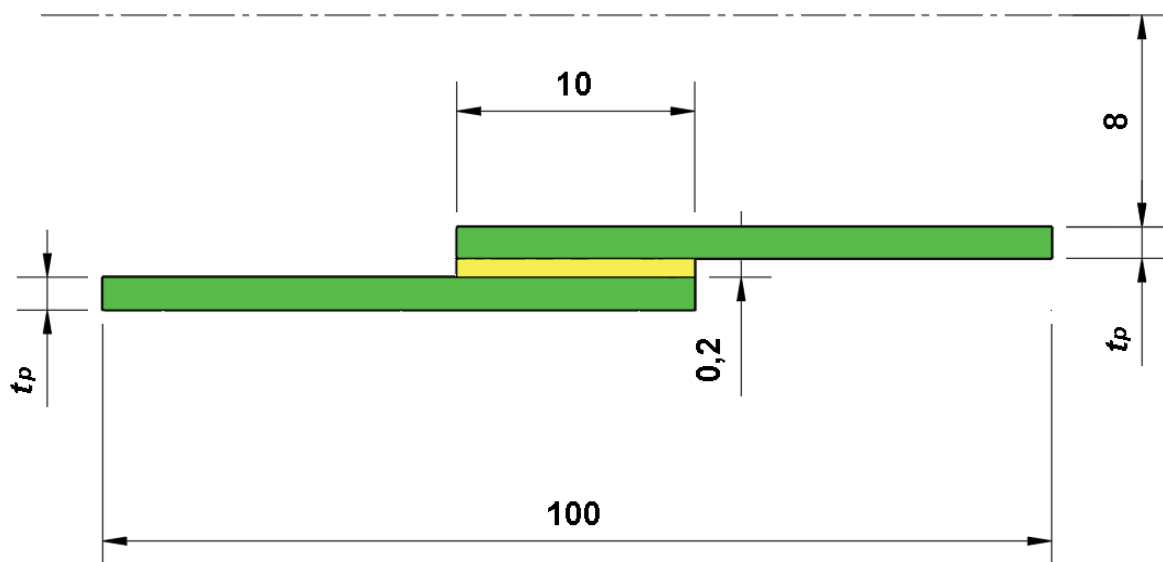


Figura 67 - Geometrias base de teste para variação de t_p .

3.3.3.2.1. Distribuição de Tensões

Conforme se pode ver pela Figura 68, relativamente ao adesivo AV138, a espessura dos tubos (t_p) teve influência nos picos tensão σ_y . Esta influência deve-se essencialmente à geometria daquela zona da camada adesiva. Em termos de valor, a junta com 4 mm de espessura registou um pico de tensão superior ao das restantes espessuras testadas, com os picos de tensão máxima registados nas extremidades da zona adesiva. Na extremidade esquerda ($X/L_0=0$), verifica-se uma maior concentração de tensões, devido à menor área do tubo interior, acontecendo o contrário na extremidade oposta ($X/L_0=1$), com a maior área do tubo exterior a reduzir o pico de tensões. Na zona central da camada adesiva, a distribuição de tensões apresenta-se relativamente uniforme, embora a junta com $t_p=4$ mm se apresente em formato parabólico. Em termos de comparação de valores, a junta com $t_p=1$ mm apresenta uma diminuição nos picos de $\sigma_y/\tau_{méd}$ de -10,4% em relação à junta base ($t_p= 2$ mm), enquanto a junta com $t_p=3$ mm apresenta +2% de concentração de tensões e a junta com $t_p=4$ mm apresenta + 39,6% em relação à junta base.

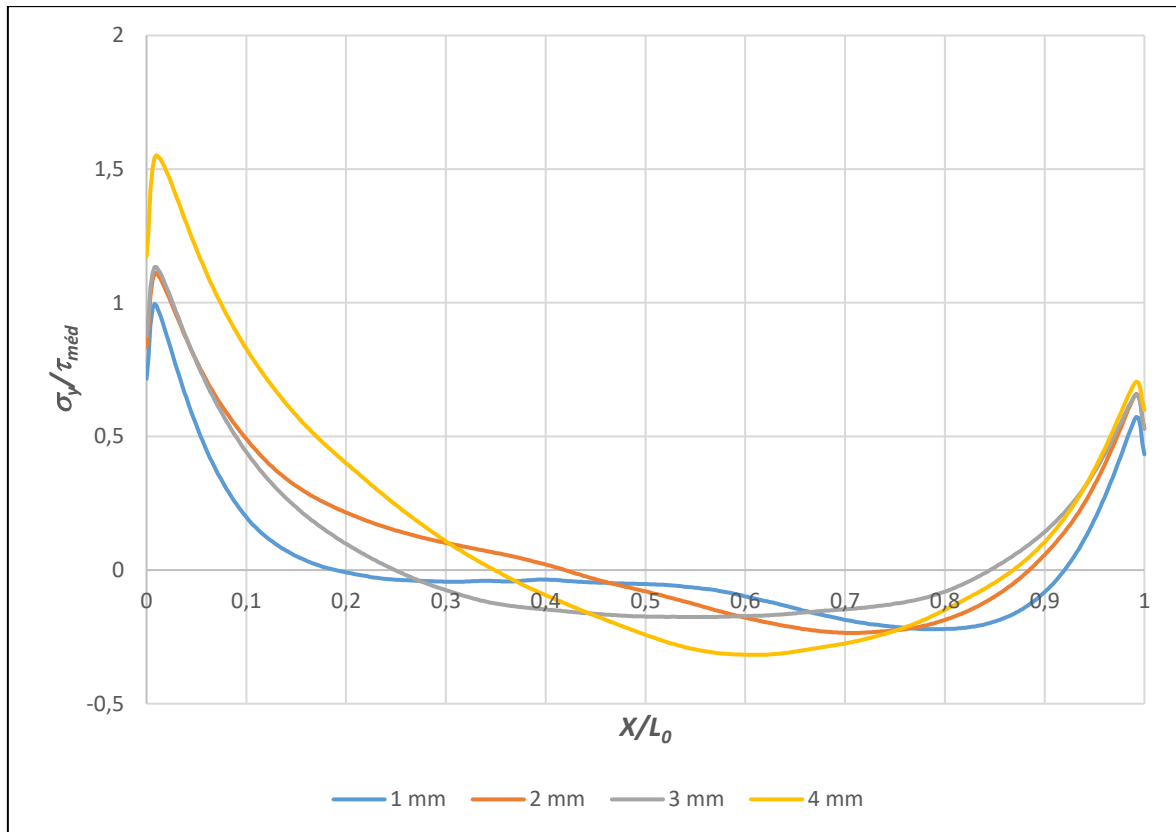


Figura 68 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo AV138 em função de t_p .

A Figura 69 mostra a distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 ao longo da camada adesiva. Ao contrário do que acontece para σ_y , o maior pico de tensões τ_{xy} verifica-se para a junta com $t_p=1$ mm. A junta com $t_p=4$ mm foi a que registou o menor pico de tensão. Na extremidade direita, a junta com $t_p=3$ mm obteve um pico de tensão superior ao da junta com $t_p=2$ mm. Notou-se uma distribuição quase simétrica para a relação X/L_0 das tensões τ_{xy} em cada uma das curvas, com os picos máximos a ocorrerem nas extremidades da camada adesiva. Em termos de comparação, a junta com $t_p = 1$ mm apresentou +15% nos picos da relação $\tau_{xy}/\tau_{méd}$, a junta com $t_p=3$ mm apresentou +3,9% e a junta com $t_p=4$ mm apresentou -0,8%, quando comparadas com a junta com $t_p= 2$ mm.

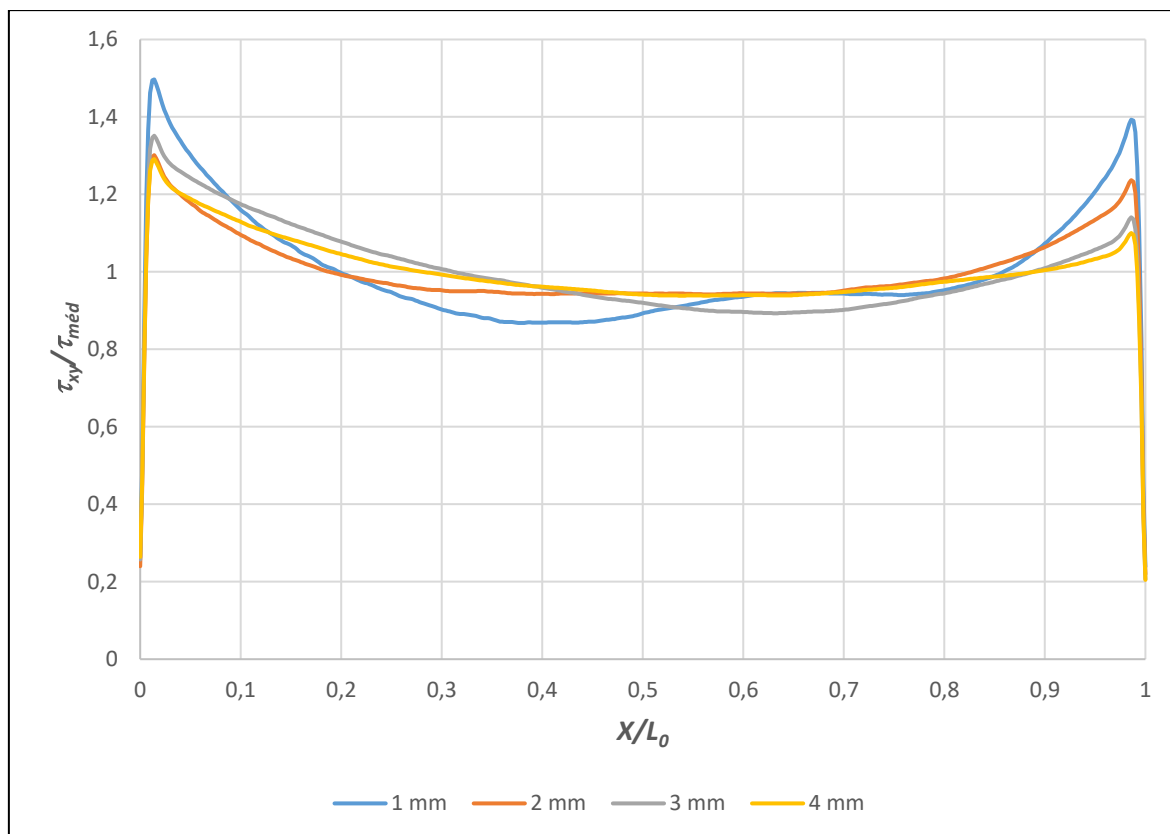


Figura 69 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função de t_p .

Na Figura 70 estão representadas as distribuições das tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função de t_p . Para este adesivo, verificou-se que as espessuras de 3 mm e 4 mm atingiram os maiores picos de tensão σ_y , embora a junta com $t_p=2$ mm apresenta um pico máximo muito próximo ao da junta com $t_p=3$ mm. Contudo, as diferenças entre as quatro espessuras testadas foram muito baixas, não chegando a uma diferença de 25% entre as espessuras de 4 mm e de 1 mm, no que diz respeito ao pico máximo atingido em termos de valor absoluto. Da mesma forma que os ensaios anteriores realizados com as juntas adesivas com o adesivo AV138, verificou-se novamente que os picos de tensão máxima são alcançados nas extremidades da camada adesiva, devido à alteração súbita de geometria e na zona de transição substrato-adesivo. Relativamente à zona central da camada adesiva, a distribuição de tensões nesta zona não foi uniforme, com grandes variações para todas as espessuras testadas. Para efeitos de comparação com o adesivo AV138, a menor rigidez (valor de E mais baixo) do adesivo DP8005 traduziu-se em tensões normais σ_y menores em valores absolutos. Em termos de comparação de resultados entre as juntas testadas com o adesivo DP8005, a junta com $t_p=1$ mm apresentou uma relação $\sigma_y/\tau_{méd}$ superior ao da junta com $t_p=2$ mm em cerca de +17,5%, enquanto a junta com $t_p=3$ mm apresentou uma diferença de +0,2% em relação à geometria de base, e a junta com $t_p=4$ mm apresentou uma diferença de +7,9% em relação à mesma.

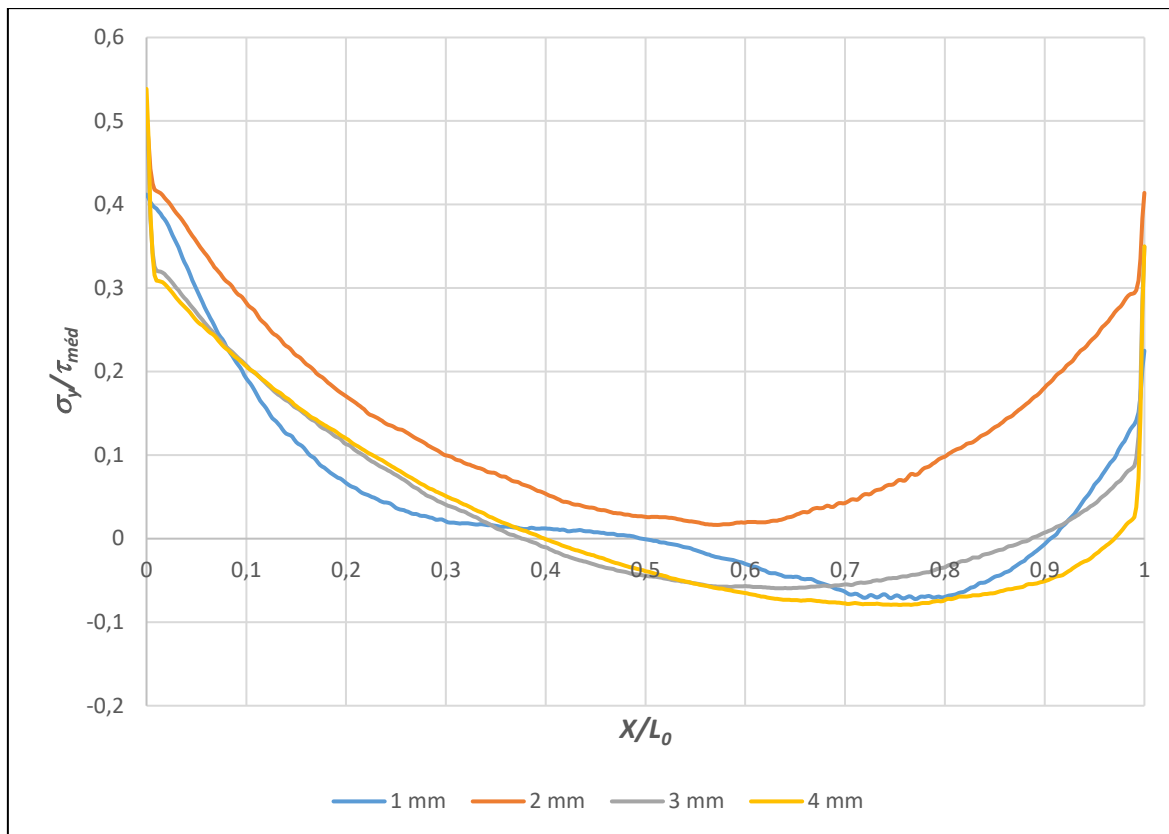


Figura 70 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função de t_p .

Na Figura 71 são representadas as curvas das tensões de corte (τ_{xy}) para o adesivo DP8005 com a variação de t_p . Para este adesivo, verificou-se que a distribuição das tensões de corte τ_{xy} se mostraram bastante mais uniformes para cada uma das espessuras testadas, e com picos de concentração de tensões com valores absolutos menores, uma vez que o adesivo DP8005 apresenta menor rigidez comparativamente aos demais. Denota-se ainda que a variação entre os picos máximos de τ_{xy} nas extremidades da camada adesiva foi muito pequena, e que houve muita uniformidade para todas as espessuras com, mais uma vez, os valores máximos a se verificarem nas extremidades da camada adesiva, onde o valor máximo absoluto a ser atingido pela junta com $t_p=1\text{mm}$ e o menor a ser atingido pela junta com $t_p=4\text{ mm}$. Para efeitos de comparação com o adesivo AV138, a distribuição da tensão é bastante mais uniforme para todas as juntas testadas, devido à menor rigidez do adesivo DP8005. Em termos de comparação de valores entre as juntas testadas com o adesivo DP8005, a junta com $t_p=1\text{ mm}$ obteve um pico máximo da relação $\sigma_y/\tau_{méd}$ de +3,2% do que em relação à junta com $t_p=2\text{ mm}$. A junta com $t_p=3\text{ mm}$ obteve um pico da relação de tensões de -0,8% em relação à junta com geometria base, e a junta com $t_p=4\text{ mm}$ obteve um pico máximo de concentração de tensões de -2,3% do que a junta de geometria base. Para efeitos de comparação global entre as juntas testadas, as tensões de corte τ_{xy} variaram, entre a junta com $t_p=1\text{ mm}$ e a junta com $t_p=4\text{ mm}$, cerca de 6%, com a maior tensão a ser verificada na junta com $t_p=4\text{ mm}$.

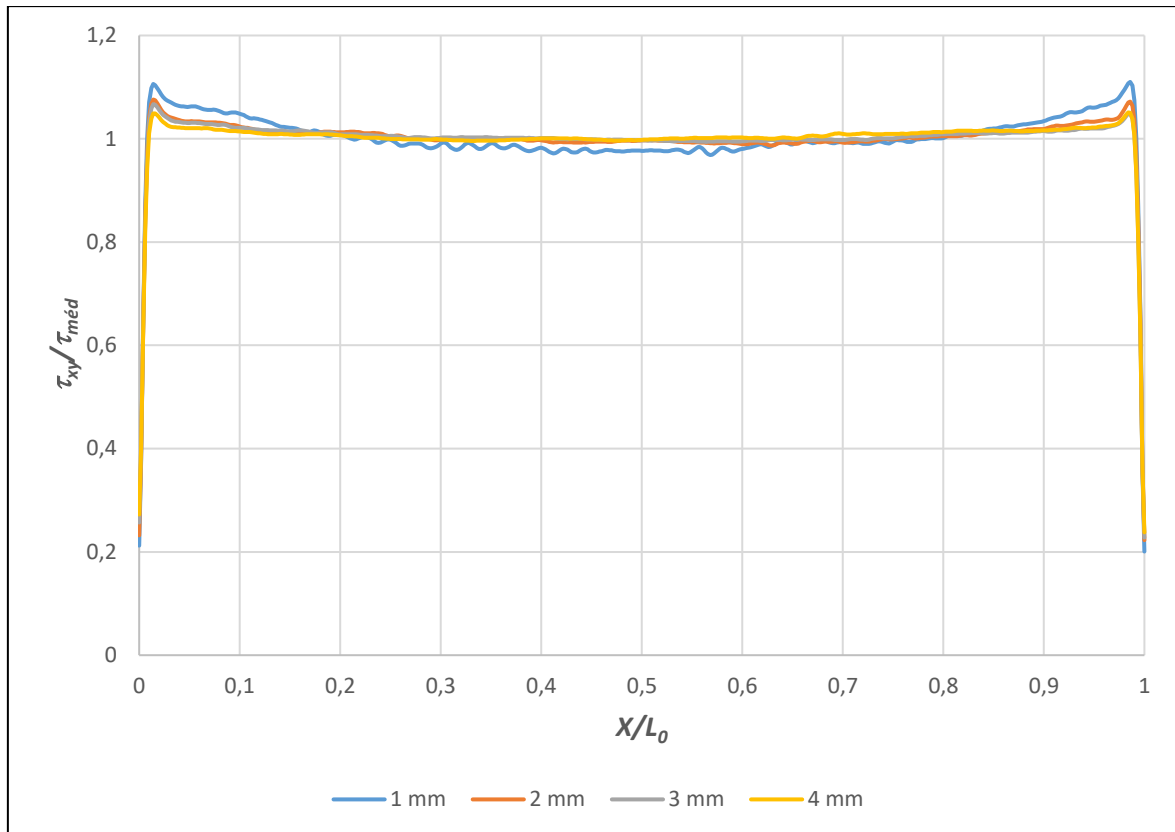


Figura 71 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função de t_p .

Na Figura 72 estão representadas as curvas com as tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p . Com comportamento semelhante aos adesivos AV138 e DP8005, para este adesivo verificou-se que os picos de tensão máxima são atingidos, mais uma vez, nas extremidades da zona da camada adesiva, com a junta de $t_p=4$ mm a atingir o pico com valor máximo absoluto. Relativamente à zona central, as juntas mostraram um comportamento bastante irregular, uma vez que as juntas com $t_p=1$ mm, $t_p=2$ mm e $t_p=3$ mm se encontram maioritariamente sujeitos a esforços de compressão ($\sigma_y/\tau_{méd}<0$), a partir de $X/L_0=0,4$, e a junta com $t_p=4$ mm se encontra sujeita a esforços de tração ($\sigma_y/\tau_{méd}>0$), estando a compressão sensivelmente entre $X/L_0=0,6$ e $X/L_0=0,8$. Em termos de valores absolutos, as tensões apresentam valores intermédios quando comparados com os outros dois adesivos, verificando a tendência das propriedades mecânicas. Em termos de comparação entre as juntas testadas, a junta com $t_p=1$ mm obteve uma relação $\sigma_y/\tau_{méd}$ inferior em cerca de -11,3% do que a junta com $t_p=2$ mm, enquanto a junta com $t_p=3$ mm obteve cerca de +5,3% de concentração de tensões do que em relação à junta de geometria base. A junta com $t_p=4$ mm obteve uma relação $\sigma_y/\tau_{méd}$ superior em cerca de +28,8% do que a junta de geometria base.

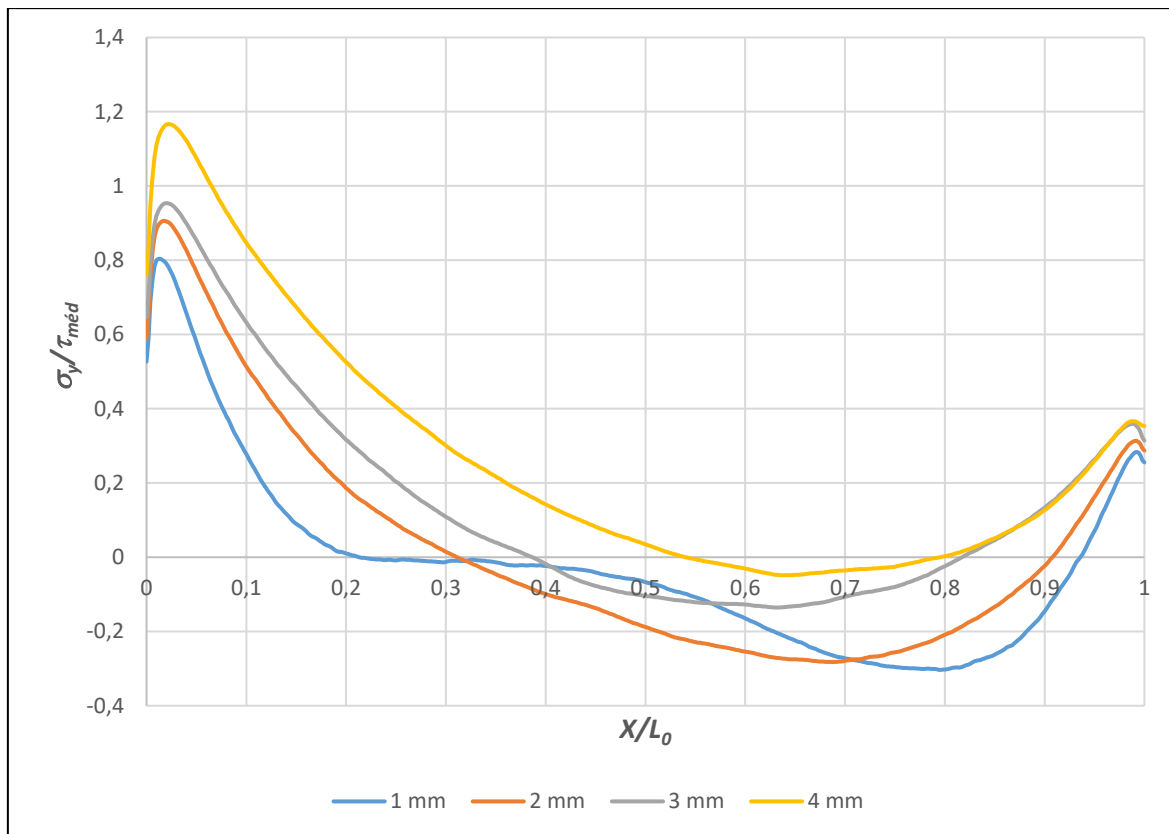


Figura 72 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p .

Por fim, na Figura 73 estão representadas as curvas com as distribuições das tensões τ_{xy} em função da variação de t_p para o adesivo XNR6852 E-2. De igual modo aos adesivos AV138 e DP8005, para este adesivo as tensões de corte τ_{xy} mostraram um comportamento mais regular, verificando-se também que a junta com $t_p=1$ mm apresenta o maior pico de tensão, refletindo-se na menor rigidez dos substratos em função da propriedade geométrica. Em termos de comparação de resultados, a junta com $t_p=1$ mm obteve um pico de concentração de tensões superior em cerca de +5,5% do que a junta com $t_p=2$ mm, enquanto a junta com $t_p=3$ mm obteve uma diferença de +0,04% do que a junta de geometria de base, e a junta com $t_p=4$ mm obteve uma diferença no pico de concentração de tensões de -3,2% do que a junta de geometria de base. De facto, para o adesivo XNR6852 E-2, e tal como foi notado para o adesivo DP8005, a variação na concentração de tensões τ_{xy} entre as juntas testadas não justifica um ganho considerável na resistência global da junta quando se varia t_p , uma vez que entre $t_p=1$ mm e de $t_p=4$ mm, esta variação andou à volta de 9%, incremento esse justificado mais por propriedades mecânicas como módulo E e ν do adesivo, do que a alteração deste parâmetro geométrico.

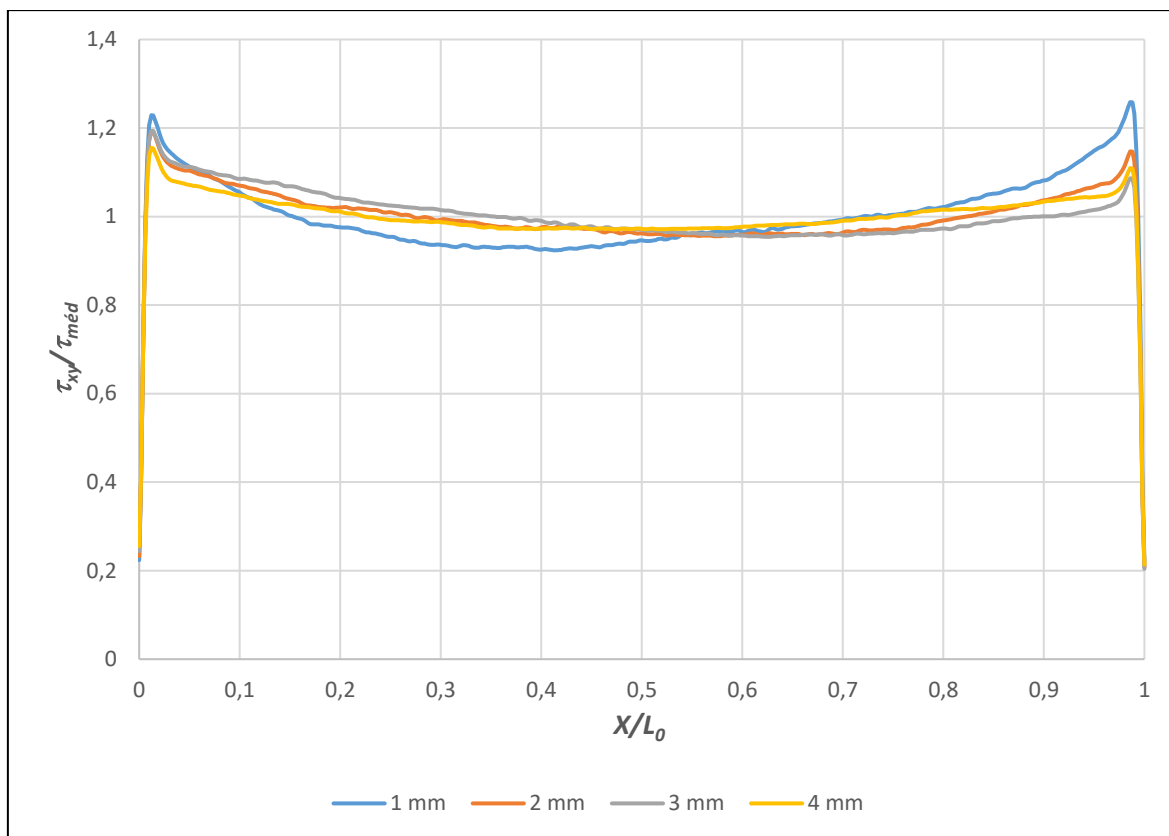


Figura 73 - Distribuição de tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p .

3.3.3.2.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida

Neste capítulo são apresentadas as curvas $P-\delta$ correspondentes aos ensaios relativos à variação da espessura dos substratos, bem como os modos de rutura, as energias absorvidas e o valor da carga máxima ($P_{máx}$) para cada uma das juntas.

Inicialmente são apresentadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo AV138 com a variação de t_p . Como é possível observar na Figura 74, o maior valor de $P_{máx}$ admitido pela junta antes da rutura foi registrado para a junta com $t_p=4$ mm, verificando-se também que a deformação de rutura (δ) para cada uma das juntas é menor para espessuras maiores, devido à maior rigidez desses substratos. A junta com $t_p=1$ mm, obteve um deslocamento de rutura claramente superior às restantes juntas, com as juntas de $t_p=2$ mm e $t_p=3$ mm a apresentaram deslocamentos de rutura muito semelhantes. Os valores $P_{máx}$ são semelhantes para as juntas com $t_p=1$ mm e $t_p=2$ mm, verificando-se uma tendência crescente deste valor para as juntas com $t_p=3$ mm e $t_p=4$ mm.

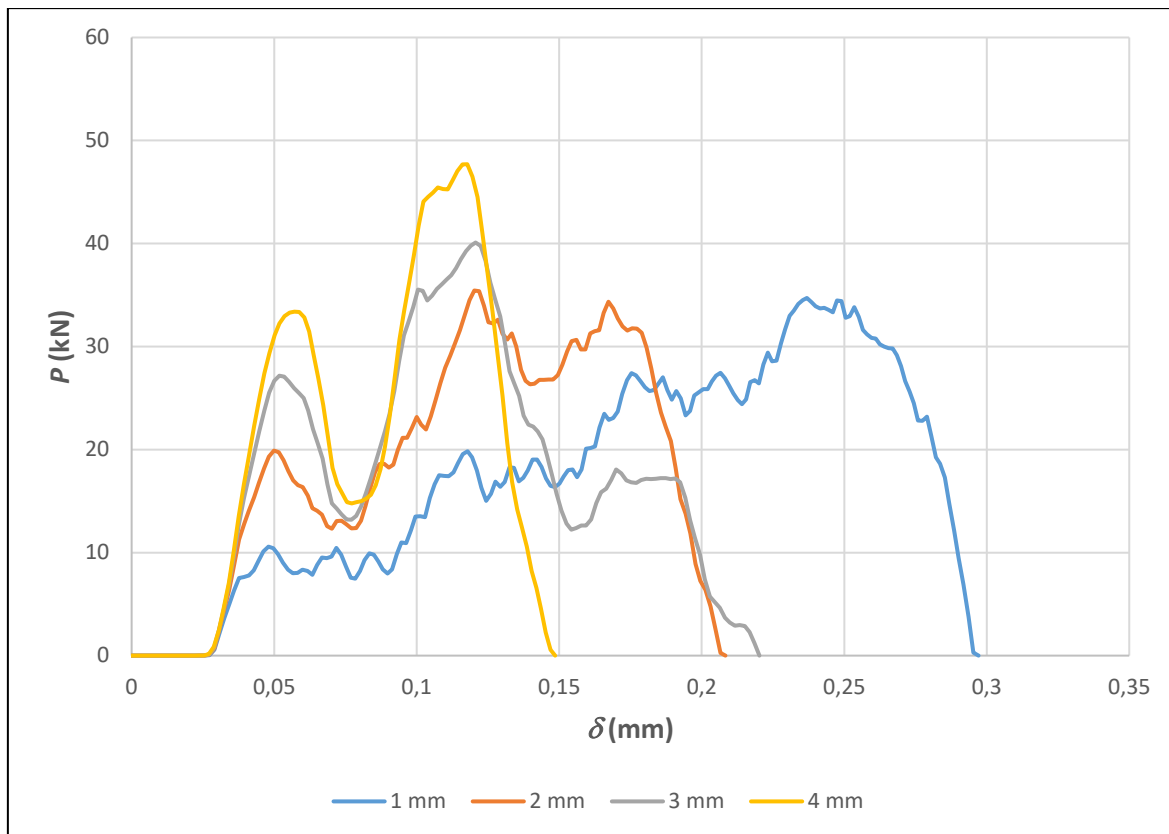


Figura 74 - Curvas P - δ para o adesivo AV138 em função de t_p .

Na Figura 75 estão representados graficamente os valores da carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) atingida para cada uma das juntas testadas com o adesivo AV138. As juntas com $t_p=1$ mm e $t_p=2$ mm tiveram um pico de $P_{m\acute{a}x}$ com valores muito similares, divergindo em apenas 2%. As juntas com $t_p=3$ mm e de $t_p=4$ mm apresentam uma tendência crescente no que diz respeito ao valor absoluto de $P_{m\acute{a}x}$ apresentando, respectivamente, um aumento de +13,1 % e de +34,6% em relação à junta com $t_p=2$ mm. A maior rigidez da junta com $t_p=4$ mm explica o aumento da capacidade de suportar maior carga antes de ocorrer a rutura.

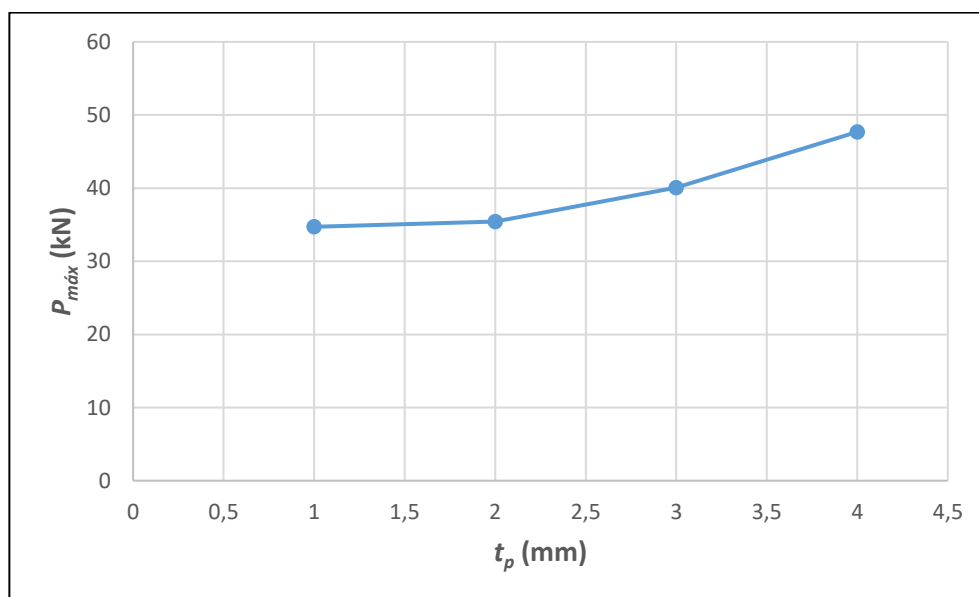


Figura 75 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada t_p testado com o adesivo AV138.

