



Estudo do efeito do material dos aderentes em juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração

CÉSAR FILIPE FERREIRA GOMES

julho de 2022

ESTUDO DO EFEITO DO MATERIAL DOS ADERENTES EM JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

César Filipe Ferreira Gomes

1140209

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO DO EFEITO DO MATERIAL DOS ADERENTES EM JUNTAS ADESIVAS TUBULARES SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

César Filipe Ferreira Gomes

1140209

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

2022

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Hernâni Miguel Reis Lopes

Professor Coordenador, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor José Joaquim da Mota Machado

Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pelo seu apoio, disponibilidade e partilha de conhecimentos que tornaram possível esta dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), por todos os ensinamentos que me foram transmitidos ao longo da licenciatura e mestrado.

Aos meus pais pelos valores transmitidos e pelo incansável apoio que me prestaram desde o início do meu percurso académico.

Aos meus amigos e família, pelo apoio incondicional, compreensão e disponibilidade.

PALAVRAS-CHAVE

Epóxido, Poliuretano, Juntas adesivas tubulares, Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Parâmetros geométricos.

RESUMO

As ligações adesivas são frequentemente utilizadas em diversas indústrias, uma vez que oferecem vantagens significativas relativamente a outras técnicas de união como a soldadura ou ligações aparafusadas. Até à data, foram apuradas vantagens como a redução do peso, a capacidade de colar e vedar simultaneamente e unir materiais dissimilares sem danificar as suas estruturas. Existem diferentes geometrias de juntas adesivas, nomeadamente juntas tubulares, onde um tubo de diâmetro inferior é introduzido num tubo com diâmetro superior, de forma a criar uma junta tubular de sobreposição. Este tipo de juntas confere à ligação elevado rácio resistência/peso, diminui a concentração e apresenta boa resistência à corrosão.

A presente dissertação compara numericamente o desempenho dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 em juntas tubulares de sobreposição com aderentes de CFRP (Polímero Reforçado com Fibra de Carbono), alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7, considerando a variação dos parâmetros geométricos da junta, nomeadamente o comprimento de sobreposição (L_0) de 10, 20 e 40 mm. A dimensão total da junta, a geometria do substrato e as espessuras dos tubos interiores (t_{si}) e exteriores (t_{se}) foram mantidos ao longo do desenvolvimento do trabalho realizado. A análise numérica, realizada no *software* ABAQUS® com recurso a modelos de dano coesivo (MDC), foi inicialmente validada por comparação com dados experimentais obtidos em trabalhos anteriores. O trabalho numérico desenvolvido permitiu obter as tensões de arrancamento (σ_y) e as de corte (τ_{xy}) na camada adesiva com recurso a modelos puramente elásticos. De seguida, por MDC foi analisada a variável de propagação de dano (*stiffness degradation* ou SDEG) e foi realizada uma previsão da resistência e energia dissipada das juntas adesivas tubulares. Após diversos ensaios realizados concluiu-se que a rigidez do material e do adesivo influenciam proporcionalmente a resistência da junta adesiva. Nos ensaios realizados nesta dissertação, a junta composta por aderentes de aço DIN 55Si7 e o adesivo Araldite® AV138, apresenta valores de carga máxima superiores.

KEYWORDS

Epoxy, Polyurethane, Tubular adhesive joints, Finite Element Method, Cohesive Zone Models, Geometric parameters.

ABSTRACT

Adhesive joints are often used in many industries as they offer significant advantages over other joining techniques such as welded or bolted joints. To date, advantages such as weight reduction, the ability to simultaneously bond and seal, and join dissimilar materials without damaging their structures, have been found. There are different geometries of adhesive joints, namely tubular joints, where a tube with a lower diameter is introduced into a tube with a larger diameter, to create an overlap tubular joint. This joint geometry promotes high ratio strength/weight, uniform stresses distribution and good corrosion resistance.

The present dissertation numerically compares the performance of the adhesives Araldite® AV138, Araldite® 2015 and SikaForce® 7752 in overlap tubular joints with CFRP (*carbon fiber reinforced polymer*), AW 6082-T651 aluminum and DIN 55Si7 steel adherends, considering the variation of the geometric parameters of the joint, namely the overlap length (L_o) of 10, 20 and 40 mm. The total dimension of the joint, the geometry of the adherends and the thickness of the inner (t_{SI}) and outer (t_{SE}) tubes were kept constant throughout the development of the work carried out. The numerical analysis, performed in the ABAQUS® software using cohesive zone models (CZM), was initially validated by comparison with experimental data obtained in previous works. The developed numerical work enabled to obtain the peel (σ_y) and the shear stresses (τ_{xy}) in the adhesive layer using purely elastic models. Then, by CZM, the damage propagation variable (stiffness degradation or SDEG) was analyzed, and a prediction of the strength and dissipated energy of the tubular adhesive joints was performed. After several tests carried out, it was concluded that the stiffness of the material and the adhesive directly influence the strength of the adhesive joint. The joint composed of the adherends DIN 55Si7 steel and the adhesive Araldite® AV138 showed higher maximum load values.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
a.C.	Antes de Cristo
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos Finitos
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
RPIM	<i>Radial Point Interpolation Method</i>
SDEG	<i>Stiffness Degradation</i>
SPH	<i>Smoothed Particle Hydrodynamics</i>
TFFV	Técnica do Fecho da Fenda Virtual

Lista de Unidades

GPa	Gigapascal
kN	Quilonewton
mm	Milímetro
N	Newton

Lista de Símbolos

γ_f	Deformação de rotura ao corte
ΔP_m	Aumento percentual
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão principal
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_y	Tensão de cedência à tração ou arrancamento
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
d_{SE}	Diâmetro externo do substrato exterior
d_{SI}	Diâmetro externo do substrato interior
E	Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G_c	Tenacidade

G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
k	Fator de momento fletor
K	Rigidez coesiva do adesivo
L	Comprimento da junta
L_0	Comprimento de sobreposição
L_s	Comprimento dos substratos
L_T	Comprimento total da junta adesiva tubular
P_m	Força máxima aplicada
$P_mMéd$	Média da força máxima aplicada
t	Espessura do substrato
t_A	Espessura do adesivo
t_n	Componente de tensão normal
t_{SE}	Espessura do substrato exterior
t_{SI}	Espessura do substrato interior

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Recentes descobrimentos mostram que o homem de Neandertal já utilizava colas nos seus objetos quotidianos [4].	7
Figura 2 - Esquema de ligação adesiva [7].	8
Figura 3 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de tração e as respetivas tensões ao longo da junta [9].	11
Figura 4 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de compressão e as respetivas tensões ao longo da junta [9].	11
Figura 5 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de tração e as respetivas tensões ao longo da junta [9].	12
Figura 6 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de clivagem e as respetivas tensões ao longo da junta [9].	12
Figura 7 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de arrancamento e as respetivas tensões ao longo da junta [9].	13
Figura 8 - Diferentes modos de rotura de uma JSS [5].	13
Figura 9 - Exemplo de rotura mista.	14
Figura 10 - Configurações de juntas adesivas [5].	15
Figura 11 - Ilustração das zonas de utilização de adesivos em automóveis ligeiros (adaptado de [11]).	16
Figura 12 - 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 [30]).	20
Figura 13 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [46].	22
Figura 14 - Propagação de fenda utilizado SPH [50].	23
Figura 15- Seis tipos diferentes de juntas tubulares [6].	25
Figura 16 - Geometria e dimensões características de uma junta adesiva tubular [1].	26
Figura 17- Representação de aderente tubular exterior com furo não passante [57].	26
Figura 18 - Modelo axissimétrico 2D da junta adesiva tubular, com os parâmetros geométricos da junta, carga e condições fronteira [2].	27
Figura 19 - Modelo de elementos sólidos em 3D (malha de elementos finitos da junta adesiva tubular): a) vista isométrica do modelo completo; b) vista aproximada da região de sobreposição [58].	28

Figura 20 - Geometria da junta [63].	33
Figura 21 - Curvas tensão-deformação (σ - ε) da liga de alumínio AW6082-T651 [61].	35
Figura 22 - Curvas σ - ε do adesivo Araldite® AV138 [67].	35
Figura 23 - Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [67].	37
Figura 24 - Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [69].	38
Figura 25 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [63].	40
Figura 26 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [63].	41
Figura 27 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [63].	42
Figura 28 - Variação de P_m com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [63].	43
Figura 29 - Lei coesiva triangular [76].	45
Figura 30 - MDC triangular [68].	46
Figura 31 - Atribuição dos respectivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS® [63].	47
Figura 32 - Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS® [63].	48
Figura 33 - Desenho 2D de uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm no ABAQUS® [63].	48
Figura 34 - Diferentes partições existentes no modelo criado no ABAQUS® [63].	49
Figura 35 - Definição de incrementos para análise no ABAQUS® [63].	49
Figura 36 - Representação das condições fronteira na simulação [63].	50
Figura 37 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=20$ mm [63].	51
Figura 38 - Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS®.	51
Figura 39 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [63].	52
Figura 40 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [63].	52
Figura 41 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [63].	52
Figura 42 - P_m em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [63].	55

Figura 43 - Representação da geometria da junta: (a) representa a vista isométrica, (b) apresenta a vista de corte e (c) o detalhe da sobreposição. Os parâmetros L_o e L_s variam de acordo com a Tabela 17.	58
Figura 44 - Distribuição das tensões de $\sigma_y/\tau_{méd}$ em função do material dos aderentes: CRFP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7.	60
Figura 45 - Distribuição das tensões de $\sigma_y/\tau_{méd}$ em função do L_o : 10, 20 e 40 mm.	62
Figura 46 - Distribuição das tensões de $\sigma_y/\tau_{méd}$ em função dos adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.	63
Figura 47 - Distribuição das tensões de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em função do material dos aderentes: CRFP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7.	64
Figura 48 - Distribuição das tensões de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em função de L_o : 10, 20 e 40 mm.	65
Figura 49 - Distribuição das tensões de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em função dos adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.	66
Figura 50 - Variável de dano na camada de adesivo, no instante em que P_m é atingido, nos aderentes CRFP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7.	68
Figura 51 - Variável de dano na camada de adesivo, no instante em que P_m é atingido, para L_o de 10, 20 e 40 mm.	69
Figura 52 - Variável de dano na camada de adesivo, no instante em que P_m é atingido, para juntas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.	70
Figura 53 - Distribuição do P_m da junta de CFRP, em função de L_o e dos diferentes adesivos.	72
Figura 54 - Distribuição do P_m da junta em alumínio AW 6082-T651, em função de L_o e dos diferentes adesivos.	73
Figura 55 - Estricção gerada no tubo interior para o adesivo Araldite® 2015, com $L_o=40$ mm: (a) antes da estricção (b) após estricção.	74
Figura 56 - Distribuição do P_m da junta em aço DIN 55Si7, em função de L_o e dos diferentes adesivos. ..	75
Figura 57 - Representação simplificada do calculo de U [97].	77
Figura 58 - Resultados de U para as juntas tubulares de CFRP, com os três adesivos em estudo e com L_o de 10, 20 e 40 mm.	77
Figura 59 - Resultados de U para as juntas tubulares de alumínio AW 6082-T651, com os três adesivos em estudo e com L_o de 10, 20 e 40 mm.	78
Figura 60 - Resultados de U para as juntas tubulares de aço DIN 55Si7, com os três adesivos em estudo e com L_o de 10, 20 e 40 mm.	79

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas (adaptado de [6]).....	9
Tabela 2 - Causas possíveis para diferentes roturas adesivas (adaptado de [9]).	14
Tabela 3 - Estado da arte de ligações adesivas.....	24
Tabela 4 - Estado da arte relativo às juntas tubulares adesivos e aos métodos de modelação numérica.	28
Tabela 5 - Dimensões dos provetes e das juntas (adaptado de [63]).....	34
Tabela 6 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [68].	36
Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [67].	37
Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [69].	39
Tabela 9 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138 [63].	40
Tabela 10 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015 [63].	41
Tabela 11 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 [63].	42
Tabela 12 - P_m Méd (em N) e aumento percentual do mesmo (ΔP_m [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares [63].	43
Tabela 13 - Descrição e comparação do comportamento das juntas ensaiadas.....	44
Tabela 14 - Deslocamentos impostos nos modelos de juntas adesivas tubulares em função do adesivo utilizado e valor de L_0 [63].	50
Tabela 15 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0 [63].	53
Tabela 16 - Valores de P_m [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa [63].....	56
Tabela 17 - Dimensões das juntas tubulares ensaiadas.	57
Tabela 18 - Propriedades elásticas de uma camada unidirecional de CFRP [79].	59
Tabela 19 - Propriedades do substrato aço DIN 55Si7 [94].	59
Tabela 20 - Variação de $\sigma_y/\tau_{méd}$ nas diferentes extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes materiais aderentes.	61
Tabela 21 - Variação de $\sigma_y/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes L_0	62
Tabela 22 - Variação de $\sigma_y/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes adesivos ensaiados.	63

Tabela 23 - Variação de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes materiais aderentes.	65
Tabela 24 - Variação de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes L_0	66
Tabela 25 - Variação de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes adesivos ensaiados.	67
Tabela 26 - Variação de SDEG nas diferentes extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ e nos diferentes materiais aderentes.	69
Tabela 27 - Variação de SDEG nas extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ e nos diferentes L_0	70
Tabela 28 - Variação de SDEG nas extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ e nos diferentes adesivos ensaiados. ...	71
Tabela 29 - Valores de P_m , em N, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de CFRP.	73
Tabela 30 - Valores de P_m , em N, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de alumínio AW 6082-T651.	75
Tabela 31 - Valores de P_m , em N, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de aço 55Si7. ...	76
Tabela 32 - Valores de U , em J, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de CFRP.	78
Tabela 33 - Valores de U , em J, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de alumínio AW 6082-T651.	79
Tabela 34 - Valores de U , em J, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de aço DIN 55Si7	80
Tabela 35 - Tabela resumo dos valores de P_m das juntas ensaiadas, em kN e aumento percentual relativamente ao $L_0=10$ mm.	81

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	3
1.1	Contextualização	3
1.2	Objetivos	3
1.3	Organização da dissertação	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das ligações adesivas	8
2.1.2	Tipos de esforços.....	10
2.1.2.1	Esforços de tração.....	10
2.1.2.2	Esforços de compressão	11
2.1.2.3	Esforços de corte	11
2.1.2.4	Esforços de clivagem.....	12
2.1.2.5	Esforços de arrancamento	12
2.1.3	Modos de rotura	13
2.1.4	Configurações típicas de juntas adesivas	15
2.1.5	Aplicações.....	16
2.2	Previsão de resistência.....	17
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos	18
2.2.2	Mecânica da fratura	18
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	19
2.2.4	Mecânica do dano	20
2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido	21
2.2.6	Métodos sem malha.....	23
2.2.7	Estado da arte aplicada às ligações adesivas	24

2.3	Juntas adesivas tubulares	25
2.3.1	Caracterização e particularidades das juntas tubulares.....	25
2.3.2	Aplicações industriais de juntas tubulares	26
2.3.3	Modelação numérica de tubulares	27
2.3.4	Estado da arte de juntas adesivas tubulares.....	28
3	DESENVOLVIMENTO	33
3.1	Validação da técnica numérica com dados experimentais.....	33
3.1.1	Descrição da geometria e dos materiais	33
3.1.1.1	Aderentes.....	34
3.1.1.2	Adesivos.....	35
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	35
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	36
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	38
3.1.2	Resultados experimentais obtidos	39
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	39
3.1.2.2	Araldite® 2015	41
3.1.2.3	SikaForce® 7752.....	42
3.1.3	Comparação de resultados.....	43
3.1.4	Modelo de dano coesivo triangular.....	44
3.1.4.1	Formulação do modelo	45
3.1.4.2	Determinação das propriedades coesivas	47
3.1.5	Condições da análise numérica	47
3.1.6	Previsão da resistência por MDC.....	52
3.1.7	Discussão dos resultados obtidos.....	53
3.1.8	Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais	55
3.2	Estudo numérico com diferentes materiais e geometrias.....	57
3.2.1	Geometria da junta	57
3.2.2	Caracterização dos diferentes aderentes.....	58
3.2.2.1	CFRP	58

3.2.2.2	Aço DIN 55Si7.....	59
3.2.3	Análise de tensões.....	59
3.2.3.1	Tensões de arrancamento	59
3.2.3.2	Tensões de corte.....	63
3.2.4	Análise da variável de dano.....	67
3.2.4.1	Análise dos aderentes.....	68
3.2.4.2	Análise L_0	69
3.2.4.3	Análise de adesivos	70
3.2.5	Previsão da resistência das juntas	71
3.2.6	Previsão da energia dissipada	76
3.2.7	Discussão dos resultados.....	80
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	85
4.1	CONCLUSÕES.....	85
4.2	PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	87
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	91

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Os adesivos têm sido alvo de um crescente desenvolvimento nas últimas décadas. Isto deve-se ao facto de apresentarem diversas vantagens relativamente a métodos tradicionais como a soldadura, ligações aparafusadas e a união através da utilização de rebites. Algumas dessas vantagens são a redução do peso, a capacidade de colar e vedar simultaneamente e unir materiais dissimilares sem danificar as suas estruturas. Além disso têm capacidade de absorver vibrações, possibilitam união de materiais e geometrias dissimilares, reduzem a concentração de tensões e possuem elevada resistência à fadiga. As ligações adesivas são assim utilizadas em diversas indústrias, desde setores de alta tecnologia como a aeronáutica, passando por aplicações médicas e até indústrias mais frequentes e menos exigentes como mobília e calçado [1].

No que diz respeito a juntas tubulares, as ligações adesivas são vastamente utilizadas nas indústrias que recorrem a construções tubulares, como por exemplo, a construção civil. No entanto, tal como qualquer ligação convencional, é importante que a sua geometria seja corretamente selecionada de forma a potenciar o desempenho desta junta quando solicitada. A seleção dos materiais, a espessura dos substratos e a espessura da camada do adesivo são outros fatores que contribuem para a resistência mecânica da junta [2].

O aumento de utilização destas uniões promoveu o desenvolvimento de técnicas que ajudam a prever o comportamento e resistência da junta. O desenvolvimento de Métodos de Elementos Finitos (MEF) possibilitam a previsão numérica do comportamento das juntas adesivas, recorrendo à simulação da geometria da junta, das solicitações envolvidas e da plasticidade do adesivo e aderente. O modelo de dano coesivo (MDC) é o método de modelação mais utilizado, uma vez que combina os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para previsão do desempenho das juntas [1].

1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como objetivo comparar a resistência mecânica de juntas tubulares adesivas, utilizando diferentes materiais nos substratos e, portanto, é necessário introduzir conceitos da adesão e previsão da resistência da junta.

1.3 Organização da dissertação

De forma a simplificar a apresentação dos conteúdos desenvolvidos, esta dissertação foi dividida em 4 capítulos distintos.

O primeiro capítulo está dedicado à apresentação dos temas abordados e da sua importância, tanto na atualidade como para o futuro. Apresenta alguns conceitos e produtos utilizados durante o desenvolvimento da dissertação e, essencialmente, ilumina o objetivo deste trabalho.

O segundo capítulo presta a informação necessária para entender conceitos sobre o tema e expõe o estado da arte. Partindo do conceito de juntas adesivas, os subcapítulos apresentados serão de carisma introdutório a este tipo de juntas. Aqui serão aprofundados os métodos analíticos de previsão de resistência de juntas adesivas e por fim, apresenta a geometria adesiva que será utilizada: juntas tubulares.

O terceiro capítulo corresponde à componente numérica do relatório. Numa fase inicial, são validados os resultados numéricos, tendo em conta os resultados experimentais de trabalhos anteriores. De seguida, embarca na missão proposta no Capítulo 1 de testar e estudar o comportamento dos diferentes materiais (adesivos e aderentes) em juntas tubulares. Para isso, foi utilizado o *software* ABAQUS® de forma a obter os resultados numéricos para a validação e previsão do comportamento da junta.

O quarto capítulo serve o propósito de concluir o estudo proposto no primeiro capítulo, mostrando e interpretando os pormenores dos resultados obtidos. No final, serão apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como objetivo expor e explicar as ligações adesivas. As diferentes características das juntas causam modos de rotura diferentes e assim, torna-se necessário analisar todos os esforços a que estas são sujeitas.

De forma a compreender melhor o conceito de união, serão apresentadas algumas vantagens e desvantagem, algumas aplicações e as principais diferenças relativamente a métodos de ligação mais comuns tais como soldadura ou ligações aparafusadas.