Na Figura 76 está representado o modo de rutura da junta com $t_p=1$ mm para o adesivo AV138, onde é possível observar que a rutura foi coesiva do adesivo. Em nenhuma geometria de junta testada se observou plastificação dos substratos.

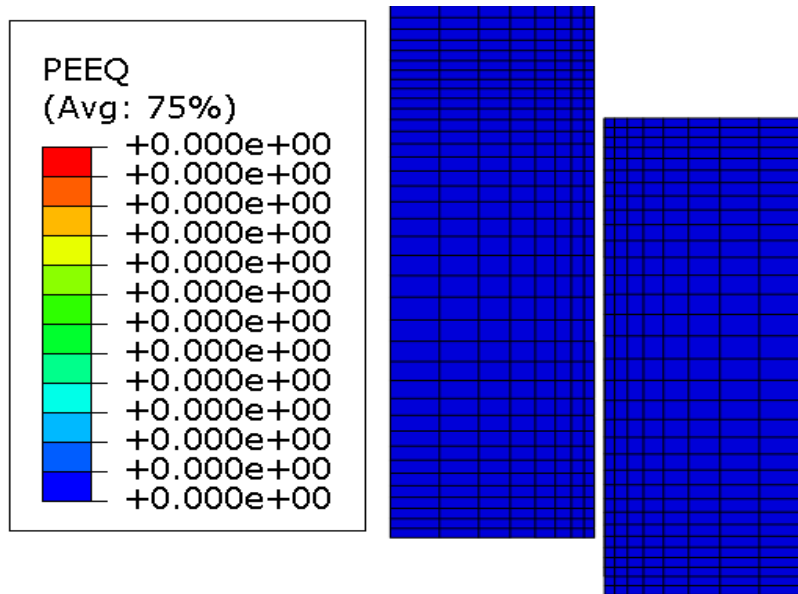


Figura 76 - Modo de rutura da junta com $t_p=4$ mm para o adesivo AV138.

Os valores da E_{abs} para as juntas em função da variação de t_p com a respetiva comparação para o adesivo AV138 estão resumidos na Tabela 22. Ao contrário do que o que aconteceu com a variação de L_0 , quanto maior o valor de t_p , menor a E_{abs} da junta. Este comportamento deve-se ao material constituinte dos substratos, o aço DIN 55 Si7 que, tendo pouca plastificação nestas condições, implica uma menor capacidade de absorver a energia ao impacto. Assim, a junta com $t_p=1$ mm, com menor resistência comparativamente às outras juntas, tem maior capacidade de absorver energia. Ao incrementar o valor de t_p , incrementa-se também o volume de material dos substratos, o que leva a uma redução da E_{abs} pela junta, e a uma maior transferência da energia de impacto para a junta adesiva, causando a sua rutura. A junta com $t_p=4$ mm foi a que absorveu menos energia, ao absorver aproximadamente -20,9% que a junta de referência com $t_p=2$ mm.

Tabela 22 - Valores da E_{abs} pelo adesivo AV138 em função de t_p .

t_p (mm)	E_{abs} (J)	Comparação
1 mm	5,2	+34,4%
2 mm	3,9	-
3 mm	3,8	-1,7%
4 mm	3,1	-20,9%

Na Figura 77 estão representadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo DP8005 em função da variação de t_p . Com comportamentos semelhantes entre si, os provetes testados com o adesivo DP8005 apresentam um δ próximo, embora o provete com $t_p=1$ mm apresente um maior deslocamento em relação aos restantes provetes, verificando-se ainda que o provete de maior espessura apresenta o menor deslocamento de rutura, devido à sua maior rigidez. Relativamente aos valores de $P_{máx}$, verificou-se para este adesivo uma distribuição mais uniforme, com os picos máximos das cargas de rutura a serem muito similares entre as geometrias testadas.

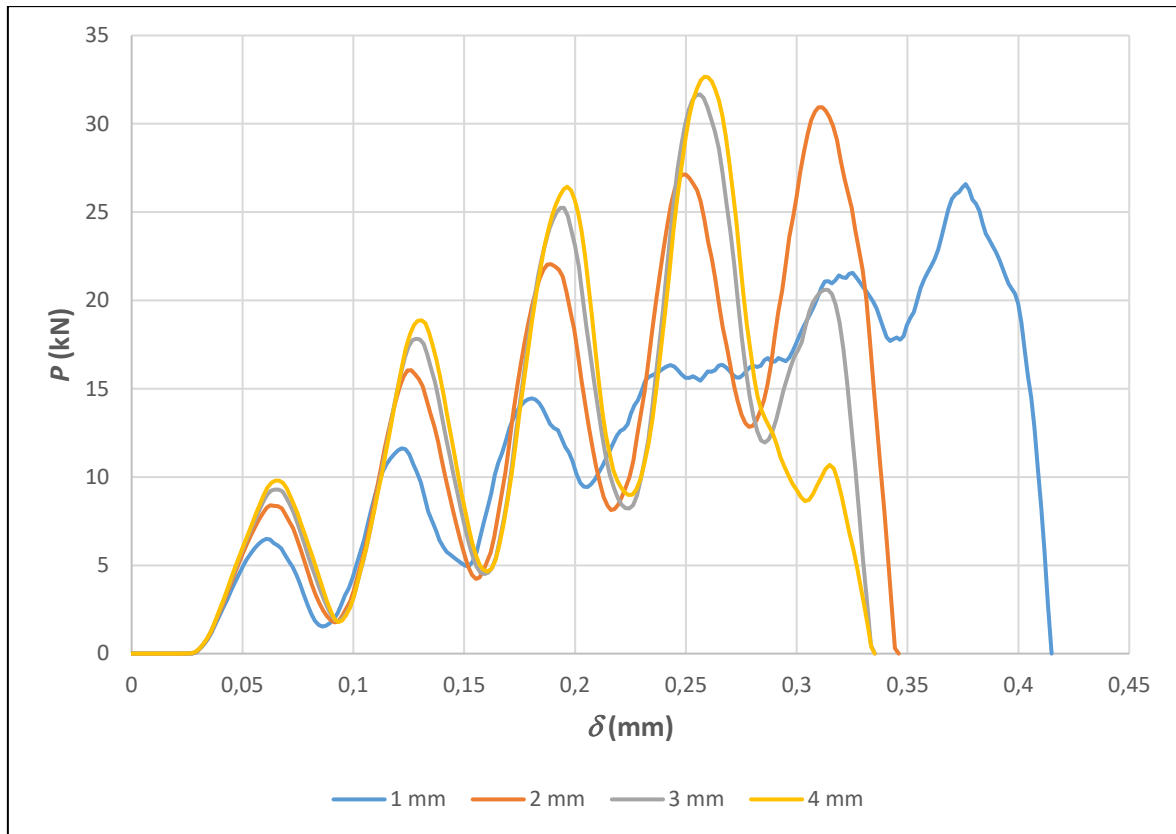


Figura 77 - Curvas P - δ para o adesivo DP8005 em função de t_p .

Na Figura 78 encontram-se representados graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada uma das espessuras testadas com o adesivo DP8005. Como é possível observar, os provetes com $t_p=2, 3$ e 4 mm apresentam uma diferença pouco relevante entre si, divergindo somente em cerca de 10% o valor máximo de $P_{m\acute{a}x}$ registado entre as juntas. Entre a junta de $t_p=2$ mm e $t_p=1$ mm verificou-se uma maior diferença em termos de valor absoluto, fixando-se em cerca de 14,1%.

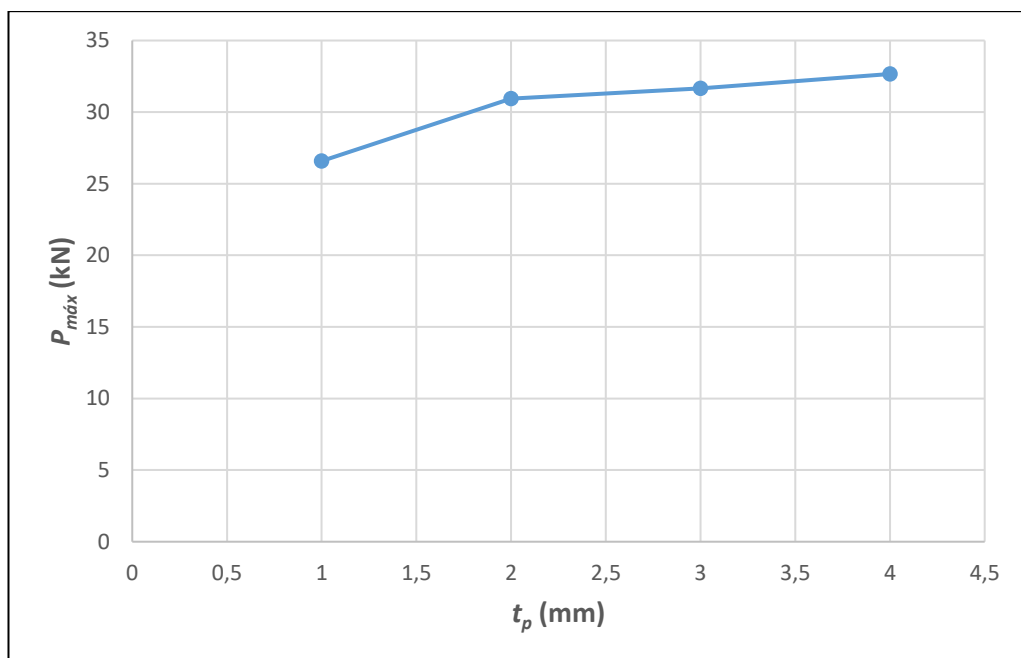


Figura 78 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada t_p testado com adesivo DP8005.

Como é possível na Figura 79, a rutura para o provete com $t_p=4$ mm ocorreu por rutura coesiva do adesivo. O modo de rutura foi idêntico em todos os provetes testados com este adesivo, não ocorrendo qualquer plastificação dos substratos.

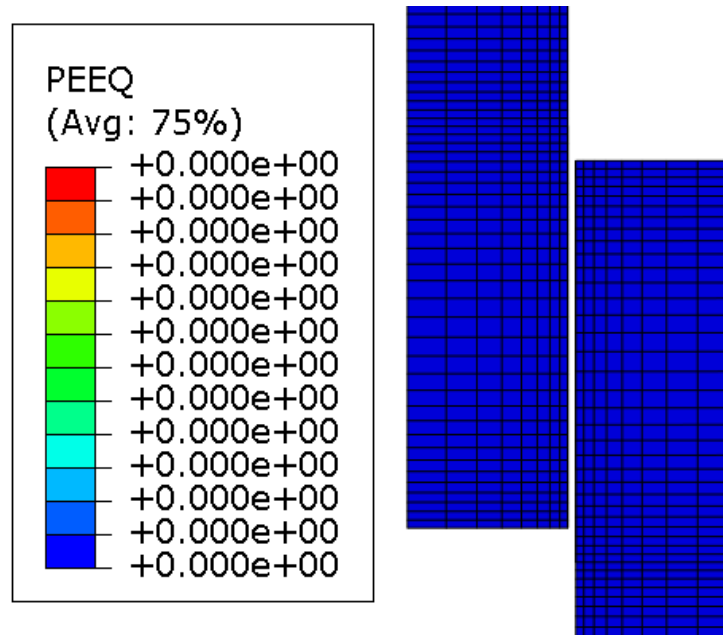


Figura 79 - Modo de rutura da junta com $t_p=4$ mm para o adesivo DP8005.

Na Tabela 23 estão resumidos os valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 com a variação de t_p . Da mesma forma que aconteceu com o adesivo AV138, para os ensaios com o adesivo DP8005 as juntas com menor valor de t_p foram as que absorveram mais energia de impacto. Em termos de comparação, para o adesivo DP8005 houve menos variação nos valores entre cada uma das juntas. Utilizando a junta com $t_p=2$ mm como referência para efeitos de comparação, a junta com $t_p=1$ mm obteve +16,3% na E_{abs} em relação à junta com $t_p=2$ mm, enquanto a junta com $t_p=3$ mm obteve -6,3% a junta com $t_p=4$ mm -9,7% de E_{abs} , ambas em relação à junta com $t_p=2$ mm. Desta forma, conclui-se que o aumento na capacidade de a junta suportar a carga implica um decréscimo do deslocamento de rutura, o que se traduz na diminuição das áreas das curvas $P-\delta$ de cada uma das t_p ensaiadas.

Tabela 23 - Valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 em função de t_p .

t_p (mm)	E_{abs} (J)	Comparação
1 mm	5,0	+16,3%
2 mm	4,3	-
3 mm	4,0	-6,3%
4 mm	3,9	-9,7%

Conforme se pode ver na Figura 80, para o adesivo XNR6852 E-2 as curvas $P-\delta$ tiveram um comportamento semelhante aos dois adesivos anteriores, com o δ máximo a ser registado para a junta com $t_p=1$ mm e o menor deslocamento a ser registado para a junta com $t_p=4$ mm. Para este adesivo, os picos das cargas máximas suportadas por cada uma das juntas também registaram um comportamento próximo, mas continuando a junta com $t_p=4$ mm a ter o valor absoluto mais elevado antes de ocorrer a rutura.

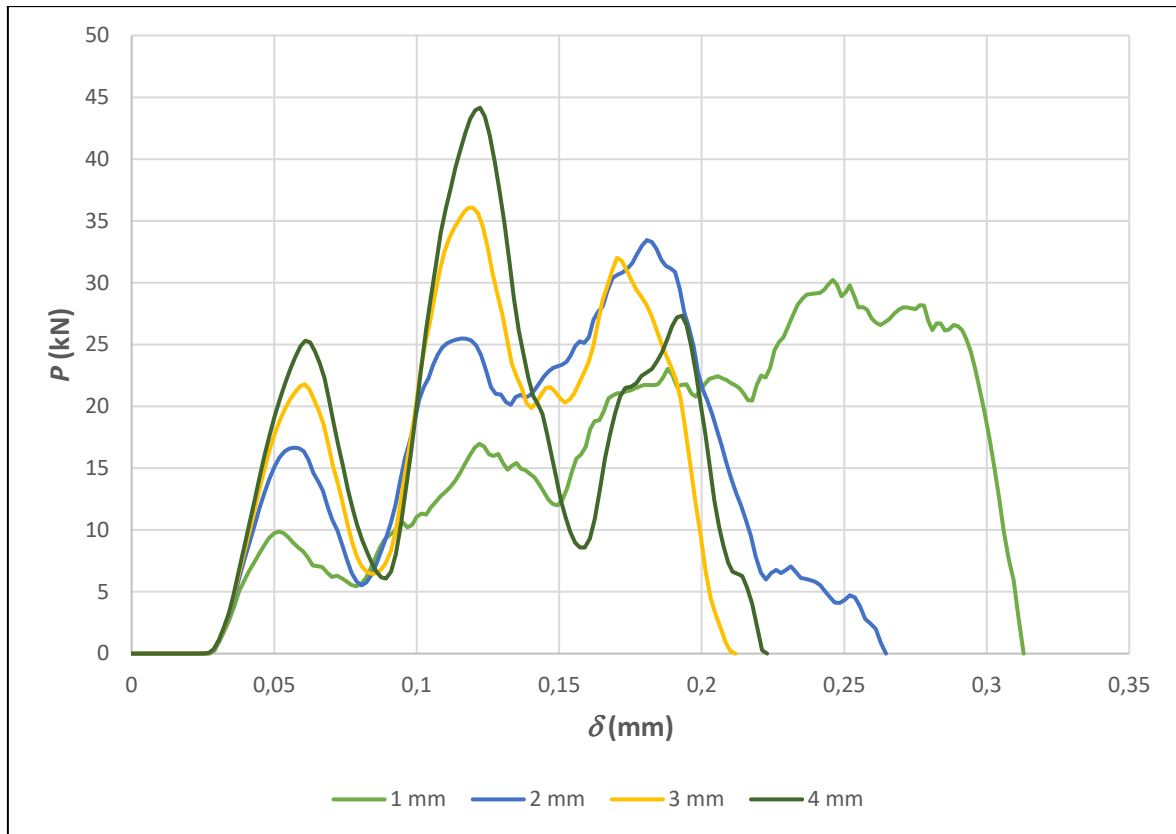


Figura 80 - Curvas P - δ para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p .

Na Figura 81 estão ilustrados graficamente os valores máximos de $P_{m\acute{a}x}$ para cada um dos valores de t_p das juntas testadas com o adesivo XNR6852 E-2. É possível notar que as juntas com $t_p=1, 2$ e 3 mm apresentam um comportamento praticamente linear com t_p . Tomando a junta com $t_p=2$ mm como geometria de comparação, a junta com $t_p=1$ mm registou uma diferença relativa de $-9,6\%$, sendo que as juntas com $t_p=3$ mm e $t_p=4$ mm obtiveram uma diferença de $+7,8\%$ e 32% , respectivamente.

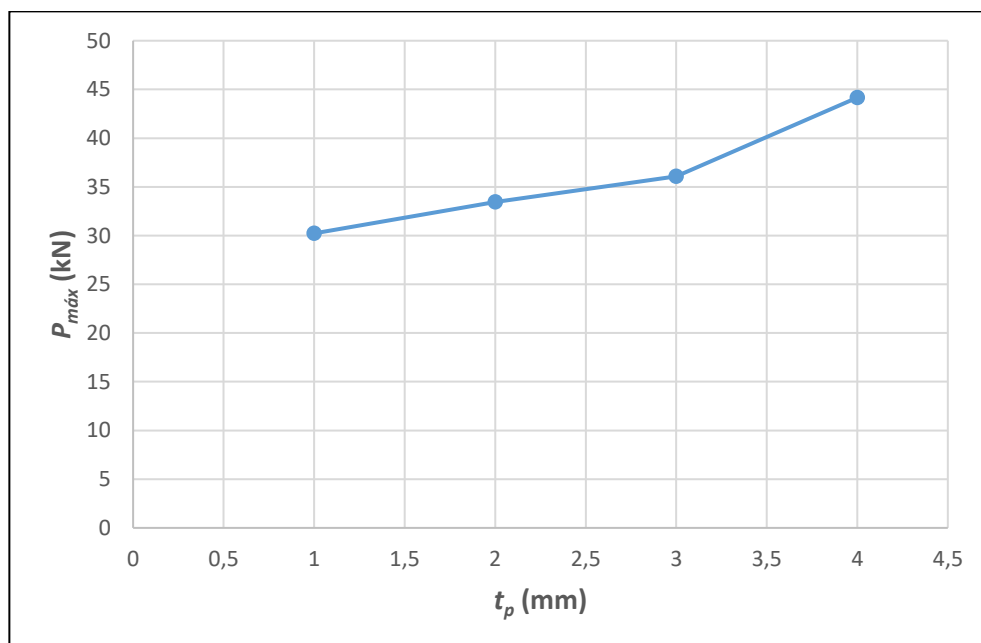


Figura 81 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p .

Conforme se pode ver pela Figura 82, a junta com $t_p=1$ mm testada com o adesivo XNR6852 E-2 teve uma rutura coesiva do adesivo. Esse modo de rutura também se verificou para as juntas com restantes t_p testadas com este adesivo.

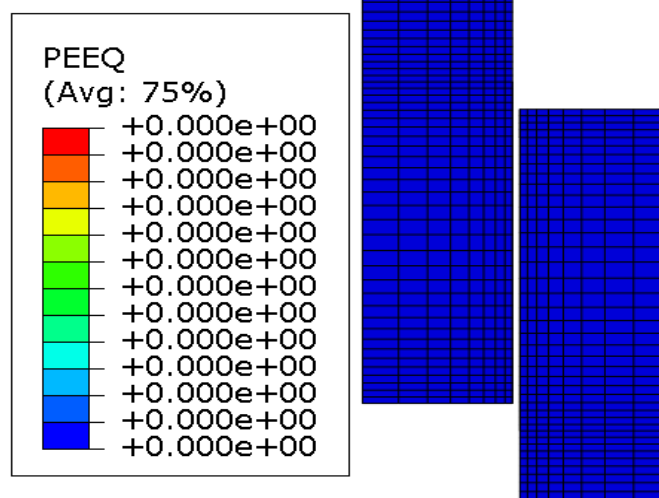


Figura 82 - Modo de rutura da junta com $t_p=4$ mm para o adesivo XNR6852 E-2.

No que diz respeito ao adesivo XNR6852 E-2, é possível observar os valores da E_{abs} na Tabela 24. Como se pode ver, os resultados foram semelhantes aos adesivos AV138 e DP8005, já que quantitativamente E_{abs} diminui com o aumento de t_p , devido ao facto de o aumento do volume de material tirar capacidade de deformação à junta e, assim, absorver a energia de impacto, transferindo-a para a junta. Em termos comparativos, a junta com $t_p=1$ mm absorveu 4,9 J de energia, +22,3% em relação à junta com $t_p=2$ mm, seguido da junta com $t_p=3$ mm, que absorveu -8,2%. Por último surge a junta com $t_p=4$ mm, que absorveu -4,5% de energia. O pico de $P_{máx}$ atingido pela junta com $t_p=4$ mm levou a um ligeiro aumento da área das curvas $P-\delta$, o que explica a menor diferença da variação da E_{abs} por esta junta em relação à junta com $t_p=3$ mm.

Tabela 24 - Valores de E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função de t_p .

t_p (mm)	E_{abs} (J)	Comparação
1 mm	4,9	+28,3%
2 mm	3,8	-
3 mm	3,5	-8,2%
4 mm	3,7	-4,5%

3.3.3.2.3. Comparação de resultados

Para se compreender e interpretar melhor os resultados obtidos nos ensaios efetuados com as juntas relativas à espessura de adesivo (t_p), na Tabela 25 estão resumidos os valores da carga máxima de rutura ($P_{máx}$) e a variação percentual ($\Delta P_{máx}$) para os três adesivos utilizados.

Como se observa na Tabela 25, o adesivo AV138 obteve os valores mais elevados da carga $P_{máx}$ para estas condições de ensaio. Uma vez que as juntas foram ensaiadas nas mesmas condições, obtido os valores obtidos mostram que as propriedades mecânicas da Tabela 14 influenciam os resultados para cada um dos adesivos. O adesivo AV138 possui os valores das propriedades mecânicas mais altos e, sendo um adesivo rígido, obteve nos testes os valores de $P_{máx}$ mais elevados seguido do XNR6852 E-2, adesivo também rígido, cujos valores de $P_{máx}$ são ligeiramente mais inferiores. Contudo, a desvantagem destes adesivos frágeis é que não permitem uma

deformação tão elevada, característica que pode ser importante consoante a aplicação. Essa característica ficou também evidenciada para L_0 . Por último surge o adesivo DP8005, que obteve valores de $P_{máx}$ mais baixos, mas é um adesivo que suporta uma maior deformação. Relativamente a esta variável geométrica (t_p), os resultados obtidos demonstram um ligeiro aumento nos esforços suportados pela junta com o aumento de t_p , o que conduz a uma maior rigidez dos substratos.

Tabela 25 - Comparação dos valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ em função de t_p .

t_p (mm)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)
1	34,7	-2,0%	26,6	-14,1%	30,2	-9,7%
2	35,4	-	30,9	-	33,5	-
3	40,1	+13,1%	31,7	+2,4%	36,1	+7,8%
4	47,7	+34,6%	32,7	+5,6%	44,2	+32%

Na Tabela 26 estão resumidos os valores da E_{abs} bem como ΔE_{abs} para os três adesivos. Para as energias absorvidas, as variações em função de t_p são maiores para os adesivos rAV138 e XNR6852 E-2, que são os mais rígidos. As propriedades mecânicas de cada adesivo também influenciam na capacidade de absorver energia por parte das juntas. Assim, os adesivos com valores de propriedades mecânicas mais altos têm menor capacidade de absorver energia ao impacto. O adesivo DP8005 foi o que absorveu mais energia, apresentando também variações mais baixas para os diferentes valores de t_p .

Tabela 26 – Comparação de E_{abs} em função de t_p .

t_p (mm)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)
1	5,2	+34,4%	5,0	+16,3%	4,9	+28,3%
2	3,9	-	4,3	-	3,8	-
3	3,8	-1,7%	4,0	-6,3%	3,5	-8,2%
4	3,1	-20,9%	3,9	-9,7%	3,7	-4,5%

Na Tabela 27 estão resumidas as tensões σ_y para os três adesivos utilizados no estudo numérico, onde se pode ver que as tensões σ_y foram mais altas para o adesivo AV138 devido aos valores mais altos das propriedades mecânicas deste adesivo, seguido do adesivo XNR6852 E-2 e do DP8005. Para o parâmetro t_p , o aumento de t_p implica um aumento de tensões σ_y .

Tabela 27 - Comparação de σ_y para os três adesivos em função de t_p .

t_p (mm)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}$ (%)	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}$ (%)	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}$ (%)
1	1,00	-10,4%	0,41	-17,5%	0,80	-11,3%
2	1,11	-	0,49	-	0,90	-
3	1,13	+2%	0,50	+0,2%	0,95	+5,3%
4	1,55	+39,6%	0,54	+7,9%	1,17	+28,8%

Na Tabela 28 estão resumidas as tensões τ_{xy} para os três adesivos, onde se pode analisar que o parâmetro geométrico t_p influencia positivamente no pico de tensões τ_{xy} , uma vez que estas diminuem com o aumento de t_p . As propriedades mecânicas de cada um dos adesivos também apresenta influência no valor das tensões τ_{xy} , sendo que para adesivos com tensões t_n e t_s , maior é o valor de τ_{xy} .

Tabela 28 - Comparação de t_{xy} para os três adesivos.

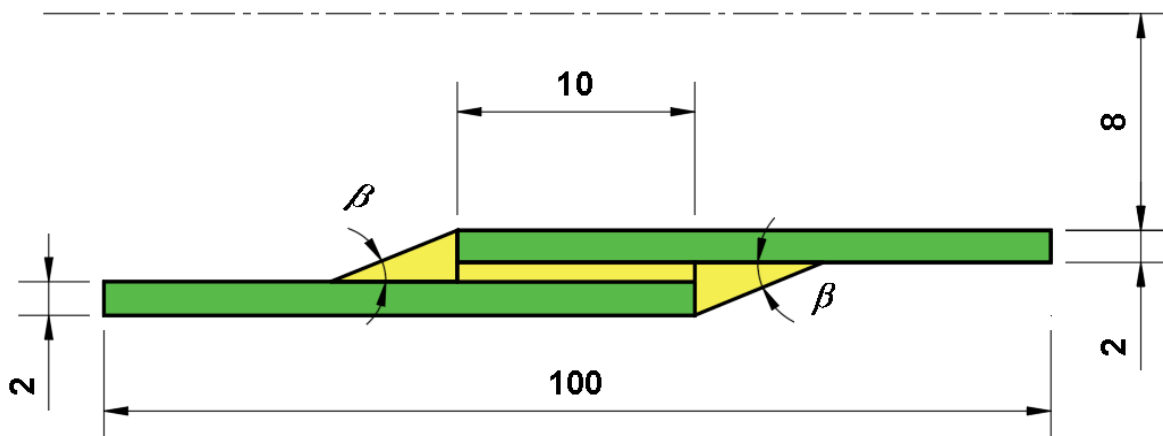
c	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$
1	1,50	+15,0%	1,11	+3,2%	1,26	+5,5%
2	1,30	-	1,08	-	1,19	-
3	1,35	+3,9%	1,07	-0,8%	1,19	+0%
4	1,29	-0,7%	1,05	-2,3%	1,16	-3,2%

3.3.4. Estudo de alterações geométricas

Neste subcapítulo é estudada a influência da utilização de alterações geométricas na resistência final da junta, tais como o acrescento de *fillets* de adesivo e a introdução de chanfros interior e exterior.

3.3.4.1. Fillet de adesivo

Na Figura 83 está representada a geometria da junta sujeita a análise. O *fillet* de adesivo consiste na introdução de uma porção de adesivo nas extremidades da camada adesiva, com o objetivo de minimizar os picos de concentrações de tensões nessa zona da junta. Assim, foi simulado o efeito da introdução de um excesso de adesivo com um ângulo de inclinação β pré-definido. Os ângulos β foram $7,5^\circ$, 15° , 30° , 45° e 60° , e comparados à junta sem *fillet*. Recorrendo à análise numérica computadorizada do software ABAQUS®, foi efetuado um estudo sobre o efeito da introdução de um *fillet* nas tensões τ_{xy} e σ_y , para os três adesivos.

Figura 83 - Geometria de teste para *fillet* de adesivo.

3.3.4.1.1. Distribuição de tensões

Na Figura 84 estão representadas as curvas com a distribuição das tensões para o adesivo AV138 ao longo da camada adesiva, onde é possível observar que a introdução de um *fillet* de adesivo implica uma menor concentração de tensões σ_y nas extremidades da camada adesiva. Por outro lado, o aumento de L_0 que advém da introdução do *fillet* (que é tanto maior quanto menor o valor de β) faz baixar o valor máximo de $\sigma_y/\tau_{méd}$. O valor de L_0 utilizado para as juntas foi de 10 mm, que corresponde na Figura 84 às zonas entre os picos de tensão registados ($X/L_0=0$ e $X/L_0=1$). As zonas com *fillet* correspondem às zonas esquerda e direita desses picos ($X/L_0<0$ e $X/L_0>1$, respetivamente), nas quais se denota que, quanto menor o valor de β , menor o pico de $\sigma_y/\tau_{méd}$. A

junta com o menor valor de β testado ($\beta=7,5^\circ$) obteve o melhor resultado, com $\sigma_y/\tau_{méd}$ máximo a ser inferior ao das outras juntas. Os restantes valores de β utilizados tendem a ter $\sigma_y/\tau_{méd}$ máximos mais altos, devido à menor área de secção resistente. Em termos de valores, a junta com $\beta=7,5^\circ$ obteve cerca de -14,5% de $\sigma_y/\tau_{méd}$ do que a junta sem *fillet*. As restantes juntas tiveram -12,3%, -13,4%, -7,2% e -3,9% por ordem crescente de β , respetivamente.

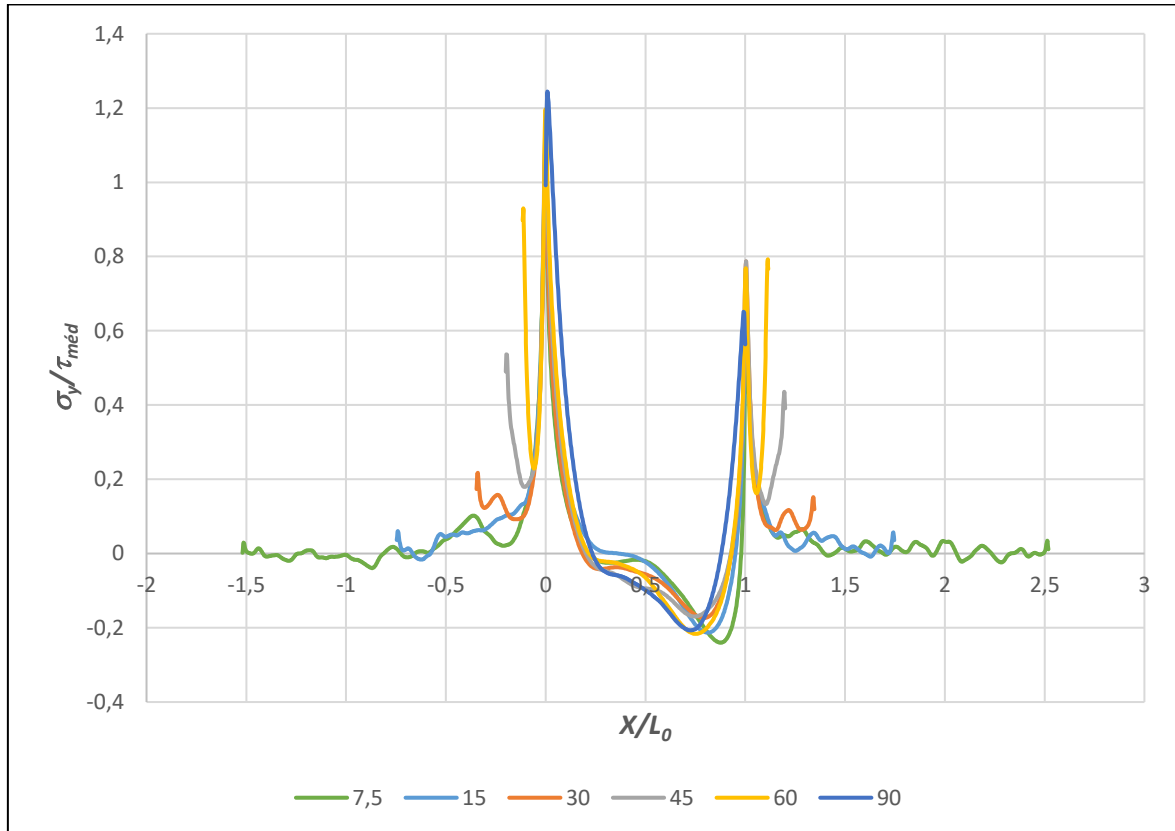


Figura 84 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo AV138 com *fillet*.

Na Figura 85 estão representadas graficamente as curvas da distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 com *fillet*. A introdução de um *fillet* de adesivo implica o aumento do comprimento do adesivo além dos topos dos substratos da junta, onde as tensões começam a surgir, os quais no gráfico representam os valores das relações $X/L_0 < 0$ e $X/L_0 > 1$. De referir que, para o cálculo da tensão $\tau_{méd}$ foram utilizadas apenas os valores das tensões τ_{xy} que correspondem à zona da camada adesiva (L_0), as quais correspondem às tensões da zona entre 0 e 1 do eixo horizontal do gráfico. Quanto menor o valor do ângulo β do *fillet*, menor são os efeitos de concentração de tensões τ_{xy} e, assim, menor o máximo de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$, uma vez que a redução do ângulo β implica o aumento da área de adesivo, ou área de secção resistente, a qual conduz a uma distribuição de tensão mais uniformes ao longo da área adesiva e reduz, assim, o valor máximo de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$, característica essa que confere à junta melhor resistência global. A junta com $\beta = 7,5^\circ$ obteve o melhor desempenho com um valor máximo de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ inferior em -11,1% comparativamente à junta sem *fillet*. Para os restantes valores de β , os picos de tensão na zona da camada adesiva foram muito semelhantes entre si, mas sempre inferiores à junta sem *fillet* de adesivo. Contudo, as tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 tendem a estabilizar e a variar muito pouco entre si, independentemente do valor de β . Para efeitos comparativos, entre a junta com $\beta=7,5^\circ$ e a junta com $\beta=60^\circ$, os valores de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ variaram somente 2,1%. Assim, justifica-se a introdução

de um *fillet* de adesivo para valores de β até 30° . Em $X/L_0=1$, os picos de tensão registaram valores inferiores do que em $X/L_0=0$, observando-se, contudo, um comportamento similar.