2.1 Ligações adesivas

Apesar de não existir na literatura um momento inicial para a utilização das ligações adesivas, existem escrituras e artefactos que sugerem que os seres humanos utilizam este tipo de ligação há milhares de anos [3]. A sua utilização surgiu gradualmente com o propósito de melhorar a conceção de algum objeto, torná-lo mais prático ou visualmente mais agradável. A Figura 1 mostra uma flecha fabricada há cinquenta mil anos atrás pelo Homem de Neandertal, que utiliza um adesivo obtido através da árvore de Bétula para unir componentes dissimilares.



Figura 1 - Recentes descobrimentos mostram que o homem de Neandertal já utilizava colas nos seus objetos quotidianos [4].

As primeiras patentes relativas a adesivos surgiram a partir do século XVII e normalmente eram colas concebidas através de peixes, goma, caseína, leite e borracha natural. As grandes guerras mundiais potenciaram o aparecimento de fábricas de adesivos por todo o mundo. Até então eram utilizados adesivos de origem vegetal, animal e mineral. No início do século XX apareceram colas fenólicas e mais tarde colas

à base de ureia-formaldeído que permitiram concepção de novos produtos em diversas indústrias. O aparecimento de adesivos epóxicos foi marcado pela primeira utilização de ligações adesivas entre metais [5]. Atualmente o desempenho dos adesivos é mensurável e alguns já são classificados como adesivos estruturais.

2.1.1 Caracterização das ligações adesivas

Por definição, a estrutura de uma junta adesiva consiste na ligação de substratos ou aderentes através da utilização de um adesivo [5]. Tal como os restantes métodos de ligação, quando dimensionada e projetada uma junta adesiva é necessário ter em atenção os seguintes aspetos:

- Seleção adequada do tipo de adesivo a utilizar;
- Geometria da junta em função dos esforços que suportará;
- Analisar e preparar todas as superfícies de forma a evitar uma rotura precoce e não planeada da junta.

De forma a conhecer melhor este tipo de ligações é importante conhecer o conceito fundamental, a adesão, e o que se entende por materiais adesivos. A adesão consiste na atração intermolecular resultante da aproximação de diferentes elementos [6]. Os materiais adesivos, por conseguinte, são definidos como materiais poliméricos capazes de realizar ligações entre dois substratos ou aderentes (do mesmo material ou de materiais diferentes) de forma a resistir à sua separação - tendo como recurso as forças adesivas e coesivas [5]. A Figura 2 mostra as diferentes fases que constituem uma junta adesiva.

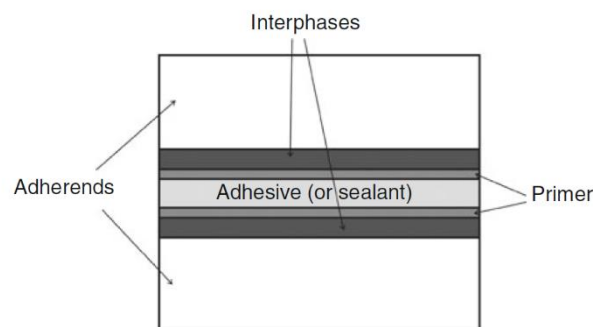


Figura 2 - Esquema de ligação adesiva [7].

Naturalmente existem desvantagens na utilização de adesivos e então torna-se necessário o estudo das condições de ligação para cada aplicação. O quadro resumo que é apresentado na Tabela 1 mostra algumas dessas vantagens e desvantagens.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens das ligações adesivas (adaptado de [6]).

Vantagens	Desvantagens
Facilidade na montagem e automatização de produção (maior cadência).	Necessidade de preparação das superfícies (limpeza e tratamentos).
Maior resistência à flexão (quando comparado com aperto mecânico ou soldadura).	Processo de cura moroso e pode necessitar de temperatura e/ou pressão.
Custos globalmente reduzidos.	A humidade e a temperatura ambiente influenciam o comportamento da junta.
Diversidade de famílias e geometrias de materiais a unir assim como componentes de posicionamento.	São ligações permanentes e tem durabilidade limitada pelas condições de serviço - são sensíveis a altas temperaturas.
Distribuição uniforme de tensões na área de adesão. Há uma redução ou eliminação de concentração de tensões.	Fraca resistência a esforços de clivagem e arrancamento.
Grande resistência à fadiga e ao choque.	Fraca resistência à propagação de fissuras.
Elevada capacidade de amortecimento de vibrações.	Tempo de vida limitado.
Permite ligar e vedar simultaneamente.	Toxicidade e flamabilidade de alguns adesivos.
Não danificam os substratos nem causam alterações estruturais.	Qualidade da ligação difícil de avaliar - dificuldade em realizar inspeção.
Capacidade de ligar qualquer tipo de materiais, até os sensíveis ao choque.	Exige elevado conhecimento técnico.
Isolamento acústico.	Pode necessitar de gabarito de posicionamento.

O aumento da competitividade das indústrias promoveu a procura e o desenvolvimento de novas soluções. Os adesivos têm propriedades que conferem à junta vantagens sobre ligações de aperto mecânico ou soldaduras, como por exemplo, possibilitar a união de materiais não soldáveis como algumas ligas de alumínio. O facto de terem boa capacidade de absorção de energia conferem-lhes boa resistência à fadiga. Este método de ligação é especialmente utilizado com materiais compósitos, uma vez que as ligações adesivas permitem uma boa distribuição de tensões sobre uma determinada superfície e evitam concentrações de tensões, especialmente prejudiciais a estes materiais [8].

2.1.2 Tipos de esforços

Durante o período de utilização de uma junta de ligação adesiva ocorrem diversos esforços. Normalmente existem cinco tipos diferentes de esforços, que podem ser isolados ou simultâneos, conforme as forças que estejam envolvidas [5].

A qualidade da junta ditará a capacidade de suportar esforços e está relacionada com o tipo de adesivo escolhido. A configuração da junta também terá influência nos resultados obtidos.

- ✓ A escolha do adesivo é fulcral para uma boa ligação. Esta escolha deve ter sempre em conta os materiais dos aderentes, o ambiente de exposição e as solicitações a que será sujeito.
- ✓ A geometria da junta dita o stress residual formado quando a ligação é solicitada. O mesmo acontece devido à área de adesão.

Todas as representações mostradas nos subcapítulos subseqüentes ilustram a junta que causa o respetivo tipo de esforço e as tensões ao longo da sobreposição [9].

2.1.2.1 Esforços de tração

Este tipo de esforço resulta da atuação de forças no sentido perpendicular ao plano de colagem. Assim, a distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é uniforme. Por outro lado, ao longo da largura da ligação este fenómeno não ocorre porque surgem picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição [5]. A Figura 3 apresenta uma representação gráfica dos esforços de tração em uma junta de sobreposição. Além disso, é possível também analisar a evolução das tensões ao longo da sobreposição – é possível verificar a existência de picos de tensão nas extremidades de L_0 .

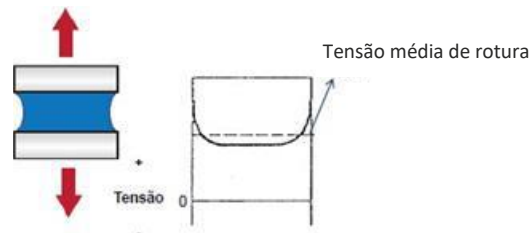


Figura 3 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de tração e as respectivas tensões ao longo da junta [9].

2.1.2.2 Esforços de compressão

Forças que comprimem um aderente contra o outro causam esforços de compressão. A distribuição da tensão pelo adesivo é constante. Este esforço não é tão comum e normalmente não causa rotura [5]. A Figura 4 mostra uma representação deste tipo de esforços.

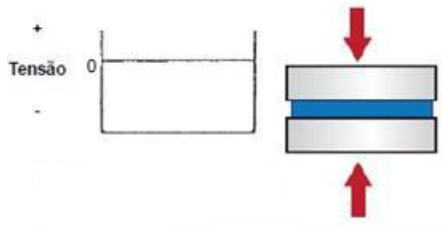


Figura 4 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de compressão e as respectivas tensões ao longo da junta [9].

2.1.2.3 Esforços de corte

São esforços causados por forças de corte que provocam o escorregamento entre dois aderentes. A distribuição da tensão de corte varia de acordo com a geometria da junta utilizada. Como é possível observar na Figura 5, que representa uma Junta de Sobreposição Simples (JSS) e a sua distribuição de tensões quando sujeita a forças de corte, as extremidades estão sujeitas a um maior nível de tensões [5]. Este comportamento deve-se ao efeito da deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta da sobreposição. Este efeito torna-se mais marcante com o aumento do comprimento de sobreposição. Por este motivo, a largura da sobreposição tem maior importância na resistência da junta que o seu comprimento.

Como mostra a Figura 5, o aumento da largura da ligação aumenta a resistência mecânica da junta, porque aumenta a área em cada um dos extremos de sobreposição.

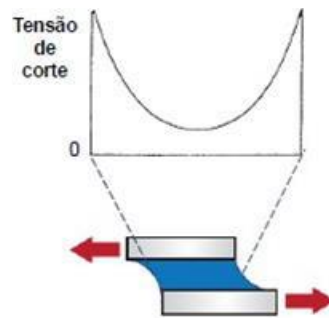


Figura 5 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de tração e as respectivas tensões ao longo da junta [9].

2.1.2.4 Esforços de clivagem

Esforços de clivagem são provocados por forças de tração, mas aplicadas na extremidade de uma junta rígida. Neste caso existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que está sob as forças de clivagem [5]. A Figura 6 representa graficamente uma junta com este tipo de sollicitação. Além disso, é possível analisar a evolução das tensões ao longo do L_0 .

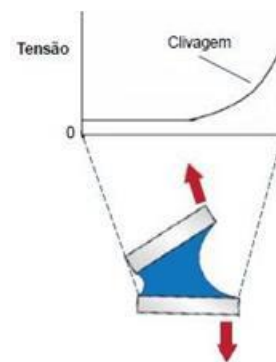


Figura 6 - Representação de uma sollicitação que causa esforço de clivagem e as respectivas tensões ao longo da junta [9].

2.1.2.5 Esforços de arrancamento

Existem algumas semelhanças entres os esforços de arrancamento e de clivagem. Os esforços de arrancamento resultam da deformação plástica de um ou dois aderentes quando sofrem esforços de clivagem. Este esforço causa concentração de forças de tração numa das extremidades da ligação [5]. A Figura 6 apresenta uma junta que sofre esforços de arrancamento. É também possível analisar a evolução das tensões ao longo do L_0 .



Figura 7 - Representação de uma solitação que causa esforço de arrancamento e as respectivas tensões ao longo da junta [9].

2.1.3 Modos de rotura

A ligação de dois aderentes tem como objetivo manter a integridade estrutural do componente e por esse motivo, necessita de ser capaz de suportar e transmitir os esforços a que é sujeito. Estes esforços podem ser estáticos ou dinâmicos, bem como ter condições ambientais menos favoráveis, como temperatura ou humidade [10]. Os principais fatores que ditam o modo de rotura da junta são a qualidade da junta, a geometria e o tipo de carregamento a que é sujeito [5]. Para testar esta ligação, muitas vezes recorre-se a métodos destrutivos, como por exemplo, ensaio de tração de uma JSS. A Figura 8 mostra todos os resultados expectáveis desse ensaio de tração.

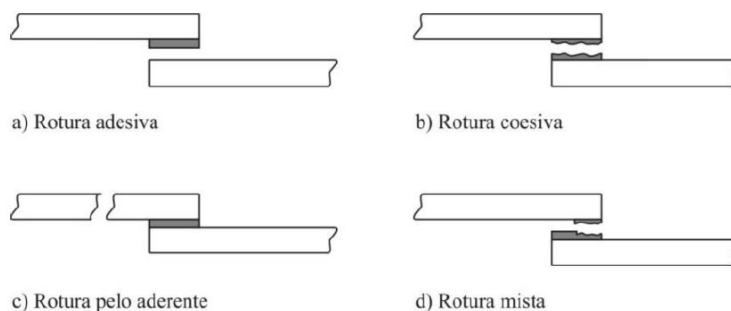


Figura 8 - Diferentes modos de rotura de uma JSS [5].

A rotura adesiva (Figura 8 a) é caracterizada pela quebra da ligação entre o adesivo e o aderente e, portanto, mostrará rotura na interface. A interface é a superfície de contacto entre estes dois componentes situa-se na zona da interfase.

A rotura coesiva (Figura 8 b), tal como o nome indica ocorre rotura no adesivo. Neste caso mostra que as forças coesivas do adesivo são inferiores às forças coesivas do aderente e que as forças de ligação estabelecidas entre o adesivo e o aderente (forças adesivas). A rotura pelo aderente, representada na Figura 8 pelo esquema c), mostra exatamente o contrário: as forças adesivas e coesivas do adesivo são superiores às coesivas do aderente. A Figura 9 mostra um exemplo real de uma rotura mista, obtida através em um ensaio de juntas de sobreposição simples à tração.

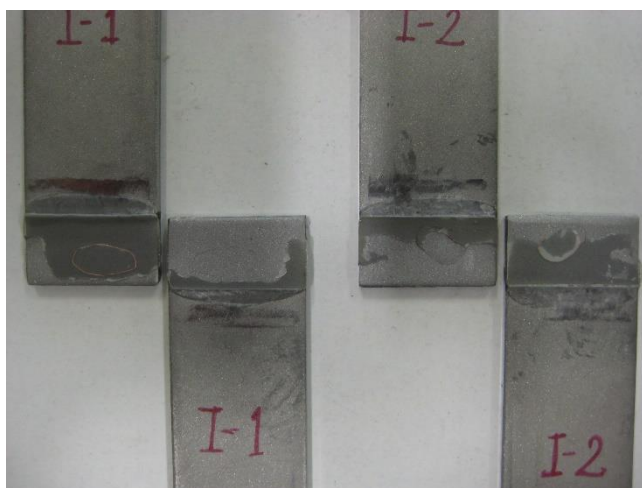


Figura 9 - Exemplo de rotura mista.

Pode ser classificada mista uma rotura que não apresente exclusivamente um modo de falha. Ou seja, esta rotura apresentará zonas coesivas e adesivas do adesivo ou substrato. Existem vários motivos para ocorrer uma falha precoce da junta. A Tabela 2 expõe possíveis causas para cada tipo de rotura apresentado anteriormente [9].

Tabela 2 - Causas possíveis para diferentes roturas adesivas (adaptado de [9]).

Rotura adesiva	Rotura coesiva	Rotura pelo aderente
Má execução da preparação da superfície ou má seleção da preparação superficial a utilizar.	Não cumprimento dos tempos de cura especialmente em adesivos com 1 componente.	Preparações do substrato comprometem a sua integridade estrutural.
Má seleção do adesivo a utilizar - Influencia a molhagem e/ou as ligações químicas.	Defeitos que surgem na cura dos adesivos (por exemplo, porosidades ou bolhas).	Tensão de rotura do material utilizado no substrato ser inferior à tensão de rotura da ligação adesiva.
Fenómeno de envelhecimento entre adesivo e substrato.	Fenómenos de envelhecimento da junta.	Dimensão dos aderentes mal projetada.
Má molhagem das superfícies. Utilização do adesivo após o tempo de manuseamento.	Solicitação a tensões superiores ao recomendado.	

2.1.4 Configurações típicas de juntas adesivas

A configuração ideal de uma junta adesiva é determinada pelas características geométricas dos aderentes e as propriedades mecânicas desejadas. De todas as possibilidades existentes, a Figura 10 mostra aquelas que mais utilizadas.

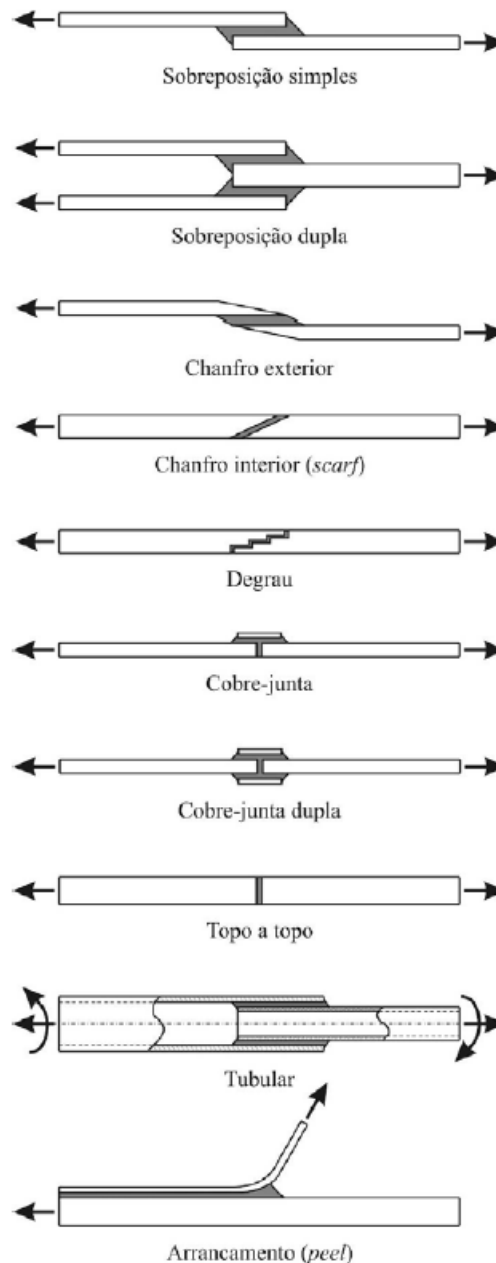


Figura 10 - Configurações de juntas adesivas [5].

Para determinar a melhor configuração é importante prever a direção e o sentido das solicitações que a junta sofrerá. A ligação adesiva ideal é aquela que o esforço esteja a ser aplicado na direção em que o adesivo tenha maior resistência à rutura [6]. Outro fator importante é a distribuição de tensões de forma a garantir a longevidade da

junta, mesmo que isso implique aumentar a complexidade do processo de fabrico ou custo da operação.

2.1.5 Aplicações

As ligações adesivas estão tão profundamente enraizadas na realidade atual que muitas vezes passam despercebidas.

As principais indústrias que utilizam estas ligações são:

- Indústria das Embalagens;
- Indústria do Mobiliário;
- Indústria do Calçado;
- Indústria da Madeira;
- Indústria Aeronáutica.

A indústria aeronáutica tem uma grande importância no desenvolvimento da indústria dos adesivos, uma vez que está constantemente a introduzir materiais nos aviões, que predominantemente utilizam estas ligações. Gradualmente também a indústria automóvel está a recorrer a adesivos de forma a produzirem veículos mais leves (ver Figura 11). Recentemente, a biologia e a medicina também estão a usar processos de adesão de proteínas, o que permite biocompatibilidade de diferentes materiais e tecidos, útil para colas cirúrgicas ou órgãos artificiais [7].

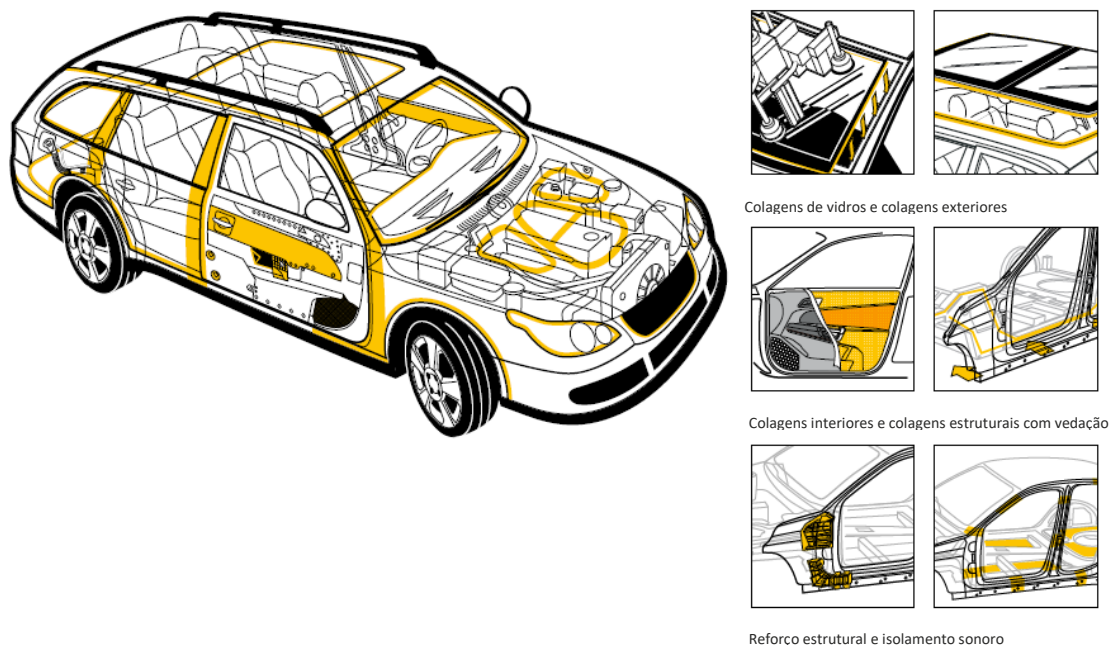


Figura 11 - Ilustração das zonas de utilização de adesivos em automóveis ligeiros (adaptado de [11]).

A fácil implementação deste método de ligação deve-se também à eficiência da automatização deste processo. Para além disso, existem várias geometrias de junta, assim como a diversidade de materiais que podem ser utilizados [12].

2.2 Previsão de resistência

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

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [13], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade de o adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [14] é a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [15], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes de adesivos. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a Técnica do Fecho da Fenda Virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [16]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles o MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF, para as regiões em que não é previsto dano, com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

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

2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão da resistência é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [13], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [17] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidades das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [18]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [15], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, este ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.2.2 Mecânica da fratura

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

lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [8]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [19] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [20]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [21] e por Rice [22] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia à tração e ao corte, G_I ou G_{II} respetivamente, e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [23], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte, e também pelo efeito dos aderentes, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação.

2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [24] e Dugdale [25], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. O MDC passou a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [26]. Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [27]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 12), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos - aproximação local [28], ou podem ser aplicados diretamente entre dois

materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva - aproximação contínua [29].

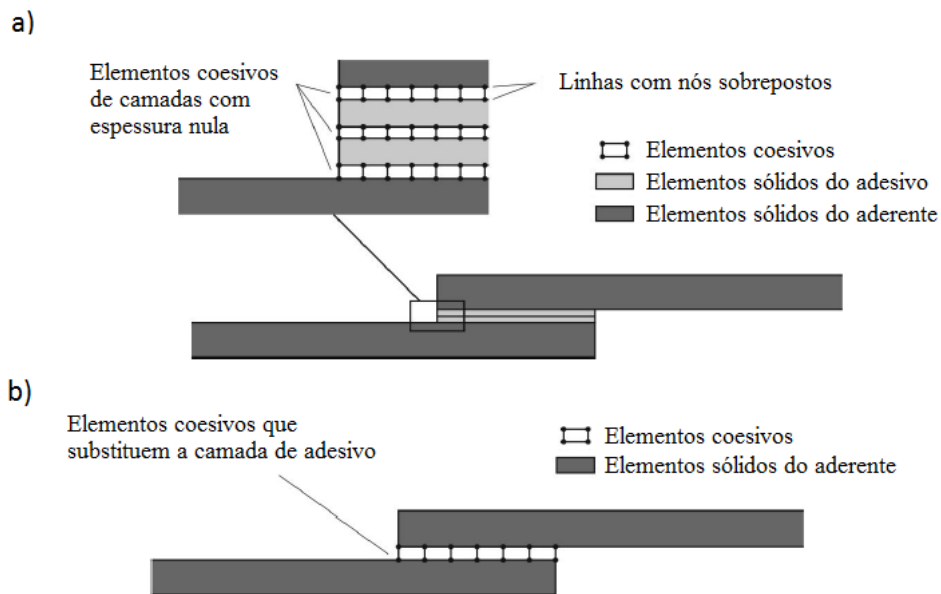


Figura 12 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [30])

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [31]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D, apresenta solicitações mais dinâmicas com uma componente adicional de corte [32].

2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [33] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou

de Khoramishad et al. [34] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [26].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um gênero específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [35]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [36] ou do número de ciclos para análises de fadiga [37, 38]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [39].

Hua et al. [40] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, que levou à redução dos valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais. Chen et al. [41] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes à força máxima exercida sobre a junta, respetivamente) utilizados no

MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das discontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [42]. Belytschko e Black [43], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [44]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda. O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [45].

Campilho et al. [46] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de JSS e junta de sobreposição dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se compararam resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 13). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

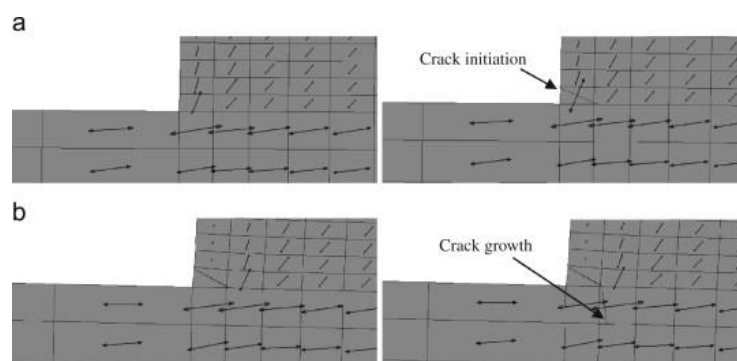


Figura 13 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [46]

2.2.6 Métodos sem malha

Apesar de os métodos sem malha oferecerem algumas vantagens em relação aos MEF em problemas relacionados com a fratura, como por exemplo eliminar a necessidade de realizar nova malha, a sua utilização não foi totalmente explorada para determinar a resistência mecânica de uma junta adesiva. Os diferentes métodos são identificados pela sua formulação, função interpolação ou aproximação e o esquema de integração [47]. Em 2014, Tsai et al. [48] propuseram uma abordagem que combinou o modelo sem malha *symmetric smoothed particle hydrodynamics meshless method* com MDC. Os autores testaram experimentalmente provetes *Double-Cantilever Beam* (DCB) sujeitos a esforços de modo I, modo II e modo misto e compararam os resultados obtidos com os métodos sem malha. Os resultados mostraram que a previsão da resistência mecânica do método sem malha, por uma aproximação da mecânica de meios contínuos, é bastante preciso para o modo I e cargas de modo misto, mostraram que o modo I é dominante. A curva tensão-deformação resultante é muito parecida com as curvas experimentais. O *Radial Point Interpolation Method* (RPIM) foi usado por Bodjana [49] para analisar estruturas híbridas. Este trabalho mostrou que o RPIM é capaz de estimar corretamente o esforço a meio da espessura da camada do adesivo e que as juntas híbridas são mais resistentes que as ligações adesivas e aparafusadas. Recentemente, Mubashar e Ashcroft [50] testaram as capacidades do método sem malha *Smoothed Particle Hydrodynamics* (SPH) implementado no *software* ABAQUS® quando comparado com o MDC implementado no mesmo programa. Os seus resultados mostraram que as curvas de tensão-deformação com o método SPH apresentam grandes oscilações e que a tensão de arrancamento é sobrestimada, enquanto a tensão de corte é subestimada. A curva tensão-deformação também apresenta algumas oscilações e o SPH subestima a tensão crítica em 9%, o que é considerado aceitável. A Figura 14 mostra o modo de propagação de fenda utilizando o método SPH.

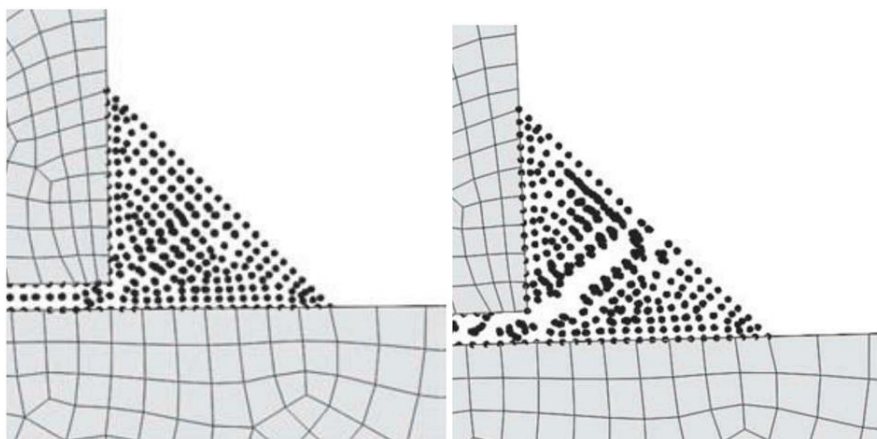


Figura 14 - Propagação de fenda utilizado SPH [50].

2.2.7 Estado da arte aplicada às ligações adesivas

Este capítulo pretende apresentar exemplos representativos do estado da arte referente a ligações adesivas e aos métodos de previsão da resistência da junta. A Tabela 3 expõe alguns artigos com relevância para os temas abordados anteriormente.

Tabela 3 - Estado da arte de ligações adesivas.

Autor	Descrição
Qiu et al., 2016 [51]	Desenvolve uma formulação teórica para descrever a distribuição de corte no adesivo e prever a capacidade de ligação da junta adesiva. Os resultados calculados foram validados recorrendo a modelação com elementos finitos e resultados experimentais, onde diferentes secções da junta foram sujeitas a tensões axiais. A percentagem de sucesso da previsão da resistência da junta através de MEF foi cerca de 98%.
Liu et al., 2018 [52]	Apresenta o efeito do tamanho, curvatura e arestas vivas no processo de descolagem de juntas adesivas. De forma a analisar o desempenho do adesivo, foi utilizado o método da mecânica dos meios contínuos. Os resultados mostram que a curvatura, quando superior a 2000 mm de raio, não tem impacto na resistência da junta. Além disso, os autores realçaram a importância de arestas vivas nos provetes para prever com rigor a resistência real da junta.
Cognard et al., 2010 [53]	Procura o aumento do desempenho das estruturas com ligações adesivas. Inicialmente foram analisadas as concentrações de tensões em juntas cilíndricas com esforços axiais, utilizando o método de elementos finitos e presumindo comportamento linear elástico do material. O uso do MEF mostrou mudanças significativas nas tensões nas camadas interiores da espessura da ligação, especialmente perto das arestas livres dos adesivos.
Goh et al., 2013 [54]	Utiliza MEF em conjunto com o método da mecânica da fratura e ao MDC, na previsão de resistência de uma junta adesiva com diferentes valores de L_0 . Como resultado, em relação aos resultados experimentais, os métodos de previsão foram capazes de prever o resultado da força máxima suportada, em juntas adesivas em sem defeitos e com defeitos controlados. O método da mecânica da fratura foi capaz de prever a força máxima de juntas com defeitos de tamanho superior a 3 mm.

2.3 Juntas adesivas tubulares

As juntas adesivas tubulares são cada vez mais utilizadas na indústria uma vez que este tipo de componente se encontra com bastante facilidade e tem imensas aplicações, como indústrias que recorrem a estruturas tubulares (construção civil), indústria do calçado, canalizações, vasos de pressão e aplicações médias. As ligações adesivas apresentam boas propriedades mecânicas e resistência à corrosão, o que promove a sua utilização também em juntas tubulares. Assim, a previsão e o estudo do comportamento destas estruturas têm-se tornado cada vez mais interessante.

2.3.1 Caracterização e particularidades das juntas tubulares

Apesar dos tubos metálicos serem os mais utilizados na indústria, têm surgido tubos em materiais compósitos (com matriz polimérica) reforçados por fibras, que promovem características mecânicas elevadas e peso consideravelmente inferior. Quando se trata de um material deste tipo, onde a soldadura está fora de questão, a ligação adesiva é preferencial [55].

O tipo de junta adesiva é altamente influenciado pela tensão máxima de corte e arrancamento nas camadas interiores do adesivo. Existem diversos estudos numéricos e analíticos que procuram determinar o estado das tensões nas ligações adesivas[56].

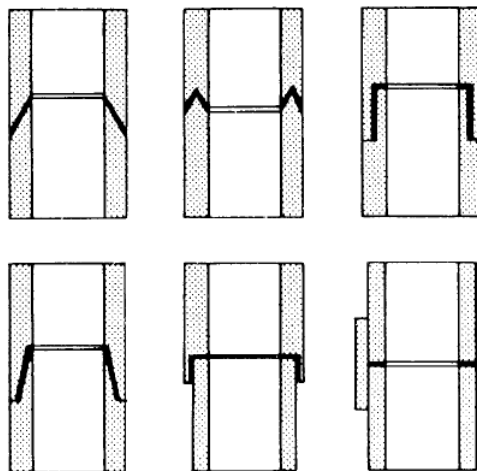


Figura 15- Seis tipos diferentes de juntas tubulares [6].

A Figura 15 representa 6 tipos de ligações diferentes que apesar de necessitarem maquinagem, conferem à junta a melhor capacidade de suportar esforços de clivagem e flexão à junta [6]. No entanto, a geometria mais utilizada para realizar a união de dois componentes tubulares está representado na Figura 16.

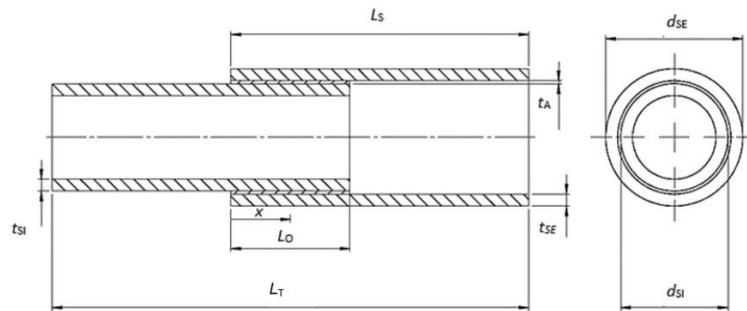


Figura 16 - Geometria e dimensões características de uma junta adesiva tubular [1].

Os parâmetros geométricos assinalados na Figura 16 são:

- Comprimento total da junta adesiva tubular (L_T)
- Comprimento dos substratos (L_S)
- Espessura do substrato interior (t_{SI})
- Espessura do substrato exterior (t_{SE})
- Espessura do adesivo (t_A)
- Diâmetro externo do substrato exterior (d_{SE})
- Diâmetro externo do substrato interior (d_{SI})

Para o fabrico desta geometria de junta recomenda-se maquinar o diâmetro dos tubos até à cota desejada, através de várias passagens para obter alguma precisão e acabamento superficial. Além disso, de forma a suavizar o processo de colagem, é realizado um furo na zona não adesivada do tubo exterior [1]. Este passo, representado na Figura 17, é especialmente importante quando os furos dos tubos não são passantes, uma vez que eliminam pressão no seu interior que causaria mau posicionamento dos aderentes.

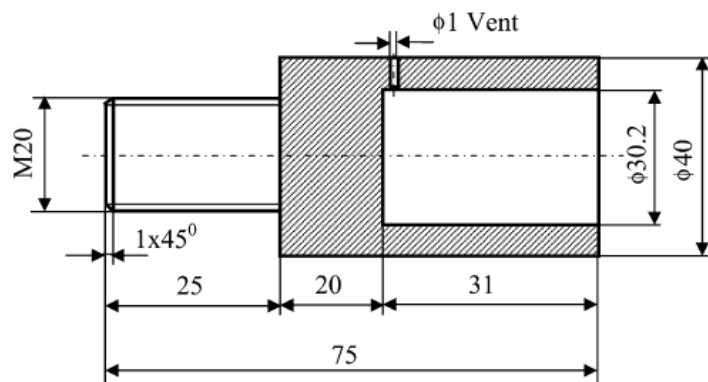


Figura 17- Representação de aderente tubular exterior com furo não passante [57].

2.3.2 Aplicações industriais de juntas tubulares

Ligações adesivas são vastamente utilizadas para juntar componentes tubulares na indústria de manufatur de tubos, como por exemplo na produção de petróleo e

energia ou no tratamento de águas residuais, nos chassis automóveis (aeronaves, carros e autocarros), na engenharia civil e até em estruturas espaciais. A principal razão esta vasta utilização reside no rácio elevado de resistência/peso, resistência à corrosão e capacidade de unir diferentes materiais [1].

2.3.3 Modelação numérica de tubulares

A modelação numérica e previsão de resistência de juntas tubulares pode ser realizada através de *softwares* de modelação, à semelhança do ABAQUS®, que permitem também a análise das tensões nas diferentes fases de carregamento. A junta tubular pode ser modelada numericamente em modelos 2D, para análise de tensões de corte ou arrancamento, ou em modelos 3D, caso se esteja a estudar a torção da junta, por exemplo. No caso dos modelos 2D, como representado na Figura 18 e utilizado no decorrer desta dissertação, são utilizadas com formulações axissimétricas, ou seja, apenas são representados o eixo de rotação e a secção da junta adesiva. Os aderentes 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 por técnicas como a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura ou MEFX, ou com elementos coesivos no caso de modelação por MDC.

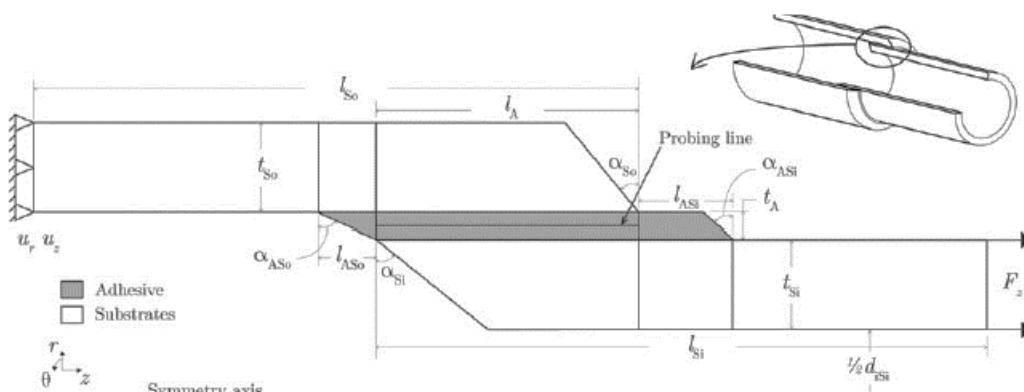


Figura 18 - Modelo axissimétrico 2D da junta adesiva tubular, com os parâmetros geométricos da junta, carga e condições fronteira [2]

Numa análise 3D, os aderentes e adesivo podem ser modelados através de elementos sólidos tridimensionais, como representado na Figura 19. Para modelação de rotura dos adesivos, são utilizados elementos coesivos. Como anteriormente referido, para efeitos de previsão de resistência, a camada de adesivo pode ser modelada através de elementos coesivos (modelação por MDC), utilizando por exemplo o modelo MDC 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 aderentes para simular roturas interlaminares, no caso de aderentes

em material compósito. Este método é abordado em mais detalhe no Subcapítulo 3.1.4. No entanto, através do *software* ABAQUS®, pode também ser utilizado o método MEFX, que é baseado no estabelecimento de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda. Este procedimento pode ser aplicado a todos os domínios do modelo (aderentes e adesivo) ou só ao adesivo.

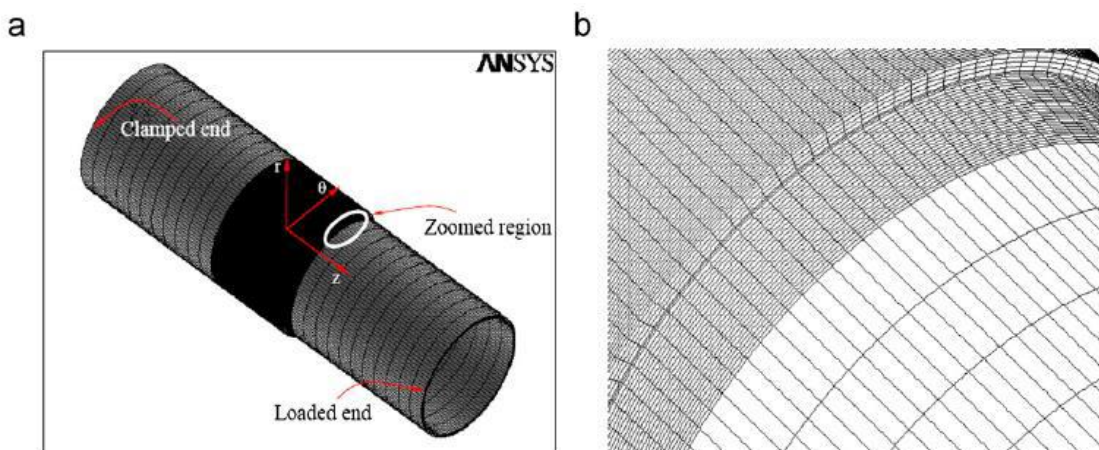


Figura 19 - Modelo de elementos sólidos em 3D (malha de elementos finitos da junta adesiva tubular): a) vista isométrica do modelo completo; b) vista aproximada da região de sobreposição [58].

2.3.4 Estado da arte de juntas adesivas tubulares

O presente subcapítulo apresenta, na Tabela 4, alguns trabalhos realizados no sentido de estudar as juntas tubulares adesivas.

Tabela 4 - Estado da arte relativo às juntas tubulares adesivos e aos métodos de modelação numérica.