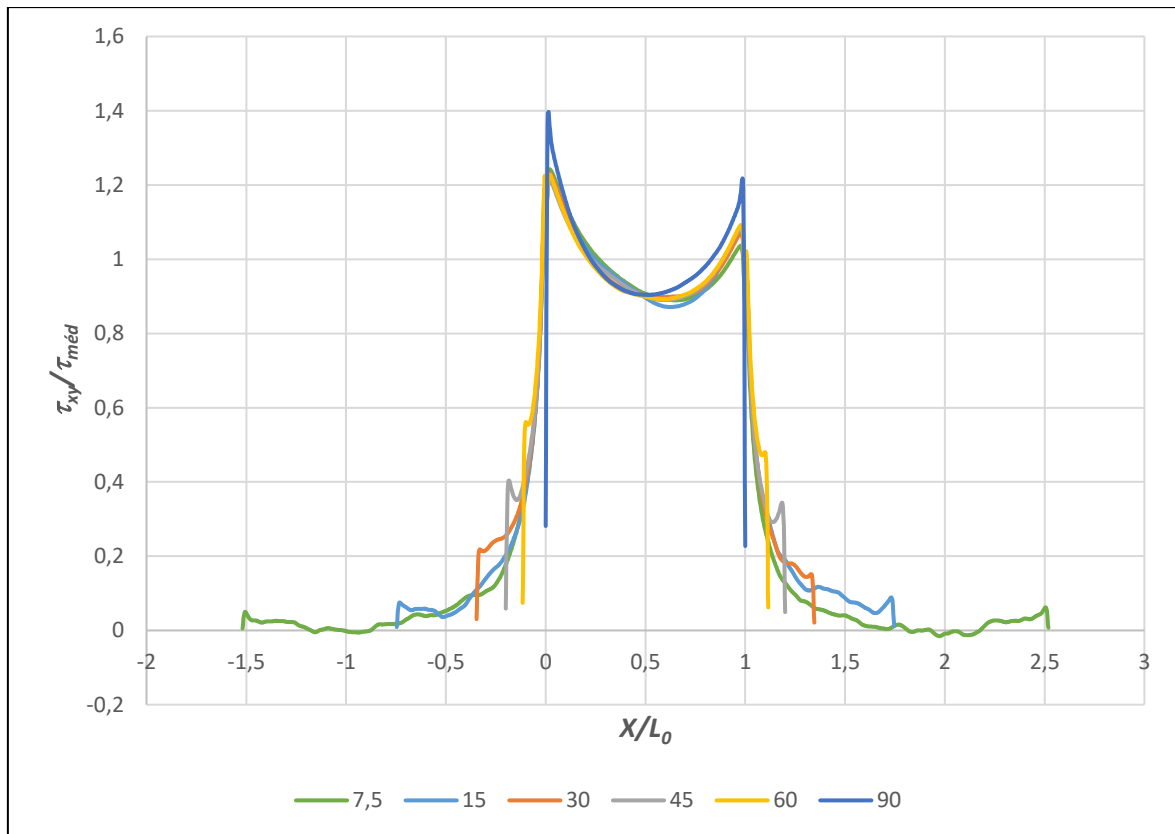


Figura 85 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 com *fillet*.

Na Figura 86 estão representadas as tensões σ_y para o adesivo DP8005 testado com *fillet*. Para este adesivo, as tensões σ_y tiveram um comportamento semelhante ao adesivo AV138, mas com a distribuição a ser mais uniforme na zona da camada adesiva e com picos $\sigma_y / \tau_{méd}$ máximos mais baixos, devido à menor rigidez do adesivo DP8005, quando comparado com o adesivo AV138. De igual modo, a análise numérica mostrou que existe a tendência de as concentrações de tensões σ_y diminuírem quando se diminui β , essencialmente devido ao aumento da área de secção resistente da junta, o que ajuda a aguentar e a dissipar elasticamente as tensões que se instalam na camada adesiva. A localização onde se concentram estes picos de tensão também foi semelhante à verificada para o adesivo AV138, localizando-se os picos máximos nas zonas das extremidades da camada adesiva. As tensões σ_y para este adesivo estão essencialmente em esforços de compressão entre $X/L_0=0,25$ e $X/L_0=1$, e em esforços de tração em $0,25 \leq X/L_0 \leq 1$. A junta com $\beta=90^\circ$ apresentou o maior pico absoluto, sendo que a junta com $\beta=7,5^\circ$ apresentou -14,5% em relação à junta sem *fillet* e a junta com $\beta=15^\circ$ apresentou um valor de -12,3%. As restantes juntas com $\beta=30^\circ$, $\beta=45^\circ$ e $\beta=60^\circ$ apresentaram variações de -13,4%, -7,2% e -3,9% respetivamente, todos em relação à junta sem *fillet*.

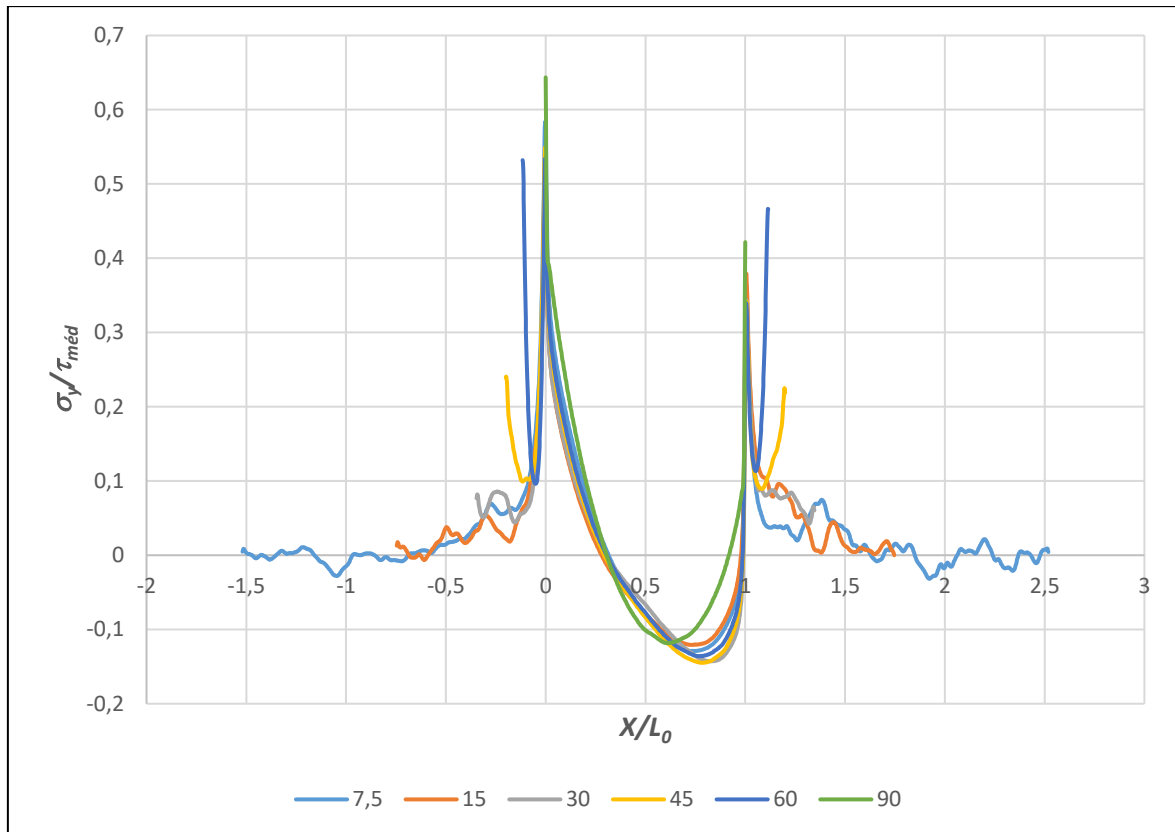


Figura 86 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo DP8005 com *fillet*.

Na Figura 87 estão representadas as tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005. Sendo este um adesivo dúctil, implicou nos testes que o efeito da concentração de tensões τ_{xy} foi reduzido e, assim, obtendo resultados cujos valores foram inferiores ao verificado com o adesivo AV138. Da mesma forma ao adesivo AV138, a introdução de um *fillet* de adesivo traduziu-se numa maior uniformidade na distribuição de tensões para todos os valores de β . Por outro lado, verificou-se que os picos máximos dos valores atingidos para todas as juntas testadas, em relação à junta de comparação sem *fillet*, variaram somente 0,3% entre a junta com $\beta=7,5^\circ$ e a junta com $\beta=60^\circ$. Em termos de resultados obtidos, a junta com $\beta=7,5^\circ$ apresentou uma diferença relativa de -5,6% em relação à junta sem *fillet*, a junta com $\beta=15^\circ$ variou -5,407%, a junta com $\beta=30^\circ$ variou -5,665%, a junta com $\beta=45^\circ$ de -5,7% e a junta com $\beta=60^\circ$ -5,5%, todas comparadas com a junta sem *fillet*. Em termos de picos máximos obtidos, estes foram também inferiores ao verificado com o adesivo AV138, confirmando a tendência da influência das propriedades mecânicas inerentes ao adesivo na resistência final da junta. Para $X/L_0=0$ e $X/L_0=1$, os valores máximos de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ foram muito similares para todas as juntas ensaiadas com *fillet* de adesivo, verificando-se pouca diferença entre os picos nos dois extremos da camada adesiva, e não se verificou diminuição direta com a diminuição de β .

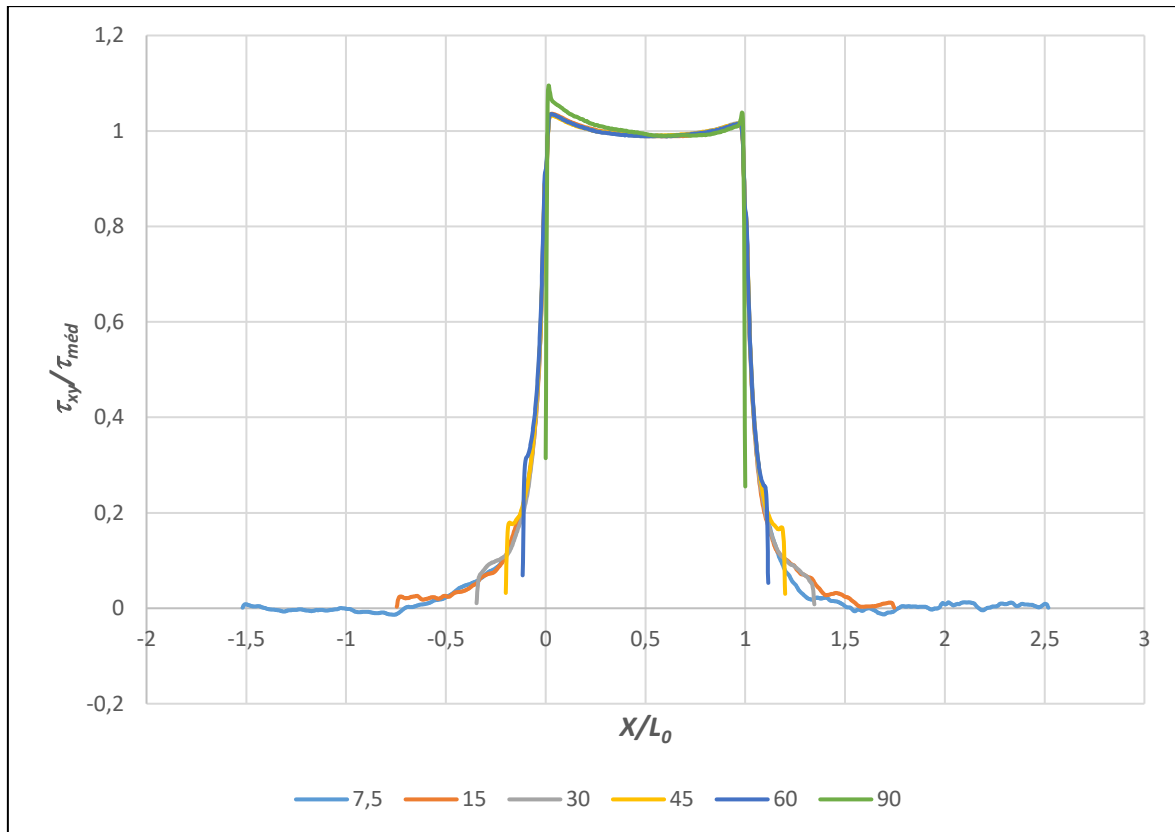


Figura 87 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 com *fillet*.

Na Figura 88 estão representadas as curvas com as tensões σ_y para as juntas testadas com o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet* de adesivo. Como é possível analisar pelos resultados obtidos, para os ensaios realizados com este adesivo não se verificou uma diminuição dos picos de tensão com a diminuição de β , tendo os resultados sido díspares entre as juntas testadas e não se verificando o aumento das tensões quando se aumentou o ângulo β do *fillet* de adesivo. Relativamente aos resultados obtidos, o maior pico de tensões ficou registado para a junta com $\beta=60^\circ$ com uma diferença de +25% em comparação com a junta sem *fillet*. As restantes juntas ensaiadas obtiveram diferenças de +13,8%, +16,9%, +14,1% e +19,4%, para os valores de β de 7,5°, 15°, 30° e 45° respetivamente. Em termos de comparação com os adesivos AV138 e DP8005, o XNR6852 E-2 obteve valores inferiores ao adesivo AV138 e superiores ao DP8005, assumindo, assim, a posição intermédia entre os três adesivos utilizados nos testes realizados nestas condições. Quanto à distribuição das tensões ao longo da camada adesivo, esta foi mais uniforme do que aquela que se verificou com o adesivo AV138, mas menos uniforme que a do adesivo DP8005, devido à rigidez intermédia do adesivo XNR6852 E-2, e contendo os elementos maioritariamente a esforços de compressão.

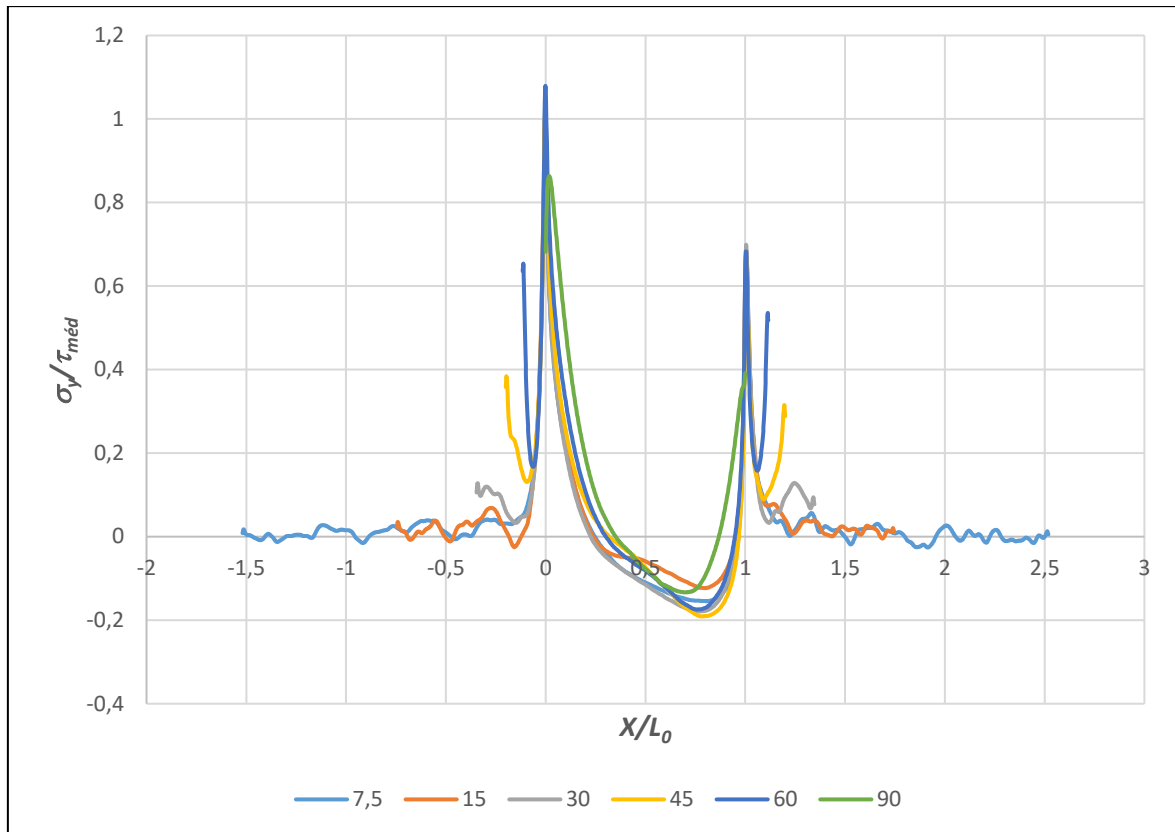


Figura 88 - Distribuição de tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet*.

Na Figura 89 estão representadas graficamente as tensões de τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet* de adesivo. Verificou-se que o pico máximo de $\tau_{xy} / \tau_{méd}$ é atingido pela junta sem *fillet*, não se verificando uma distribuição uniforme entre as juntas ensaiadas com a introdução de um *fillet* de adesivo, e apresentaram uma tendência decrescente dos esforços cortantes e, por isso, dos valores dos picos de tensão τ_{xy} com a diminuição de β . Apesar dessa diminuição, as juntas com β de 15°, 30°, 45° e 60° obtiveram um valor de $\tau_{xy} / \tau_{méd}$ máximo muito similares e variaram somente 1,1053% entre elas. Para $\beta=7,5^\circ$ o valor máximo de $\tau_{xy} / \tau_{méd}$ foi cerca de -10% mais baixo quando comparada com a junta sem *fillet*, tendo as juntas com *fillet* de 15°, 30°, 45° e 60° obtido, respetivamente, diferenças de -9,63%, -10,363%, -10,45% e -10,618%, todas comparadas com a junta sem *fillet*. Ao longo da camada adesiva, o adesivo XNR6852 E-2 também teve uma variação intermédia quando comparada com os outros dois adesivos utilizados nos ensaios, tendo os valores máximos das extremidades varia menos do que o adesivo AV138 e mais do que o DP8005, verificando a tendência da influência dos valores das propriedades mecânicas.

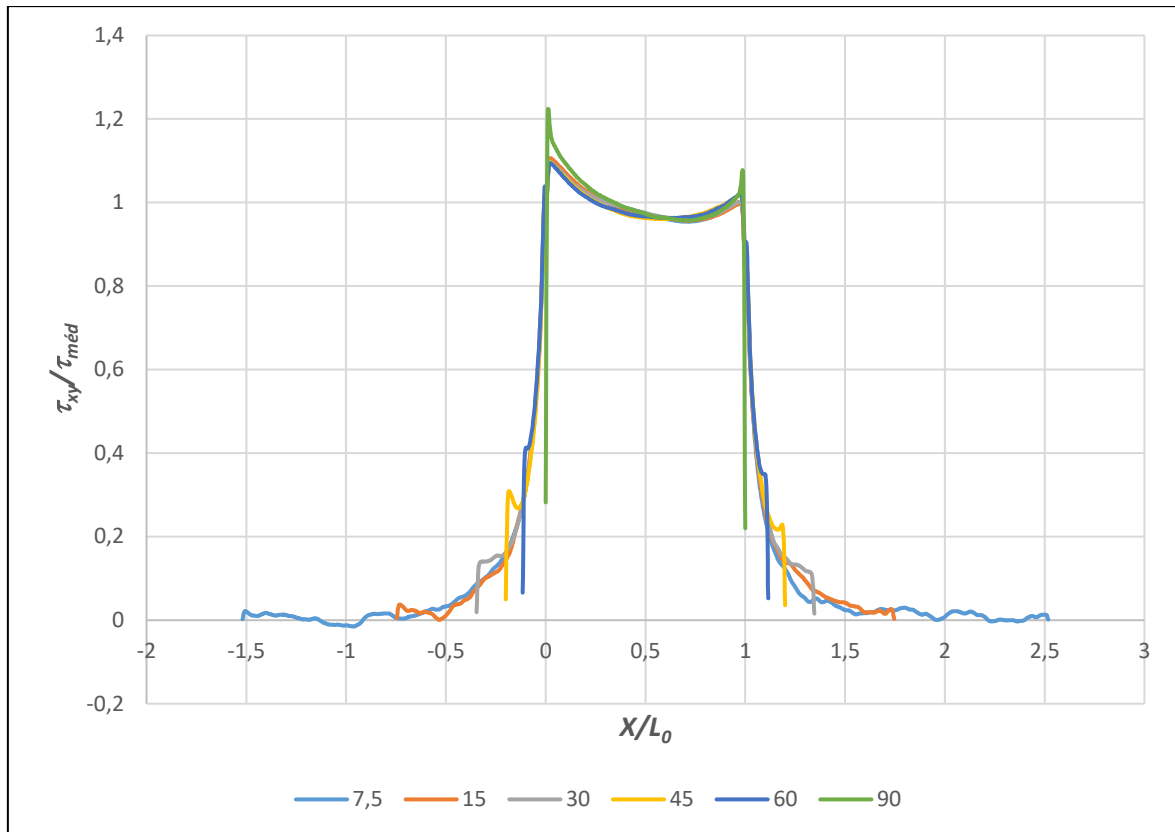


Figura 89 - Distribuição das tensões de τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet*.

3.3.4.1.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida

Na Figura 90 estão representadas as curvas P - δ para todas as juntas ensaiadas com a variação de β para o adesivo AV138. O valor de β influencia o valor de $P_{máx}$ suportada pela junta, bem como os respectivos δ antes de ocorrer a rutura. Para este estudo, ficou demonstrado que, quanto menor o valor de β , maior é o valor de $P_{máx}$ suportado pela junta, e maior o deslocamento de rutura suportado pela mesma. Como foi demonstrado no capítulo 3.3.3.1 para a influência de L_0 na resistência final da junta, o aumento de L_0 implica o aumento da área de secção resistente da junta, sendo que a introdução de um *fillet* de adesivo na leva a um aumento dessa mesma área, pelo que os resultados obtidos vão de encontro com o previsto. Pela análise da Figura 90, a junta cujo *fillet* possui o menor ângulo, $\beta=7,5^\circ$, obteve o maior valor de δ e o maior valor de $P_{máx}$, sendo que a junta sem *fillet* (a que possui menos área de secção resistente) obteve o valor mais baixo de $P_{máx}$ e δ . Para as restantes juntas ensaiadas, os valores de $P_{máx}$ e de δ diminuem com o aumento do ângulo do *fillet* (β).

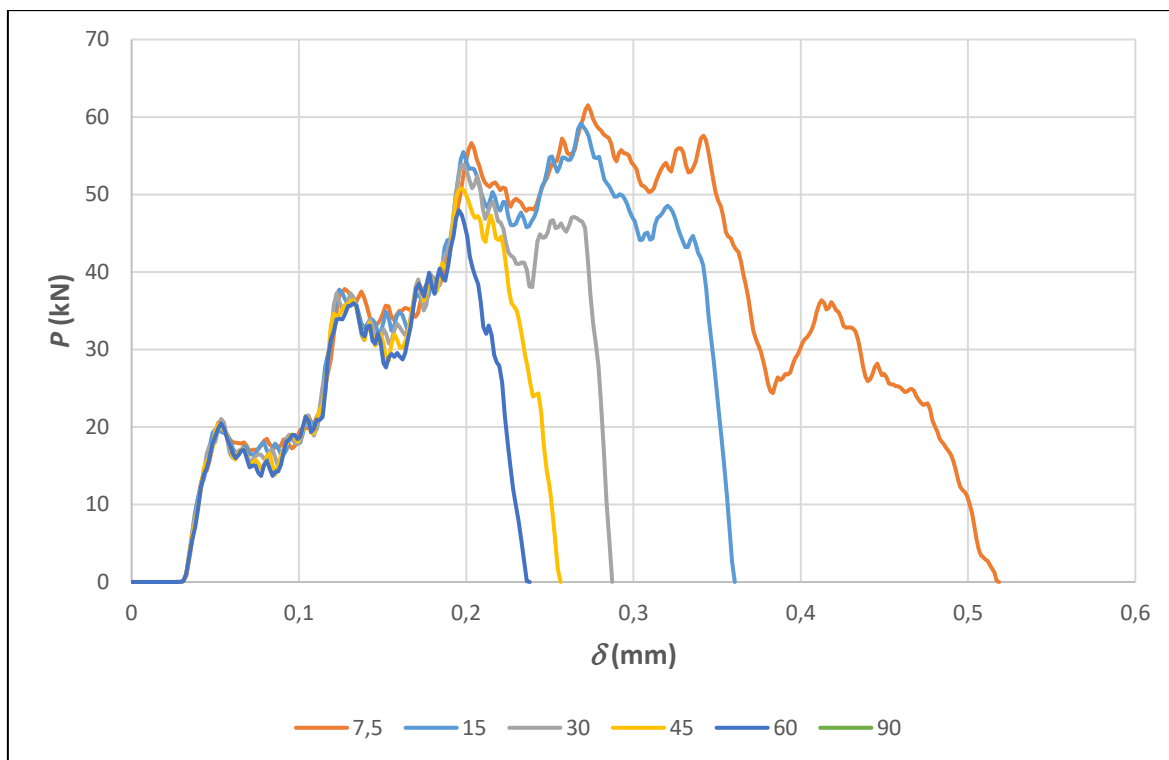


Figura 90 - Curvas P - δ para o adesivo AV138 com *fillet*.

Na Figura 91 é representada graficamente a evolução dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ registados para todas as juntas ensaiadas com os diferentes valores de β . Pela análise, verifica-se que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ registados diminuem com o aumento de β . De facto, para valores de β mais baixos, a área resistente aumenta. A junta com $\beta=7,5^\circ$ registou o valor mais elevado de $P_{m\acute{a}x}$ com o valor mais alto, de cerca de 61,5 kN, +73,6% do que a junta sem *fillet*, sendo que a junta com $\beta=15^\circ$ registou um valor cerca de +67%. A junta com $\beta=30^\circ$ registou +51,8%, enquanto a junta com $\beta=45^\circ$ registou +43,3%. Por último surge a junta com $\beta=60^\circ$, que registou um valor de $P_{m\acute{a}x}$ cerca de +35,3% superior ao da junta sem *fillet*.

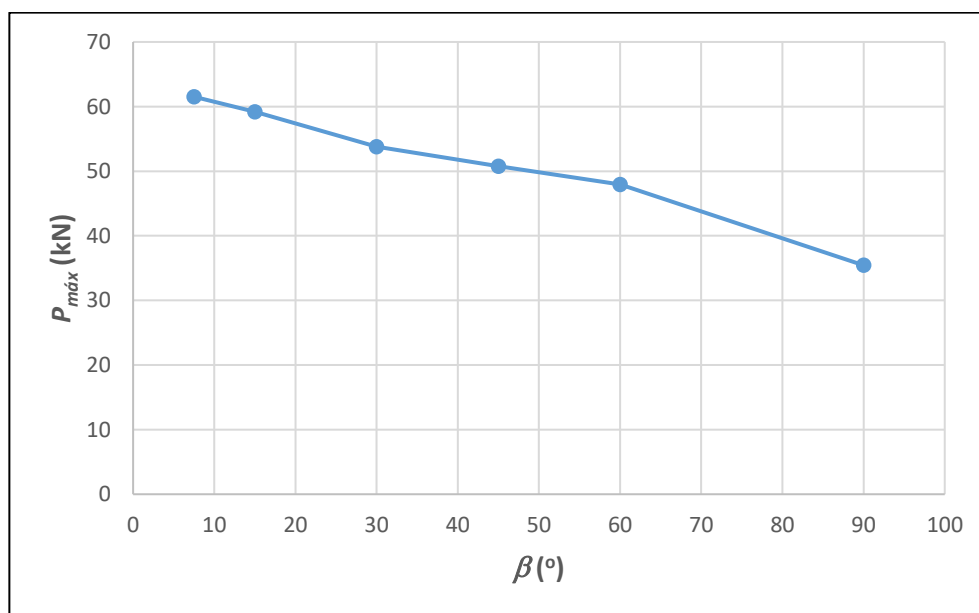


Figura 91 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo AV138 com *fillet*.

Relativamente ao modo de rutura, é possível observar na Figura 92 que a junta $\beta=7,5^\circ$ teve rutura coesiva do adesivo. Para todos os testes com o adesivo AV138 não ocorreu plastificação dos substratos.

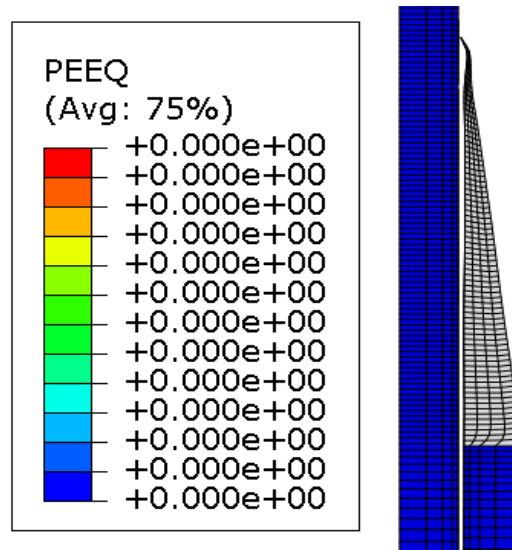


Figura 92 - Modo de rutura para o adesivo AV138 com $\beta=7,5^\circ$.

Na Tabela 29 estão resumidos os valores de E_{abs} em função do parâmetro geométrico β . Pela análise das curvas $P-\delta$, verificou-se que, para valores de β mais baixos se regista um crescimento de P e de δ , devido ao aumento da área resistente. Em termos gráficos, isso significa que as áreas das curvas $P-\delta$ para valores mais baixos de β são maiores, o que implica que as juntas com β mais baixos têm mais capacidade para absorver mais energia de impacto. Pela análise da Tabela 29 verifica-se essa tendência, onde a junta com $\beta=7,5^\circ$ absorveu +340,6% do que a junta sem *fillet*. A junta com $\beta=15^\circ$ absorveu +209,9%, enquanto a junta com $\beta=30^\circ$ absorveu +110,4% em relação à junta sem *fillet*. Quanto à junta com $\beta=45^\circ$ absorveu +61,7% e, por último, a junta com $\beta=60^\circ$ absorveu +35,3%. Esta tendência confirma que uma junta sem *fillet* ($\beta=90^\circ$) perde na capacidade de absorver energia ao esforço de impacto, uma vez que com as mesmas dimensões ($L_o=10$ mm e $t_p=2$ mm) sem *fillet* absorveu cerca de 3,9 J de energia, como ficou demonstrado na Tabela 15. O parâmetro geométrico β implica um aumento da área de secção resistente da junta, que é tanto maior quanto menor for o valor de β empregado, conferindo à junta maior resistência e maior capacidade de absorver energia numa aplicação ao impacto.

Tabela 29 - Valores da E_{abs} para o adesivo AV138 em função de β .

β (°)	E_{abs} (J)	Comparação
7,5°	17,0	+340,6%
15°	12,0	+209,9%
30°	8,1	+110,4%
45°	6,2	+61,7%
60°	5,2	+35,3%
90°	3,9	-

Na Figura 93 estão representadas graficamente as curvas $P-\delta$ para o adesivo DP8005 e diferentes valores do parâmetro β . Com um comportamento semelhante ao observado para o adesivo AV138, verificou-se para o adesivo DP8005 que a junta com o valor de β mais baixo possui o maior valor de $P_{máx}$, bem como δ até à rutura. Assim sendo, pela análise da Figura 93, fica

demonstrado que a junta com $\beta=7,5^\circ$ obteve o maior valor de $P_{m\acute{a}x}$ registado, bem como o maior valor de δ . Isto deve-se ao facto de que, quanto mais baixo for o valor de β , maior sera a área adesiva final, o que conduz ao aumento da área de secao resistente. Para este adesivo, verificou-se que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ atingidos são mais baixos comparativamente aos valores atingidos pelo adesivo AV138, por fatores intrínsecos das propriedades mecânicas dos materiais.

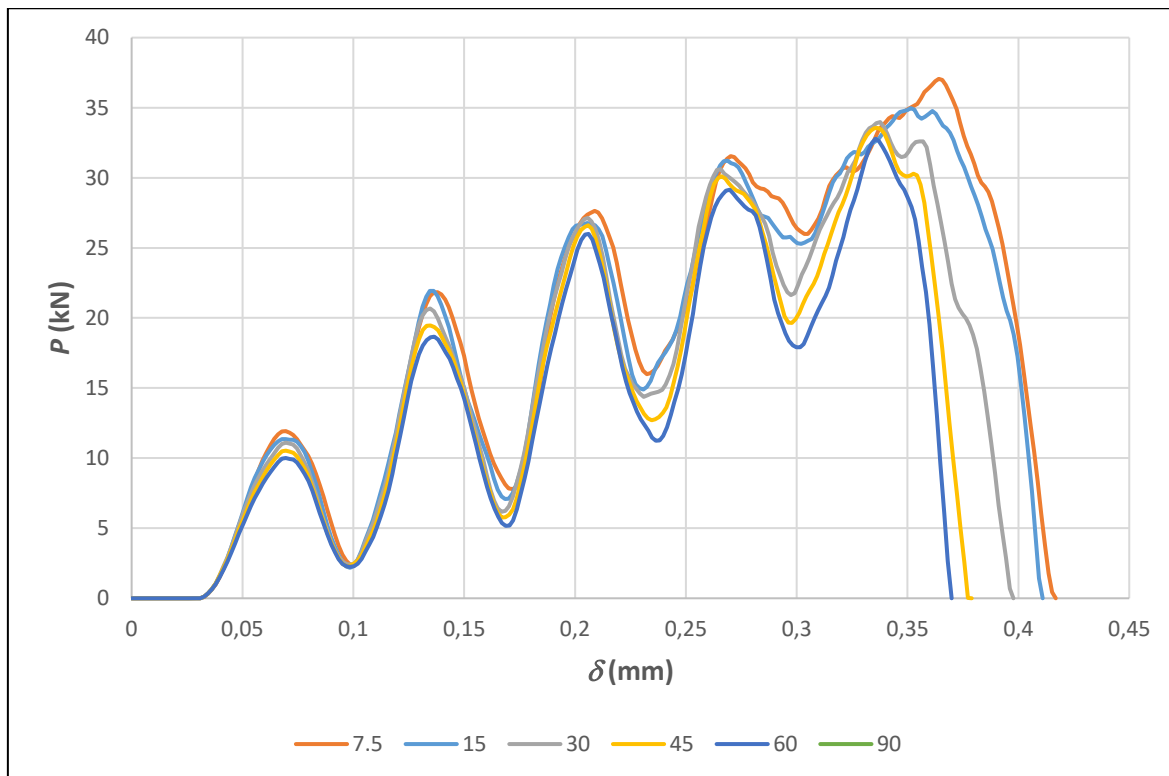


Figura 93 - Curvas P - δ para o adesivo DP8005 com *fillet*.

Para o adesivo DP8005 ficou demonstrado e registado na Figura 94, que as variaes entre as diferentes juntas testadas foram menos significativas do que o adesivo AV138, pelo facto de o adesivo DP8005 ser dúctil, com uma variao de cerca de 20% entre a junta com $\beta=7,5^\circ$ e a junta sem *fillet*.