Autor	Descrição
Rosas et al., 2021 [59]	O trabalho numérico realizado, através do MDC, visa estudar o desempenho de uma junta adesiva tubular, com aderentes de alumínio unidos pelo adesivo Araldite® 2015, solicitada à tração. Foram estudados diferentes parâmetros geométricos (chanfros e filetes na camada do adesivo). Os resultados das juntas com adição de filetes de adesivos nas extremidades da ligação apresentaram redução significativa nas tensões de corte ($\approx 60\%$), mas que não se traduziu no aumento da resistência da junta devido à plastificação dos aderentes.

-
- Eusébio et al, 2019 [60]
- O principal objetivo foi estabelecer as capacidades de previsão do método MEFX para a resistência de juntas tubulares adesivas sujeitas à tração, com diferentes comprimentos de sobreposição. 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 com adesivos mais dúcteis. O método MEFX mostrou previsões inferiores aos resultados experimentais em adesivos extremamente dúcteis, como é o caso do SikaForce® 7752.
-
- Silva et al.,2021 [61]
- Foi estudada a resistência ao impacto de uma junta tubular, com aderentes de alumínio AW6082-T651 unidos pelo adesivo Araldite® AV138, com o método MDC triangular. A metodologia utilizada neste trabalho consistiu na aplicação de um campo de velocidade numa massa criada artificialmente numa das extremidades da junta para emular a aplicação de uma energia de impacto de 40 J. O aumento do $L_0=10$ para $L_0=20$ mm mostrou influenciar positivamente a resistência da junta em 43,7%. Esta tendência apareceu também na dissipação de energia da junta (U). Por outro, o aumento da espessura dos aderentes não se mostrou relevante.
-
- Ferreira et al., 2019 [62]
- O trabalho numérico aqui apresentado compara o desempenho de três adesivos estruturais inseridos em aderentes tubulares de alumínio, quando sujeitos a esforços de tração. Para análise de tensões de arrancamento e corte é utilizado o MEF, enquanto para prever a resistência da junta é utilizado o MDC. Foram consideradas algumas variações geométricas, como variações do comprimento de sobreposição (L_0) e chanfros nos limites do aderente. Os resultados, comparativamente com os resultados experimentais, mostraram que o MDC prevê o comportamento de adesivos pouco dúcteis, como o Araldite AV138® ou o Araldite® 2015, com erro inferior a 10%, enquanto adesivos dúcteis, como SikaForce® 7752, com erro até 20%. Os chanfros no aderente, tal como o aumento de L_0 , globalmente melhoram a resistência da junta.
-

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Validação da técnica numérica com dados experimentais
- 3.2 Estudo numérico com diferentes materiais e geometrias

3 DESENVOLVIMENTO

Numa fase inicial do capítulo de desenvolvimento são apresentados os resultados experimentais e numéricos obtidos no trabalho de Ferreira [63], para efeitos de validação da técnica numérica utilizada (MDC). Neste trabalho, foi testada a resistência mecânica de juntas tubulares de sobreposição simples a esforços de tração. Depois, numa segunda instância, o trabalho aqui desenvolvido terá como objetivo estudar numericamente a *performance* dos adesivos Araldite®AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite®2015 (adesivo epóxico dúctil) e Sikaforce®7752 (adesivo poliuretano estrutural) sobrepostos em juntas tubulares de alumínio AW 6082-T651, CFRP e aço DIN 55Si7. O valo de L_0 varia entre 10, 20 e 40 mm. No fim, os resultados obtidos serão analisados através das curvas de tensões de corte e arrancamento, propagação de dano, força máxima exercida sobre a junta (P_m) e energia dissipada.

3.1 Validação da técnica numérica com dados experimentais

3.1.1 Descrição da geometria e dos materiais

No presente subcapítulo será exposto e explicado o processo de validação da técnica numérica dos resultados experimentais dos ensaios, realizado por Ferreira [63]. Inicialmente é apresentada a geometria da junta adesiva e os materiais utilizados. Depois, é feita uma análise dos resultados experimentais. Posteriormente é feita uma análise dos resultados obtidos comparativamente com os resultados numéricos, para validação do método utilizado.

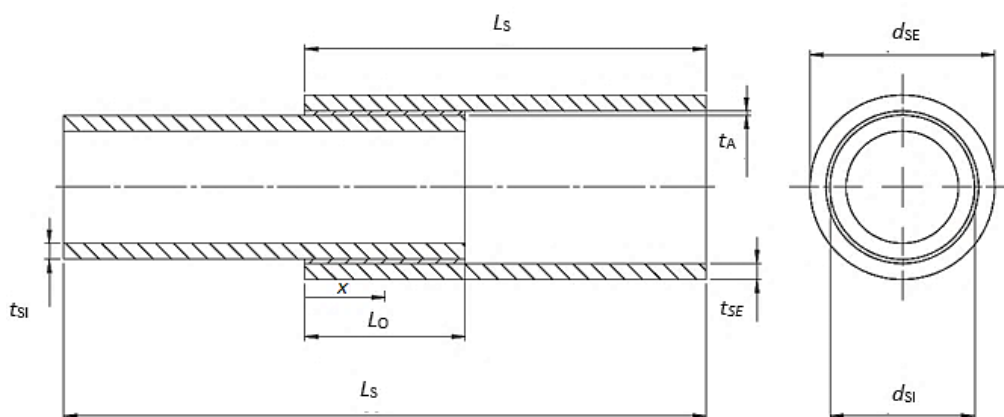


Figura 20 - Geometria da junta [63].

A Figura 20 ilustra a junta tubular de sobreposição simples utilizada na componente prática desta dissertação. Os parâmetros geométricos e as respectivas cotas estão apresentadas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões dos provetes e das juntas (adaptado de [63]).

Descrição	Cotas [mm]	
Comprimento de sobreposição, L_o	20	40
Comprimento dos substratos, L_s	50	60
Comprimento total da junta tubular, L_T	80	80
Diâmetro externo do substrato interior, d_{SI}	20	
Diâmetro externo do substrato exterior, d_{SE}	24,4	
Espessura do substrato interior, t_{SI}	2	
Espessura do substrato exterior, t_{SE}	2	
Espessura do adesivo, t_A	0,2	

3.1.1.1 Aderentes

Os aderentes utilizados na validação foram fabricados em liga de alumínio AW 6082-T651. Este material é uma liga estrutural que, apesar de ter resistência mecânica intermédia, tem a maior resistência da série 6000 e tem uma excelente resistência à corrosão. Como é uma liga relativamente recente e com boas propriedades mecânicas, acaba por substituir a utilização da liga AW 6061 em algumas aplicações. As propriedades desta liga são obtidas através de um processo de têmpera (alívio de tensões através de temperatura e solicitações mecânicas) e de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A adição de uma grande quantidade de manganésio controla o grão da estrutura o que resulta numa liga mais resistente. É difícil produzir chapa fina com formas complexas na extrusão. A superfície de extrusão não é tão suave como outras ligas similares na série 6000 [64].

Campilho et al. [65] caracterizaram esta liga de alumínio em trabalhos anteriores. Os resultados obtidos mostram uma resistência à tração de 324,00±0,16 MPa, módulo de Young de 70,07±0,83 GPa, tensão de cedência à tração de 261,67±7,65 MPa e deformação de rotura à tração de 21,70±4,24%.

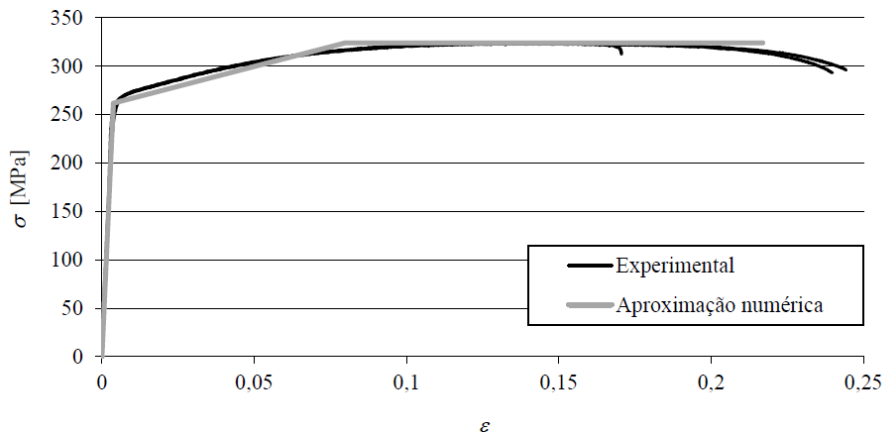


Figura 21 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [61].

A Figura 21 mostra as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) de três provetes da liga AW6082-T651. O ensaio realizado seguiu a norma ASTM-E8M-04.

3.1.1.2 Adesivos

Como referido anteriormente, de forma a promover a junção dos aderentes, foram selecionados três tipos de adesivos: Araldite®AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite®2015 (adesivo epóxico dúctil) e Sikaforce®7752 (adesivo poliuretano estrutural).

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 é combinado com o endurecedor HV 998 (com proporcionalidade mássica de 10:4, respetivamente) de forma a criar uma mistura com excelente resistência mecânica e química. Este sistema epóxico bi-componente é, no entanto, frágil. A sua aplicação é vasta uma vez que este adesivo é adequado para ligar materiais de diferentes famílias. A aplicação é feita utilizando uma espátula [66].

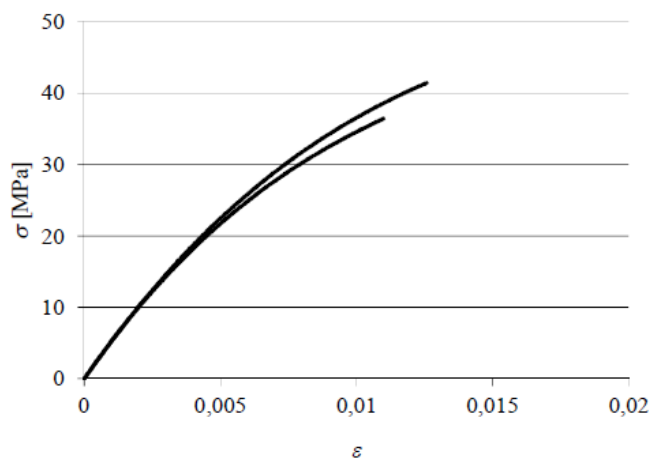


Figura 22 - Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [67].

A Figura 22 mostra as curvas σ - ε de provetes maciços ensaiados experimentalmente à tração. As propriedades mecânicas de fratura mais relevantes do adesivo encontram-se na Tabela 6.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [68].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E [GPa]	$4,89 \pm 0,81$
Coeficiente de Poisson, ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$39,45 \pm 3,18$
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$1,21 \pm 0,10$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$25,1 \pm 0,33$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$30,2 \pm 0,40$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$7,8 \pm 0,7$
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm] ^a	0,20
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm] ^a	0,38

^a valores estimados na referência [68]

^b valor do fabricante

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015, à semelhança do anterior, é um adesivo epóxico estrutural bi-componente. As suas propriedades mecânicas são diferentes: este adesivo tem alguma ductilidade, o que permite uma distribuição de tensões nas extremidades das juntas. Comparativamente ao adesivo Araldite® AV138, este realiza juntas com resistência à tração e corte inferior. A razão de aplicação é 50:50 e a cura é efetuada à temperatura ambiente. Normalmente este adesivo é aplicado por meio de uma pistola e bico de mistura [66].

As curvas σ - ε de provetes ensaiados à tração são dadas na Figura 23. As propriedades mecânicas e fratura mais relevantes deste adesivo podem ser consultadas na Tabela 7.

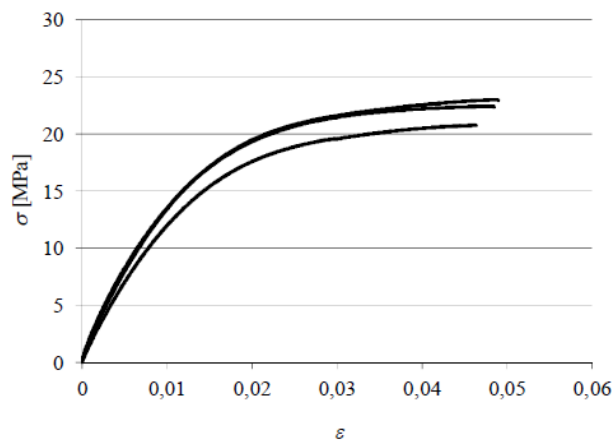


Figura 23 - Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [67].

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [67].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coeficiente de Poisson, ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	$14,60 \pm 1,30$
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	$17,90 \pm 1,80$
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	$43,90 \pm 3,40$
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$

^a valor do fabricante

Após comparar os valores da Tabela 6 com os valores da Tabela 7, conclui-se que a deformação de rotura ao corte do adesivo Araldite® 2015 é quase seis vezes superior à do adesivo Araldite® AV138. No entanto, a tensão de rotura ao corte do adesivo Araldite® AV138 é praticamente o dobro da registada para o adesivo Araldite® 2015.

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano que se combina com o endurecedor FRW L60 com a proporção de 5 para 1, respetivamente. Trata-se de um adesivo dúctil que, comparativamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, apresenta menor resistência ao corte e à tração.

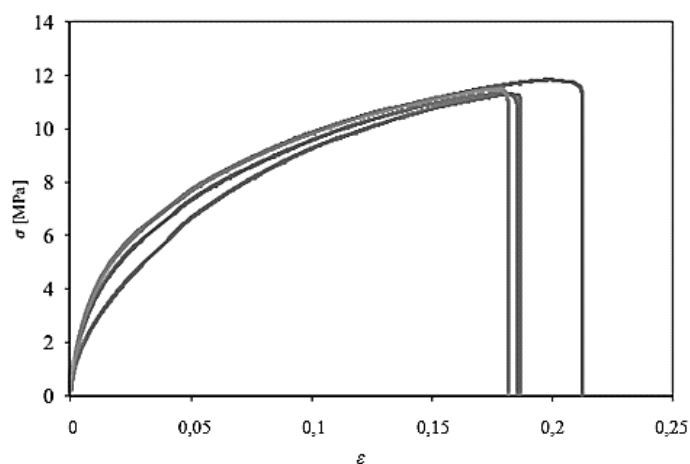


Figura 24 - Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [69].

A Tabela 8 apresenta as propriedades mecânicas e fratura mais relevantes do adesivo. De acordo com o observado na Tabela 8, é expectável que a resistência mecânica das juntas adesivas seja elevada, pois este adesivo combina uma resistência aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. É também possível e provável o efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [70].

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [69].

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

^a valor do fabricante

3.1.2 Resultados experimentais obtidos

No presente subcapítulo são apresentadas as curvas força-deslocamento (P - δ) obtidas experimentalmente. Foram realizados cinco ensaios para cada adesivo, variando o L_0 . O valor P_m atingido em cada ensaio é também apresentado, bem como a força máxima média (P_m Méd). Todas as ruturas foram coesivas. Os dados experimentais são posteriormente utilizados para validar os resultados obtidos pelos métodos numéricos posteriormente.

3.1.2.1 Araldite® AV138

Os resultados obtidos experimentalmente utilizando o adesivo Araldite® AV138 estão representados nas curvas P - δ da Figura 25. Posteriormente, é possível analisar os

valores de P_m obtidos em juntas adesivas tubulares, utilizando este adesivo e para os diferentes valores de L_0 , bem como o desvio padrão associado.

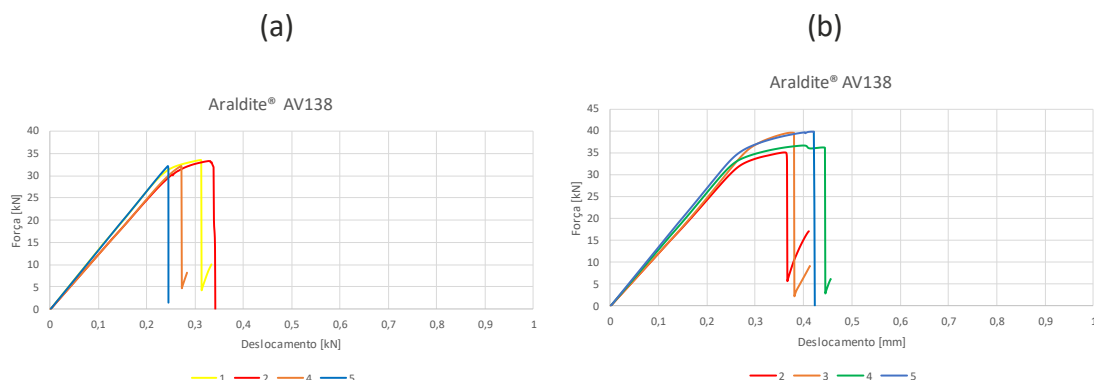


Figura 25 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [63].

As curvas não apresentadas correspondem a provetes considerados inválidos. Verificou-se a ocorrência de plastificação dos substratos nas amostras 1 e 2, com $L_0=20$ mm. Este fenómeno foi justificado pela ocorrência de um escorrimento do adesivo em excesso no interior da junta tubular, o que gerou uma área de contacto superior. A plastificação dos substratos ocorre em todas as amostras com comprimento de sobreposição 40 mm. Foi verificada uma boa repetibilidade das curvas na rigidez elástica, carga máxima e respetivo deslocamento para os casos de estudo. No entanto, a flexibilidade da máquina de ensaios e a amarração dos provetes causaram umas pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas.

Tabela 9 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138 [63].

L_0 [mm]	1	2	3	4	5	P_m Méd	Desvio Padrão/ %	
20	33468,2	33342,3	-	32162,6	32216,9	32797,5	609,7	1,86
40	-	35209,8	39546,9	36770,2	39902,1	37857,2	1951,1	5,15

Como é possível observar na Tabela 9, foram invalidados ensaios que apresentavam discrepâncias demasiado elevadas entre P_m e P_m Méd. Assim foi possível reduzir o desvio padrão percentual relativamente ao respetivo valor médio e obter uma boa repetibilidade das curvas $P-\delta$. O maior desvio padrão percentual fica registado para o $L_0=40$ mm, cerca de 5,15%. O fabrico dos provetes, contribuição dos materiais ou variações nos equipamentos utilizados para realizar os ensaios, poderão ter contribuído para esta diferença.

3.1.2.2 Araldite® 2015

A Figura 26 apresenta as curvas $P-\delta$ dos ensaios experimentais utilizando o adesivo Araldite® 2015. Na Tabela 10 é possível observar os valores de P_m obtidos para o mesmo adesivo, em função de L_0 .

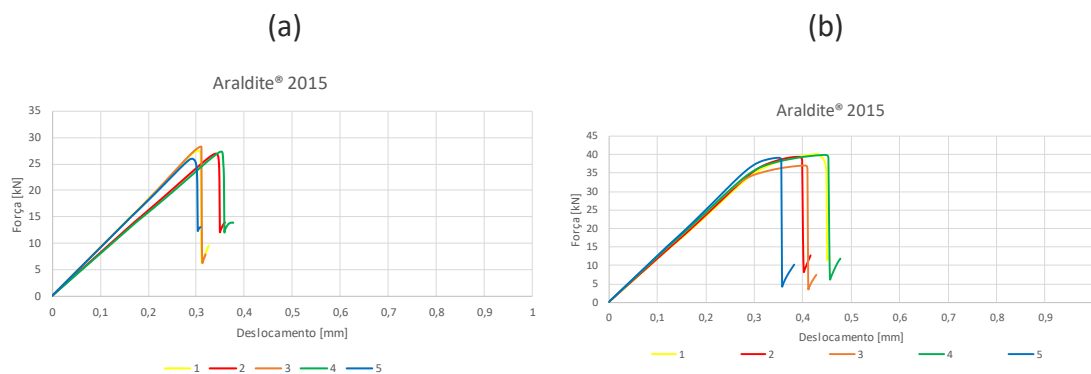


Figura 26 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [63].

Tal como é possível observar no gráfico Figura 26 (a) ($L_0=20$ mm), os provetes apresentam um comportamento linear até à rotura. Para o caso dos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 26 (b)) verifica-se uma plastificação dos substratos. Tal como no caso das juntas adesivas de Araldite® AV138, verificou-se boa repetibilidade das curvas na rigidez elástica, carga máxima e respetivo deslocamento. As pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios, especialmente para $L_0=20$ mm.

Tabela 10 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015 [63].

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

Os resultados obtidos utilizando o adesivo Araldite® 2015 foram aqueles que apresentaram mais coerência em relação à dispersão dos valores obtidos. O desvio padrão percentual foi igual, cerca de 2,84%, nos dois comprimentos de sobreposição analisados. É de notar a estabilidade dos resultados, onde nenhum ensaio foi invalidado e o valor do desvio não é significativo.