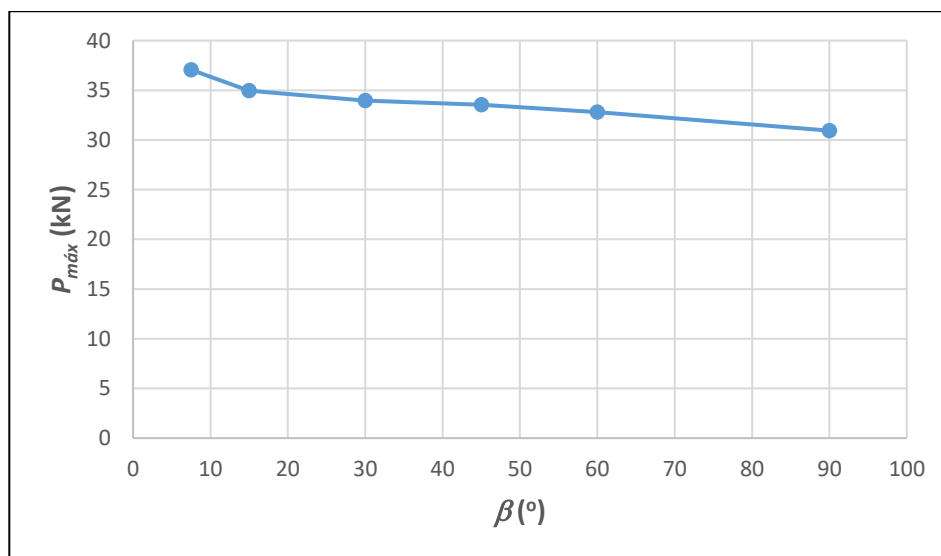


Figura 94 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo DP8005 com *fillet*.

Quanto ao modo de rutura para o adesivo DP8005, todas as juntas tiveram rutura coesiva pelo adesivo, e não se verificou deformação plástica nos substratos, como se pode ver na Figura 95.

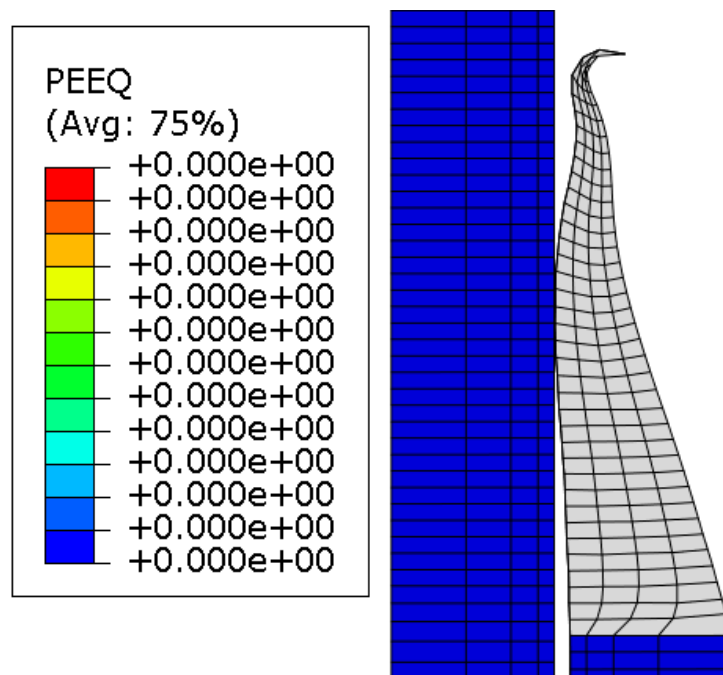


Figura 95 - Modo de rutura para o adesivo DP8005 com $\beta=30^\circ$.

Na Tabela 30 são apresentados os valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 com diferentes valores de β . Para este adesivo, a variação dos valores da E_{abs} pelas juntas é mais gradual, com a variação entre um β de $7,5^\circ$ e a junta sem *fillet* a não chegar aos 100%. Contudo, a tendência de que a introdução de um *fillet* na junta adesiva lhe fornece mais capacidade de absorver energia de impacto mantém-se.

Tabela 30 - Valores da E_{abs} para o adesivo DP8005 com *fillet*.

β ($^\circ$)	E_{abs} (J)	Comparação
7,5$^\circ$	7,6	+76,7%
15$^\circ$	7,4	+70,6%
30$^\circ$	6,5	+51,4%
45$^\circ$	5,8	+35%
60$^\circ$	5,4	+24,1%
90$^\circ$	4,3	-

Na Figura 96 estão representadas as curvas P - δ dos ensaios numéricos das juntas com o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet*. Da mesma forma que os adesivos anteriores, a influência da introdução de um *fillet* na camada adesiva resultou numa maior resistência da junta, com os valores de P e de δ a seguirem a tendência de aumento com a redução de β . De facto, verificou-se que a junta com $\beta=7,5^\circ$ obteve o deslocamento de rutura mais alto, seguido da junta com $\beta=15^\circ$ e da junta com $\beta=30^\circ$. A partir de $\beta=30^\circ$ a variação torna-se cada vez menor, aproximando-se da junta sem *fillet*.

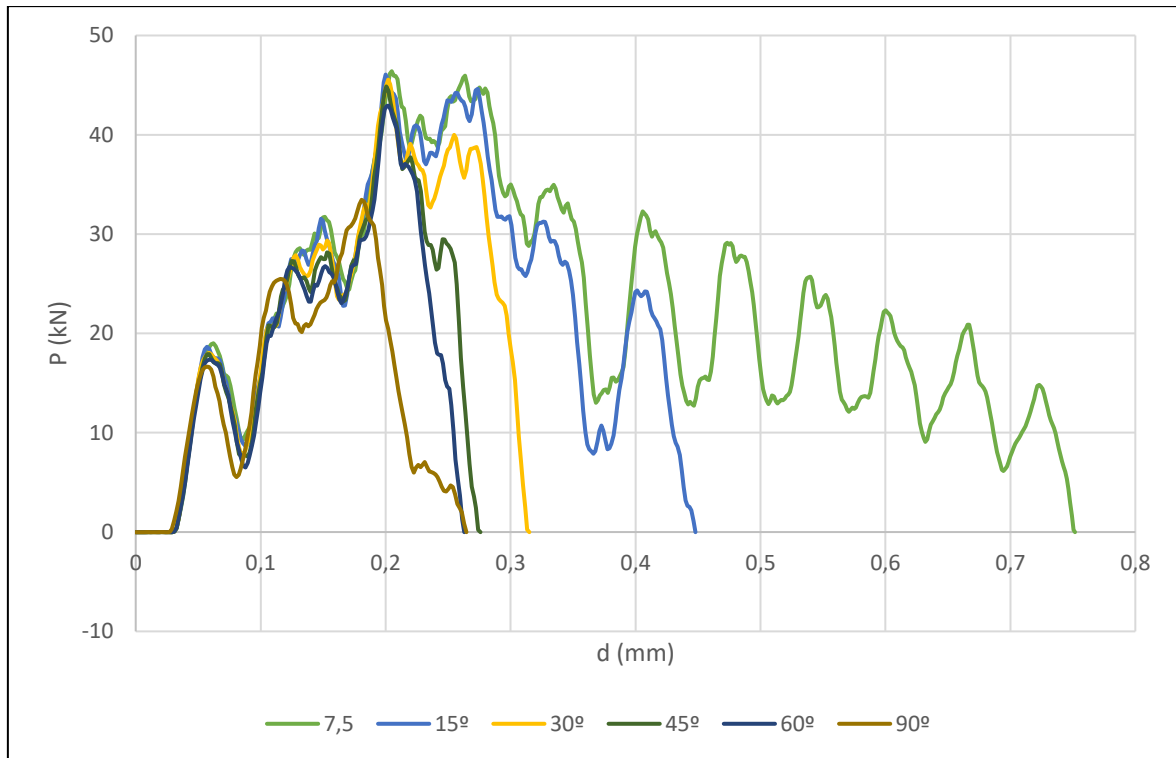


Figura 96 - Curvas P - δ para o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet*.

Na Figura 97 estão representados graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ em função de β para o adesivo XNR6852 E-2. Confirma-se que os valores registados para cada uma das juntas testadas apresentam uma tendência decrescente com o aumento de β . A junta com $\beta=7,5^\circ$ registou um valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado comparativamente com as outras juntas testadas, sendo que a junta sem *fillet* apresenta o valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais baixo. Pela mesma razão dos dois adesivos anteriores, valores de β mais baixos aumentam a área de secção resistente, o que aumenta a capacidade das juntas em suportar cargas mais elevadas antes de ocorrer a rutura. Em termos comparativos, a junta com $\beta=7,5^\circ$ obteve um valor de $P_{m\acute{a}x}$ superior em cerca de 38,7% comparativamente à junta sem *fillet*, com variações muito ligeiras até a um valor de $\beta=60^\circ$, que teve um valor de $P_{m\acute{a}x}$ superior em 28,4% ao da junta sem *fillet*.

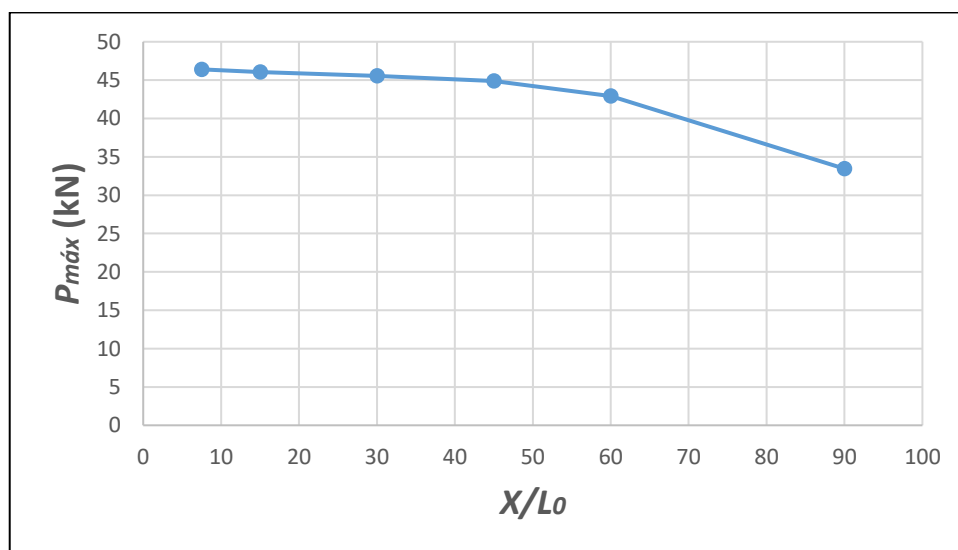


Figura 97 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet*.

No que diz respeito ao modo de rutura, é possível observar na Figura 98 que para o adesivo XNR6852 E-2 as juntas tiveram rutura coesiva pelo adesivo. Para todos os valores de β testados com este adesivo, não ocorreu plastificação dos substratos.

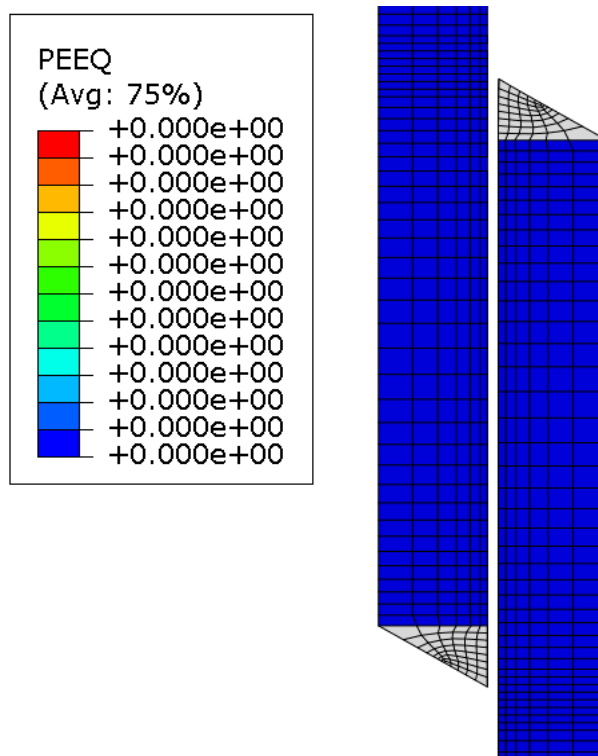


Figura 98 - Modo de rutura para o adesivo XNR6852 E- para $\beta=60^\circ$.

Na Tabela 31 estão resumidos os valores de E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 com a variação do parâmetro geométrico β . Observa-se que a introdução do *fillet* de adesivo na junta conduz a uma maior capacidade de absorção da energia de impacto, capacidade esta que diminui à medida que β aumenta. Em termos comparativos, a junta com $\beta=7,5^\circ$ obteve o maior valor de E_{abs} , com aproximadamente 16,4 J de energia absorvida, +328,2% do que a junta sem *fillet*. Para as restantes juntas testadas, registaram diferenças de +171,3%, +88,0%, +45,3% e +30,3% para os valores de $\beta=15^\circ$, $\beta=30^\circ$, $\beta=45^\circ$ e $\beta=60^\circ$, respetivamente. Estes valores advêm do somatório total das áreas das respetivas curvas $P-\delta$, confirmando a tendência segundo a qual quanto maior a área da curva $P-\delta$ associada à junta testada, maior é a capacidade da junta em absorver a energia gerada no esforço de impacto, dissipando-a pela deformação da junta.

Tabela 31 - Valores da E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 com *fillet*.

β (°)	E_{abs} (J)	Comparação
7,5°	16,4	+328,2%
15°	10,4	+171,3%
30°	7,2	+88,0%
45°	5,6	+45,3%
60°	5,0	+30,3%
90°	3,8	-

3.3.4.1.3. Comparação de resultados

Na Tabela 32 estão apresentados os valores de $P_{máx}$ em função do parâmetro geométrico β com a respetiva diferença percentual medida em relação ao valor de $P_{máx}$ para $\beta=90^\circ$.

Tabela 32 - Comparação dos três adesivos com valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para β .

β (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)
7,5	61,5	+73,6%	7,6	+76,7%	16,4	+328,2%
15	59,2	+67,0%	7,4	+70,6%	10,4	+171,3%
30	53,8	+51,8%	6,5	+51,4%	7,2	+88,0%
45	50,8	+43,3%	5,8	+35%	5,6	+45,3%
60	48,0	+35,3%	5,4	+24,1%	5,0	+30,3%
90	35,4	-	4,3	-	33,5	-

Como se pode comparar através da análise da Tabela 32, a introdução de *fillet* de adesivo fez diminuir os picos de tensão para as juntas ensaiadas com os três adesivos utilizados neste estudo, o que equivale a referir que fez aumentar a resistência da camada adesiva e, por consequência, da resistência global da junta. Analisando primeiro o adesivo AV138, a introdução do *fillet* fez aumentar o valor de $P_{máx}$ de tal forma que, para um ângulo $\beta=7,5^\circ$, se observou um aumento de +73,587%, aumento esse alicerçado no aumento da área de secção resistente e das propriedades mecânicas deste adesivo. O aumento de β diminui a área de secção resistente, pelo que a carga $P_{máx}$ suportada pela junta diminui. Quanto ao adesivo DP8005, a sua menor rigidez significa que os valores de $P_{máx}$ atingidos pelas juntas testadas com este adesivo são mais baixos, para os mesmos valores de β e condições de ensaio. A variação destes valores também foi inferior entre os diferentes β , com a variação da carga máxima ($\Delta P_{máx}$) a diferenciarem-se em 20% entre a junta sem *fillet* e a junta com $\beta=7,5^\circ$. Contudo, a introdução do *fillet* implica o aumento do valor de $P_{máx}$, fornecendo à junta um aumento de resistência. Para o adesivo XNR6852 E-2, verificou-se também que a introdução de um *fillet* de adesivo influencia positivamente a resistência global da junta. Da mesma forma, o parâmetro β também aumentou a área de secção resistente das juntas, com o valor da carga suportada $P_{máx}$ a ser crescente para valores de β mais baixos. Assim, a junta com $\beta=7,5^\circ$ obteve, para o adesivo XNR6852 E-2, o maior valor de $P_{máx}$, com uma variação $\Delta P_{máx}$ de +38,7% em relação à junta sem *fillet*, sendo essa variação decrescente à medida que β aumenta até à junta sem *fillet* ($\beta=90^\circ$).

Na Tabela 33 estão representados os valores de E_{abs} para os três adesivos em função do parâmetro β .

Tabela 33 - Comparação dos de E_{abs} em função de β .

β (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)
7,5	17,0	+340,6%	7,6	+76,7%	16,4	+328,2%
15	12,0	+209,9%	7,4	+70,6%	10,4	+171,3%
30	8,1	+110,4%	6,5	+51,4%	7,2	+88,0%
45	6,2	+61,7%	5,8	+35%	5,6	+45,3%
60	5,2	+35,3%	5,4	+24,1%	5,0	+30,3%
90	3,9	-	4,3	-	3,8	-

Conforme se pode constatar pela análise da Tabela 33, o parâmetro geométrico β influenciou positivamente a capacidade de absorção de energia por parte das juntas. Quanto menor o valor de β , maior é a capacidade das juntas em absorverem energia ao impacto. Para adesivos com propriedades mecânicas mais altas, maior é o valor de E_{abs} respectivo.

Na Tabela 34 estão registados os valores das tensões σ_y para os três adesivos em função de β . Como é possível visualizar, os picos das tensões σ_y são maiores para o adesivo AV138, que é o mais rígido e, por esse motivo, o que possui os maiores valores de E , G e ν , bem como t_n e t_s . Em segundo lugar está o adesivo XNR6852 E-2, logo seguido do DP8005. As tensões σ_y apresentam um comportamento crescente com o aumento de β .

Tabela 34 - Comparação de σ_y para os três adesivos em função de β .

β (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$
7,5	1,06	-14,5%	0,58	-9,2%	0,98	+13,8%
15	1,09	-12,2%	0,53	-17,1%	1,01	+16,9%
30	1,08	-13,4%	0,52	-18,5	0,99	+14,1%
45	1,15	-7,2%	0,55	-14,5	1,03	+19,4%
60	1,20	-3,9%	0,53	-17%	1,08	+25,0%
90	1,24	-	0,64	-	0,86	-

Na Tabela 35 estão resumidos os valores das tensões τ_{xy} para os três adesivos em função de β . Da mesma forma que se verificou com as tensões σ_y , as tensões τ_{xy} também foram maiores para os adesivos rígidos, como é o caso do AV138 e XNR6852 E-2, logo seguidos pelo DP8005. As tensões τ_{xy} aumentam com o aumento de β .

Tabela 35 - Comparação de τ_{xy} para os três adesivos em função de β .

c	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$
7,5	1,24	-11,1%	1,03	-5,6%	1,10	-10,0%
15	1,23	-11,8%	1,04	-5,4%	1,11	-9,6%
30	1,23	-11,8%	1,03	-5,7%	1,10	-10,0%
45	1,22	-12,9%	1,03	-5,7%	1,10	-10,0%
60	1,23	-12,1	1,04	-5,5%	1,09	-10,6%
90	1,40	-	1,10	-	1,22	-

3.3.4.2. Chanfro interior

Neste capítulo é realizado o estudo da introdução de um chanfro interior nos substratos. A introdução de chanfros interiores nos tubos constituintes dos substratos visa diminuir os picos de tensão nas extremidades da camada adesiva, pelo aumento do volume de adesivo nas extremidades de L_0 . Na Figura 99 está representada a geometria base da junta sujeita a análise.

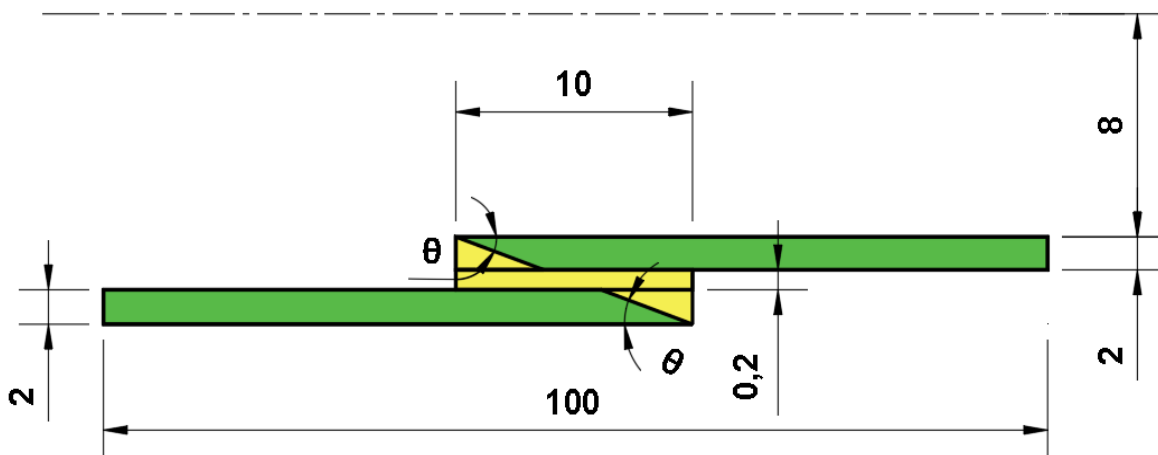


Figura 99 - Geometria de base para ensaio do parâmetro chanfro interior.

3.3.4.2.1. Distribuição de tensões

Na Figura 100 são representadas as tensões σ_y para o adesivo AV138 em função de θ . Observa-se que os picos de tensão têm lugar nas extremidades da junta adesiva, havendo alterações nas curvas que estão relacionadas com alterações de geometria e de propriedades nas zonas de fronteira adesivo-substrato. Pela análise da Figura 100, fica evidente que o maior pico de tensões $\sigma_y / \tau_{méd}$ ocorre para $\theta=15^\circ$, decorrente da menor área de secção transversal do substrato. A inclinação do substrato, dada pelo ângulo θ , implica que haja alterações na geometria e das propriedades mecânicas nessa zona, responsáveis pela existência de um segundo pico de tensões em $X/L_0=0,2$. De uma forma geral, quanto maior é θ , maior é a concentração de tensões nas zonas onde se iniciam os chanfros interiores dos substratos. Este aumento de θ resulta num decréscimo da quantidade de adesivo na extremidade da junta, fazendo com que esta fique mais suscetível às tensões criadas pela rotação da junta na zona de sobreposição.

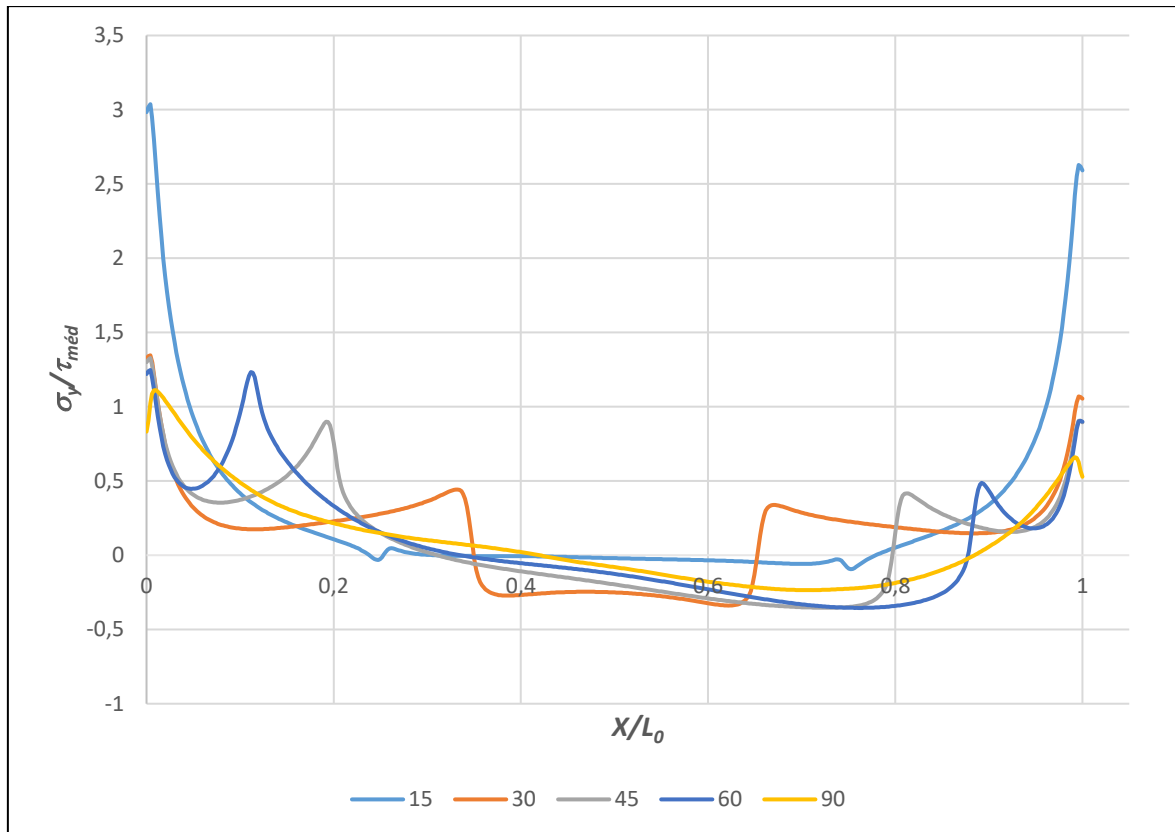


Figura 100 – Tensões σ_y para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ .

Na Figura 101 estão representadas as tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 com variação do parâmetro geométrico θ . Com a adição do chanfro interior nos substratos verificam-se dois picos de tensão τ_{xy} . O primeiro pico surge nas extremidades da camada adesiva, em $X/L_0=0$ e $X/L_0=1$. O segundo pico ocorre na zona da variação geométrica derivada do chanfro interior, sendo que este segundo pico de tensões foi superior ao primeiro para todos os valores de θ ensaiados. O excesso de adesivo que se forma nas extremidades, em $X/L_0=0$ e $X/L_0=1$, reduz o valor das tensões τ_{xy} devido à diferença de rigidez na zona adesivo-substrato. A junta com $\theta=30^\circ$ obteve o maior valor máximo de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$, com uma diferença de +43,3% em relação ao valor obtido pela junta sem adição de chanfro interior.

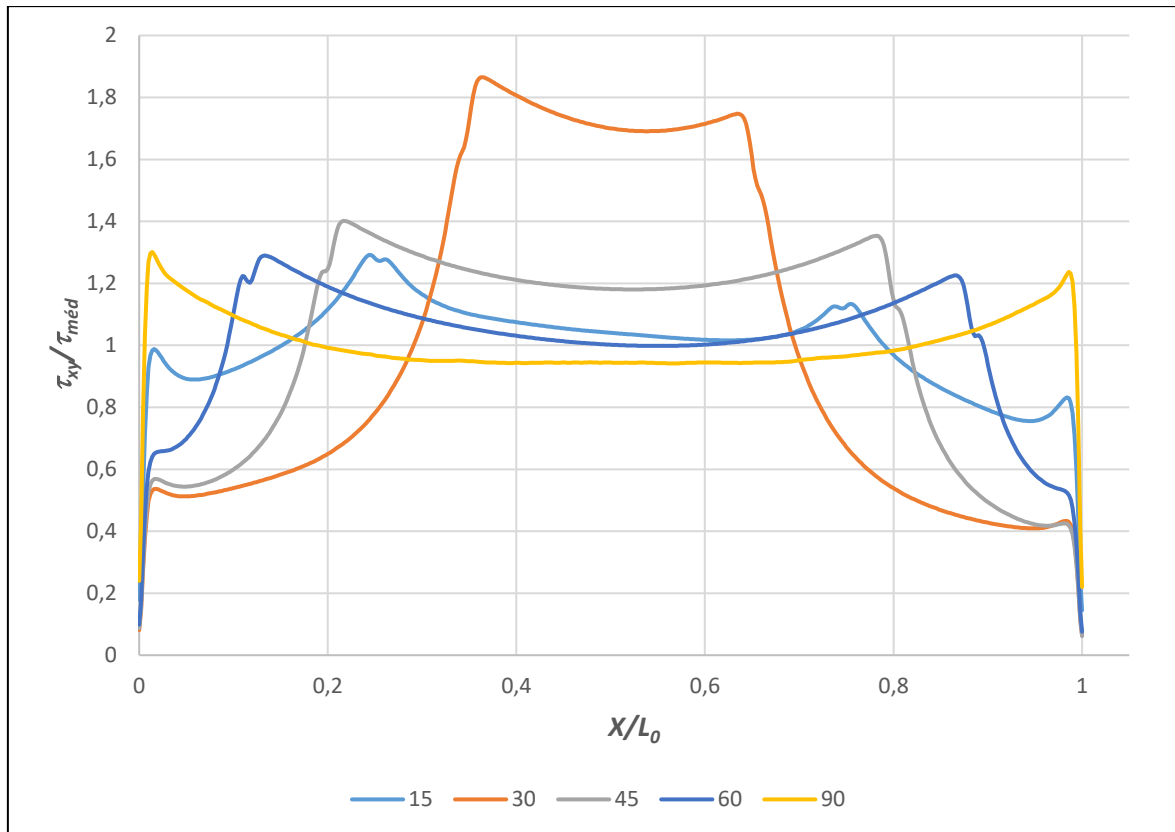


Figura 101 - Tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ .

Na Figura 102 estão representadas as tensões σ_y para o adesivo DP8005 testado com variação do parâmetro geométrico θ . Para este adesivo, as curvas tiveram um comportamento muito similar ao registado para o adesivo AV138, e com valores das tensões σ_y muito semelhantes, para todos os valores do ângulo θ ensaiados, sendo que se voltou a verificar a existência de dois picos de tensões σ_y . De forma semelhante, a junta com $\theta=15^\circ$ obteve claramente o maior pico de tensões, com um valor máximo da relação $\sigma_y/\tau_{méd}$ superior em +392,8% à junta com menor concentração de tensões, para $\theta=90^\circ$. Assim, e tal como sucedeu com os ensaios realizados com o adesivo AV138, a introdução de um chanfro interior nos substratos significou um aumento das tensões σ_y , essencialmente devido à alteração geométrica daquela zona da junta, e à menor presença de quantidade de adesivo nos extremos da camada adesiva com o aumento do ângulo θ .

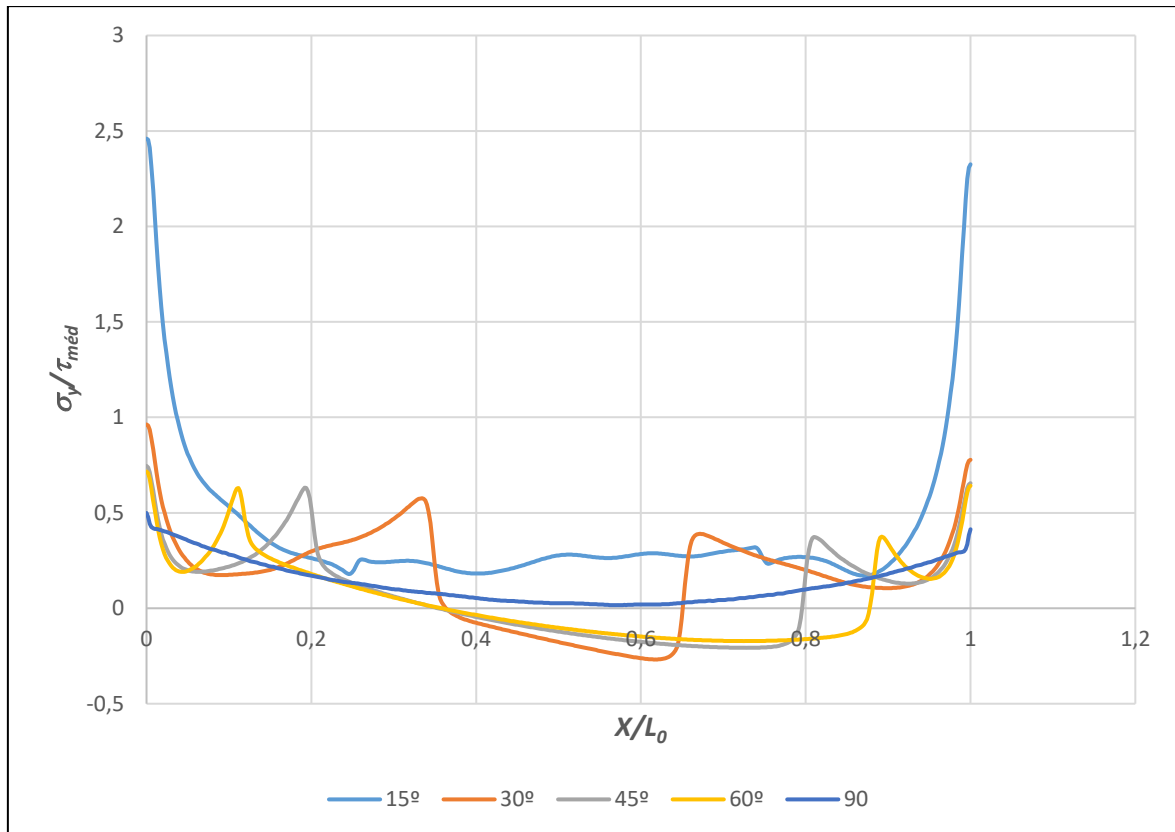


Figura 102 - Tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ .

Na Figura 103 estão representadas as tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 com alteração do parâmetro θ . Pela análise da Figura 103, percebe-se que os valores alcançados nos ensaios com este adesivo foram claramente inferiores para as mesmas condições de ensaio. Porém, as curvas apresentam um comportamento semelhante às obtidas para o adesivo AV138, com a junta com $\theta=30^\circ$ a alcançar o maior pico de tensões τ_{xy} , com um valor superior em 18% ao da junta sem chanfro. Para θ entre 15° e 45° , os resultados não apresentam um padrão de comportamento, com a junta com $\theta=30^\circ$ a atingir o maior valor, seguida da junta com $\theta=45^\circ$ e da junta com $\theta=15^\circ$. Contudo, a diminuição de θ resultou em valores das concentrações mais significativas das tensões τ_{xy} do que para valores de θ mais altos, sendo que essas tensões se concentraram na zona central da camada adesivo.

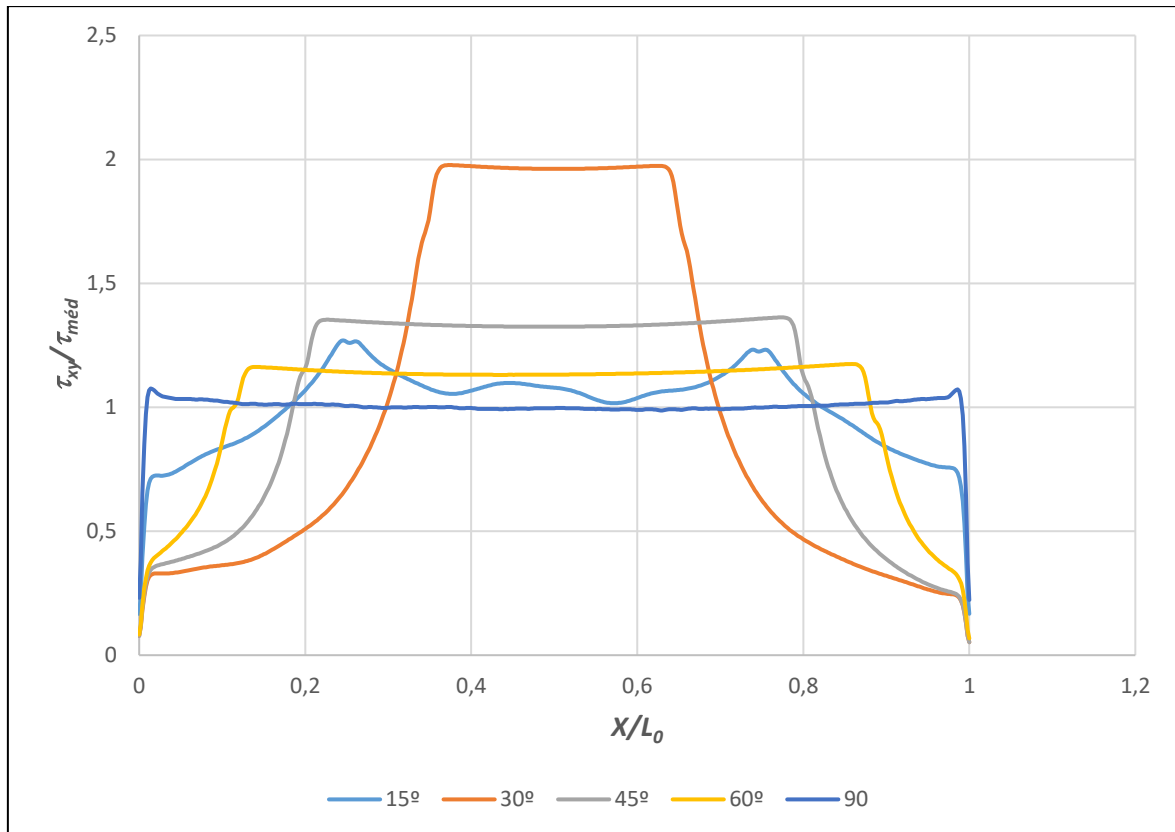


Figura 103 - Tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ .

Na Figura 104 estão representadas as tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 com a variação do parâmetro geométrico θ . Com um comportamento muito similar aos dois adesivos anteriores, notou-se que os valores máximos de $\sigma_y/\tau_{méd}$ se posicionam entre os outros adesivos testados. Também se observa que a junta com $\theta=15^\circ$ alcança o maior pico de tensões σ_y com um valor superior em 199,6% ao alcançado pela junta sem chanfro. Mais uma vez, não se verificou um padrão de comportamento nesta distribuição de tensões, com a junta com $\theta=15^\circ$ a alcançar o maior valor, seguido das juntas com $\theta=60^\circ$, $\theta=45^\circ$ e da junta com $\theta=30^\circ$, por ordem decrescente de tensões instaladas. Assim, é possível afirmar que existe uma tendência crescente das tensões instaladas para valores do ângulo θ mais baixos, devido à perda de rigidez por parte do substrato na zona que se inicia o chanfro até à fronteira dos tubos, zona esta preenchida com adesivo.

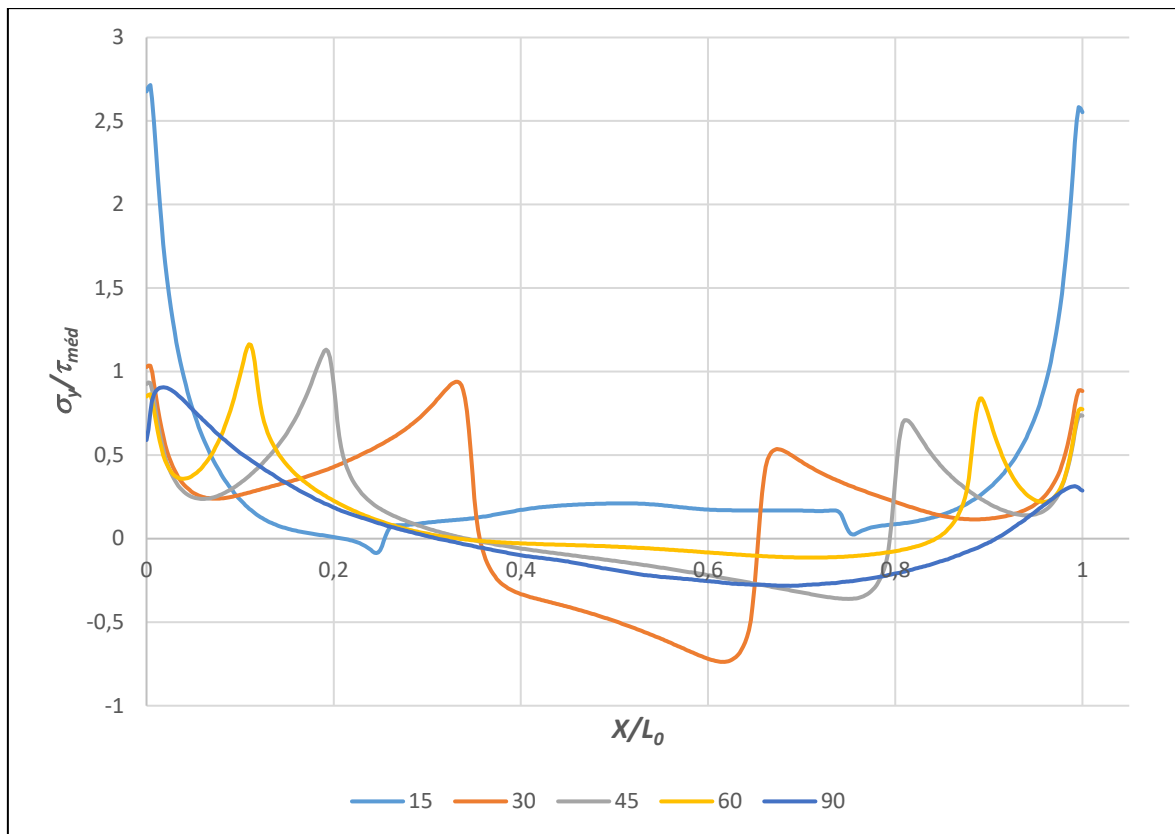


Figura 104 - Tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ .

Na Figura 105 estão representadas as tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 com alteração do parâmetro θ . Mais uma vez, denota-se um comportamento semelhante nas curvas e com valores muito próximos. A junta com $\theta=30^\circ$ obteve o maior pico de concentração de tensões com um valor 57,7% superior ao da junta sem chanfro.

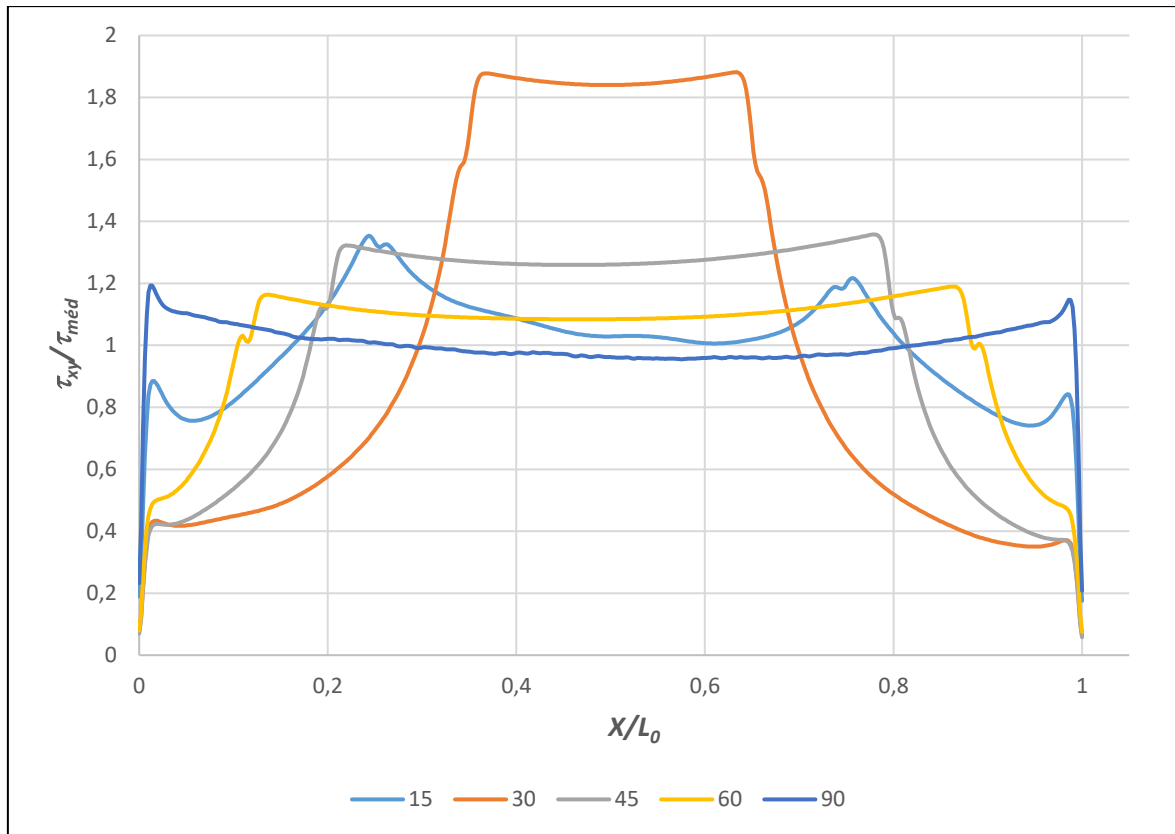


Figura 105 - Tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ .

3.3.4.2.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida

Na Figura 106 estão representadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo AV138 com alteração do parâmetro geométrico θ . Para as curvas com $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ verificou-se uma sobreposição quase perfeita das curvas, com valores de $P_{máx}$ e δ muito similares. Para a junta com $\theta=15^\circ$ notou-se um deslocamento de rutura similar ao das juntas com $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$, embora tivesse uma diferença significativa de $P_{máx}$. A maior variação de δ verificou-se para a curva com $\theta=30^\circ$, com uma diferença considerável em relação às outras juntas com chanfro, e com uma diferença ainda maior em relação à junta sem chanfro.

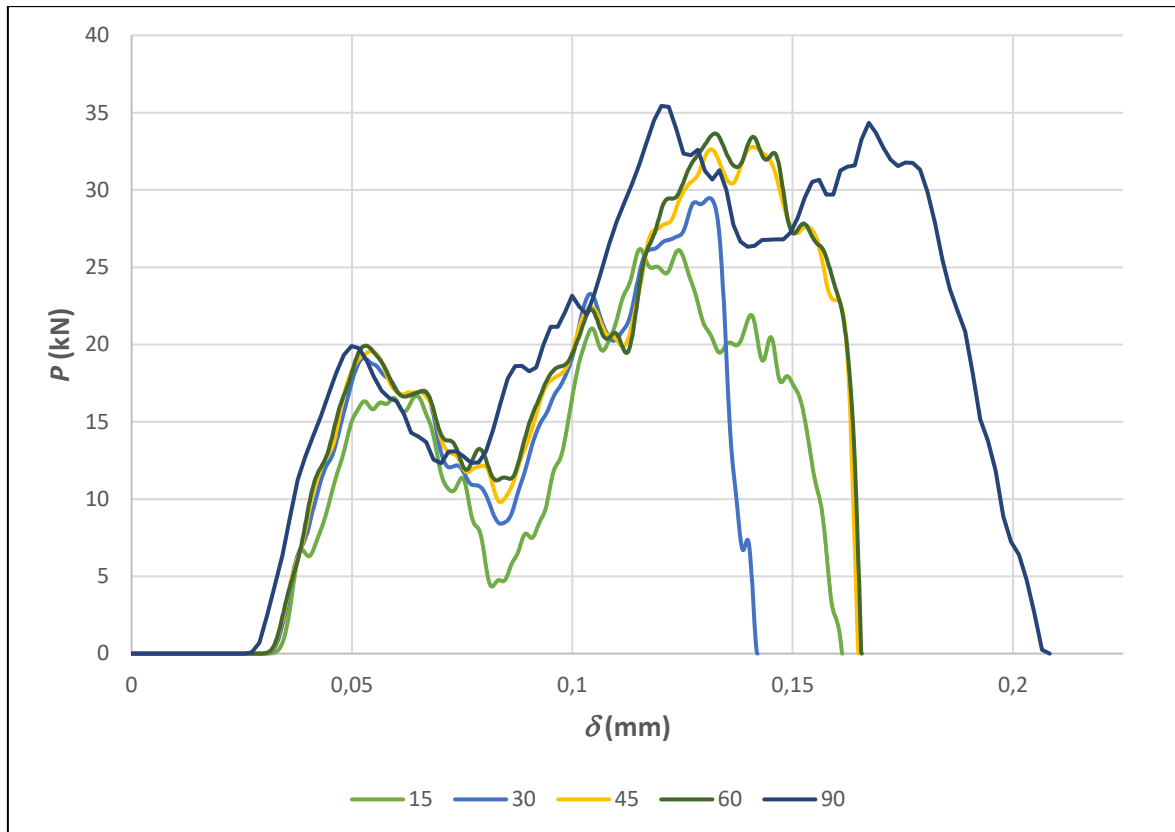


Figura 106 - Curva P - δ do adesivo AV138 em função do parâmetro θ .

Na Figura 107 estão representados graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo AV138 com variação do parâmetro geométrico θ . Como é possível concluir da sua análise, a introdução de um chanfro nos substratos faz diminuir $P_{m\acute{a}x}$ a sua capacidade de suportar carga antes de ocorrer a rutura. Esta alteração geométrica conduz à perda de rigidez devido à remoção de material do substrato e substituída por adesivo mais flexível, fazendo com que a junta perca resistência global e ceda para cargas instaladas inferiores. Assim, a junta com $\theta=15^\circ$ obteve o menor valor de $P_{m\acute{a}x}$, com um valor inferior em 26,1% ao da junta sem chanfro, que suportou o valor mais alto, com 35,44 kN. O valor de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas ensaiadas com $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ registaram uma diferença de -16,8%, -7,5% e -5,0%, respetivamente.

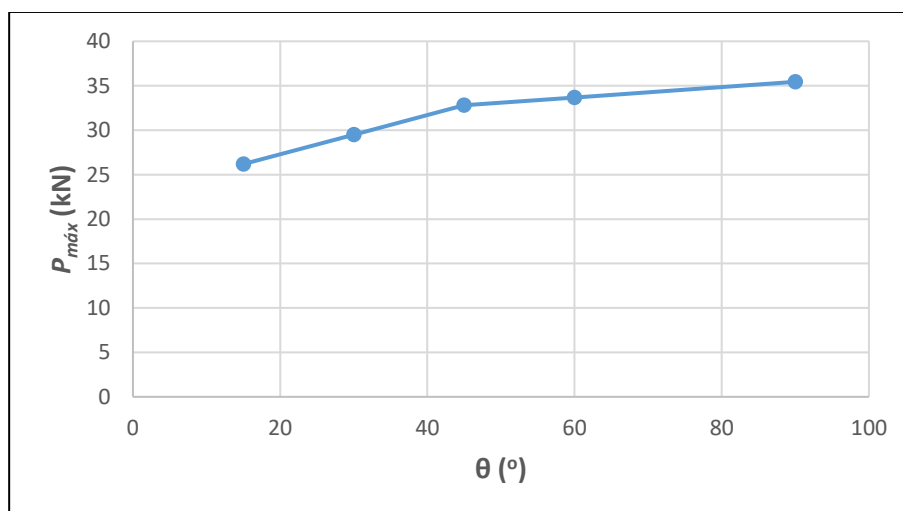


Figura 107 - Valor de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ .

Quanto ao modo de rutura, para o valor de $\theta=15^\circ$ deu-se uma rutura coesiva do adesivo com plastificação dos substratos num valor máximo de 0,58%, conforme se pode ver pela Figura 108. Para os restantes valores de θ ensaiados com o adesivo AV38, a rutura deu-se pela camada adesiva sem plastificação dos substratos.

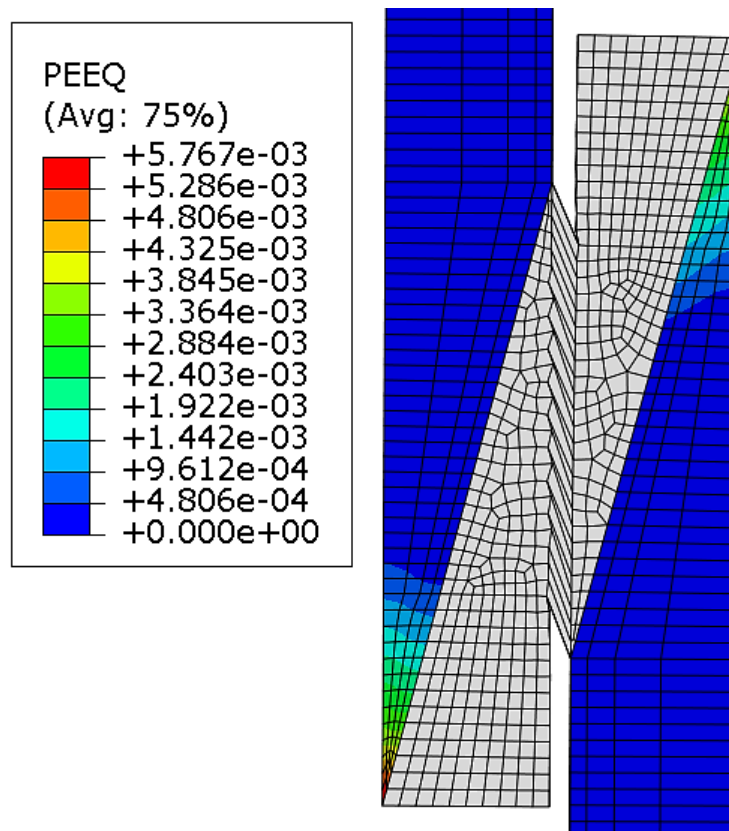


Figura 108 - Modo de rutura para o adesivo AV138 para $\theta=15^\circ$.

Na Tabela 36 estão representados os valores de E_{abs} das juntas com o adesivo AV138 em função do parâmetro θ . O parâmetro θ influenciou negativamente a capacidade das juntas em absorver energia ao esforço de impacto. Assim, a junta sem chanfro foi a que mais absorveu energia, com $E_{abs}=3,9$ J. As juntas com $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ absorveram -50,7%, -53,2%, -31,6% e -30,1%, respetivamente. Estes valores refletem as respetivas áreas das curvas $P-\delta$.

Tabela 36- Valores da E_{abs} pela junta para o adesivo AV138 em função do parâmetro θ .

θ ($^\circ$)	E_{abs} (J)	Comparação
15 $^\circ$	1,9	-50,7%
30 $^\circ$	1,8	-53,2%
45 $^\circ$	2,6	-31,6%
60 $^\circ$	2,7	-30,1%
90 $^\circ$	3,9	-

Na Figura 109 estão representadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo DP8005 com variação do parâmetro geométrico θ , onde pode ver que as juntas para $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ obtiveram curvas muito similares, com quase o mesmo deslocamento de rutura e ligeira variação de $P_{máx}$. A curva com $\theta=15^\circ$ obteve um valor de $P_{máx}$ mais baixo, embora a junta tenha obtido o maior de δ . A junta sem chanfro obteve o maior valor de $P_{máx}$.

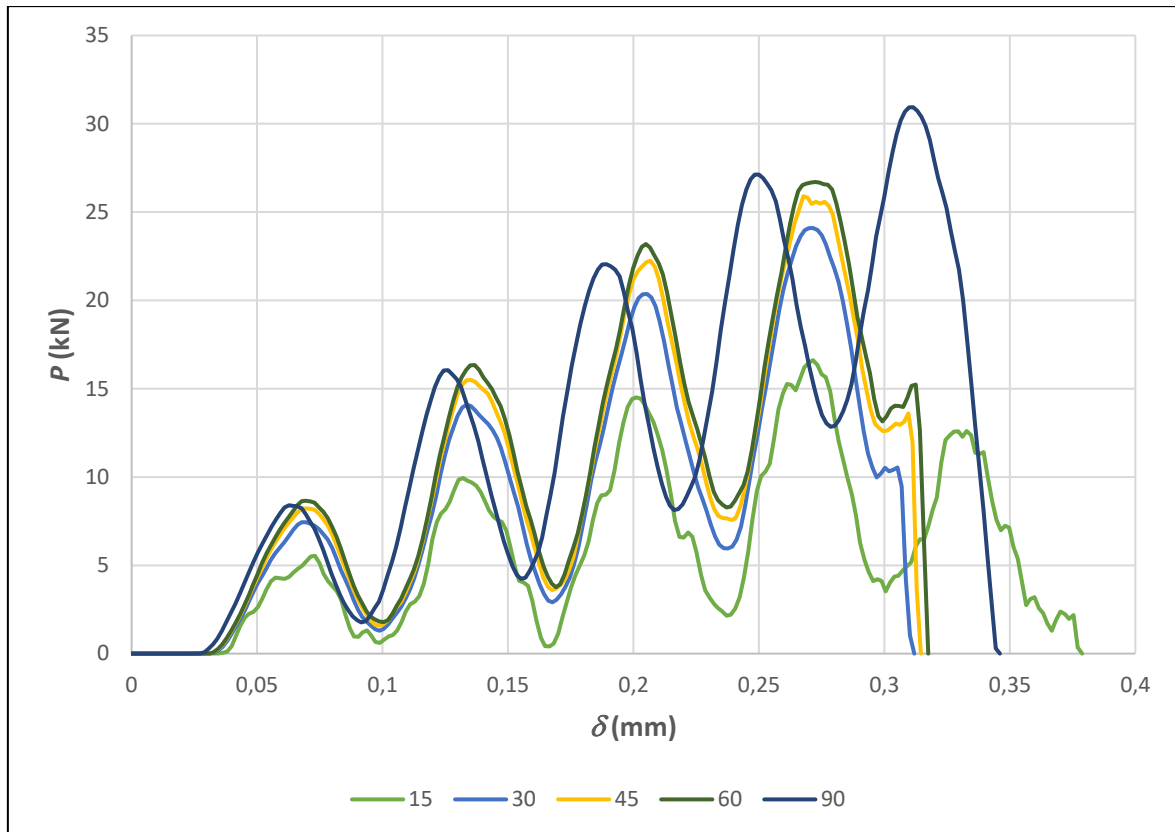


Figura 109 - Curvas P - δ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ .

Na Figura 110 estão representados graficamente os valores de $P_{máx}$ para o adesivo DP8005 com variação do parâmetro geométrico θ . Conforme se verificou para o adesivo DP8005, a introdução de um chanfro interior nos substratos implicou a perda de suportar cargas, sendo que a junta com $\theta=15^\circ$ registra uma diferença relativa de -46,3% comparativamente à junta sem chanfro, que alcançou $P_{máx}=30,9$ kN. As juntas com $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ obtiveram diferenças de -22,1%, -16,3% e -13,7% em relação à junta sem chanfro interior nos substratos.

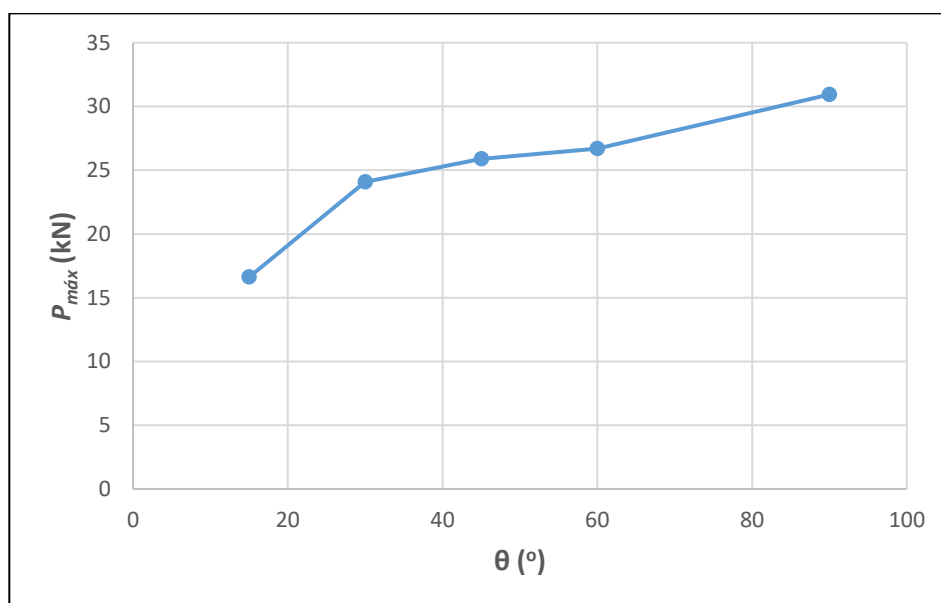


Figura 110 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ .

Na Figura 111 está representado o modo de rutura da junta com $\theta=15^\circ$ para o adesivo DP8005, onde se vê que a rutura para este ângulo com este adesivo também rutura coesiva do adesivo com plastificação dos substratos em 1,3%. Para os restantes valores de θ a rutura deu-se na camada adesiva.

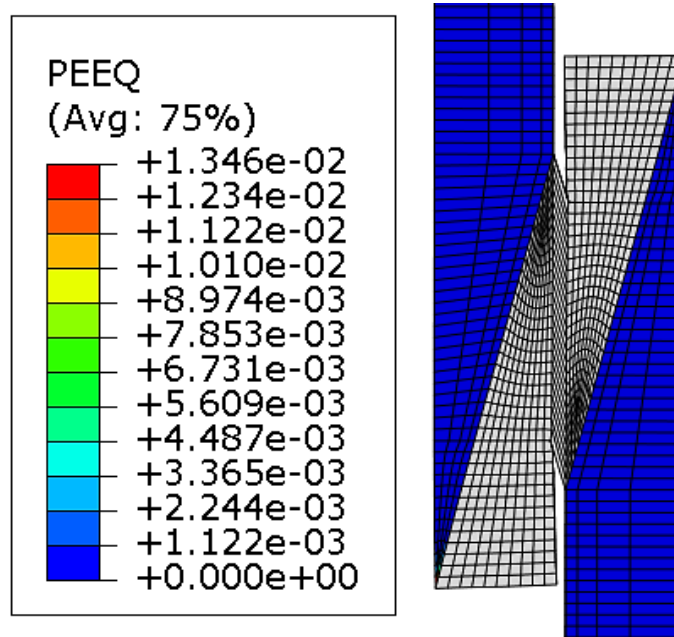


Figura 111 - Modo de rutura para o adesivo DP8005 para $\theta=15^\circ$.

Na Tabela 37 estão representados os valores de E_{abs} para as juntas com o adesivo DP8005 em função do parâmetro geométrico θ . Assim como aconteceu com o adesivo AV138, o parâmetro θ também influenciou negativamente a capacidade de as juntas com o adesivo DP8005 em absorver energia quando sujeitas a um esforço de impacto. Assim, a junta sem chanfro foi a que, mais uma vez, absorveu mais energia, com 4,3 J de E_{abs} . As juntas com $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ apresentaram diferenças de E_{abs} de -48,4%, -35,4%, -26,3% e -21,2%, respetivamente, valores estes que refletem a dimensão das respetivas áreas das curvas $P-\delta$.

Tabela 37 - Valores de E_{abs} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro θ .

θ ($^\circ$)	E_{abs} (J)	Comparação
15 $^\circ$	2,2	-48,4%
30 $^\circ$	2,8	-35,4%
45 $^\circ$	3,2	-26,3%
60 $^\circ$	3,4	-21,2%
90 $^\circ$	4,3	-

Na Figura 112 estão representadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo XNR6852 E-2 com variação do parâmetro geométrico θ . As curvas com $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ tiveram valores de $P_{máx}$ e δ de rutura muito similares, com as curvas quase a se sobreporem. A curva com $\theta=30^\circ$ obteve um pico idêntico, embora registe um δ de rutura bastante inferior. A curva com $\theta=15^\circ$ apresenta um $P_{máx}$ mais baixo do que as três juntas referidas anteriormente, mas obteve um δ de rutura superior. A junta correspondente à curva sem chanfro obteve o maior valor de $P_{máx}$, com 33,5 kN, bem como o maior δ de rutura. Assim, as curvas com $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ obtiveram, respetivamente, diferenças de $P_{máx}$ de -22,0%, -23,3%, -13,3% e -15,2%.

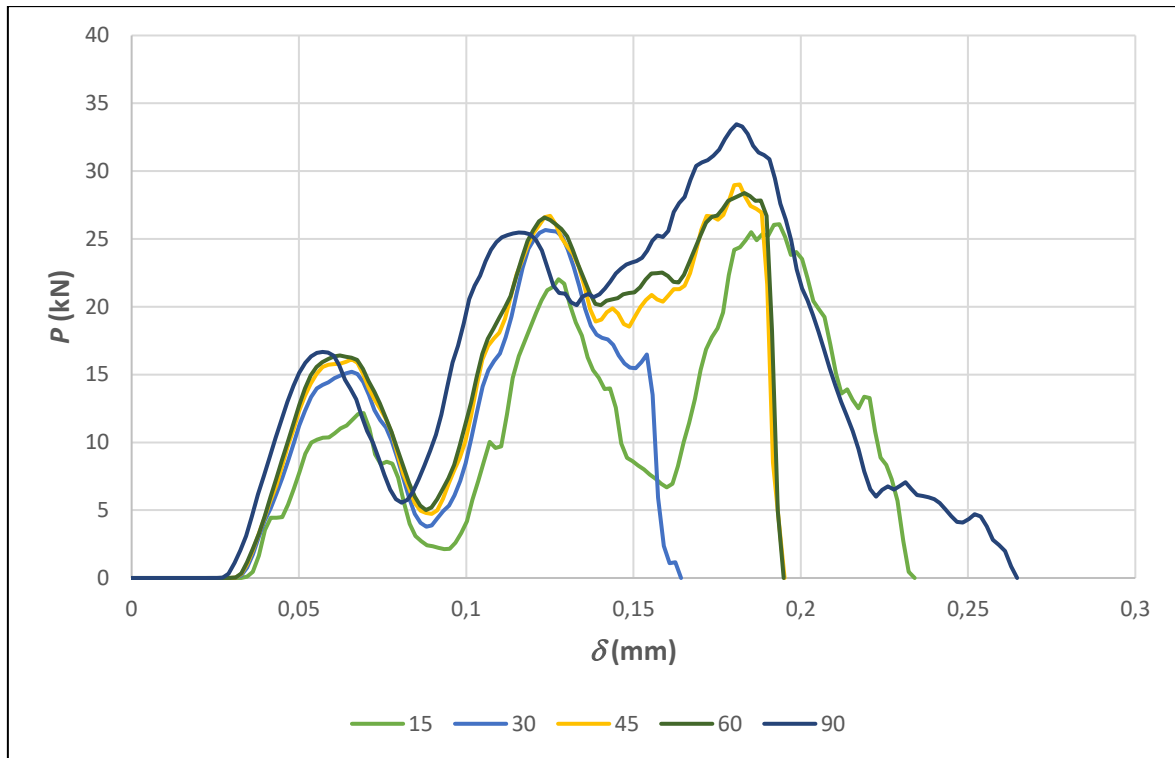


Figura 112 - Curvas P - δ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ .

Na Figura 113 estão representados graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ atingidos por cada uma das juntas ensaiadas com o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ . Com uma tendência crescente, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ alcançados com o adesivo XNR6852 E-2 situam-se numa posição intermédia entre os três adesivos utilizados, embora exista uma diferença nas juntas com $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$, já que a junta com $\theta=45^\circ$ alcançou um valor de $P_{m\acute{a}x}$ ligeiramente superior ao da junta com $\theta=60^\circ$, implicando num decréscimo de $P_{m\acute{a}x}$ entre estes valores de θ , contrariamente ao que se verificou com os adesivos AV138 e DP8005 que tiveram uma tendência crescente em todos os valores de θ . A junta com maior valor de $P_{m\acute{a}x}$ foi a junta com $\theta=90^\circ$, com 33,5 kN. As juntas com $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ obtiveram, respetivamente, diferenças de -22,0%, -23,3%, -13,3% e -15,2% comparativamente à junta sem chanfro.

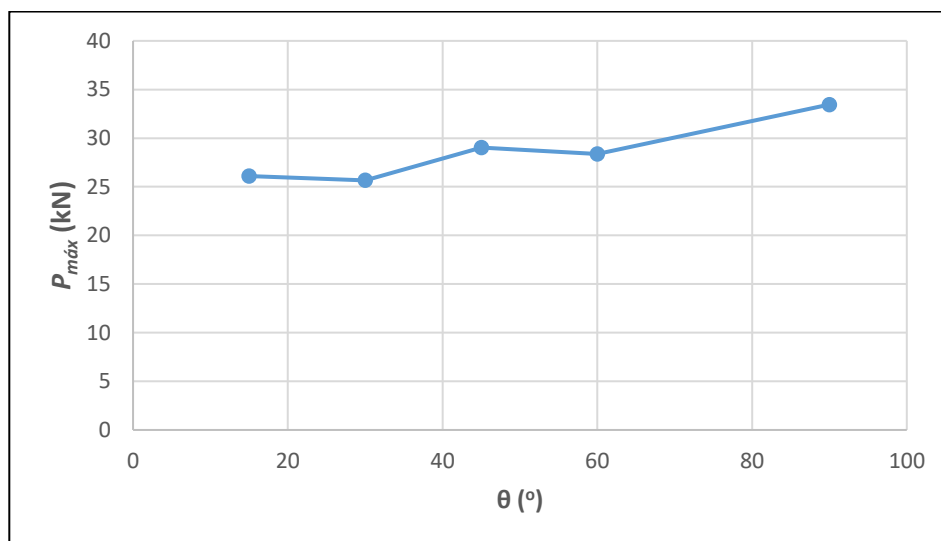


Figura 113 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ .

Na Figura 114 está representado o modo de rutura do da junta com $\theta=15^\circ$ para o adesivo XNR6852 E-2, onde se observa que a rutura foi coesiva do adesivo com plastificação reduzida dos substratos em cerca de 1,9%. Para os restantes valores de θ , as ruturas deram-se pela camada adesiva sem plastificação dos substratos.

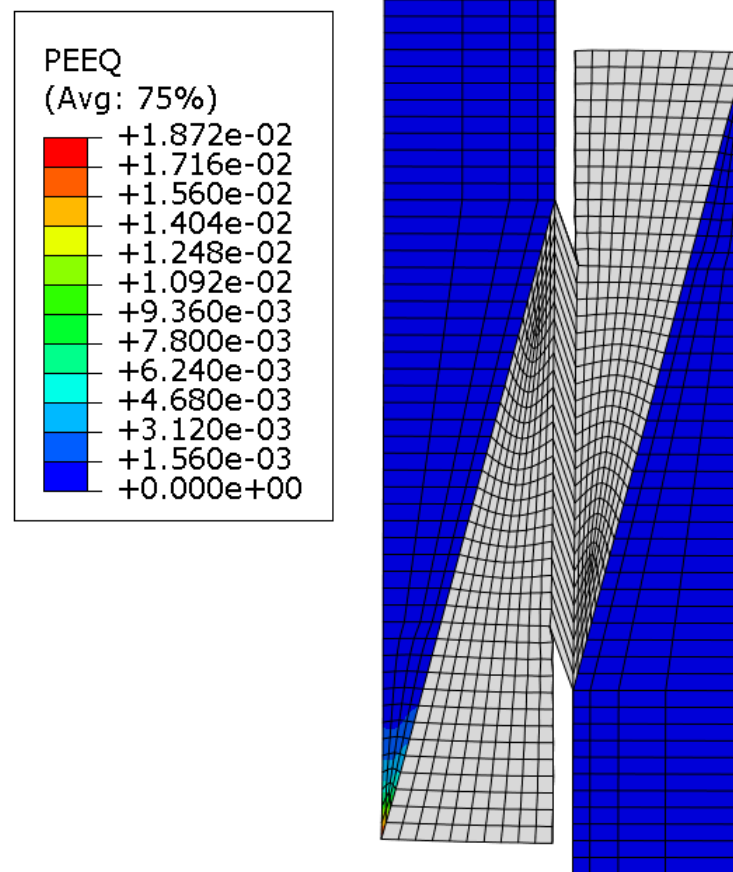


Figura 114 - Modo de rutura para o adesivo XNR6852 E-2 para $\theta=15^\circ$.