3.1.2.3 SikaForce® 7752

À semelhança dos ensaios anteriores, são apresentadas as curvas $P-\delta$ (Figura 27). Na Tabela 11 estão presentes os valores de P_m obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 em função de L_0 .

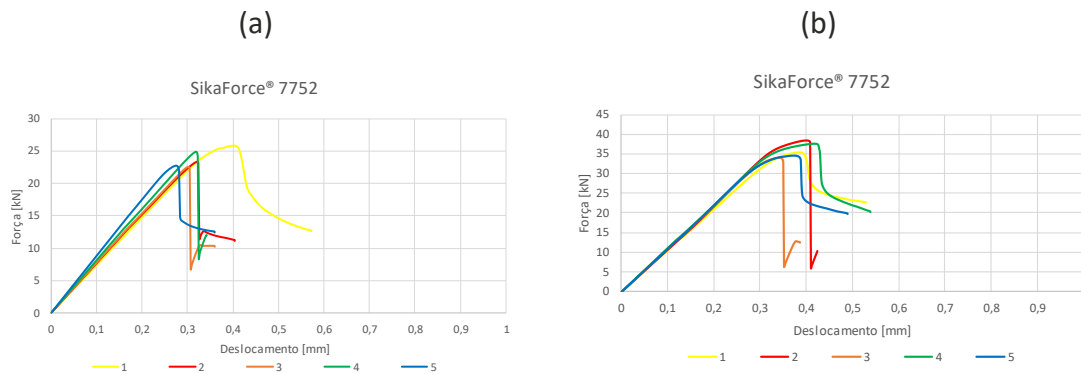


Figura 27 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [63].

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 27 (a)) verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura, exceto na amostra 1 (curva amarela). Esta última apresenta plasticidade dos substratos e um deslocamento até à rotura evidentemente superior em comparação com os restantes provetes. Este comportamento pode ter sido o resultado da deposição de uma espessura de adesivo superior à prevista ou por se ter acumulado adesivo em excesso dentro da junta adesiva.

Nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 27 (b)) observou-se plastificação dos substratos. O provete 3 (curva laranja) apresenta uma deformação até à rotura menor em relação aos outros provetes. Este comportamento pode ter ocorrido devido a uma espessura de adesivo inferior à pretendida.

Apesar das diferenças registadas, em geral assiste-se a uma boa repetibilidade na rigidez elástica das curvas. Como foi apontado para os adesivos anteriores, é notória a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes.

Tabela 11 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 [63].

L_0 [mm]	1	2	3	4	5	P_m Méd	Desvio Padrão/ %
20	25776,6	23329,9	22552,7	24848,6	22774,0	23856,4	1250,6 5,24
40	35247,2	38345,6	33909,8	37634,2	34512,8	35929,9	1749,0 4,87

O adesivo SikaForce® 7752 é, dos três adesivos ensaiados, aquele que apresenta as dispersões mais elevadas: 5,24% para $L_0=20$ mm e 4,87% para $L_0=40$ mm. Contudo, estes não são desvios significativos em relação aos valores individuais dos ensaios relativamente ao respetivo valor médio. As diferenças registadas entre os valores podem ser justificadas pelos mesmos motivos mencionados no caso do Araldite® AV138.

3.1.3 Comparação de resultados

De forma a comparar os resultados experimentais obtidos, a Tabela 12 mostra, para cada adesivo ensaiado, a comparação geral dos valores de P_m de cada valor de L_0 e o aumento percentual de P_m , e a variação percentual da força máxima (ΔP_m). Na Figura 28 está também representada a comparação geral dos valores de P_m para as juntas com os três adesivos, assim como o desvio padrão de cada valor de L_0 . Desta forma é possível observar a dispersão dos valores de P_m individuais de cada provete relativamente à média.

Tabela 12 - P_m Méd (em N) e aumento percentual do mesmo (ΔP_m [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares [63].

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm	ΔP_m [%]
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,4
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,4
SikaForce® 7752	23856,4	35929,9	50,6

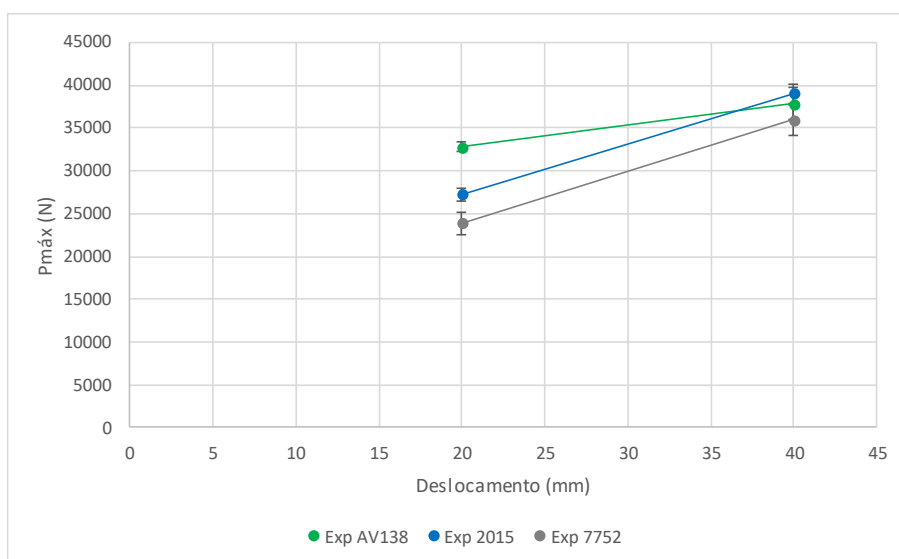


Figura 28 - Variação de P_m com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [63].

A Tabela 13 apresenta descrições e compara o comportamento dos três diferentes adesivos estudados.

Tabela 13 - Descrição e comparação do comportamento das juntas ensaiadas.

Adesivo	Descrição e comparação do comportamento das juntas
Araldite® AV138	Com um L_0 de 20 mm, apresenta ser o adesivo mais capaz (P_m de 32797,5 N). A variação relativamente baixa de P_m com a alteração de L_0 (15,4%) mostra a fragilidade deste adesivo.
Araldite® 2015	Sendo um adesivo mais dúctil, apresenta aumento percentual superior ao adesivo anterior (43,4%). Observou-se uma plastificação dos substratos, fruto das cargas mais elevadas que estes suportaram. Com um L_0 de 40 mm, a junta adesiva apresenta carga máxima de 39066,8 N, ou seja, superior à do Araldite® AV138.
SikaForce® 7752	Apresenta maior resistência percentual (50,6%) entre os comprimentos de sobreposição observados, uma vez que é o adesivo mais dúctil. Contudo, a carga máxima suportada pelos provetes com este adesivo manteve-se abaixo dos adesivos anteriormente descritos.

Através da análise dos dados experimentais obtidos, verificou-se que os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares para ambos os L_0 . Por outro lado, o adesivo SikaForce® 7752 apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência relativamente aos dois adesivos referidos anteriormente. Os adesivos mais dúcteis apresentaram um aumento percentual superior com o aumento de L_0 .

3.1.4 Modelo de dano coesivo triangular

O uso de MDC na análise de juntas adesivas requer uma lei constitutiva para descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de modo a obter resultados mais precisos, em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação [71]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o modelo triangular [72], o linear-parabólico [73], o exponencial [74] e o trapezoidal [29]. Devido a vários fatores, tais como a simplicidade, reduzido número de parâmetros a determinar e resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [75].

A Figura 29 exemplifica uma lei coesiva triangular. No ponto O, o material ainda não está em carga e não há separação. Ao longo da linha OA, o material encontra-se no domínio elástico. No ponto A (com a separação δ^0), a tração coesiva alcança o valor máximo admissível (resistência coesiva ou t^0). A seguir ao ponto A, o material começa a sofrer dano e a rigidez coesiva diminui (amaciamento do material). Num ponto genérico B (com separação δ) entre os pontos A e C, a trajetória do descarregamento é linear em direção ao ponto O. A rigidez coesiva cai assim do valor inicial K para K^δ e a tração admissível desce da resistência coesiva t^0 para o valor atual t . Quando a tração admissível cai para zero no ponto C (que corresponde à extremidade da fenda), a separação é igual a δ^f e ocorre a separação completa do material. De seguida, outra fenda é nucleada ou a ponta da fenda existente avança. Qualquer ponto à frente de C (por exemplo o ponto D) está agora fora da zona coesiva e pertence às superfícies da fenda localizadas atrás da ponta da mesma [76].

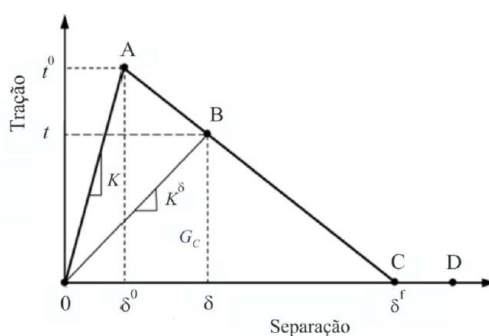


Figura 29 - Lei coesiva triangular [76].

A energia crítica coesiva ou tenacidade à fratura, G_c , que é dada pela área do triângulo, está relacionada com outros dois parâmetros através da relação de área $G_c = t^0 \times \delta^f / 2$. Assim, quaisquer dois dos três parâmetros (por exemplo t^0 e G_c) podem ser escolhidos como entradas para a lei coesiva triangular. Além dos dois parâmetros t^0 e δ^f , outro parâmetro tem de ser definido para descrever completamente a forma da lei coesiva triangular. Este parâmetro pode ser a rigidez coesiva inicial K ou a separação normal característica δ^0 , que corresponde à tração máxima. Estes parâmetros relacionam-se por $\delta^0 = t^0 / K$ [76].

3.1.4.1 Formulação do modelo

O modelo de dano triangular pode ser do tipo 2D ou 3D. No modelo 2D distinguem-se dois modos: o puro e o misto (Figura 30). O modo puro divide-se em modo I, em que a fenda abre por esforços de tração, e em modo II, em que a fenda desliza por esforços de corte [77]. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. No modo misto, os modos puros I e II

atuam simultaneamente, e são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar tração e corte [78].

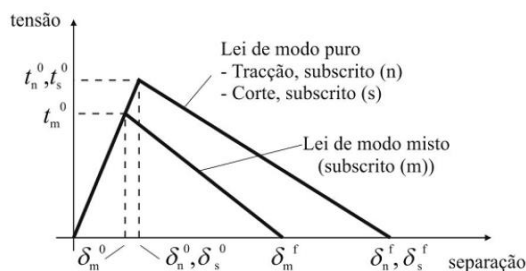


Figura 30 - MDC triangular [68].

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

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

No caso de a formulação ser local, os elementos coesivos são usados para simular fraturas de espessura nula. Nestas condições, os parâmetros de K_{COH} possuem valores extremamente elevados, tendo por finalidade não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [79]. Na formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para as ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (2), onde G é o módulo de elasticidade transversal:

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

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [78]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério da tensão nominal quadrática, expresso pela Equação (3):

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

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. A evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 30), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_{mf} , é prevista por

um critério linear energético, definido pela Equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} [30]:

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

3.1.4.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivo maciço [79, 80]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [81-83]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

3.1.5 Condições da análise numérica

Dado que a análise numérica que se pretende realizar assenta nos princípios do MEF, o *software* escolhido foi o ABAQUS® versão 6.13 (*Dassault Systèmes*). Este *software* permite utilizar o módulo integrado de MDC para prever a resistência das juntas adesivas. A análise de MEF é caracterizada pelo uso de elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) e elementos coesivos axissimétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para a camada de adesivo (Figura 31). O MDC utilizado é o modelo de dano triangular que existe no ABAQUS®. Este modelo descreve adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

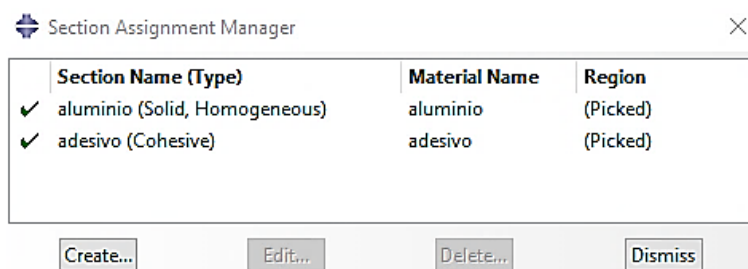


Figura 31 - Atribuição dos respetivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS® [63].

De seguida apresentam-se os procedimentos de pré-processamento da modelação através da referência aos diferentes módulos *software* em que a informação foi introduzida de forma sequencial: *Part*, *Property*, *Assembly*, *Step*, *Interaction*, *Load*, *Mesh*, *Job* e *Visualization* [84].

1º Passo - Part

O primeiro passo consistiu no desenho da junta adesiva, tal como mostra a Figura 32. Os diferentes módulos deste *software* permitem desenhar apenas um corpo, que foi posteriormente dividido em partições para a atribuição das respetivas propriedades. Na camada do adesivo considerou-se apenas um elemento na direção de t_A . A modelação dos aderentes foi efetuada com elementos axissimétricos deformáveis de estado plano de deformação, tal como mencionado anteriormente. Na análise de rotura por MDC considerou-se o comportamento não linear geométrico das juntas.



Figura 32 - Junta adesiva tubular modelada no ABAQUS® [63].

De forma a realizar a simulação numérica, foram construídos modelos virtuais com as dimensões de cada junta testada. De forma a obter as forças, deslocamentos e tensões na camada de adesivo, foi necessário definir o diâmetro da junta tubular. Como a junta tubular é constituída por elementos axissimétricos (ou seja, elementos simétricos em relação ao eixo), o desenho realizado da secção da junta necessita de um eixo de rotação (assinalado a vermelho na Figura 33) para definir o diâmetro. A Figura 33 mostra a construção de uma junta com $L_0=20$ mm.

As secções apresentadas na Figura 34 foram definidas de forma a atribuir diferentes propriedades e diferentes comportamentos, aos diferentes materiais e zonas onde a solitação terá efeitos distintos.

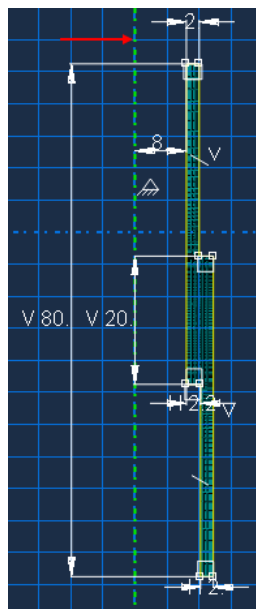


Figura 33 - Desenho 2D de uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm no ABAQUS® [63].



Figura 34 - Diferentes partições existentes no modelo criado no ABAQUS® [63].

2º Passo - *Property*

As propriedades mecânicas das partições anteriormente criadas são atribuídas nesta secção (adesivo e substratos). Também neste módulo são criados os materiais e são atribuídas secções às respetivas partições. Na análise por MDC o alumínio é modelado considerando a rigidez do material e a sua plasticidade de forma a aferir se os tubos cedem antes ou depois da camada adesiva. Por outro lado, o adesivo é modelado pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos, e uma lei de tração-separação triangular que inclui a rigidez da camada adesiva.

3º Passo - *Assembly*

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

4º Passo - *Step*

É nesta secção que os parâmetros de computação da simulação são introduzidos. Na Figura 35 estão descritos os incrementos utilizados e o tamanho dos incrementos. De modo a evitar a paragem da análise por exceder o número de incrementos permitido, foi considerado um valor de 10000 para o número máximo de incrementos a realizar na análise. Considerou-se um tamanho inicial de incremento de 1% do deslocamento aplicado nos modelos. O tamanho máximo do incremento foi também fixo em 1% do deslocamento aplicado. O tamanho mínimo do incremento foi um valor extremamente reduzido para contabilizar a redução de tamanho do incremento que o *software* tem necessidade de aplicar, para evitar os problemas de convergência associados.

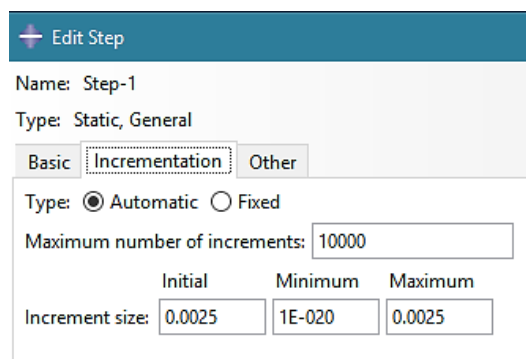


Figura 35 - Definição de incrementos para análise no ABAQUS® [63].

5º Passo - Interaction

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

6º Passo - Load

Para simular o carregamento de tração é necessário aplicar condições fronteira à junta adesiva. Numa das extremidades do substrato é simulado um encastramento, enquanto na outra extremidade é aplicado um deslocamento vertical e uma restrição horizontal à secção. Na Figura 36 é possível visualizar as condições fronteira.

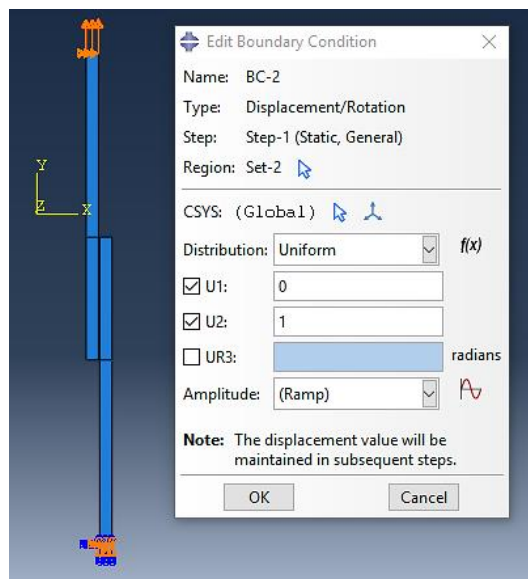


Figura 36 - Representação das condições fronteira na simulação [63].

Tabela 14 - Deslocamentos impostos nos modelos de juntas adesivas tubulares em função do adesivo utilizado e valor de L_0 [63].

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

Na Tabela 14 verifica-se uma discrepância entre os valores de deslocamento necessários a impor às juntas adesivas analisadas. Os mesmos são necessários devido à plastificação que os substratos de alumínio sofreram quando ensaiados com o adesivo Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

7º Passo - *Mesh*

Neste passo de construção do modelo é efetuada a discretização da geometria em elementos finitos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. É possível observar na junta adesiva uma variação das dimensões da malha, sendo que as zonas mais próximas das extremidades da sobreposição estão mais refinadas. Este refinamento adicional visa aumentar a precisão dos resultados uma vez que preveem picos de tensão nessas zonas.

De forma a obter valores com precisão, foram atribuídos valores diferentes ao número de elementos e ao *bias ratio*, em função de L_0 . O objetivo dos diferentes valores atribuídos é a redução do esforço computacional, garantindo simultaneamente a precisão dos resultados em zonas com grandes variações de tensões [84]. De seguida, foi introduzida viscosidade aos elementos coesivos, de forma a evitar problemas de convergência, e foram aplicados os *mesh controls* em função do tipo de elemento. A Figura 37 mostra em detalhe a malha de MEF na zona de sobreposição da junta.

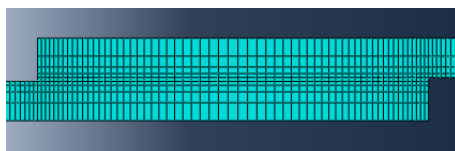


Figura 37 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta com $L_0=20$ mm [63].

8º Passo - *Job*

Nesta etapa dá-se início à simulação da junta. Aqui é inserido o nome e a capacidade computacional que se pretende alocar à simulação. Posteriormente submete-se a simulação e, caso se pretenda, segue-se a evolução da análise. Através do comando “*Results*” avança-se para o passo seguinte.

9º Passo - *Visualization*

A secção *Visualization* tem como objetivo visualizar os resultados obtidos para a junta adesiva. Na Figura 38 é possível observar uma junta adesiva tubular após rotura completa da camada de adesivo. Depois de terminada a simulação, procede-se à análise dos resultados (curvas $P-\delta$). Estes resultados são obtidos através da criação de dados XY: somam-se todas as reações do encastramento e são retirados os valores do deslocamento para criar as curvas $P-\delta$.