Na Tabela 38 estão representados os valores de E_{abs} para as juntas ensaiadas com o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro geométrico θ . Assim como aconteceu com os adesivos AV138 e DP8005, o parâmetro θ também influenciou negativamente a capacidade das juntas com o adesivo XNR6852 E-2 em absorver energia devido ao esforço de impacto. Assim, a junta sem chanfro foi a que, mais uma vez, absorveu mais energia, com $E_{abs}=3,8$ J. As juntas com $\theta=15^\circ$, $\theta=30^\circ$, $\theta=45^\circ$ e $\theta=60^\circ$ apresentam diferenças de -36,3%, -56,1%, -29,7% e -26,9%, respetivamente, valores esses que refletem a dimensão das respetivas áreas das curvas $P-\delta$.

Tabela 38 - Valores de E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro θ .

θ (°)	E_{abs} (J)	Comparação
15°	2,4	-36,3%
30°	1,7	-56,1%
45°	2,7	-29,7%
60°	2,8	-26,9%
90°	3,8	-

3.3.4.2.3. Comparação de resultados

Na Tabela 39 estão representados os valores das comparações dos três adesivos utilizados para o ensaio com variação do parâmetro geométrico θ .

Tabela 39 - Comparação dos três adesivos com valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para θ .

θ (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)
15°	26,2	-26,1%	16,6	-46,3%	26,1	-22,0%
30°	29,5	-16,8%	24,1	-22,1%	25,7	-23,3%
45°	32,8	-7,5%	25,9	-16,3%	29,0	-13,3%
60°	33,7	-5,0%	26,7	-13,7%	28,4	-15,2%
90°	35,4	-	30,9	-	33,5	-

A introdução de chanfros interiores nos substratos das juntas adesivas não beneficiou positivamente a resistência global das juntas para um esforço de impacto. Para os três adesivos ensaiados, as juntas perderem quer na capacidade de suportar a carga de impacto quer na absorção de energia. Para valores de $\theta < 90^\circ$ todos os parâmetros de resistência das juntas tiveram uma tendência decrescente relativamente a $\theta = 90^\circ$, isto é, uma junta adesiva tubular sem chanfro interior que obteve maior o valor de $P_{máx}$. Para o adesivo AV138, o valor de $P_{máx}$ permaneceu o mais alto, seguido do adesivo XNR6852 E-2 e do adesivo DP8005, valores esses influenciados pelos valores respetivos das propriedades mecânicas de cada um deles. Além disso, o adesivo dúctil DP8005 apresentou a maior variação entre as juntas testadas, com uma diferença relativa de 46,3%.

Tabela 40 - Comparação dos três adesivos com valores de E_{abs} .

θ (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)
15°	1,9	-50,7%	2,2	-48,4%	2,4	-36,3%
30°	1,8	-53,2%	2,8	-35,4%	1,7	-56,1%
45°	2,6	-31,6%	3,2	-26,3%	2,7	-29,7%
60°	2,7	-30,1%	3,4	-21,2%	2,8	-26,9%
90°	3,9	-	4,3	-	3,8	-

Na Tabela 40 estão resumidos os valores de E_{abs} para os três adesivos, com o adesivo DP8005 a mostrar maior E_{abs} para quase todos os valores de θ , com exceção de $\theta = 45^\circ$, o qual foi inferior ao do adesivo XNR6852 E-2. O adesivo AV138, que é o mais rígido, foi o que mostrou os menores valores de E_{abs} para todos os valores de θ , seguido do adesivo XNR6852 E-2 e do DP8005. No que diz respeito à influência de θ nos valores de E_{abs} , ficou patente que as juntas com chanfros mostraram valores E_{abs} inferiores comparativamente à junta sem chanfro, sendo que estes valores de E_{abs} diminuem com o aumento de θ .

Na Tabela 41 estão registados os valores das tensões σ_y para os três adesivos em função de θ . Como é possível visualizar, os picos das tensões σ_y são maiores para o adesivo AV138, sendo este adesivo aquele que possui os maiores valores de E , G e ν , bem como das tensões t_n e t_s . Em segundo lugar está o adesivo XNR6852 E-2, logo seguido do DP8005. As tensões σ_y apresentam um comportamento decrescente com o aumento de θ .

Tabela 41 - Comparação dos valores de σ_y para os três adesivos em função de θ .

θ (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$
15	3,04	+173,1%	2,46	+392,8%	2,72	+199,6%
30	1,35	+21,0%	0,96	+92,9%	1,04	+14,4%
45	1,33	+19,4%	0,75	+49,4%	1,13	+24,9%
60	1,25	+12,1%	0,72	+43,5%	1,16	+28,4%
90	1,11	-	0,50	-	0,91	-

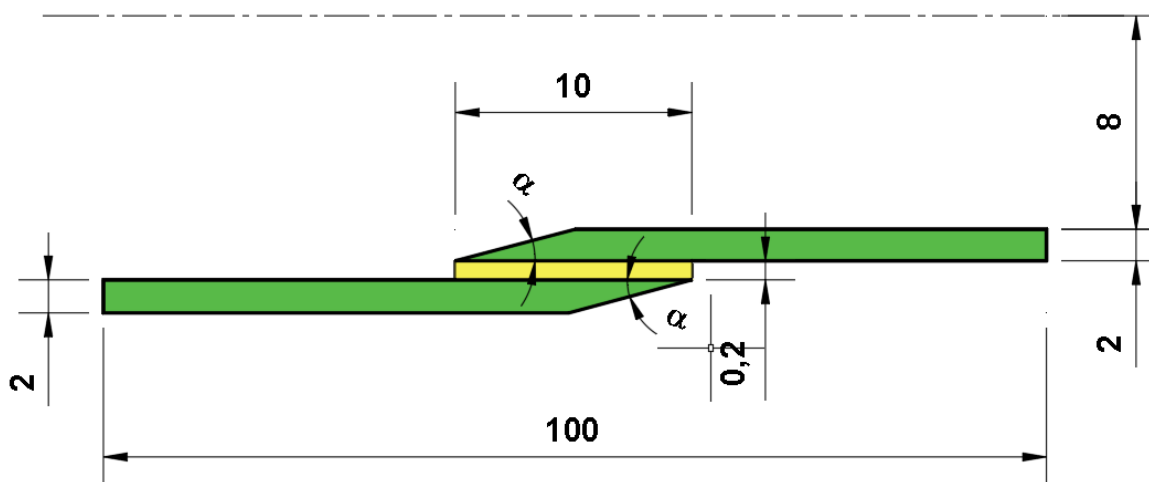
Na Tabela 42 estão resumidos os valores das tensões τ_{xy} para os três adesivos em função de θ . Da mesma forma que se verificou com as tensões σ_y , as tensões τ_{xy} também foram maiores para os adesivos rígidos, como é o caso do AV138 e XNR6852 E-2, logo seguidos pelo DP8005. As tensões τ_{xy} aumentam com o aumento de θ .

Tabela 42 - Comparação dos valores de τ_{xy} para os três adesivos em função de θ .

θ (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$
15	1,29	-0,7%	1,27	+18,0%	1,35	+13,5%
30	1,87	+43,3%	1,98	+83,8%	1,88	+57,7%
45	1,40	7,7%	1,36	+26,7%	1,36	+13,8%
60	1,29	-0,9%	1,17	+9,2%	1,19	-0,3%
90	1,30	-	1,08	-	1,19	-

3.3.4.3. Chanfro exterior

Neste capítulo é realizado o estudo da introdução de um chanfro exterior nos substratos. A introdução de chanfros exterior nos tubos constituintes dos substratos visa corrigir o efeito negativo das singularidades existentes, devido à geometria das extremidades da junta adesiva de formato tubular. Na Figura 115 está representada a geometria da junta para submeter a análise.

Figura 115 - Geometria base para ensaio em função do parâmetro α .

3.3.4.3.1. Distribuição de tensões

Na Figura 116 estão representadas as tensões σ_y com o adesivo AV138 em função de α . Observa-se que os picos de tensão ocorrem nas extremidades da junta adesiva, estando os elementos constituintes da camada adesiva maioritariamente à compressão ($\sigma_y/\tau_{méd} < 0$). Pela análise da Figura 116, fica evidente que o maior pico de tensões foi alcançado pela junta com $\alpha=60^\circ$ no extremo esquerdo, e pela junta com $\alpha=45^\circ$ no extremo direito. A inclinação do substrato, dada pelo ângulo α , implica que haja alterações secção transversal da junta que influenciam o pico de tensões. Contudo, este pico de tensões teve um comportamento semelhante, entre as juntas com $\alpha=45^\circ$ e 60° , entre as juntas com $\alpha=15^\circ$ e 30° , em comparação com a junta sem chanfro exterior. Contudo, o aumento de α reduz a concentração de tensões normais na junta. Entre a junta com maior pico de tensões ($\alpha=60^\circ$) e a junta com menor pico de tensões ($\alpha=15^\circ$) a diferença relativa foi de 30%.

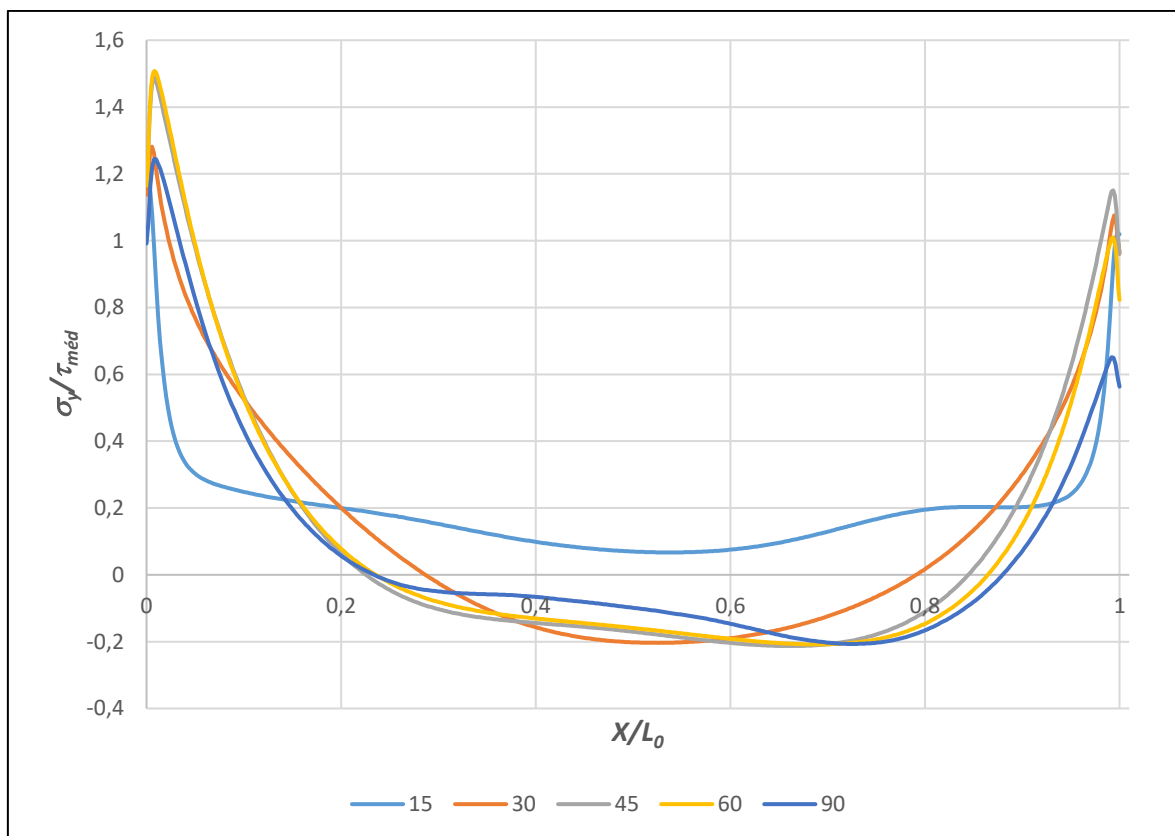


Figura 116 - Tensões σ_y para o adesivo AV138 em função do parâmetro α .

Na Figura 117 estão representadas as tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 com variação do parâmetro α . A junta com menor pico de tensões foi a junta com $\alpha=15^\circ$, enquanto as juntas com valores de α mais elevados a obtêm os maiores picos de tensões τ_{xy} . Contudo, a introdução de um chanfro exterior parece ter pouca influência na minimização destas tensões, já que a variação entre juntas com o maior e mais pico de concentração de tensões τ_{xy} resulta numa diferença de 9,1%, mesmo comparando com a junta sem chanfro. Assim, para a junta com $\alpha=15^\circ$, a introdução do chanfro significou a perda de rigidez do material do substrato em detrimento de adesivo, o que levou à diminuição da concentração de tensões naquela zona da junta. Entre as juntas com $\alpha=30^\circ$ e $\alpha=90^\circ$ (junta sem chanfro), a diferença relativa de tensões destas tensões foi somente de

2,3%. A junta com maior pico de tensões foi a junta com $\alpha=45^\circ$, cuja influência de α permitiu atingir um pico maior dadas as condições de ensaio.

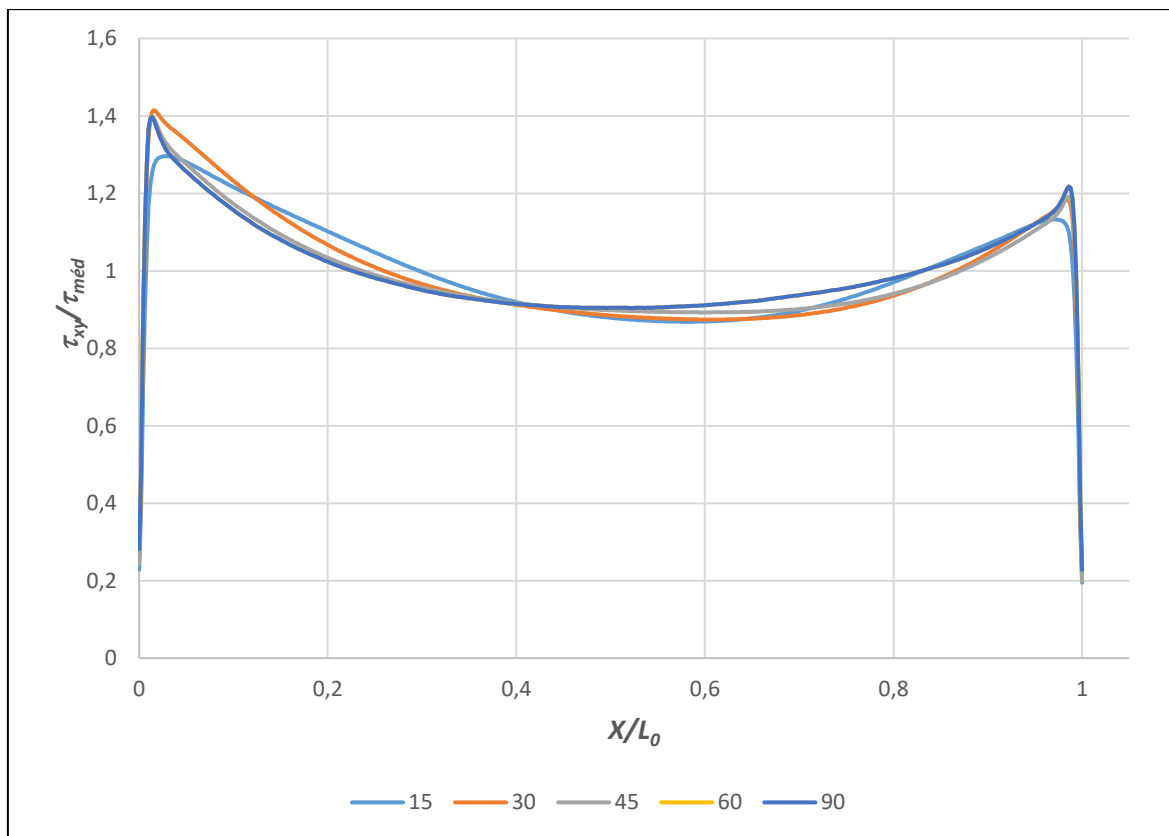


Figura 117 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo AV138 em função do parâmetro α .

Na Figura 118 estão representadas as tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função do parâmetro geométrico α . Para este adesivo, a sua menor rigidez e a remoção de material de secção dos substratos levaram a que as juntas com ângulos de chanfro exteriores α menores tivessem os maiores picos de concentração de tensões, onde a junta sem chanfro a obteve o menor pico de tensões, comportamento semelhante ao verificado para o adesivo AV138. No caso do DP8005, a introdução de um chanfro exterior parece aumentar as tensões σ_y . A junta com $\alpha=15^\circ$ e a junta sem chanfro ficaram sujeitas a somente esforços de tração, com as restantes juntas a transitarem entre esforços de tração e compressão na camada adesiva. Os picos de tensões nas extremidades foram numericamente inferiores aos do adesivo AV138. Entre as juntas com $\alpha=15^\circ$ e $\alpha=90^\circ$ ensaiadas com o adesivo DP8005a diferença relativa foi de 83,1%.

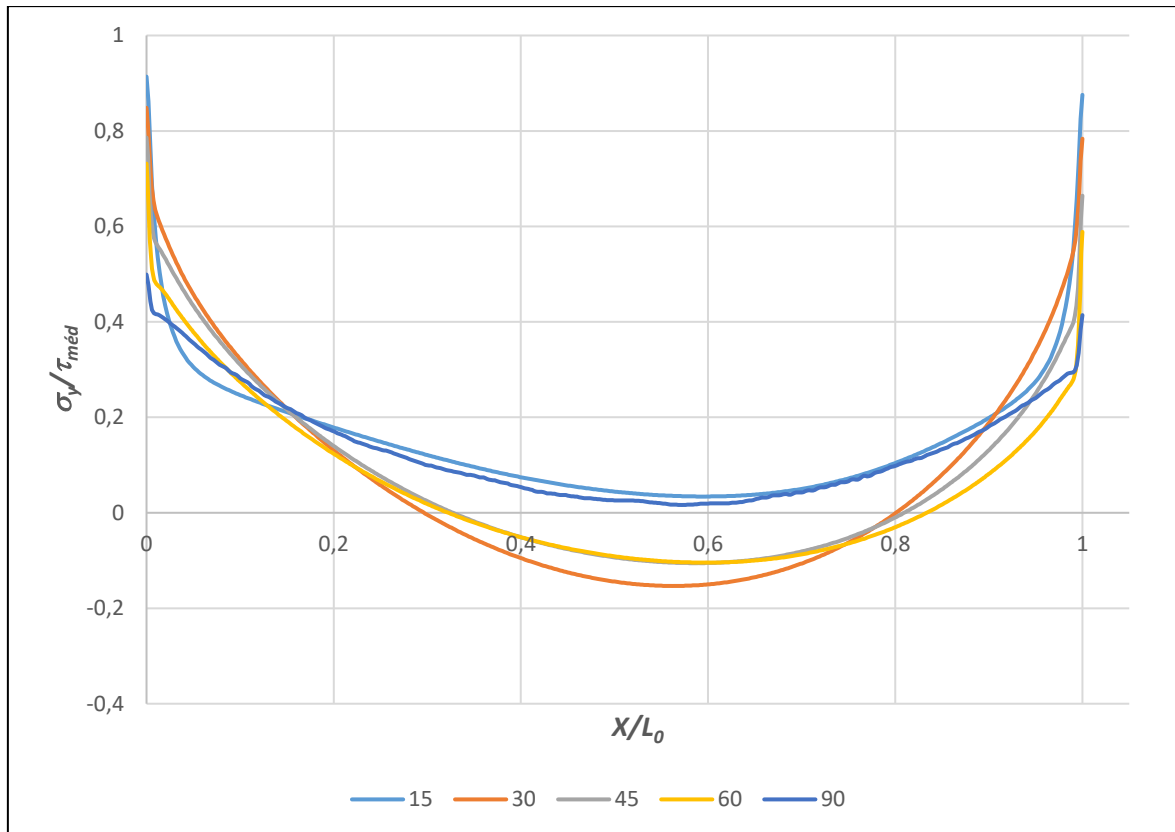


Figura 118 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α

Na Figura 119 estão representadas as tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 com variação do parâmetro α . Como é possível visualizar, para todas as juntas ensaiadas a diferença relativa das tensões foi muito pequena. Este comportamento reforça a ideia de que a introdução de um chanfro exterior nos substratos apresenta uma influência reduzida na redução destas tensões, com a diferença relativa entre as juntas com $\alpha=15^\circ$ e $\alpha=90^\circ$ a ser de apenas 2,21% entre todas as juntas testadas.

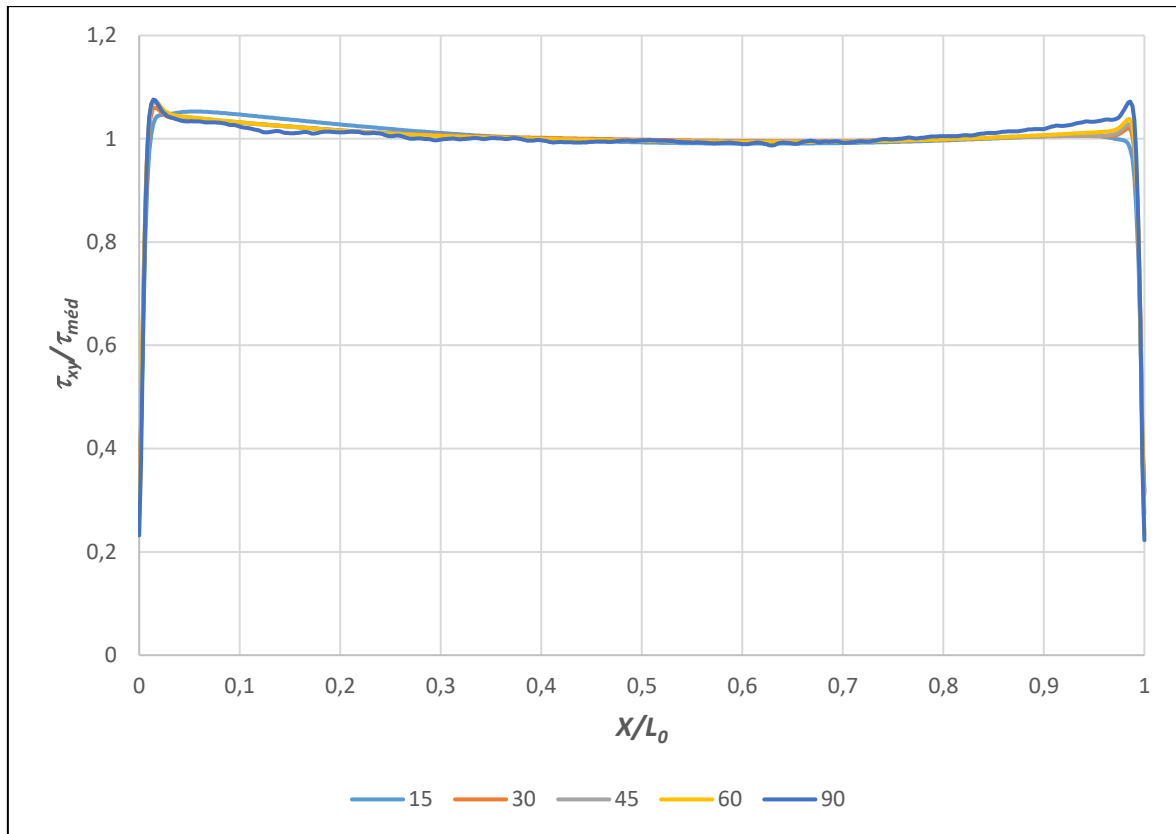


Figura 119 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α .

Na Figura 120 estão representadas as tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 com variação do parâmetro α . Para este adesivo, a diferença relativa no valor das tensões foi a menos acentuada entre os três adesivos utilizados, com a diferença relativa a ser de 12,0%. A junta com $\alpha=15^\circ$ foi a única onde os seus elementos estiveram exclusivamente a esforços de tração, enquanto as outras juntas variaram entre esforços de tração e de compressão ao longo da camada adesiva.

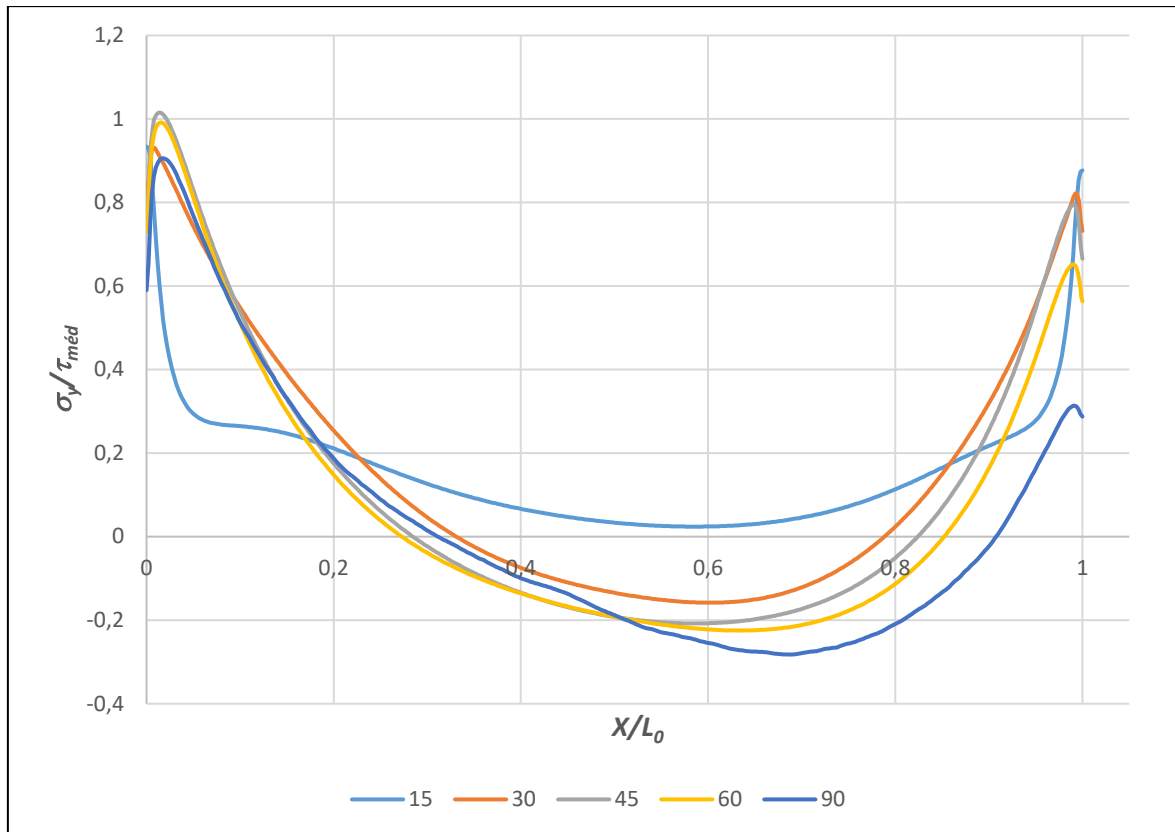


Figura 120 - Distribuição das tensões σ_y para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α .

Na Figura 121 estão representadas as tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 com variação do parâmetro geométrico α . Com um comportamento muito semelhante aos adesivos AV138 e DP8005, as variações das tensões de corte τ_{xy} entre todas as juntas testadas foi bastante reduzida, com uma diferença relativa de 7,5%. A junta com $\alpha=30^\circ$ obteve o maior valor do pico de concentração de tensões, sendo que a junta com $\alpha=15^\circ$ obteve o menor valor. A menor rigidez do substrato exterior explica a redução da concentração de tensões.

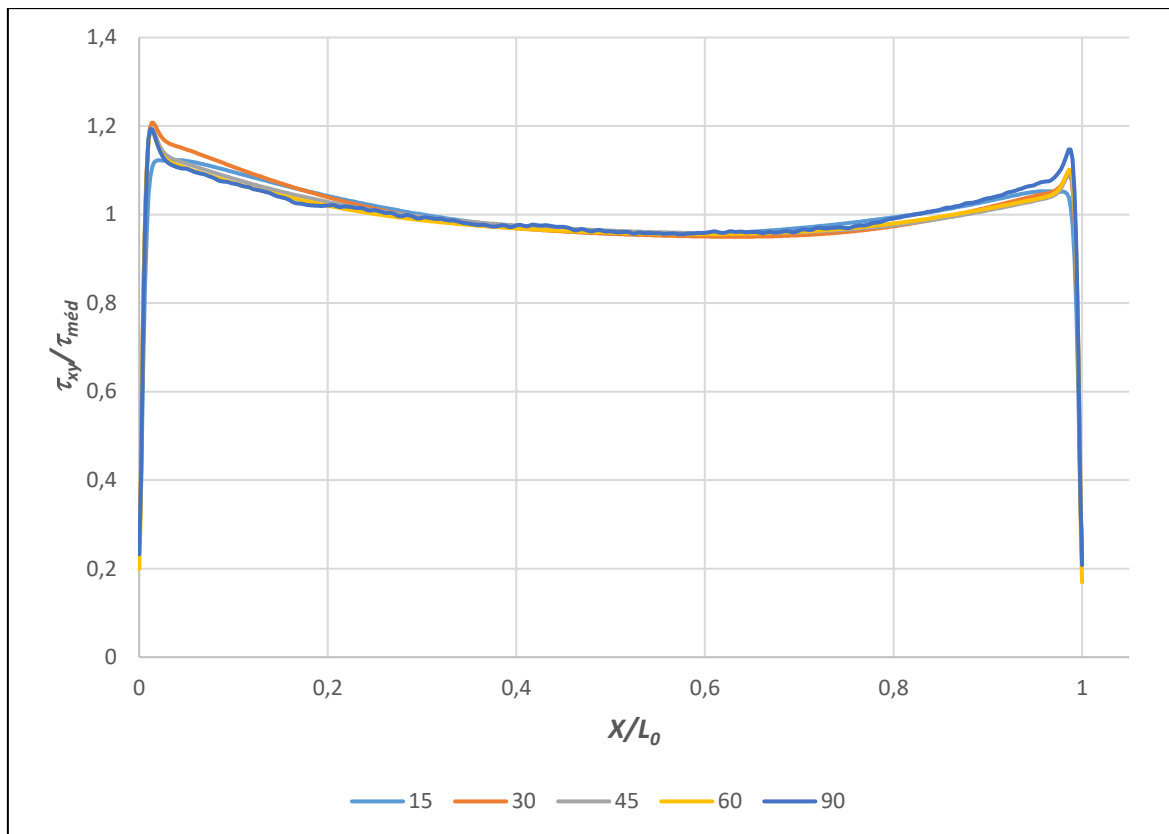


Figura 121 - Distribuição das tensões τ_{xy} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α .

3.3.4.3.2. Resistência da junta, modo de rutura e energia absorvida

Na Figura 122 estão representadas as curvas P - δ para o adesivo AV138 com variação do parâmetro geométrico α . A introdução de um chanfro exterior nos substratos implicou uma redução no δ de rutura para todos os valores de α em comparação à junta sem chanfro. Quanto ao valor de $P_{máx}$, as juntas tiveram valores máximos muito semelhantes, mas ainda assim com a junta sem chanfro obteve o maior valor de $P_{máx}$. O parâmetro α implicou uma diminuição ligeira no valor de $P_{máx}$ das juntas, e uma diminuição ainda mais acentuada no δ de rutura.

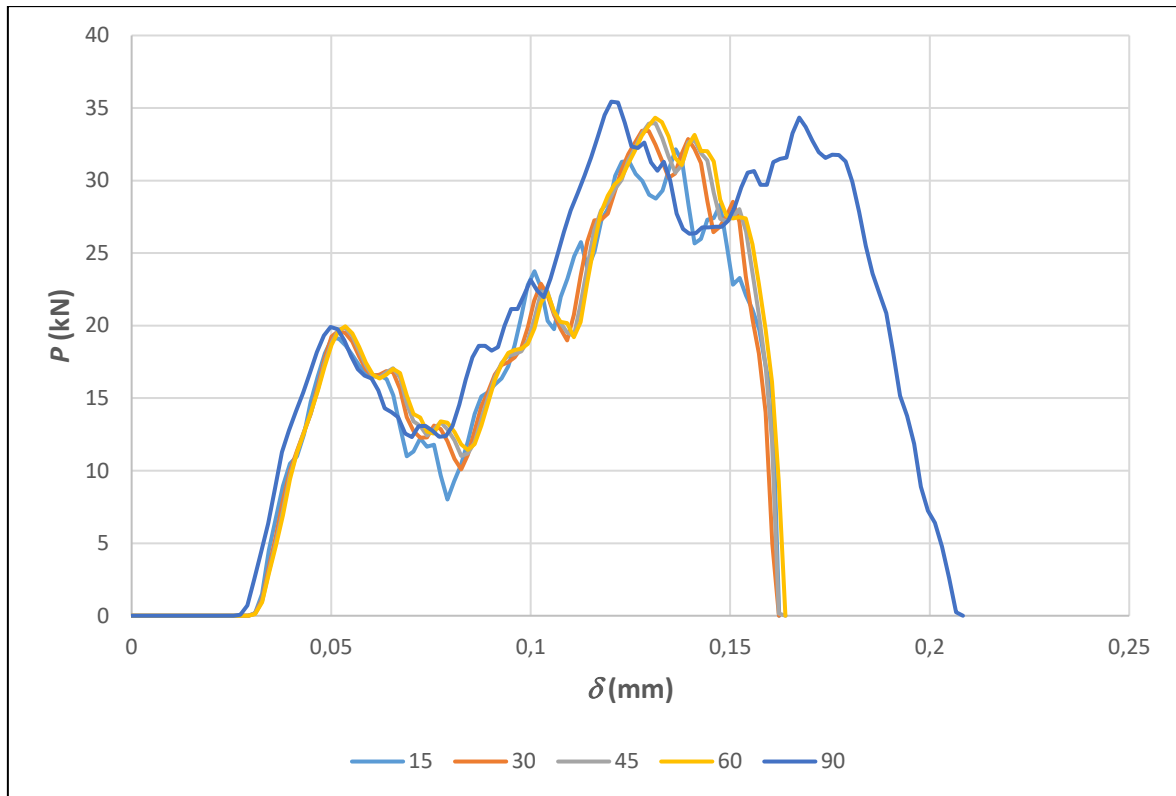


Figura 122 - Curva P - δ para o adesivo AV138 em função do parâmetro α .