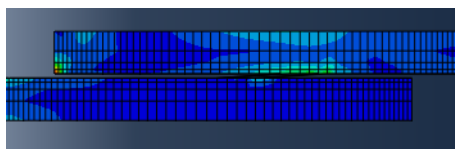


Figura 38 - Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS®

3.1.6 Previsão da resistência por MDC

Neste capítulo é feita a comparação dos resultados dos ensaios experimentais com as previsões de P_m pelos MDC, de forma a efetuar a respectiva validação das propriedades obtidas nas análises numéricas. Segue-se a apresentação das curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC (Figura 39, Figura 40 e Figura 41, para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

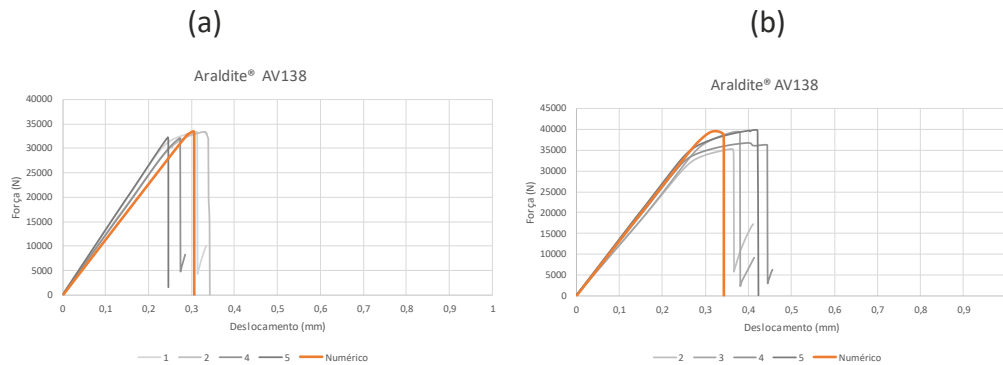


Figura 39 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [63].

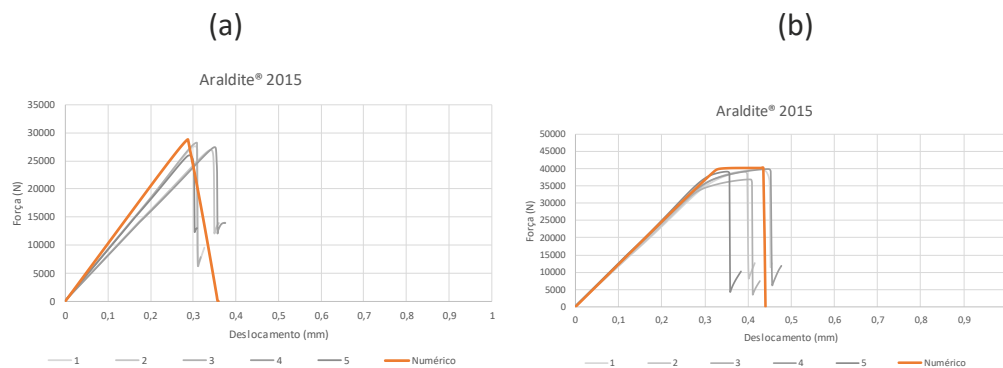


Figura 40 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [63].

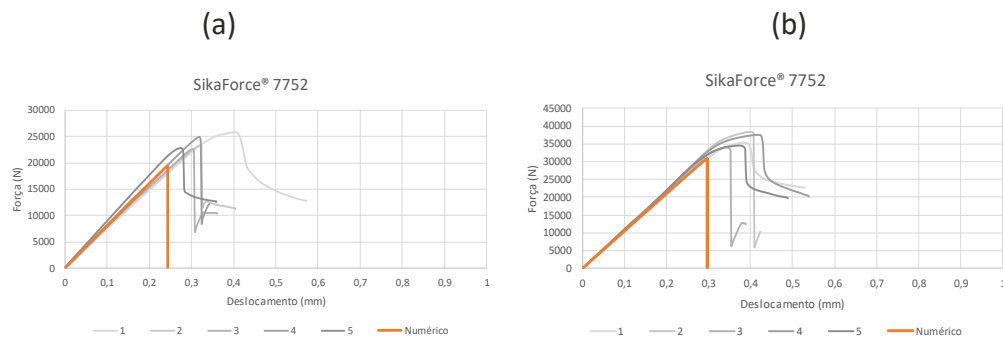


Figura 41 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [63]

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas com o Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 39 e Figura 40, respetivamente), em relação à P_m , rigidez elástica e deslocamento de rotura [85]. Para o adesivo SikaForce® 7752, uma vez que é bastante dúctil, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais [66]. Por esta razão, os resultados experimentais (P_m e deslocamento) são superiores aos numéricos.

3.1.7 Discussão dos resultados obtidos

O adesivo Araldite® AV138 mostrou ter resistência superior relativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752 (Tabela 15). Esta diferença é possível observar para um $L_0=20$ mm, cujo $P_m \approx 33$ kN. Com o aumento de L_0 (até 40 mm), o adesivo Araldite® 2015 passa a apresentar um comportamento superior ao do Araldite® AV138 devido à plastificação que ocorre antes da rotura. Desta forma é possível que adesivos dúcteis e frágeis apresentem uma resistência similar.

Tabela 15 - Valores de P_m [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0 [63].

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

O Araldite® AV138 permite um valor mais elevado de P_m do que os restantes adesivos para $L_0=20$ mm, mas a ductilidade característica do Araldite® 2015 permitiu um aumento percentual de 43,4% e, como tal, um aumento significativo de P_m , superando o P_m do Araldite® AV138. O SikaForce® 7752 combina uma alta resistência e ductilidade, e a rotura ocorre em condições que se assemelham à plastificação generalizada até grandes valores de L_0 [86]. As juntas com este adesivo apresentaram-se como sendo as menos resistentes, uma vez que tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ mm, P_m foi sempre inferior aos outros adesivos. Por outro lado, uma vez que se trata de um adesivo extremamente dúctil, o elevado aumento percentual (50,6%) permitiu uma grande subida de P_m , aproximando-o dos restantes adesivos para $L_0=40$ mm.

Conclui-se então que o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752 são os adesivos mais dúcteis, ou seja, os que apresentam aumentos percentuais mais elevados entre $L_0=20$ mm e 40 mm. Este comportamento provoca um aumento de P_m , o que origina uma melhoria do seu comportamento mecânico. Uma vez que o Araldite® AV138 é um adesivo frágil, a sua capacidade de plastificação é bastante limitada. Por esta razão, o seu aumento percentual foi de apenas 15,4%. Tal facto induziu uma rotura das juntas praticamente no momento em que as tensões nas extremidades atingem o valor limite.

A rigidez, resistência e a ductilidade são características dos adesivos que influenciam diretamente os resultados dos ensaios das juntas adesivas. O módulo de elasticidade (E) dos adesivos está intimamente relacionado com a sua rigidez e influencia a distribuição das tensões. Assim, um adesivo com menor valor de E tem uma distribuição de tensões mais uniforme [3].

No que diz respeito às tensões de arrancamento (σ_y), na extremidade interior da ligação registam-se picos de compressão [87]. Esta ocorrência deve-se ao carregamento simétrico nas juntas, que evita a deflexão transversal do substrato interior [77, 88]. Com isto ocorre uma redução das tensões de pico σ_y para todos os valores de L_0 [89]. Na região central da ligação os valores das tensões σ_y são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da sobreposição com o incremento de L_0 .

No que diz respeito ao perfil de tensões de corte (τ_{xy}) verificam-se picos de tensões de maior magnitude na extremidade exterior, enquanto na extremidade oposta os picos são menos preponderantes. Isto é decorrente da solicitação a que o substrato intermédio é sujeito, que se traduz na indução de cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$ [90].

Dos três adesivos ensaiados, o Araldite® AV138 é aquele que apresenta maior valor de E . Por este motivo é que este adesivo apresenta os maiores picos de concentração de tensões. Este comportamento é mais evidente para valores de L_0 mais elevados. Os perfis das tensões σ_y e τ_{xy} tornam-se mais constantes com a redução de L_0 , o que torna as sobreposições menores mais dependentes da resistência do adesivo. Um adesivo frágil sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona de ligação, enquanto os adesivos dúcteis permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, enquanto que o interior da zona de ligação aumenta a sua contribuição para a resistência da junta [91].

Com isto é possível concluir que o adesivo Araldite® AV138 é o que confere à junta adesiva tubular a maior resistência mecânica. Por outro lado, trata-se de um adesivo frágil, ou seja, à semelhança dos gradientes de tensões σ_y , verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas. A fratura ocorre no momento em que é atingida τ_f e também devido à capacidade de

plastificação quase nula destes adesivos [92]. O adesivo Araldite® 2015, devido à menor rigidez, apresenta picos de tensões inferiores ao Araldite® AV138. Para além disto, a ductilidade característica deste adesivo permitiu uma distribuição mais uniforme das tensões por toda a zona de sobreposição. O SikaForce® 7752 mostrou ser o adesivo menos resistente dos três. Foi possível constatar uma boa uniformidade na distribuição de tensões, mais óbvia para valores de L_0 inferiores (20 mm). Os picos de tensão gerados são reduzidos quando comparados com os dos outros adesivos, o que é benéfico à ligação adesiva, pois reduz a probabilidade da mesma sofrer uma rutura prematura (desde que a carga aplicada esteja dentro dos limites de resistência do material).

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

Neste subcapítulo pretende-se aferir a validade dos resultados numéricos de P_m obtidos pela lei coesiva triangular, a partir da sua comparação com resultados experimentais. A Figura 42 representa os valores experimentais de P_m em função de L_0 e as previsões numéricas.

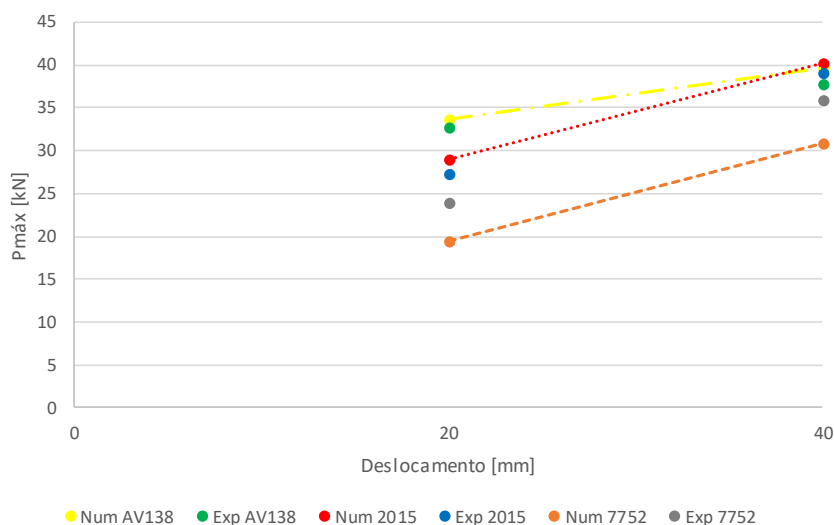


Figura 42 - P_m em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [63].

A Tabela 16 mostra a comparação entre os valores experimentais e numéricos para os diferentes L_0 dos três adesivos analisados.

Tabela 16 - Valores de P_m [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa [63]

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

A Figura 42 e a Tabela 16 demonstram que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a P_m são muito próximos para as juntas adesivas tubulares com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta as menores diferenças relativas entre os resultados experimentais e numéricos. Para $L_0=20$ mm a diferença relativa foi de 2,4% e, para $L_0=40$ mm, de 4,7%. Os valores numéricos são ligeiramente superiores aos experimentais, contudo é uma diferença muito reduzida e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

No caso do adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diferença percentual entre os resultados de P_m experimentais e numéricos de 6,1% para $L_0=20$ mm, com os valores obtidos pelo MDC superiores aos experimentais. Esta discrepância é aceitável pois é, muito reduzida, uma vez que P_m experimental ≈ 27 kN e P_m numérico ≈ 29 kN. Esta percentagem torna-se ainda mais reduzida para $L_0=40$ mm (2,9%). Conclui-se que, tal como sucedeu com o Araldite® AV138, e apesar das pequenas diferenças observadas, os valores obtidos pelo MDC são adequados.

No caso das juntas com o adesivo SikaForce® 7752, os valores de P_m obtidos pelo método numérico são bastante inferiores. Isto acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões abaixo do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [67]. Contudo, alguns trabalhos sobre delaminação de materiais compósitos mostraram que leis coesivas pouco adequadas para modelar um determinado material ainda permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento [93]. A diferença entre os valores experimentais e do MDC para o SikaForce® 7752 é de 18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3 para $L_0=40$ mm, com os valores experimentais superiores aos numéricos. Portanto, tendo em conta os fatores envolvidos, aceitam-se os valores obtidos numericamente, apesar da respetiva dispersão de valores.

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

3.2 Estudo numérico com diferentes materiais e geometrias

3.2.1 Geometria da junta

Os aderentes das juntas estudadas apresentam ter forma cilíndrica e têm apenas uma variação geométrica, o L_O . Este parâmetro toma o valor de 10 mm, 20 mm e 40 mm. Uma vez que o comprimento da junta adesiva se manteve constante, o comprimento dos substratos variou em função do L_O . Os restantes parâmetros permaneceram inalterados e as suas dimensões podem ser consultadas na Tabela 17.

Tabela 17 - Dimensões das juntas tubulares ensaiadas.

Descrição	Cotas [mm]		
Comprimento de sobreposição, L_O	10	20	40
Comprimento dos substratos, L_S	45	50	60
Comprimento total da junta tubular, L_T	80		
Diâmetro externo do substrato interior, d_{SI}	20		
Diâmetro externo do substrato exterior, d_{SE}	24,4		
Espessura do substrato interior, t_{SI}	2		
Espessura do substrato exterior, t_{SE}	2		
Espessura do adesivo, t_A	0,2		

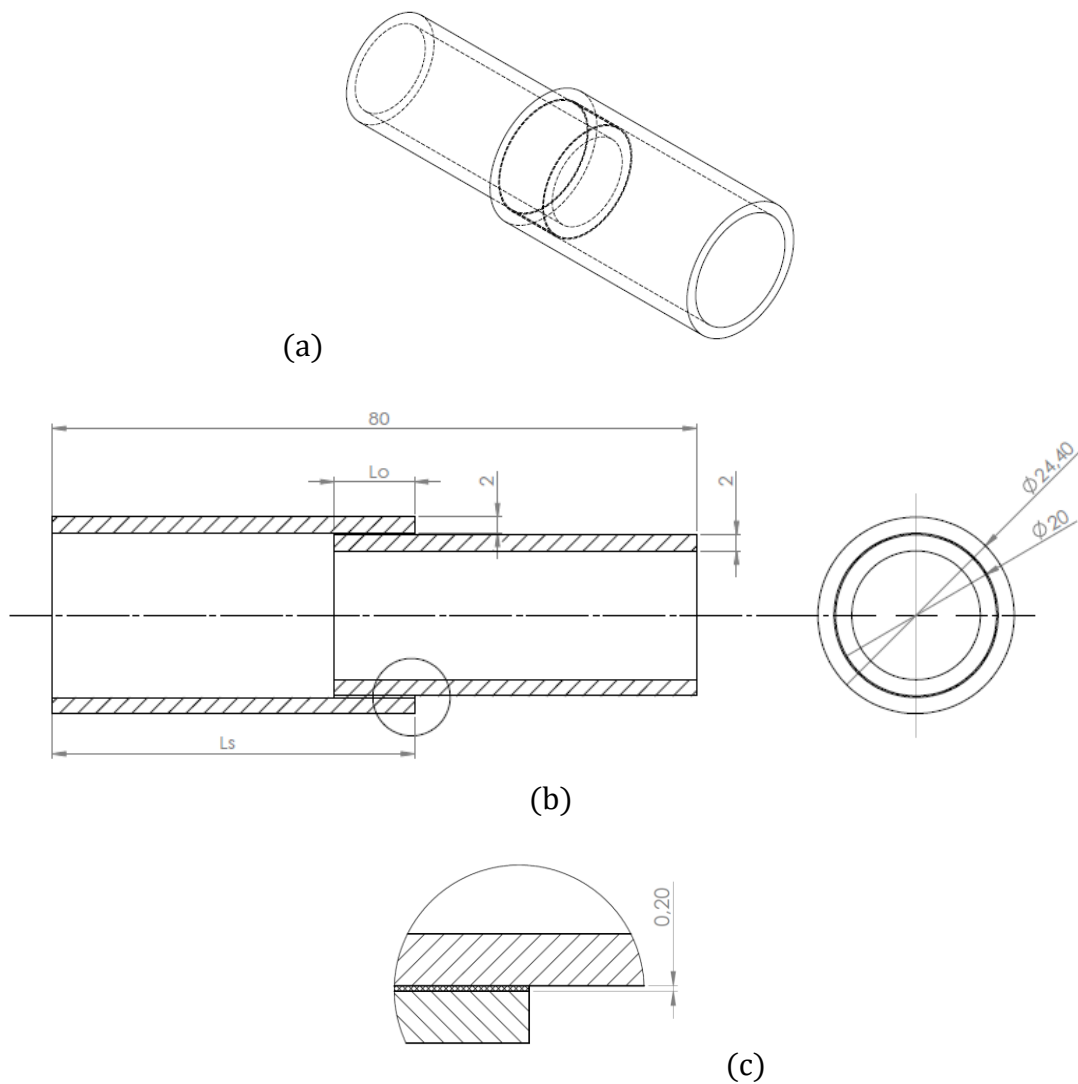


Figura 43 - Representação da geometria da junta: (a) representa a vista isométrica, (b) apresenta a vista de corte e (c) o detalhe da sobreposição. Os parâmetros L_o e L_s variam de acordo com a Tabela 17.

3.2.2 Caracterização dos diferentes aderentes

De acordo com o mencionado na introdução do Capítulo 3, a segunda instância da análise numérica aqui realizada será focada no desempenho de diferentes adesivos em juntas tubulares de CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7. A liga de alumínio foi caracterizada na descrição do trabalho de Ferreira [63], apresentada no subcapítulo 3.1.1.1.

3.2.2.1 CFRP

A sigla CFRP tem o significado de *Carbon fiber reinforced polymer*, ou seja, polímero com reforço de fibra de carbono. Este material compósito é obtido através da sobreposição de pré-impregnado SEAL® Texipreg HS 160 RM, que consiste numa

matriz de resina epóxico reforçada com fibra de carbono unidirecional. Esta combinação confere ao aderente alta resistência mecânica e rigidez elevada. Este pré-impregnado é um material com diversas aplicações de alto desempenho no âmbito da indústria aeronáutica. As propriedades elásticas do CFRP foram obtidas em estudos anteriores [79] e estão apresentadas na Tabela 18.

Tabela 18 - Propriedades elásticas de uma camada unidirecional de CFRP [79].

E_1 [MPa]	E_2 [MPa]	E_3 [MPa]	ν_{12}	ν_{13}	ν_{23}	G_{12} [MPa]	G_{13} [MPa]	G_{23} [MPa]
109000	8819	8819	0,342	0,342	0,38	4315	4315	3200

3.2.2.2 Aço DIN 55Si7

O aço DIN 55Si7 é um material de alta resistência que garante que não existe deformação plástica dos aderentes durante o ensaio. Este aspeto é relevante porque torna possível comparar o desempenho dos diferentes adesivos sem interferência da plastificação ou rotura dos aderentes. As propriedades deste material já foram estudadas anteriormente [94] e apresentam-se na Tabela 19.

Tabela 19 - Propriedades do substrato aço DIN 55Si7 [94].

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

3.2.3 Análise de tensões

As juntas tubulares são inicialmente analisadas através da comparação dos resultados das tensões σ_y e τ_{xy} ao longo da camada de adesivo. No presente subcapítulo é feita a comparação destas tensões no meio da espessura do adesivo. As distribuições de tensões são normalizadas pela média de todos os valores registados ao longo de L_0 ($\tau_{méd}$). Assim, o valor da ordenada do gráfico encontra-se representado entre 0 e 1, o que facilita a comparação entre todas as juntas estudadas.

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

As figuras que se seguem representam as curvas de distribuição de tensões σ_y dos provetes analisados, considerando as variações que se pretendem estudar: materiais dos aderentes, adesivos utilizados e L_0 . De forma a garantir uma análise clara e objetiva, foram construídos gráficos $\sigma_y/\tau_{méd}-x/L_0$ para cada uma das variações.

A magnitude das tensões σ_y mostra ser inferior às tensões τ_{xy} em toda a camada do adesivo, com a exceção das extremidades, onde é possível observar singularidades devido à geometria da junta [95, 96]. A curvatura da junta gera na zona próxima dos picos de tração tensões de compressão, enquanto nas zonas das extremidades se observam concentrações de tensões de tração. A deformação transversal surge devido ao descentramento da carga aplicada, que causa um momento fletor.

Na região central da sobreposição as tensões σ_y são aproximadamente nulas. A distribuição de tensões σ_y observadas na Figura 44, Figura 45 e Figura 46 mostra uma tendência crescente das tensões máximas com o aumento de x/L_0 , onde existe um aumento da rigidez da junta adesiva. O aumento da rigidez provoca um aumento da capacidade de resistência a solicitações (maior capacidade de absorver energia), o que aumenta as tensões instaladas. Também é possível observar que em todos os resultados há uma diminuição da magnitude do pico de tensão σ_y instalado em cada extremidade da junta ($\Delta\sigma_y$). O valor percentual de $\Delta\sigma_y$ é calculado pela diferença entre o pico de tensão σ_y presente na região $x/L_0=0$ e o pico de tensão σ_y em $x/L_0=1$, relativamente ao valor superior tensão σ_y na região $x/L_0=0$. Esta diminuição deve-se à posição geográfica da secção da junta relativamente ao aderente tubular interior e exterior: pelo facto de $x/L_0=0$ representar graficamente a posição da junta adesiva onde a área da secção é obtida apenas através do diâmetro do tubo interior, a concentração de tensões toma um valor superior. Quando $x/L_0=1$ a área da secção transversal à junta é superior porque o diâmetro do tubo exterior é superior. A secção com área superior terá, naturalmente, picos de tensões inferiores.

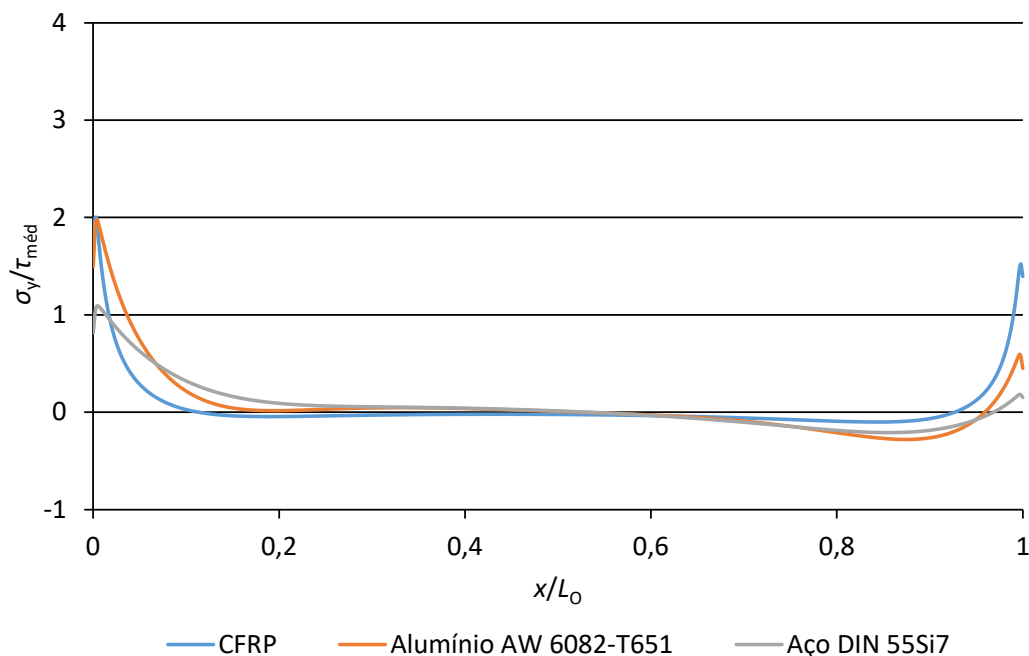


Figura 44 - Distribuição das tensões de $\sigma_y/\tau_{méd}$ em função do material dos aderentes: CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7.

De forma a estudar a influência dos materiais de aderente nas juntas, foram comparados resultados de juntas adesivas com L_0 de 20 mm e adesivo Araldite® 2015 em aderentes de CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7. O resultado pode ser observado na Figura 44. Pela análise dos dados das curvas apresentadas na figura, é possível perceber que o valor máximo de $\sigma_y/\tau_{méd} \approx 2,00$ foi registado na singularidade de uma das extremidades de CFRP. Como E_2 do CRPF é superior ao E do alumínio, o pico de tensões σ_y foi superior. Na mesma região foi registado o segundo maior pico de tensão pelo aderente de alumínio, com valor máximo de $\sigma_y/\tau_{méd} \approx 1,98$. Como o aço é o aderente que apresenta o maior valor E , o gradiente de deformações expectável será inferior aos restantes. Assim, o valor máximo registado por este aderente foi cerca de $\sigma_y/\tau_{méd} \approx 1,09$. O aderente que apresentou $\Delta\sigma_y$ menor foi o CFRP com uma perda percentual de 24%, e o maior foi o aço DIN 55Si7 com 83%. Os valores das tensões $\sigma_y/\tau_{méd}$ em cada extremidade e a $\Delta\sigma_y$ de cada aderente apresentam-se na Tabela 20.

Tabela 20 - Variação de $\sigma_y/\tau_{méd}$ nas diferentes extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes materiais aderentes.

	CFRP	Alumínio 6082-T651	Aço DIN 55Si7
$\sigma_y/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 0$	2,00	1,98	1,09
$\sigma_y/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 1$	1,52	0,59	0,18
$\Delta\sigma_y$	24%	70%	83%

De forma a perceber qual a magnitude da deformação da junta quando solicitada a esforços de arrancamento em diferentes valores de L_0 , a Figura 45 mostra a distribuição das tensões σ_y das juntas adesivas de CFRP, unidas com o adesivo Araldite® 2015, onde o parâmetro L_0 tomou a dimensão de 10, 20 e 40 mm.

A Figura 45 mostra uma tendência crescente das tensões de pico com o aumento de L_0 . Tal como mencionado na introdução do subcapítulo, o aumento de L_0 causa um aumento da rigidez da junta adesiva e, por este motivo, a junta adquire uma maior capacidade de absorção da energia que, conseqüentemente, traduz um aumento de tensões instaladas [63]. Os picos de concentração de tensões σ_y encontram-se, mais uma vez, nas extremidades da junta adesiva, para $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. A deformação transversal e a curvatura da junta geram tensões de tração mais significativas nestas regiões. O valor máximo foi obtido na curva do provete com $L_0=40$ mm, $\sigma_y/\tau_{méd} \approx 3,08$, na extremidade correspondente a $x/L_0=0$ (região onde, à semelhança dos dados analisados na comparação de aderentes, corresponde à secção mais reduzida da junta). A influência da área da secção nas extremidades do adesivo mostrou ser menor comparativamente à influência das propriedades dos aderentes. Neste caso $\Delta\sigma_y$

apresenta o valor máximo de 32% para $L_0 = 40$ mm e um valor mínimo de 14% para $L_0 = 10$ mm. A $\Delta\sigma_y$ mostrou uma tendência crescente com o aumento de L_0 (Tabela 21).

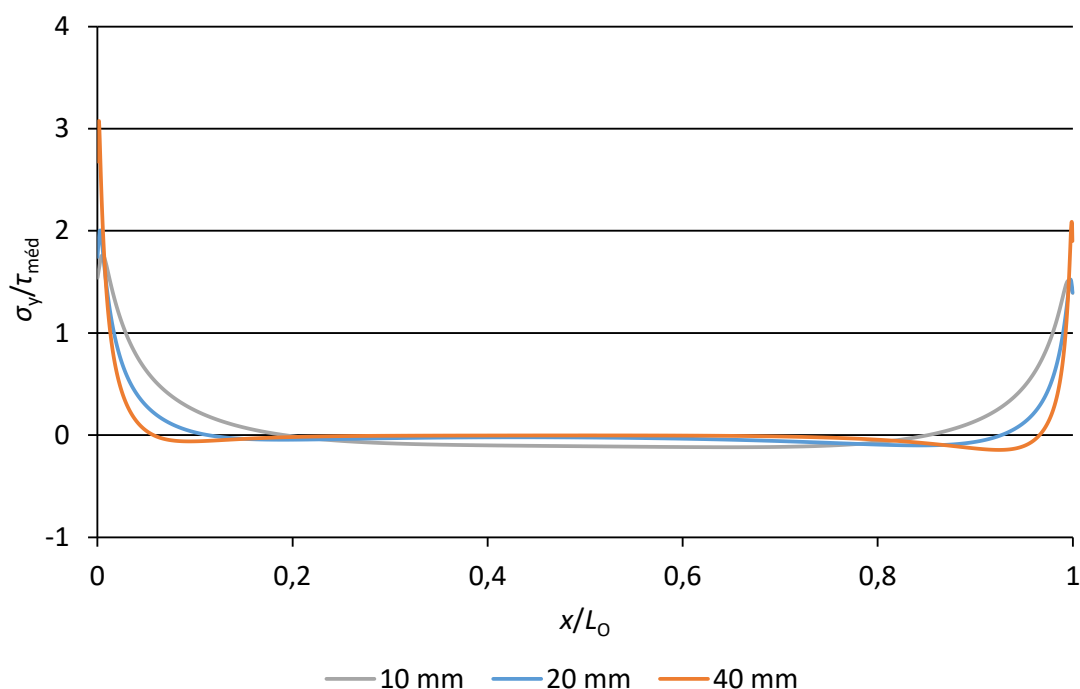


Figura 45 - Distribuição das tensões de $\sigma_y/\tau_{méd}$ em função do L_0 : 10, 20 e 40 mm.

Tabela 21 - Variação de $\sigma_y/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes L_0 .

	$L_0=10$ mm	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
$\sigma_y/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 0$	1,76	2,00	3,08
$\sigma_y/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 1$	1,51	1,52	2,09
$\Delta\sigma_y$	14%	24%	32%

A Figura 46 pretende estudar a influência do adesivo numa distribuição de tensões σ_y . O estudo do comportamento da junta sujeita a tensões σ_y surge com a comparação do resultado das juntas tubulares de CFRP com L_0 de 20 mm, unidas pelo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. As curvas da Figura 46 mostram picos de tensão σ_y superiores no adesivo Araldite® AV138 comparativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752. Esta magnitude de picos prende-se no facto de este adesivo possuir rigidez elástica elevada, o que resulta em concentração de tensões mais elevadas nas extremidades. Por outro lado, o adesivo SikaForce® 7752 é o que apresenta gradientes menos elevados de $\sigma_y/\tau_{méd}$. Estes resultados são coerentes uma vez que este adesivo é o que apresenta menor rigidez dos três adesivos estudados. A Tabela 22 quantifica os resultados obtidos. O adesivo Araldite® AV138 apresentou $\sigma_y/\tau_{méd} = 2,92$ enquanto o

SikaForce® 7752 apenas $\sigma_y/\tau_{méd} = 1,07$. O $\Delta\sigma_y$ mostrou-se consistente com a diminuição da rigidez dos adesivos.

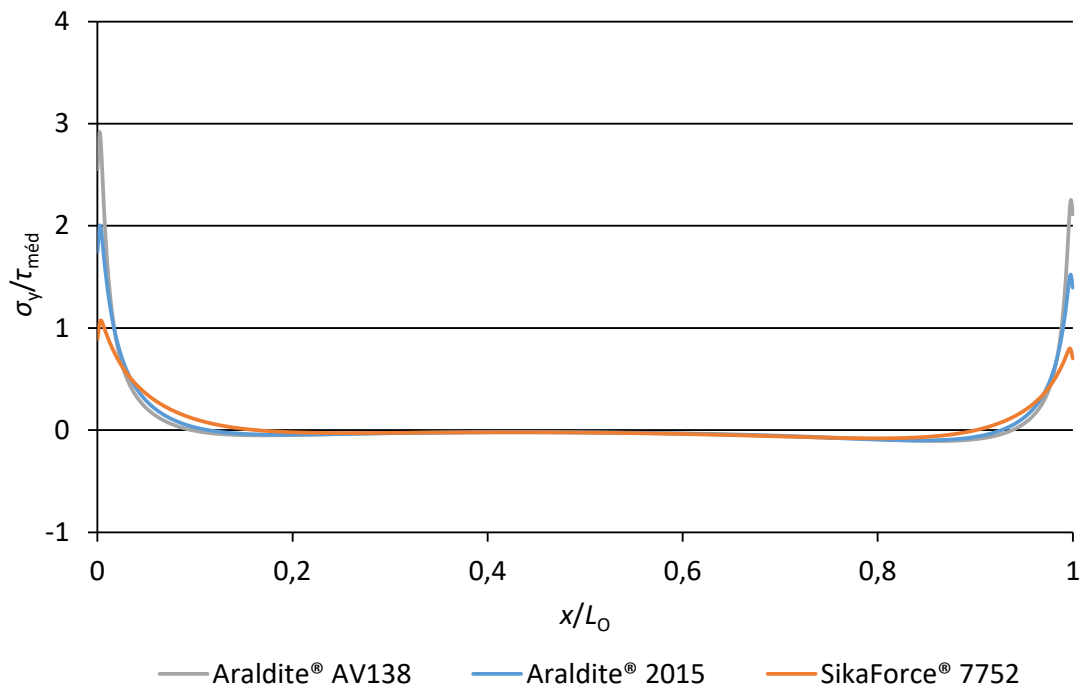


Figura 46 - Distribuição das tensões de $\sigma_y/\tau_{méd}$ em função dos adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

Tabela 22 - Variação de $\sigma_y/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes adesivos ensaiados.

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
$\sigma_y/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 0$	2,92	2,00	1,07
$\sigma_y/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 1$	2,25	1,52	0,80
$\Delta\sigma_y$	23%	24%	26%

3.2.3.2 Tensões de corte

As figuras que se seguem representam as curvas de distribuição de tensões τ_{xy} dos provetes analisados, à semelhança da análise feita às tensões σ_y . De um modo geral, a distribuição de tensões τ_{xy} mostram-se reduzidas na zona central do L_0 e atingem valores máximos próximo das extremidades da sobreposição. Estes picos de tensões surgem devido à existência de deformação diferencial dos tubos ao longo da sobreposição. A deformação diferencial é nula na sua extremidade livre e aumenta progressivamente até à outra extremidade [17, 92]. Na zona central da sobreposição, apesar de estes efeitos serem anulados, dá-se o desenvolvimento de tensões τ_{xy} devido ao esforço de tração aplicado na junta.

Os resultados obtidos e apresentados de seguida foram construídos com o mesmo princípio utilizado para a descrição das tensões σ_y : fixação de duas das três variáveis da junta e comparação dos três possíveis resultados da terceira variável. A diminuição da magnitude do pico de tensão τ_{xy} instalado em cada extremidade da junta ($\Delta\tau_{xy}$) foi também verificado e analisado para cada caso de estudo. O valor $\Delta\tau_{xy}$ é calculado pela diferença entre o pico de tensão τ_{xy} presente na região $x/L_0=0$ e o pico de tensão τ_{xy} em $x/L_0=1$, relativamente ao valor superior tensão τ_{xy} na região $x/L_0=0$.

Assim, a influência dos materiais de aderente nas tensões τ_{xy} está apresentada na Figura 47, onde foram comparados resultados de juntas adesivas com L_0 de 20 mm e adesivo Araldite® 2015 em aderentes de CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7.

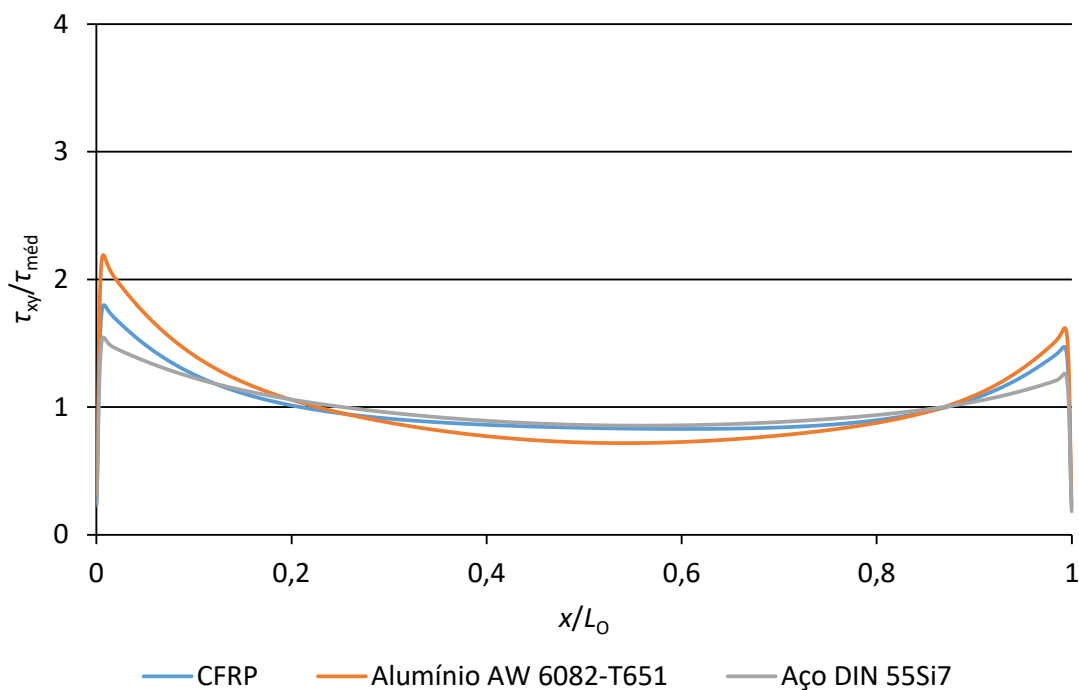


Figura 47 - Distribuição das tensões de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em função do material dos aderentes: CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7.

A Figura 47 apresenta das tensões τ_{xy} para diferentes aderentes. Através da análise das curvas é possível observar uma tendência crescente das tensões junto das extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, tal como foi observado com as tensões σ_y . O aderente que registou pico mais elevado foi o alumínio, com $\tau_{xy}/\tau_{méd}=2,19$ na região de $x/L_0=0$. A liga de alumínio, tendo valor de E inferior, apresenta a maior flexibilidade dos diferentes aderentes em estudo. Esta flexibilidade, por sua vez, aumenta a deformação diferencial entre os dois aderentes, o que resulta em picos de tensão τ_{xy} superiores devido ao maior efeito de corte gerado. O resultado dos restantes aderentes foi então

coerente e o aço apresentou menor valor de tensões τ_{xy} , nomeadamente cerca de $\tau_{xy}/\tau_{méd}=1,54$ na região de $x/L_0=0$ e $\tau_{xy}/\tau_{méd}=1,26$ na região de $x/L_0=1$. A Tabela 23 apresenta os valores de pico de tensões $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para as duas extremidades da sobreposição. Para além disso, o $\Delta\tau_{xy}$ para cada material, que apresenta ser inversamente proporcional ao E do aderente, ou seja, quanto menor o valor da rigidez, maior $\Delta\tau_{xy}$ (Tabela 23).

Tabela 23 - Variação de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes materiais aderentes.

	CFRP	Alumínio 6082-T651	AW	Aço 55Si7	DIN
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 0$	1,80	2,19		1,54	
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 1$	1,47	1,62		1,26	
$\Delta\tau_{xy}$	24%	26%		18%	

A Figura 48 apresenta os valores de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em função de L_0 , para juntas adesivas de CFRP unidas com o adesivo Araldite® 2015, onde o valor de L_0 variou entre 10, 20 e 40 mm.