Na Figura 123 estão representados graficamente os valores de $P_{máx}$ para o adesivo AV138 em função da variação do parâmetro geométrico α . Como é possível visualizar, a junta sem chanfro obteve o maior valor de $P_{máx}$, com 35,4 kN de carga suportada. As juntas com $\alpha=15^\circ$, $\alpha=30^\circ$, $\alpha=45^\circ$ e $\alpha=60^\circ$ obtiveram, respetivamente, diferenças relativas de -9,3%, -5,7%, -4,2% e -3,1% comparativamente à junta sem chanfro. A introdução do chanfro exterior também retirou capacidade de suportar carga por parte da junta antes de ocorrer a rutura e, assim, na perda de resistência final.

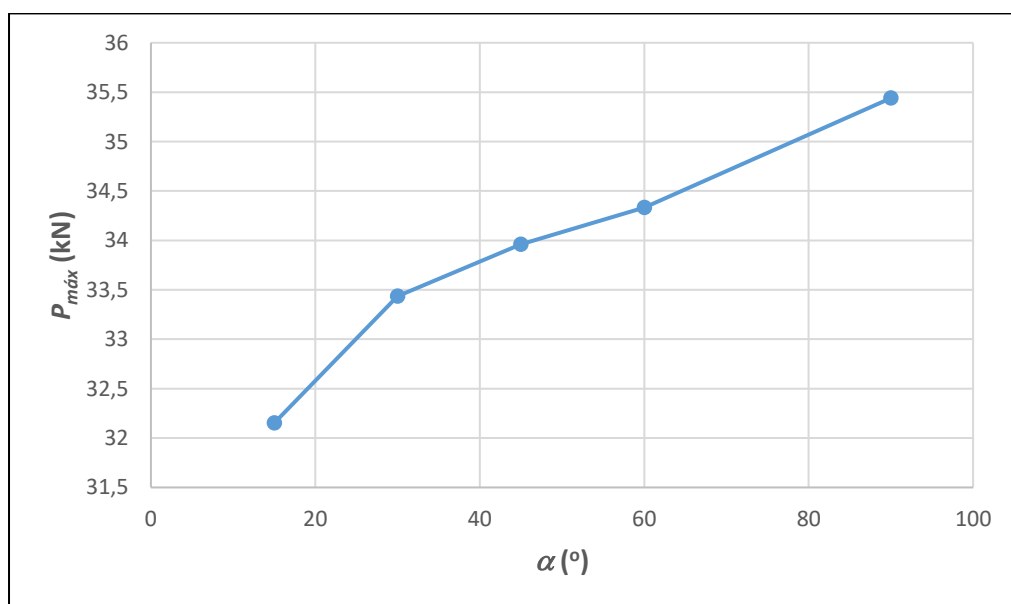


Figura 123 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo AV138 em função do parâmetro α .

Na Figura 124 está representado o modo de rutura para o adesivo AV138 com um chanfro de $\alpha=15^\circ$. Para este valor de α , ficou demonstrado que a rutura coesiva do adesivo, com cerca de 0,64% de deformação plástica dos substratos. As restantes juntas tiveram rutura coesiva no adesivo, sem plastificação dos substratos.

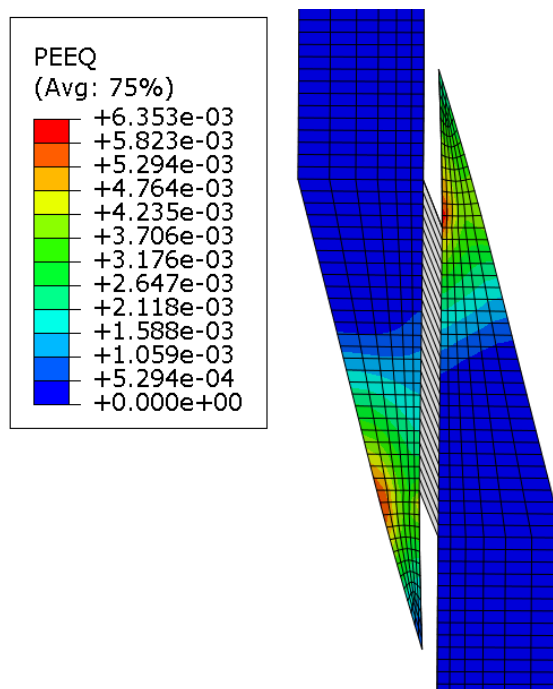


Figura 124 - Modo de rutura do adesivo AV138 com $\alpha=15^\circ$.

Na Tabela 43 estão registados os valores de E_{abs} pelas juntas com o adesivo AV138 em função de α . A junta sem chanfro obteve a maior área da curva $P-\delta$, o que se traduziu no maior valor de E_{abs} . As juntas com $\alpha=15^\circ$, 30° , 45° e 60° apresentaram diferenças relativas de -34,7%, -33,6%, -32,5% e -31,3% respetivamente, em comparação com a junta sem chanfro.

Tabela 43 - Valores da E_{abs} para o adesivo AV138 em função do parâmetro α .

α ($^\circ$)	E_{abs} (J)	Comparação
15 $^\circ$	2,5	-34,7%
30 $^\circ$	2,6	-33,6%
45 $^\circ$	2,6	-32,5%
60 $^\circ$	2,7	-31,3%
90 $^\circ$	3,9	-

Na Figura 125 estão representadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo DP8005 com variação do parâmetro α . Para este adesivo a junta com $\alpha=15^\circ$ obteve o menor valor de δ de rutura, embora este ser muito semelhante para os restantes valores de α . A junta sem chanfro obteve o maior valor de $P_{máx}$, bem como o maior valor de δ de rutura. A introdução de um chanfro também fez perder capacidade de transportar carga por parte do adesivo DP8005 e, por isso, resistência global.

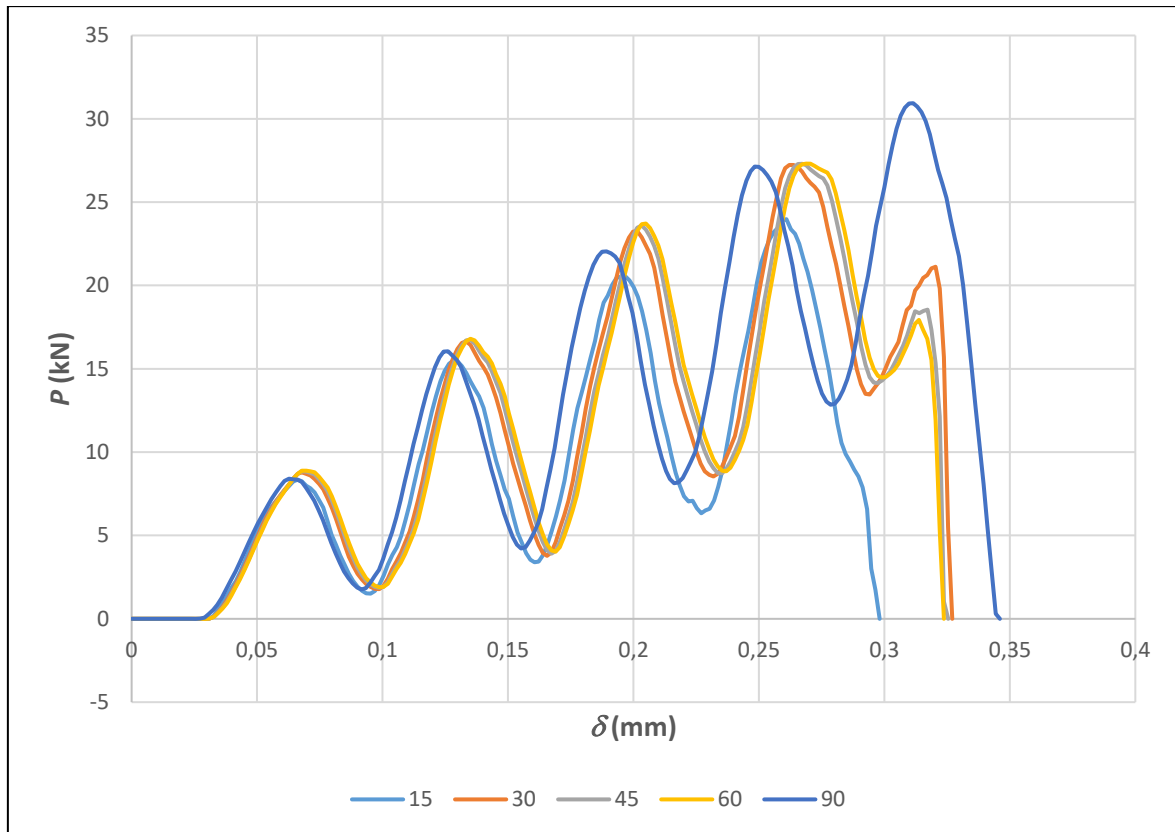


Figura 125 - Curvas P - δ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α .

Na Figura 126 está representada graficamente a variação dos valores de $P_{máx}$ das juntas com o adesivo DP8005 em função do parâmetro α . Tal como se verificou com o adesivo AV138, para este adesivo também houve uma redução de $P_{máx}$ com a introdução de um chanfro exterior nos substratos. A junta com maior valor de $P_{máx}$ foi a junta sem chanfro com 30,9 kN de carga de rutura. As juntas com $\alpha=15^\circ$, 30° , 45° e 60° apresentaram diferenças relativas de -22,5%, -12%, -11,5% e -11,7% respetivamente, em comparação com a junta sem chanfro.

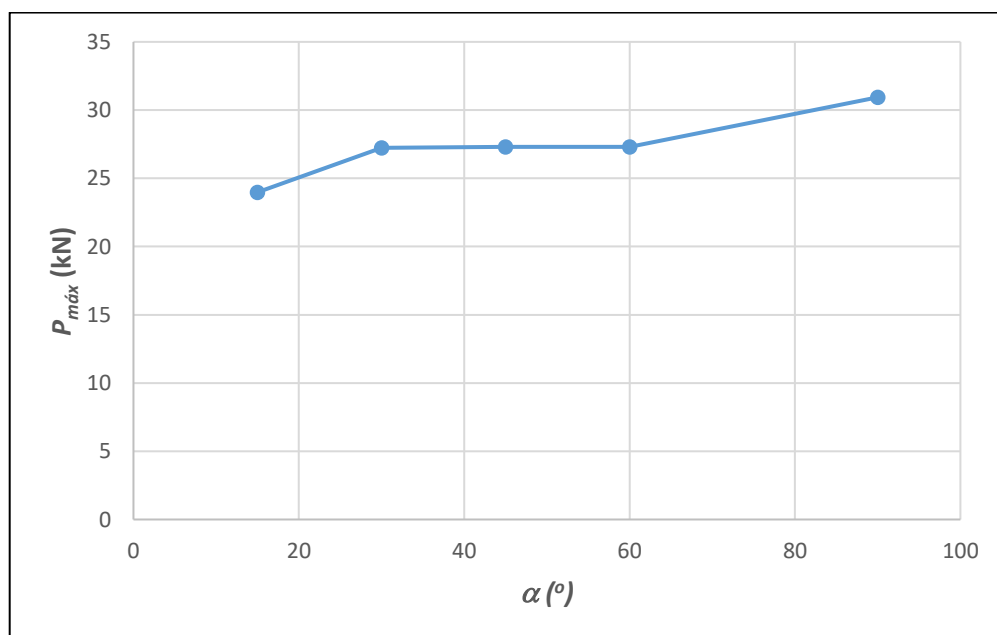


Figura 126 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α .

Na Figura 127 está ilustrado o modo de rutura para o adesivo DP8005 com $\alpha=15^\circ$. Como se pode ver, a rutura para este adesivo foi coesiva do adesivo, sem plastificação dos substratos, da mesma forma que se verificou para os restantes valores de α .

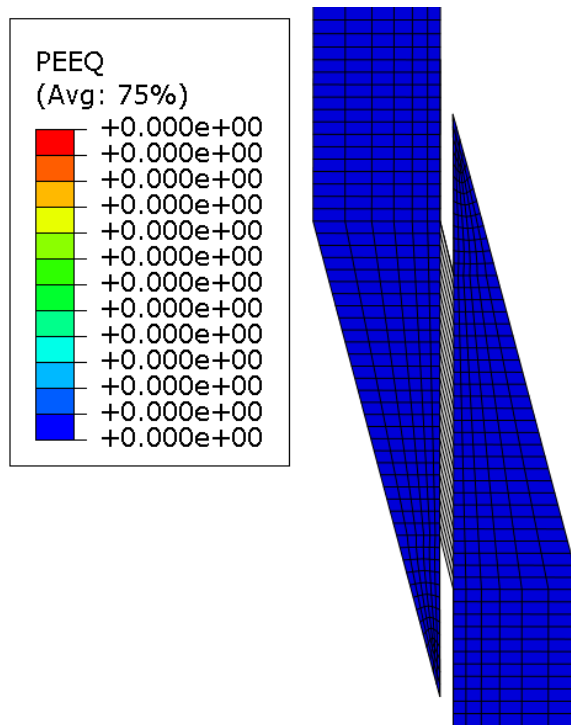


Figura 127 - Modo de rutura para o adesivo DP8005 com $\alpha=15^\circ$.

Na Tabela 44 estão registados os valores de E_{abs} para o adesivo DP8005 em função da variação do parâmetro geométrico α . Como é possível analisar, a junta sem chanfro teve a capacidade de absorver mais energia do que as juntas com introdução de chanfro. As juntas com chanfro de $\alpha=15^\circ$, 30° , 45° e 60° apresentaram diferenças relativas de -36,1%, -14,2%, -15,4% e -15,7%, respetivamente.

Tabela 44 - Valores de E_{abs} para o adesivo DP8005 em função do parâmetro α .

α ($^\circ$)	E_{abs} (J)	Comparação
15 $^\circ$	2,8	-36,1%
30 $^\circ$	3,7	-14,2%
45 $^\circ$	3,6	-15,4%
60 $^\circ$	3,6	-15,7%
90 $^\circ$	4,3	-

Na Figura 128 estão representadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo XNR6852 E-2 com variação do parâmetro α . Para este adesivo, o comportamento foi similar ao verificado com os adesivos AV138 e DP8005, com a junta sem chanfro a obter o valor mais alto da carga de rutura bem como o maior deslocamento de rutura. As juntas com chanfro obtiveram valores muito similares quer para a carga de rutura suportada quer para os respetivos deslocamentos de rutura. Para este adesivo também se confirmou a perda de resistência global da junta com a introdução de chanfros exteriores nos substratos.

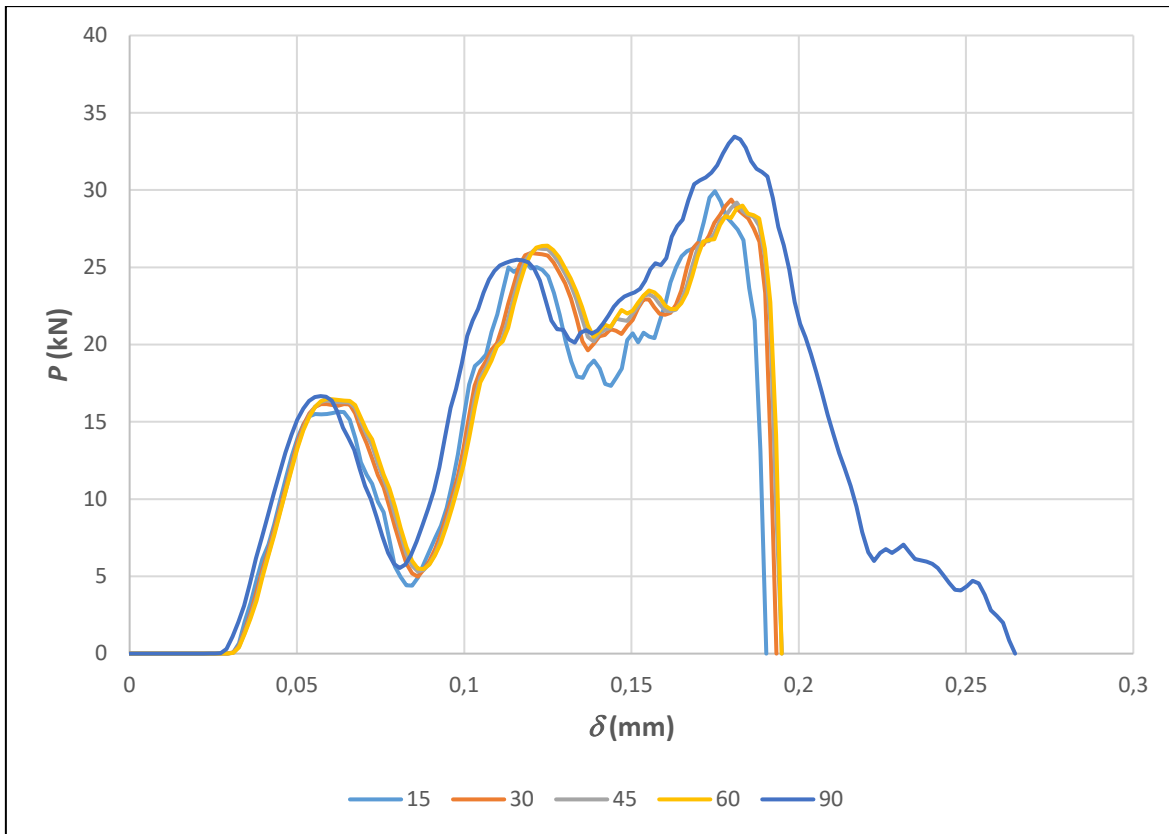


Figura 128 - Curvas $P-\delta$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α .

Na Figura 129 estão representados os valores de $P_{máx}$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro geométrico α . Para o adesivo XNR6852 houve uma diferença no comportamento da carga suportada em relação aos adesivos AV138 e DP8005, tendo a carga de rutura diminuído com o aumento do parâmetro α . A junta sem chanfro exterior nos substratos obteve o maior valor de $P_{máx}$. As juntas com $\alpha=15^\circ$, $\alpha=30^\circ$, 45° e 60° registaram uma diferença relativa de -10,6%, -12,2%, -12,8% e -13,3% respectivamente, em comparação à junta sem chanfro.

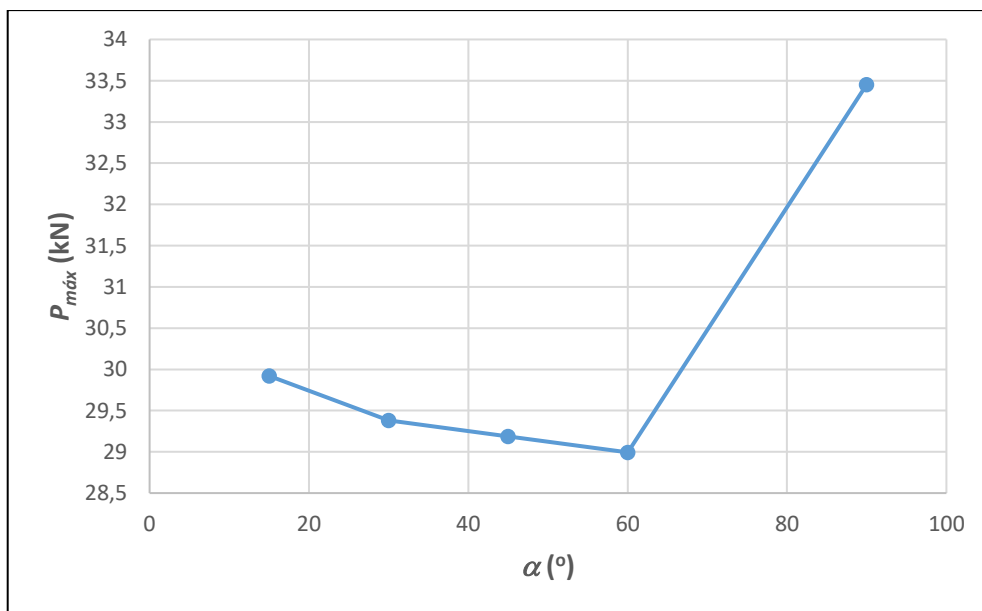


Figura 129 - Valores de $P_{máx}$ para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α .

Na Figura 130 está representado o modo de rutura da junta com $\alpha=15^\circ$ com o adesivo XNR6852 E-2, onde é possível visualizar uma rutura coesiva do adesivo sem plastificação dos substratos. Para os restantes valores de α , a rutura foi igual.

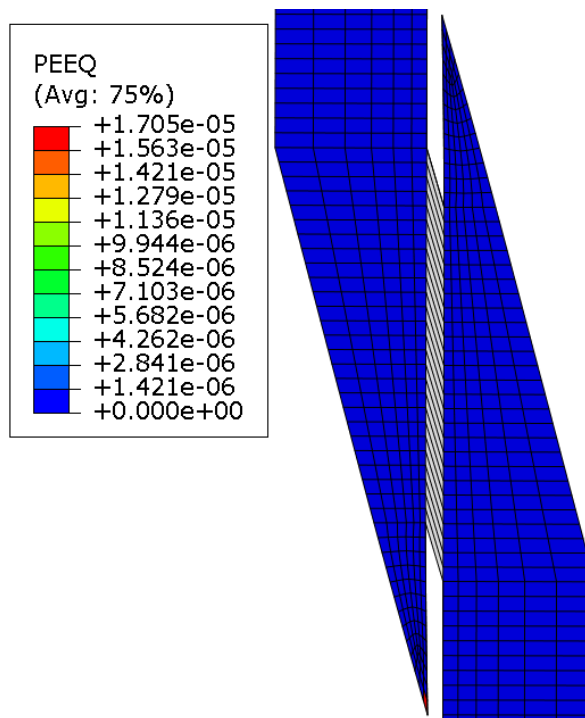


Figura 130 - Modo de rutura do adesivo XNR6852 E-2 para $\alpha=15$.

Na Tabela 45 estão registados os valores de E_{abs} pelo adesivo XNR6852 E-2 com a variação do parâmetro α . De forma contrária ao que aconteceu com $P_{máx}$, os valores de E_{abs} tiveram uma tendência decrescente com a diminuição do parâmetro α . A junta que absorveu mais energia foi a junta sem chanfro. As juntas com $\alpha=15^\circ$, 30° , 45° e 60° apresentaram diferenças relativas de -30,3%, 26,1%, -25,0% e -24,6%, respetivamente, correspondentes às áreas das respetivas curvas $P-\delta$.

Tabela 45 - Valores da E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2 em função do parâmetro α .

α ($^\circ$)	E_{abs} (J)	Comparação
15 $^\circ$	2,7	-30,3%
30 $^\circ$	2,8	-26,1%
45 $^\circ$	2,9	-25,0%
60 $^\circ$	2,9	-24,6%
90 $^\circ$	3,8	-

3.3.4.3.3. Comparação de resultados

Na Tabela 46 estão resumidos os valores de $P_{máx}$ e das respetivas variações Δ para os três adesivos ensaiados com a variação do parâmetro α . Para o adesivo AV138, os valores de $P_{máx}$ apresentaram diferenças relativas entre a junta com $\alpha=15$ e a junta sem chanfro de 9,3%. Porém, devido à rigidez deste adesivo, a introdução de um chanfro exterior nos substratos resultou em perda de resistência das juntas que foi tanto maior quanto menor o valor de α , devido à diminuição da área de secção resistente nos substratos. A rigidez fornecida pelas propriedades mecânicas deste adesivo permitiu-lhe obter os valores de $P_{máx}$ mais elevados.

Tabela 46 - Comparação dos três adesivos com valores de $P_{máx}$ e $\Delta P_{máx}$ para α .

α (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)	$P_{máx}$ (kN)	$\Delta P_{máx}$ (%)
15	32,2	-9,3%	24,0	-22,5%	29,9	-10,6%
30	33,4	-5,7%	27,2	-12,0%	29,4	-12,2%
45	34,0	-4,2%	27,3	-11,8%	29,2	-12,8%
60	34,3	-3,1%	27,3	-11,7%	29,0	-13,3%
90	35,4	-	30,9	-	33,5	-

Para o adesivo DP8005, $\Delta P_{máx}$ foi maior para $\alpha=15^\circ$, estabilizando entre $\alpha=30^\circ$ e $\alpha=60^\circ$, continuando os valores de $P_{máx}$ inferiores ao da junta sem chanfro. Para este adesivo, ficou registado uma diferença relativa entre a junta com $\alpha=15^\circ$ e a junta sem chanfro de 22,5%, sendo uma amplitude de variação maior que o adesivo rígido AV138. Porém, o efeito da introdução de um chanfro exterior nos substratos foi igual, com as juntas a mostrarem perda de resistência. Para todas as juntas ensaiadas com o adesivo DP8005, os valores de $P_{máx}$ foram os mais baixos, uma vez que este adesivo apresenta valores de propriedades mecânicas mais baixas.

O adesivo XNR6852 E-2 registou comportamento peculiar, com valores baixos de $P_{máx}$ para chanfros com $\alpha=60^\circ$, 45° e 30° , respetivamente, sendo que a junta com $\alpha=15^\circ$ obteve o valor de $P_{máx}$ mais alto entre as juntas com chanfro testadas. Apesar deste comportamento, a junta sem chanfro obteve o maior valor de $P_{máx}$ entre as juntas ensaiadas com o adesivo XNR6852 E-2, confirmando a tendência da perda de resistência global das juntas quando é introduzido um chanfro nos substratos. Quanto à posição dos valores de $P_{máx}$ obtidos, estes situam-se numa posição intermédia, entre o adesivo AV138 e o DP8005, evidenciando a influência dos valores das propriedades mecânicas nos resultados finais.

Na Tabela 47 estão representados os valores de E_{abs} para o adesivo XNR6852 E-2. Como é possível analisar, o adesivo DP8005 foi o que apresentou maior capacidade de absorver energia, seguido do adesivo XNR6852 E-2 e do AV138. A rigidez dos adesivos parece retirar capacidade de as juntas absorverem energia ao impacto. Quanto ao parâmetro α , para valores menores de α , menor é a energia absorvida pela junta.

Tabela 47 - Comparação dos três adesivos com valores de E_{abs} para α .

α (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)	E_{abs} (J)	ΔE_{abs} (%)
15°	2,5	-34,7%	2,8	-36,1%	2,7	-30,3%
30°	2,6	-33,6%	3,7	-14,2%	2,8	-26,1%
45°	2,6	-32,5%	3,6	-15,4%	2,9	-25,0%
60°	2,7	-31,3%	3,6	-15,7%	2,9	-24,6%
90°	3,9	-	4,3	-	3,8	-

Na Tabela 48 estão registados os valores das tensões σ_y para os três adesivos em função de α . Como é possível visualizar, os picos das tensões σ_y são maiores para o adesivo AV138, sendo este adesivo aquele que possui os maiores valores de propriedades como E , G e ν , bem como t_n e t_s . Em segundo lugar está o adesivo XNR6852 E-2, logo seguido do DP8005. As tensões σ_y apresentam um comportamento decrescente com o aumento de α .

Tabela 48 - Comparação de σ_y em função de α para os três adesivos.

α (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$	$\sigma_y/\tau_{méd}$	$\Delta\sigma_y/\tau_{méd}(\%)$
15	1,16	-6,8%	0,91	+83,1%	0,93	+3,0%
30	1,28	+3,0%	0,85	70,0%	0,93	+3,0%
45	1,49	+19,7	0,79	57,5%	1,02	12,0%
60	1,51	+21,2%	0,73	46,6%	0,99	+9,5%
90	1,24	-	0,50	-	0,91	-

Na Tabela 49 estão resumidos os valores das tensões τ_{xy} para os três adesivos em função de α . Da mesma forma que se verificou com as tensões σ_y , as tensões τ_{xy} também foram maiores para os adesivos rígidos, como é o caso do AV138 e XNR6852 E-2, logo seguidos pelo DP8005. As tensões τ_{xy} aumentam com o aumento de α .

Tabela 49 - Comparação de τ_{xy} em função de α para os três adesivos.

α (°)	AV138		DP8005		XNR6852 E-2	
	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$	$\tau_{xy}/\tau_{méd}$	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{méd}(\%)$
15	1,30	-7,2%	1,05	-2,2%	1,12	-5,9%
30	1,41	+1,3	1,06	-1,4%	1,21	+1,2%
45	1,40	+0,0	1,07	-0,5%	1,19	+0,0
60	1,38	-1,0%	1,08	+0,0%	1,19	+0,0
90	1,40	-	1,08	-	1,19	-

3.3.5. Discussão e comparação de resultados

Neste capítulo é efetuada uma comparação entre os diferentes ensaios para avaliar a influência dos parâmetros anteriormente testados na resistência global das juntas adesivas tubulares sujeitas a um esforço de impacto. Aqui serão discutidos os resultados e comparados com recurso a ilustrações gráficas, passando para uma avaliação de que parâmetros geométricos melhoram a resistência global da junta. Para efeito de comparação com as alterações geométricas e com as variáveis principais, a geometria base mantém-se como elemento comparativo, mantendo os valores originais de $L_0=10$ mm e $t_p=2$ mm, sabendo que valores mais elevados de L_0 implicam uma maior resistência da junta, mas foram as juntas com a geometria base as usadas no estudo das alterações geométricas e seus efeitos comparativos.

Para o adesivo AV138, os valores de $P_{máx}$ atingidos para cada uma das alterações geométricas estão resumidos na Figura 131. Conforme se pode visualizar, para as alterações geométricas ensaiadas com este adesivo, a adição do *fillet* de adesivo e a junta com $t_p=4$ mm conferiram à junta maior capacidade de suportar carga, sendo que a adição do *fillet* de adesivo foi o parâmetro geométrico que conferiu à junta o maior valor de $P_{máx}$. A introdução dos chanfros não conferiu vantagens à junta adesiva comparativamente à junta de geometria de base, sendo que o melhor registo para o chanfro interior corresponde a $\theta=60^\circ$, e o melhor para o chanfro exterior foi para $\alpha=60^\circ$, ambos abaixo do valor de $P_{máx}$ obtido pela geometria de base que, com um $L_0=10$ mm, registou o terceiro maior valor de $P_{máx}$ entre as juntas em análise.

Para uma situação em que a junta adesiva tenha de aguentar altas cargas aplicadas por impacto, a combinação de uma junta com um $L_0=10$ mm com um *fillet* de adesivo com qualquer valor de β

seria uma escolha adequada, pois com os ensaios realizados, ficou demonstrado que estes dois parâmetros geométricos sozinhos ou combinados fornecem a capacidade à junta de suportar cargas mais altas.

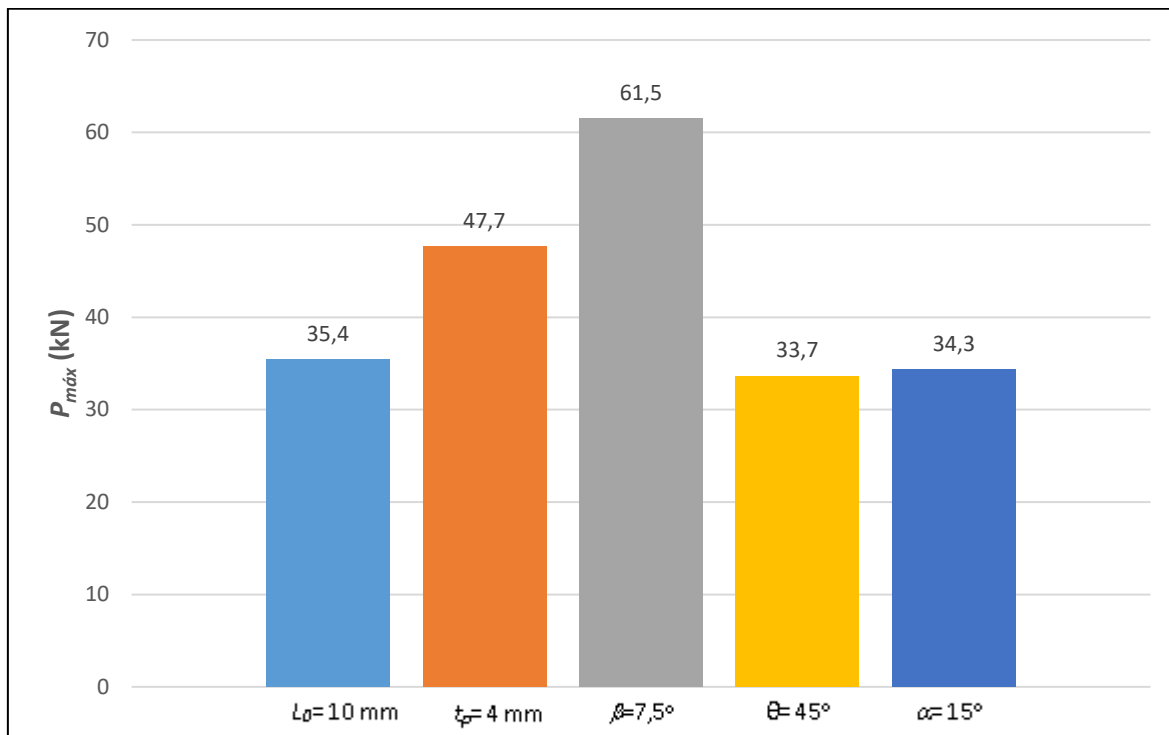


Figura 131 - Valores de $P_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo AV138.

Na Figura 132 estão representados os valores de $\delta_{máx}$ para cada alteração geométrica efetuada e ensaiada com o adesivo AV138, onde é possível observar que β voltou a ter o valor de $\delta_{máx}$ mais alto para $\beta=7,5^\circ$. As restantes alterações geométricas resultaram em $\delta_{máx}$ inferiores ao obtido com o ensaio de L_0 base. O ganho dado por β em δ foi de 148,9% em relação a L_0 . De igual modo como se constatou para $P_{máx}$, os chanfros interiores e exteriores nos substratos não resultaram em nenhuma melhoria em $\delta_{máx}$.

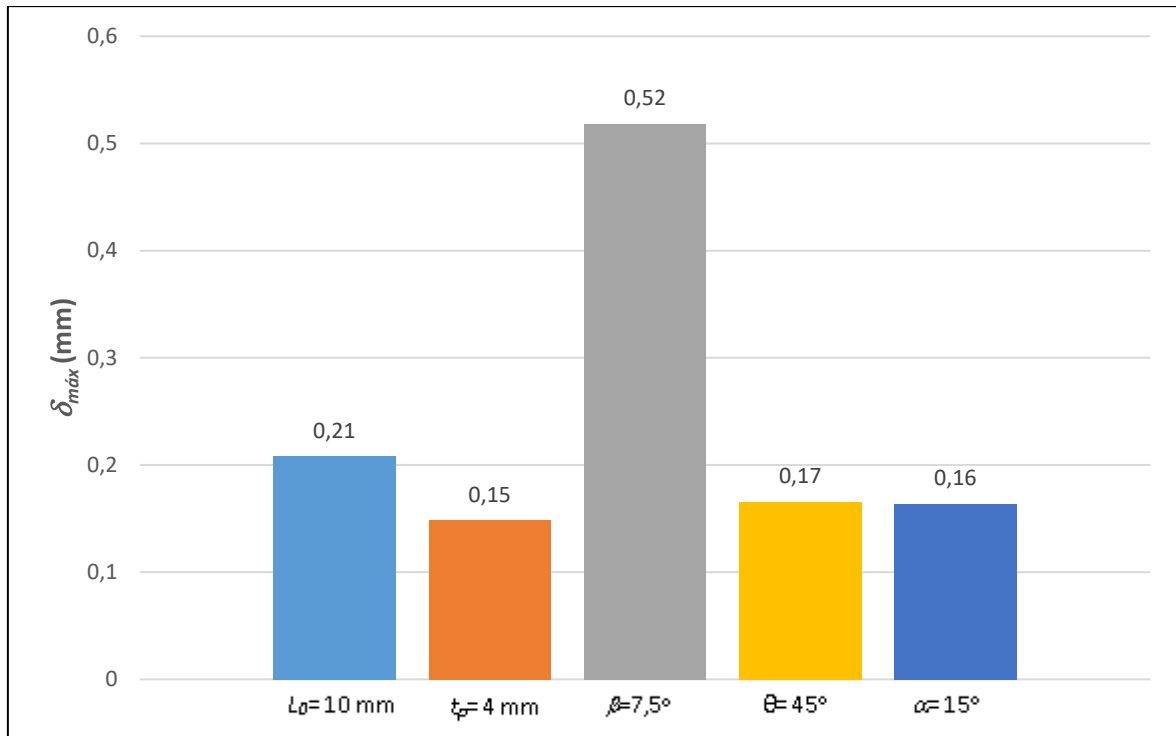


Figura 132 - $\delta_{máx}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo AV138.

Na Figura 133 estão representados os valores de $P_{máx}$ registados para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo DP8005, onde se observa que mais uma vez, a introdução de um *fillet* de adesivo na junta e o aumento de t_p trouxeram vantagens à resistência da junta, com valores de $P_{máx}$ mais altos comparativamente à junta ensaiada com L_0 base. O ganho mais acentuado foi com o *fillet* de adesivo. Por outro lado, para o adesivo DP8005 voltou a verificar-se que a introdução de chanfros interiores e exteriores não trouxe nenhum ganho de resistência global às juntas, os quais registaram valores de $P_{máx}$ inferiores ao da geometria de base. Por possuir valores de propriedades mecânicas muito mais baixas que o adesivo AV138, a variação dos de $P_{máx}$ não foi tão acentuada entre os parâmetros geométricos para o adesivo DP8005.

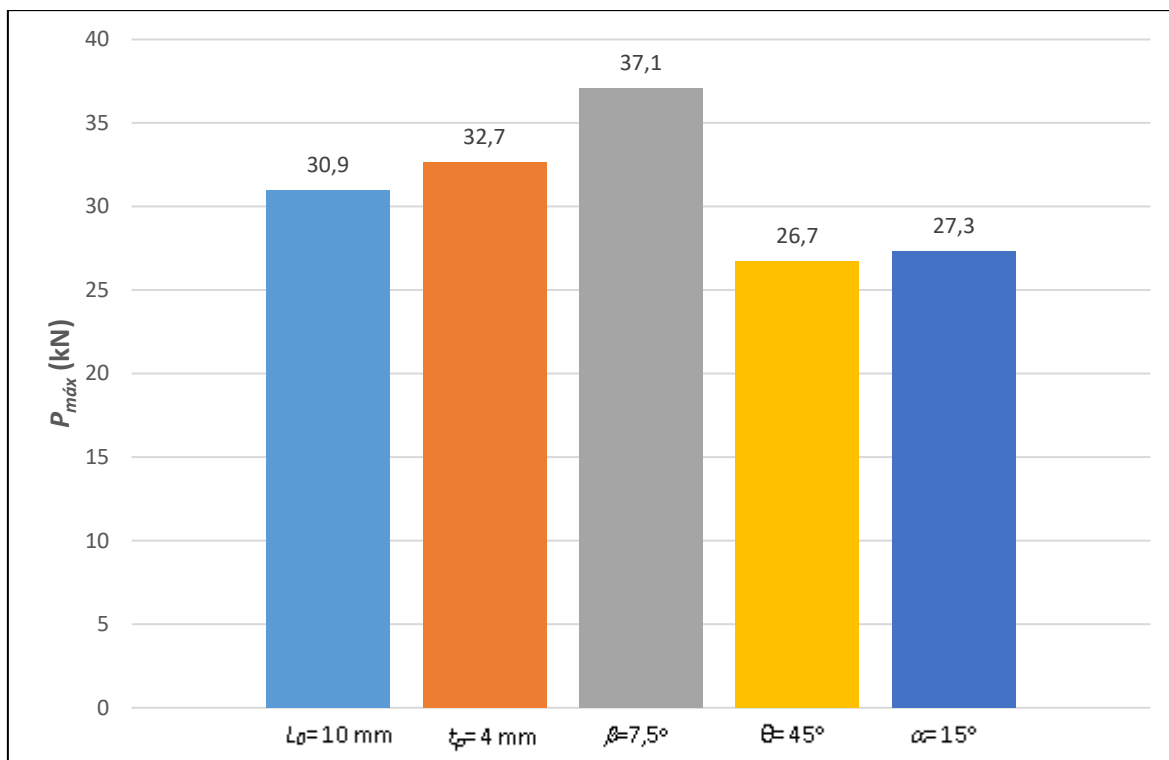


Figura 133 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo DP8005.

Na Figura 134 estão representados os valores dos $\delta_{m\acute{a}x}$ registados nos ensaios efetuados para cada uma das alterações geométricas efetuadas com o adesivo DP8005, onde é possível visualizar que no que diz respeito ao deslocamento, somente a introdução de um *fillet* de adesivo obteve um $\delta_{m\acute{a}x}$ superior ao da junta com geometria de base. Apesar da junta com $t_p=4$ mm ter registado um valor de $P_{m\acute{a}x}$ superior, o valor de $\delta_{m\acute{a}x}$ foi inferior ao da junta de geometria de base, uma vez que possui uma maior rigidez. Da mesma forma que se verificou com o adesivo AV138, a introdução dos chanfros interiores e exteriores nos substratos não demonstrou nenhuma vantagem na resistência final da junta, com deslocamentos inferiores ao da geometria de base.

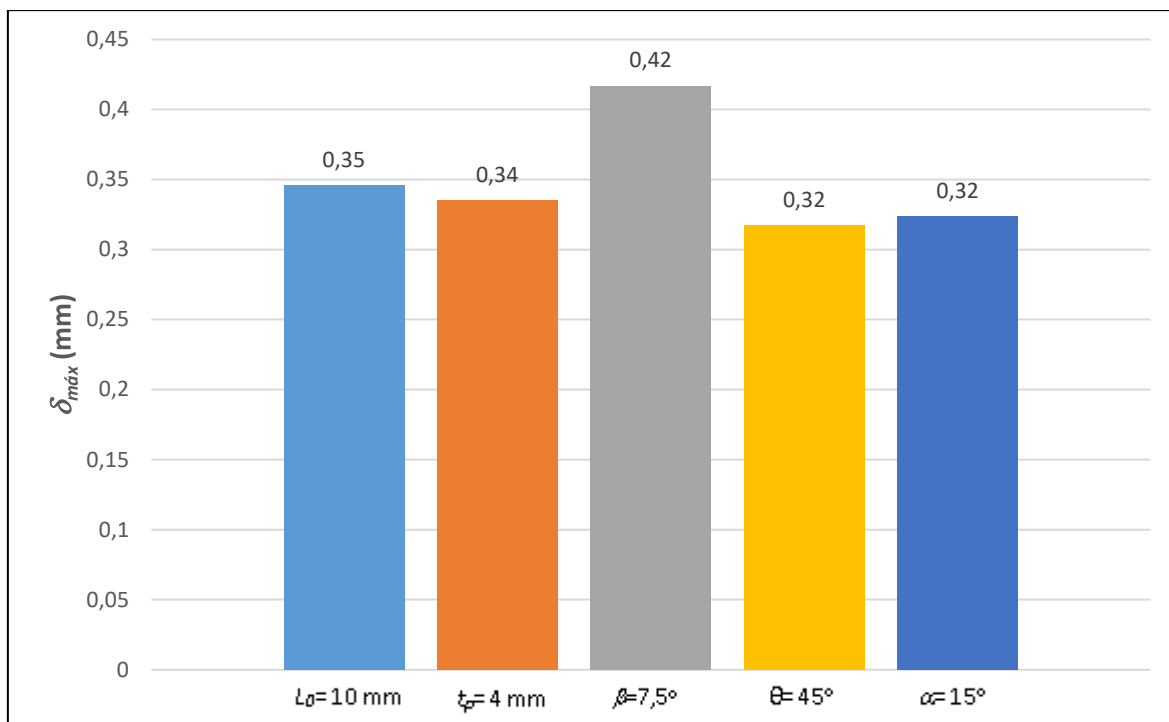


Figura 134 - $\delta_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo DP8005.

Para o adesivo XNR6852 E-2, é possível observar na Figura 135 que o maior ganho na resistência final corresponde à introdução de um β e o aumento de t_p para 4 mm, verificando-se mais uma vez que a introdução dos chanfros interiores e exteriores dos substratos não conferiram nenhuma vantagem em termos de resistência final da junta, seguindo a mesma tendência dos adesivos AV138 e DP8005.

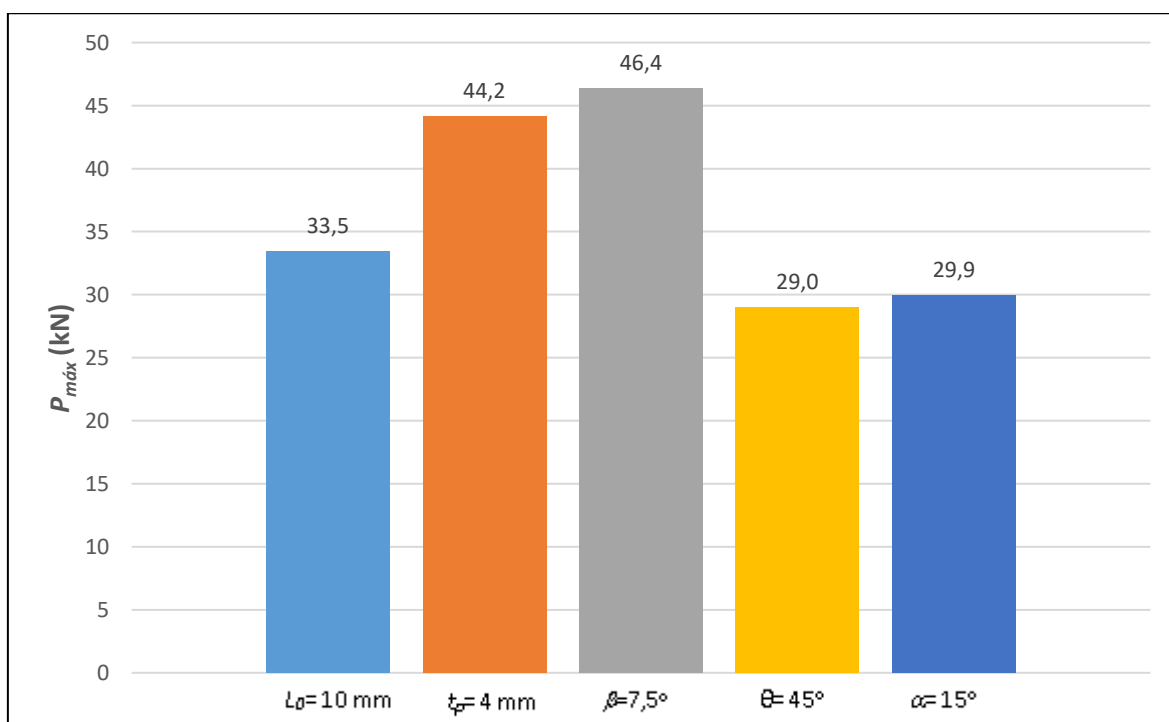


Figura 135 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo XNR6852 E-2.

Na Figura 136 estão ilustrados os valores de $\delta_{m\acute{a}x}$ para cada uma das alterações geométricas efetuadas e ensaiadas com o adesivo XNR6852 E-2. Para este adesivo, a introdução de um *fillet* conferiu à junta um aumento significativo de $\delta_{m\acute{a}x}$, muito influenciado pelo alongamento antes de ocorrer a separação, demonstrado na curva $P-\delta$. Ao contrário com o que aconteceu com os valores de $P_{m\acute{a}x}$, para a junta com $t_p=4$ mm o deslocamento de rutura diminuiu, ficando abaixo do deslocamento atingido pela junta com L_0 base. Mais uma vez, e da mesma forma que aconteceu para os adesivos AV138 e DP8005, a introdução de chanfros interiores e exteriores nos substratos não trouxe nenhuma vantagem à resistênci final da junta.

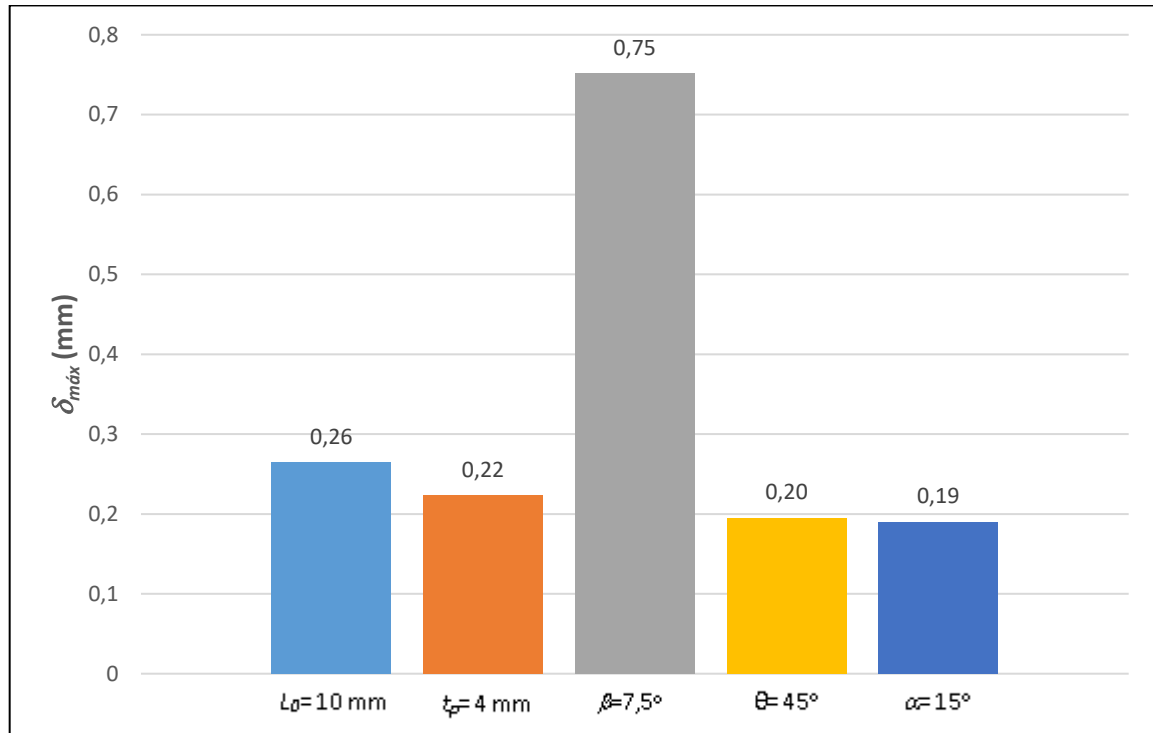


Figura 136 $\delta_{m\acute{a}x}$ para cada alteração geométrica ensaiada com o adesivo XNR6852 E-2.

4. CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHO FUTUROS

Neste capítulo é efetuada a conclusão do trabalho numericamente proposto, analisando a abordagem MEF na aplicação dos MDC para modelar e simular a resistência de juntas adesivas tubulares para aplicações em engenharia, bem como algumas propostas para trabalhos futuros.

4.1. Análise crítica

Com a realização deste trabalho, pode-se concluir que o MDC aqui utilizado foi válido para simular e ensaiar juntas adesivas tubulares para prever as suas resistências, e onde foram empregados três adesivos com propriedades mecânicas distintas para estudar a sua influência, quando solicitadas a um esforço de impacto.

Além do estudo da influência das propriedades mecânicas dos materiais na resistência global da junta, foram introduzidas algumas alterações geométricas às juntas ensaiadas para, de forma combinada, averiguar se existia melhoria da resistência da junta. Desta forma, entre os principais parâmetros geométricos estudados, destacam-se L_0 e t_p , sendo posteriormente efetuadas alterações geométricas como a introdução de *fillets* de adesivo nas juntas e adição de chanfros interiores e exteriores nos substratos. De ressaltar que as propriedades mecânicas utilizadas no estudo numérico elaborado são as propriedades estimadas para ensaio dinâmico, uma vez que as propriedades em modo estático apresentam um comportamento diferente, devido ao efeito da viscoelasticidade dos adesivos.

Relativamente a L_0 , era de esperar que a resistência final de uma junta adesiva tubular fosse maior para valores de L_0 superiores, resultante do aumento da área final da camada adesiva, aumento esse que permite à junta suportar cargas maiores antes de ocorrer a rutura. Para o adesivo rígido AV138, este parâmetro revelou-se especialmente importante, uma vez que a junta com $L_0=40$ mm não chegou a falhar para as condições de ensaio iniciais, sendo posteriormente reformulada a densidade (ρ) da massa de impacto para o dobro de forma a que a energia de impacto fosse igualmente o dobro. Este parâmetro aumentou significativamente a resistência final das juntas no que diz respeito à capacidade de transportar carga para os três adesivos, adesivos esses cujos valores de propriedades E , G e ν tiveram papel preponderante nos resultados obtidos.

O parâmetro t_p teve também influência nos resultados finais obtidos. Para os três adesivos utilizados, o aumento de t_p implicou um aumento da resistência das juntas, aumento esse não tão significativo como o parâmetro L_0 , mas pelo aumento da rigidez dos substratos devido ao aumento do volume de material destes.

Posteriormente foram introduzidas as alterações geométricas. Começando pelo *fillet* de adesivo, a introdução deste aspeto geométrico significa a introdução de uma porção de adesivo nas zonas fronteiras delimitantes dos substratos. Essa introdução traduz-se num aumento da área colada ao longo da camada adesiva bem como nos topos das estruturas tubulares, a qual funciona como um aumento de L_0 e, por isso, num aumento da resistência final das juntas. Esta alteração geométrica foi a única alteração geométrica testada que fez aumentar a resistência final da junta. O aumento de L_0 com este parâmetro é tanto maior quanto menor o ângulo do *fillet*.

Os outros parâmetros geométricos testados foram os chanfros interiores e exteriores dos substratos. A introdução destes aspetos geométricos não se revelou vantajosa para nenhum dos adesivos utilizados, onde a junta sem chanfro obteve o melhor resultado final.

4.2. Limitações e trabalhos futuros

Durante a realização deste trabalho, os testes por MEF com recurso a *softwares* como ABAQUS®, exigem a utilização de capacidades computacionais que muitas vezes não estão presentes, sendo que se esses *softwares* não forem intuitivos levam ainda tempo de aprendizagem. A aplicação dos métodos numéricos com MEF exigem a existência de estudos práticos comparáveis, por forma a averiguar a veracidade dos resultados numéricos.

Para continuidade deste género de estudos, uma análise de custos poderia ser desenvolvida, por forma a averiguar se uma relação desempenho-custo para determinadas aplicações em engenharia as torna economicamente viáveis. Ensaaios experimentais com novas formas geométricas e combinação de parâmetros geométricos como L_0 com β para melhoria de resistência podem ser desenvolvidas. Uma análise dos custos de intervenção de reparação ou substituição pode ser desenvolvida, uma vez que o material constituinte de um adesivo envelhece e degrada-se, significando com isso a perda de propriedades mecânicas que, com o passar do tempo, pode levar uma junta a ter uma rutura catastrófica

Outros trabalhos interessantes e igualmente importantes podem ser desenvolvidos para testar o comportamento de juntas adesivas tubulares quando solicitadas por agentes externos. De entre esses trabalhos, estudos de fadiga e análise de vibrações, efeito de envelhecimento do adesivo com o tempo, aplicações com substratos dissimilares e até estruturas de geometria tubular variável podem e devem ser desenvolvidos, para que seja possível comparar e prever o comportamento deste tipo de ligações mecânicas em projetos de engenharia. Além disso, estudos acerca da influência da velocidade de impacto sobre as juntas deve ser realizado, com a finalidade de estudar fatores como taxa de deformação e energias de impacto transmitidas aos provetes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Pocius, A.V. e Dillard, D. (2002). *Adhesion Science and Engineering - The Mechanics of Adhesion*. 1 ed. Vol. 1. Amsterdão, Países Baixos. Elsevier. ISBN 0-444-51140-7.
2. Petrie, E.M. (2007). *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2 ed., Nova Iorque, EUA. McGraw-Hill Education. 978-0-07-170981-1.
3. da Silva, L.F.M., de Magalhaes, A.G., e de Moura, M.F.S. (2007). *Juntas Adesivas Estruturais*. Porto, Portugal. Publindústria. ISBN 978-989-723-224-4.
4. Ramalho, L.D., Campilho, R.D., Belinha, J., e da Silva, L.F.(2020). Static strength prediction of adhesive joints: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 96, p. 102451.
5. Ramalho, L., Sánchez-Arce, I.J., Gonçalves, D.C., Belinha, J., e Campilho, R.(2022). Numerical analysis of the dynamic behaviour of adhesive joints: A review. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, p. 103219.
6. Cognard, P. (2005). *Handbook of Adhesives and Sealants - Basic Concepts and High Tech Bonding*. Vol. 1. Amsterdão, Países Baixos. Elsevier. ISBN 0-08-044554-3.
7. Dillard, D.A. (2010). *Advances in Structural Adhesive Bonding*. Boca Raton, Florida, EUA. CRC Press. ISBN 978-1-84569-805-8.
8. Habenicht, G. (2008). *Applied Adhesive Bonding: a Practical Guide for Flawless Results*. Weinheim, Alemanha. John Wiley & Sons. ISBN 978-3-527-32014-1.
9. Sadek, J. (2012). *Industrial Applications of Adhesive Bonding*. Amsterdão, Países Baixos. Elsevier. ISBN 13:978-94-009-3419-1.
10. Chaves, F., Silva, L., Carbas, R., Marques, E., Pinto, A., Rispler, A., Tong, L., Steven, G., Wisnom, M., e Silva, L.(2017). Problemas e Trabalhos Práticos de Juntas Adesivas Estruturais. *Publindústria. Portugal*.
11. Adams, R.D. (2000). *Adhesive Bonding - Science, Technology and Applications*. Boca Raton, Florida, EUA. CRC Press. ISBN 0-8493-2584-6.
12. Volkersen, O.(1938). Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten. *Luftfahrtforschung*. 15, p. 41-47.
13. Harris, J. e Adams, R.(1984). Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods. *International journal of adhesion and adhesives*. 4(2), p. 65-78.
14. Spaggiari, A., Castagnetti, D., e Dragoni, E.(2012). Experimental tests on tubular bonded butt specimens: effect of relief grooves on tensile strength of the adhesive. *The Journal of Adhesion*. 88(4-6), p. 499-512.
15. Adams, R.D., Adams, R.D., Comyn, J., Wake, W.C., e Wake, W. (1997). *Structural Adhesive Joints in Engineering*. 2 ed., Berlim, Alemanha. Springer Science & Business Media. ISBN 0-412-70920-1.
16. Panigrahi, S. e Pradhan, B.(2007). Three dimensional failure analysis and damage propagation behavior of adhesively bonded single lap joints in laminated FRP composites. *Journal of Reinforced plastics and Composites*. 26(2), p. 183-201.
17. Campilho, R.D. (2017). *Strength Prediction of Adhesively-Bonded Joints*. Boca Raton, Florida, EUA. CRC Press. ISBN 13:978-1-4987-2246-9.
18. Rice, J.R.(1968). A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks.
19. Rybicki, E.F. e Kanninen, M.F.(1977). A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral. *Engineering fracture mechanics*. 9(4), p. 931-938.
20. Leguillon, D.(2002). Strength or toughness? A criterion for crack onset at a notch. *European Journal of Mechanics-A/Solids*. 21(1), p. 61-72.
21. Moradi, A., Carrère, N., Leguillon, D., Martin, E., e Cognard, J.-Y.(2013). Strength prediction of bonded assemblies using a coupled criterion under elastic assumptions: effect of material and geometrical parameters. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 47, p. 73-82.
22. Hell, S., Weißgraeber, P., Felger, J., e Becker, W.(2014). A coupled stress and energy criterion for the assessment of crack initiation in single lap joints: a numerical approach. *Engineering Fracture Mechanics*. 117, p. 112-126.
23. Mendoza-Navarro, L.E., Diaz-Diaz, A., Castañeda-Balderas, R., Hunkeler, S., e Noret, R.(2013). Interfacial failure in adhesive joints: Experiments and predictions. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 44, p. 36-47.

24. Weißgraeber, P., Felger, J., Talmon l'Armée, A., e Becker, W.(2015). Crack initiation in single lap joints: effects of geometrical and material properties. *International Journal of Fracture*. 192(2), p. 155-166.
25. Barenblatt, G.I.(1959). The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks. *Journal of applied mathematics and mechanics*. 23(3), p. 622-636.
26. Dugdale, D.S.(1960). Yielding of steel sheets containing slits. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*. 8(2), p. 100-104.
27. Duan, K., Hu, X., e Mai, Y.-W.(2004). Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 18(1), p. 39-53.
28. Silva, L.F. e Campilho, R.D.(2012). Advances in numerical modelling of adhesive joints. *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*, p. 1-93.
29. Ji, G., Ouyang, Z., Li, G., Ibekwe, S., e Pang, S.-S.(2010). Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints. *International Journal of Solids and Structures*. 47(18-19), p. 2445-2458.
30. Turon, A., Costa, J., Camanho, P., e Dávila, C.(2007). Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue. *Composites Part A: applied science and manufacturing*. 38(11), p. 2270-2282.
31. Carvalho, U. e Campilho, R.(2017). Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints. *International Journal of Adhesion and Adhesives*. 77, p. 41-50.
32. Kattan, P.I. e Voyiadjis, G.Z. (2012). *Damage Mechanics with Finite Elements - Practical Applications with Computer Tools*. Berlim, Alemanha. Springer Science & Business Media. 3642563848.
33. Raghavan, P. e Ghosh, S.(2005). A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding. *Mechanics of materials*. 37(9), p. 955-979.
34. Wahab, M.A., Ashcroft, I., Crocombe, A., e Shaw, S.(2001). Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics. *Journal of adhesion science and technology*. 15(7), p. 763-781.
35. Imanaka, M., Hamano, T., Morimoto, A., Ashino, R., e Kimoto, M.(2003). Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive. *Journal of Adhesion Science and Technology*. 17(7), p. 981-994.
36. Shenoy, V., Ashcroft, I.A., Critchlow, G.W., e Crocombe, A.(2010). Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue. *Engineering Fracture Mechanics*. 77(7), p. 1073-1090.
37. Moës, N., Dolbow, J., e Belytschko, T.(1999). A finite element method for crack growth without remeshing. *International journal for numerical methods in engineering*. 46(1), p. 131-150.
38. Melenk, J.M. e Babuška, I.(1996). The partition of unity finite element method: basic theory and applications. *Computer methods in applied mechanics and engineering*. 139(1-4), p. 289-314.
39. Mostovoy, S. e Ripling, E.(1975). Flaw tolerance of a number of commercial and experimental adhesives. *Adhesion science and technology*. 9, p. 513-562.
40. Esmaeili, F., Zehsaz, M., Chakherlou, T., e Barzegar, S.(2015). Fatigue life estimation of double lap simple bolted and hybrid (bolted/bonded) joints using several multiaxial fatigue criteria. *Materials & Design*. 67, p. 583-595.
41. KN, K.S., Watson, P., e TH, T.T.(1970). Stress-strain function for the fatigue of metals. *J mater*. 5(4), p. 767-778.
42. Shahani, A.R. e Pourhosseini, S.M.(2019). The effect of adherent thickness on fatigue life of adhesively bonded joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 42(2), p. 561-571.
43. Wu, G., Li, D., Lai, W.J., Chen, Q., Shi, Y., Huang, L., Huang, S., Kang, H., Peng, Y., e Su, X.(2020). Experimental and numerical evaluations on the effects of adhesive fillet, overlap length and unbonded area in adhesive-bonded joints. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*. 43(10), p. 2298-2311.
44. Taylor, D.(2008). The theory of critical distances. *Engineering Fracture Mechanics*. 75(7), p. 1696-1705.
45. Irwin, G.R.(1957). Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate.

46. Griffith, A.A.(1921). VI. The phenomena of rupture and flow in solids. *Philosophical transactions of the royal society of london. Series A, containing papers of a mathematical or physical character.* 221(582-593), p. 163-198.
47. Chen, Q., Guo, H., Avery, K., Su, X., e Kang, H.(2017). Fatigue performance and life estimation of automotive adhesive joints using a fracture mechanics approach. *Engineering Fracture Mechanics.* 172, p. 73-89.
48. Pascoe, J., Zavatta, N., Troiani, E., e Alderliesten, R.(2020). The effect of bond-line thickness on fatigue crack growth rate in adhesively bonded joints. *Engineering Fracture Mechanics.* 229, p. 106959.
49. Xu, Y., Ke, Y., e Ma, X.(2021). Finite Element Analysis of Stress Wave Propagation in Adhesive Joints under Low Speed Impact Tensile Loadings. *Macromolecular Theory and Simulations.* 30(1), p. 2000066.
50. Gollins, K., Elvin, N., e Delale, F.(2020). Characterization of adhesive joints under high-speed normal impact: Part I–Experimental studies. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 98, p. 102529.
51. Gollins, K., Elvin, N., e Delale, F.(2020). Characterization of adhesive joints under high-speed normal impact: part II–numerical studies. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 98, p. 102530.
52. Saito, H. e Tani, H.(1984). Vibrations of bonded beams with a single lap adhesive joint. *Journal of Sound and Vibration.* 92(2), p. 299-309.
53. Rao, M. e Crocker, M.(1990). Analytical and experimental study of the vibration of bonded beams with a lap joint.
54. Miles, R.N. e Reinhall, P.(1986). An analytical model for the vibration of laminated beams including the effects of both shear and thickness deformation in the adhesive layer.
55. Basri, A.B.A., Chae, D.W., e Lee, H.(2020). Investigation of the dynamic characteristics of a carbon-fiber-reinforced epoxy with adhesive-jointed structure. *Composite Structures.* 247, p. 112499.
56. Apalak, M.K., Ekici, R., e Yildirim, M.(2006). Optimal design of an adhesively-bonded corner joint with single support based on the free vibration analysis. *Journal of adhesion science and technology.* 20(13), p. 1507-1528.
57. Hazimeh, R., Challita, G., Khalil, K., e Othman, R.(2015). Finite element analysis of adhesively bonded composite joints subjected to impact loadings. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 56, p. 24-31.
58. SSAB. (2022) *Tubular steel that meets your needs.* Available from: <https://www.ssab.com/en/brands-and-products/steel-categories/tubular-products>.
59. Profissional, T. (2022) *Estação do Oriente em Lisboa.* Available from: <https://turistaprofissional.com/estacao-oriente-lisboa/>.
60. Eusebio, S. e Campilho, R.(2019). Modelling of tubular adhesively-bonded joints by the Extended Finite Element Method. *Procedia Manufacturing.* 41, p. 484-491.
61. Dantas, M., Carbas, R., Marques, E., Kushner, D., e Da Silva, L.(2021). Flexible tubular metal-polymer adhesive joints under torsion loading. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 105, p. 102787.
62. Barbosa, D., Campilho, R., Rocha, R., e Ferreira, L.(2019). Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications.* 233(3), p. 452-464.
63. MMA, H.(2020). Qual a liga mais usada na construção de aeronaves, e porquê?
64. da Silva, L.F.M., Öchsner, A., e Adams, R.D. (2011). *Handbook of adhesion technology.* Vol. 1. Springer.
65. Sekercioglu, T.(2007). Strength based reliability of adhesively bonded tubular lap joints. *Materials & design.* 28(6), p. 1914-1918.
66. Labbé, S. e Drouet, J.-M.(2012). A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading. *International journal of adhesion and adhesives.* 33, p. 26-35.
67. Das, R. e Pradhan, B.(2010). Adhesion failure analyses of bonded tubular single lap joints in laminated fibre reinforced plastic composites. *International Journal of Adhesion and Adhesives.* 30(6), p. 425-438.
68. Rosas, M., Campilho, R., e Moreira, R.(2021). Numerical analysis of geometrical modification combinations of the tensile strength of tubular adhesive joints. *Procedia Structural Integrity.* 33, p. 115-125.

69. Silva, A., Peres, L., Campilho, R., e Rocha, R.(2021). Impact loading analysis of tubular adhesive joints. *Procedia Structural Integrity*. 33, p. 138-148.
70. Ferreira, L., Campilho, R., Rocha, R., e Barbosa, D.(2019). Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling. *The Journal of Adhesion*. 95(5-7), p. 425-449.
71. Silva, M.R.G., *Impact of mixed adhesive joints for the automotive industry*. 2015, Universidade do Porto (Portugal).
72. Ebadi-Rajoli, J., Akhavan-Safar, A., Hosseini-Toudeshky, H., e da Silva, L.(2020). Progressive damage modeling of composite materials subjected to mixed mode cyclic loading using cohesive zone model. *Mechanics of Materials*. 143, p. 103322.
73. Moreira, R., De Moura, M., Silva, F., Ramírez, F., e Silva, F.(2020). Numerical comparison of several composite bonded repairs under fatigue loading. *Composite Structures*. 243, p. 112250.
74. De Moura, M. e Moreira, R.(2017). Fatigue analysis of composite bonded repairs. *Journal of adhesion science and Technology*. 31(19-20), p. 2164-2179.
75. Valente, J.P.A., *Estudo de alterações geométricas em juntas adesivas solicitadas ao impacto*. 2017, Instituto Politecnico do Porto (Portugal).
76. Hua, Y., Crocombe, A., Wahab, M., e Ashcroft, I.(2006). Modelling environmental degradation in EA9321-bonded joints using a progressive damage failure model. *The Journal of Adhesion*. 82(2), p. 135-160.
77. Campilho, R.D., De Moura, M., e Domingues, J.(2008). Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs. *International Journal of Solids and Structures*. 45(5), p. 1497-1512.
78. Alfano, G. e Crisfield, M.(2001). Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues. *International journal for numerical methods in engineering*. 50(7), p. 1701-1736.
79. Campilho, R.D., De Moura, M., e Domingues, J.(2005). Modelling single and double-lap repairs on composite materials. *Composites Science and Technology*. 65(13), p. 1948-1958.
80. Varajão, J.F.D., *Impact of CFRP adhesive joints for the automotive industry*. 2015, Universidade do Porto (Portugal).
81. Araújo, H., Machado, J., Marques, E., e Da Silva, L.(2017). Dynamic behaviour of composite adhesive joints for the automotive industry. *Composite Structures*. 171, p. 549-561.
82. Liao, L., Kobayashi, T., Sawa, T., e Goda, Y.(2011). 3-D FEM stress analysis and strength evaluation of single-lap adhesive joints subjected to impact tensile loads. *International journal of adhesion and adhesives*. 31(7), p. 612-619.