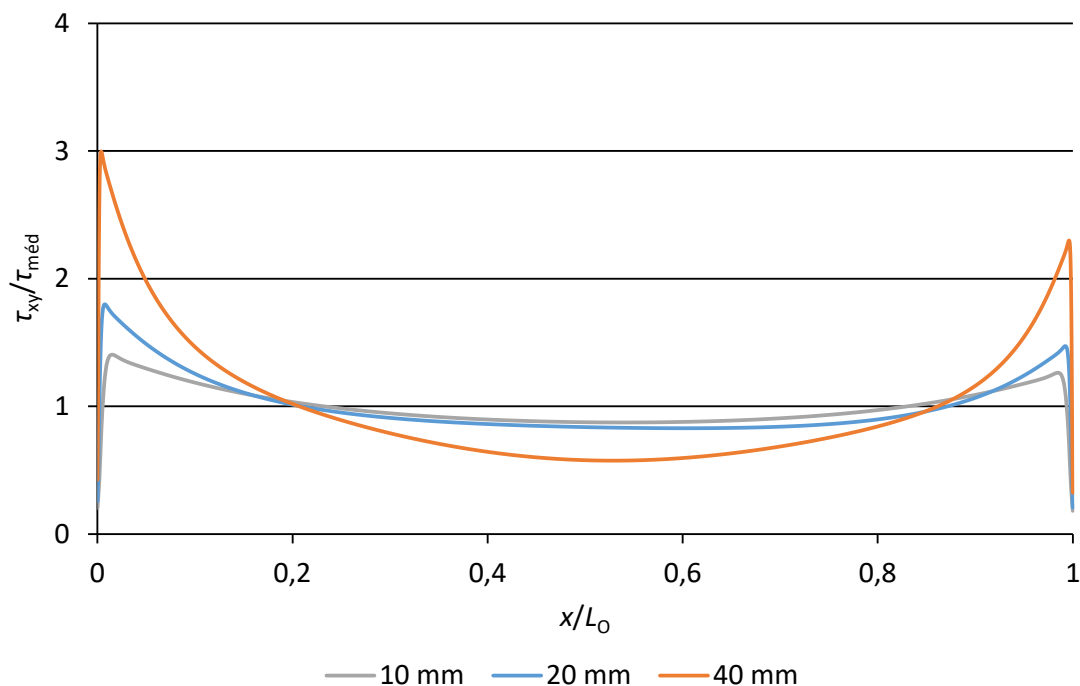


Figura 48 - Distribuição das tensões de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em função de L_0 : 10, 20 e 40 mm

Nota-se uma tendência crescente das tensões de pico com o aumento de L_0 , tal como foi observado com as tensões σ_y . Devido à deformação diferencial ser inferior para valores de L_0 inferiores, a curva de tensões τ_{xy} é mais uniforme. Além disso, a diminuição de L_0 provoca uma diminuição da rigidez global da junta que, por sua vez,

provoca também uma distribuição uniforme destas tensões. As grandes áreas de colagem e as cargas aplicadas provocam um aumento dos gradientes de tensão τ_{xy} com o aumento de L_0 . Dito isto, é possível observar os valores de pico registados nas extremidades da sobreposição na Tabela 24. O valor de $\Delta\tau_{xy}$ seguiu a tendência do crescimento do L_0 .

Tabela 24 - Variação de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes L_0 .

	$L_0 = 10$ mm	$L_0 = 20$ mm	$L_0 = 40$ mm
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 0$	1,40	1,80	2,99
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 1$	1,26	1,47	2,30
$\Delta\tau_{xy}$	10%	18%	23%

Por fim, também à semelhança das tensões de arrancamento, a comparação entre os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, observa-se na Figura 49, onde foram apresentados resultados de ligações adesivas entre o CFRP com os adesivos, numa junta com L_0 de 20 mm.

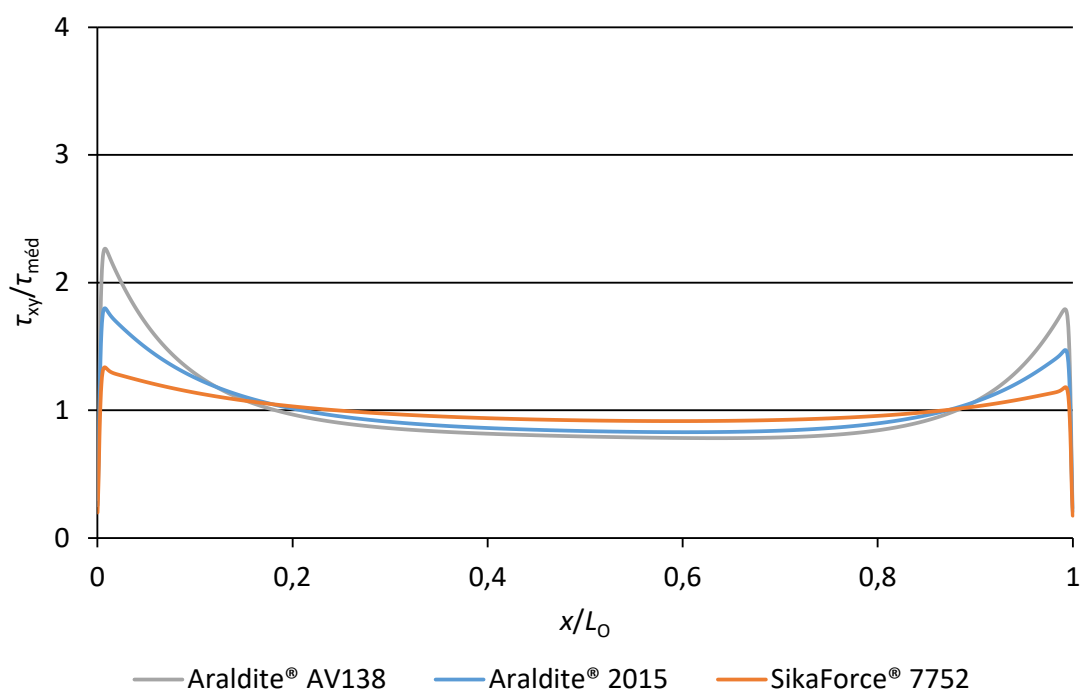


Figura 49 - Distribuição das tensões de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ em função dos adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

Foi com o adesivo Araldite® AV138 que se registou um valor máximo de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$, que atingiu 2,26. Isto acontece porque, dado que deste adesivo é o mais frágil dos três, geram-se picos de concentração de tensões τ_{xy} muito elevados nas extremidades das juntas. A sua rigidez pode condicionar a resistência da junta e conduzir a uma rotura

prematura. Este fenómeno é aplicável também aos restantes adesivos já que, à medida que o valor de E vai diminuindo, o pico de concentração de tensões τ_{xy} acaba por diminuir também. Os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição das tensões nas extremidades da sobreposição, o que possibilita o aumento da resistência da junta [79, 86]. Quando utilizados adesivos frágeis, a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões instaladas não permitirem a plastificação do adesivo nas extremidades da sobreposição [92]. Desta forma, o adesivo SikaForce® 7752 apresentou distribuição de tensões τ_{xy} mais uniformes e tomou o valor máximo de $\tau_{xy}/\tau_{méd}=1,33$, uma vez que apresenta menos rigidez elástica. A Tabela 25 apresenta os resultados $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ nas extremidades da junta e o $\Delta\tau_{xy}$, que variou proporcionalmente com o E do adesivo.

Tabela 25 - Variação de $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ nas extremidades $x/L_0 \approx 0$ e $x/L_0 \approx 1$ e nos diferentes adesivos ensaiados.

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 0$	2,26	1,80	1,33
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ para $x/L_0 \approx 1$	1,79	1,47	1,18
$\Delta\tau_{xy}$	21%	18%	12%

3.2.4 Análise da variável de dano

O dano de uma junta adesiva pode ser analisado através do variável SDEG no *software* ABAQUS®. Com o gráfico resultante desta variável, associada ao dano da lei coesiva, é possível analisar a evolução da propagação do dano ao longo do adesivo e assim compreender a sua degradação em diferentes fases de carregamento.

Com o objetivo de prever e analisar variações da resistência das juntas, o presente subcapítulo apresenta a variável de dano SDEG no momento em que as juntas atingem o valor de P_m . Esta variável toma valores entre 0 antes de ocorrer dano (inclui a zona de elasticidade) e o valor de 1, quando se perde a totalidade da resistência do material e ocorre rotura. Todos os valores entre 0 e 1 correspondem à zona de amaciamento da lei coesiva. De uma das extremidades da junta adesiva para a outra, nota-se novamente um decréscimo da magnitude dos picos de SDEG (Δ SDEG). O valor de Δ SDEG é calculado pela diferença entre o pico de dano SDEG presente na região $x/L_0=0$ e o pico de dano SDEG em $x/L_0=1$, relativamente ao valor superior de dano SDEG na região $x/L_0=0$. Desta vez, estes picos são diretamente influenciados pela combinação das tensões τ_{xy} e σ_y , que tomam valores superiores para os valores limite de x/L_0 .

3.2.4.1 Análise dos aderentes

A primeira análise dos parâmetros que se fez variar é o material dos aderentes. À semelhança de análises anteriores, foram estudadas juntas adesivas unidas com Araldite® 2015 e com L_0 de 20 mm, utilizando o material CFRP, alumínio AW 6082-T651 ou aço DIN 55Si7.

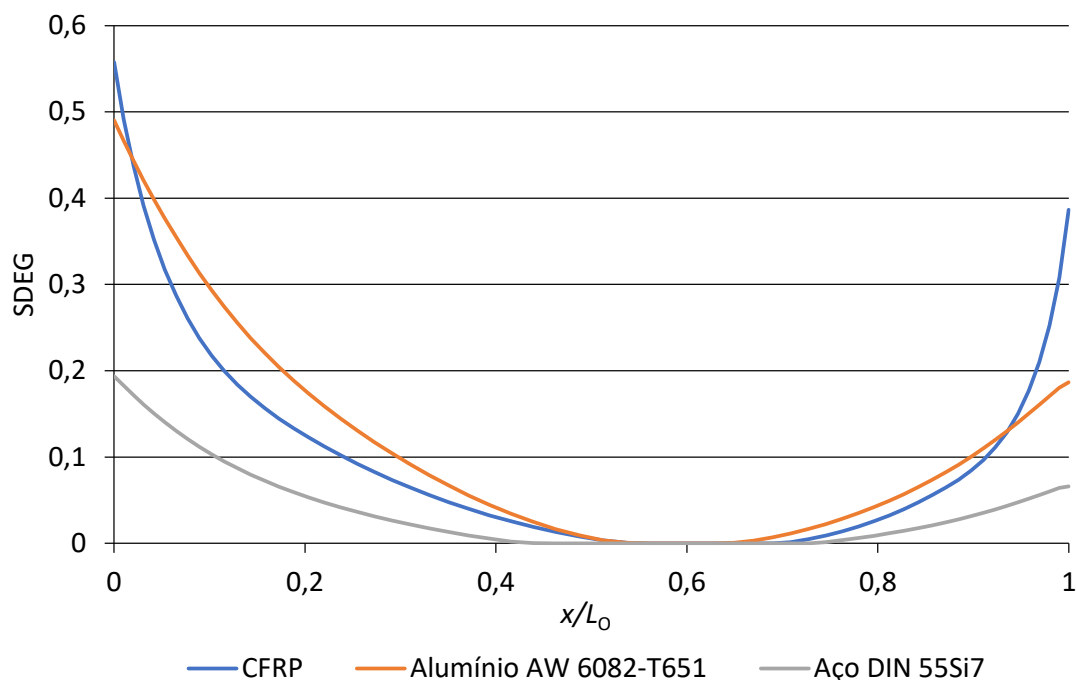


Figura 50 - Variável de dano na camada de adesivo, no instante em que P_m é atingido, nos aderentes CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7.

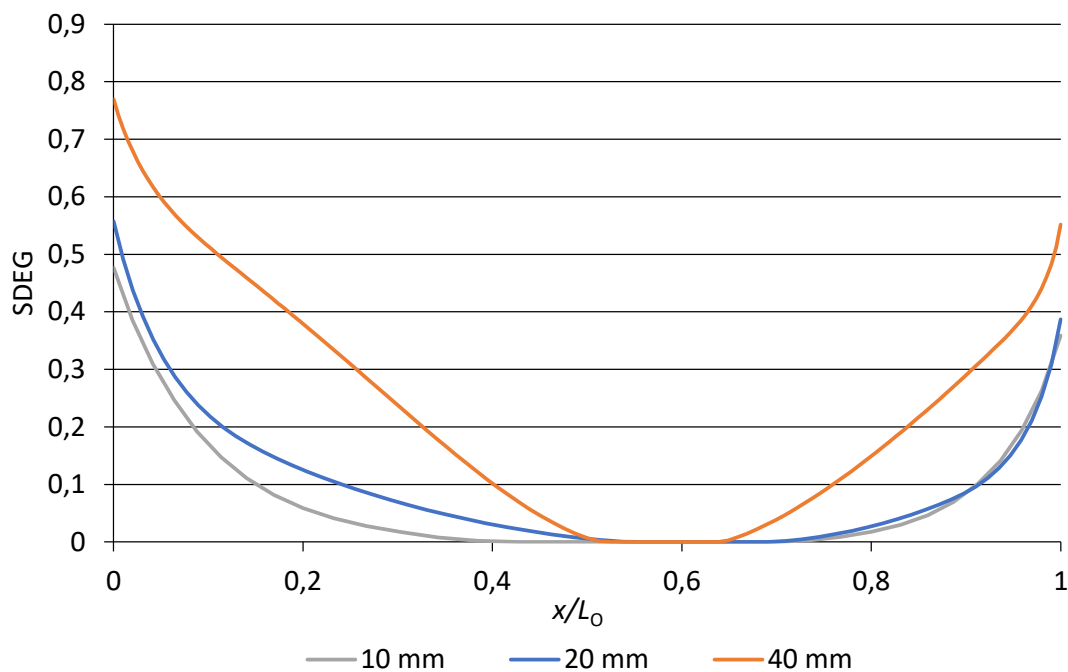
Pela análise dos resultados apresentados na Figura 50 é possível observar, uma vez mais, picos de degradação nas extremidades do adesivo. Os resultados são coerentes com os valores de tensões analisados previamente e com a rigidez elástica dos aderentes: quando maior o valor de E , menor a degradação verificada na junta. Apesar de o aderente CFRP apresentar o valor SDEG superior, cerca de 0,55, globalmente o aderente que apresentou mais degradação ao longo de x/L_0 foi alumínio AW 6082-T651. Este pico de SDEG no CFRP surge porque a propriedade E_2 é inferior a E_1 , o que origina rigidez nas extremidades do adesivo, potenciando o dano nas regiões. A zona central não apresenta dano nos três casos de estudo. No caso do aço DIN 55Si7, 25% da extensão total de L_0 não apresentou dano. Na mesma região, o CFRP apenas apresentou 15% da extensão total de L_0 sem dano, e o alumínio AW 6082-T651 cerca de 11%. O $\Delta SDEG$ superior foi registado pelo aço DIN 55Si7, de cerca de 66%, porque de $x/L_0=0$ para $x/L_0=1$, o valor SDEG passou de 0,19 para 0,07 (Tabela 26).

Tabela 26 - Variação de SDEG nas diferentes extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ e nos diferentes materiais aderentes.

	CFRP	Alumínio 6082-T651	AW	Aço 55Si7	DIN
SDEG para $x/L_0=0$	0,55	0,49		0,19	
SDEG para $x/L_0=1$	0,49	0,19		0,07	
Δ SDEG	31%	62%		66%	

3.2.4.2 Análise L_0

O estudo da degradação do adesivo em função de L_0 pode ser obtido através da observação do estado de degradação das juntas de CFRP, unidas através do adesivo Araldite® 2015, com valores de L_0 de 10, 20 e 40 mm (Figura 51).

Figura 51 - Variável de dano na camada de adesivo, no instante em que P_m é atingido, para L_0 de 10, 20 e 40 mm.

É possível observar que o dano apresenta uma distribuição mais uniforme para L_0 de 10 e 20 mm. Isto acontece devido à menor magnitude dos picos de tensão σ_y e τ_{xy} observados anteriormente, para os L_0 mencionados. Outro pormenor notório é o comprimento sem dano do $L_0 = 40$ mm ser inferior às restantes, cerca de 14% da extensão total do L_0 da junta. A percentagem da extensão total do L_0 sem dano nos provetes de L_0 com 20 mm foi cerca de 17% e dos provetes com L_0 de 10 mm, cerca de 35%. O gradiente de tensões τ_{xy} (principais responsáveis pelo processo de rotura) é maior para L_0 superiores e, portanto, menor a área não danificada. Assim, os

resultados foram coerentes e o valor máximo de degradação, dos 3 resultados apresentados, foi 0,77 com $L_0 = 40$ mm, na zona de $x/L_0 = 0$. O valor mínimo foi $SDEG = 0,36$, para $L_0 = 10$ mm, quando $x/L_0 = 1$. O maior valor de $\Delta SDEG$ registado foi cerca de 31% na junta adesiva com $L_0 = 20$ mm. Estes resultados podem ser consultados na Tabela 27. Em função dos resultados obtidos é possível prever que o aumento de P_m não é proporcional a L_0 devido à degradação do estado de tensão e dano na junta, com assimetrias de dano crescentes com L_0 .

Tabela 27 - Variação de SDEG nas extremidades $x/L_0 = 0$ e $x/L_0 = 1$ e nos diferentes L_0 .

	$L_0 = 10$ mm	$L_0 = 20$ mm	$L_0 = 40$ mm
SDEG para $x/L_0 = 0$	0,48	0,56	0,77
SDEG para $x/L_0 = 1$	0,36	0,37	0,55
$\Delta SDEG$	25%	31%	28%

3.2.4.3 Análise de adesivos

Por fim, como feito anteriormente, é nesta secção apresentada a comparação entre os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Para este efeito, foram analisadas juntas de CFRP, com L_0 de 20 mm, unidas com estes adesivos. A Figura 52 mostra a evolução do dano destas juntas adesivas.

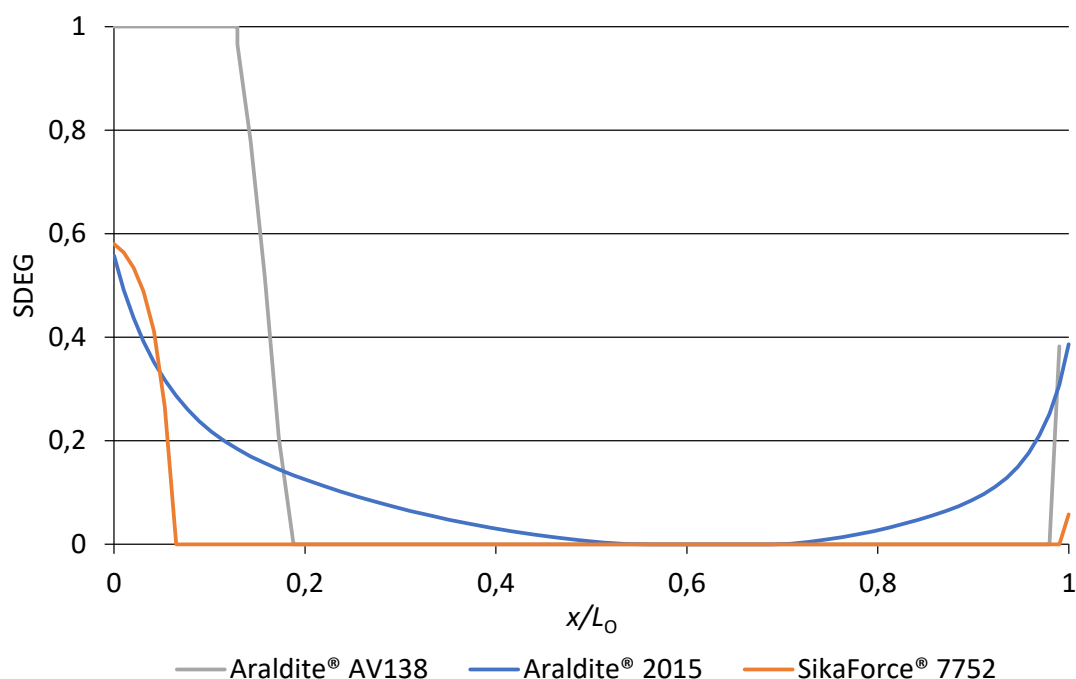


Figura 52 - Variável de dano na camada de adesivo, no instante em que P_m é atingido, para juntas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

Pela análise dos resultados obtidos na Figura 52, é possível observar que o adesivo Araldite® AV138 apresenta rotura da ligação adesiva até $x/L_0=0,13$. Este efeito era expectável uma vez que este adesivo apresentou valores máximos de tensões τ_{xy} e σ_y . Sendo este o adesivo mais frágil e com maior rigidez, os picos de tensões causaram uma falha catastrófica na junta, com pouca região com deformação plástica. Este fenómeno é observável também para o adesivo SikaForce® 7752, apesar de não apresentar rotura no momento em que a junta atinge o P_m . O adesivo Araldite® 2015, neste exato momento ainda não apresenta rotura em nenhum ponto do adesivo, apesar das deformações plásticas existentes em grande parte do x/L_0 . Este adesivo apresentou, globalmente, mais dano no adesivo que o SikaForce® 7752 devido à sua ductilidade. Também por este motivo, a percentagem sem dano na extensão L_0 foi inferior, cerca de 17%. Na mesma zona, o adesivo Araldite® AV138 apresentou 82% da extensão em L_0 sem dano e o SikaForce® 7752 cerca de 95%. Os valores máximos de SDEG nas extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ e Δ SDEG estão apresentados na Tabela 28.

Tabela 28 - Variação de SDEG nas extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$ e nos diferentes adesivos ensaiados.

		Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
SDEG	para $x/L_0=0$	1	0,56	0,58
SDEG	para $x/L_0=1$	0,82	0,39	0,06
Δ SDEG		18%	31%	90%

3.2.5 Previsão da resistência das juntas

Tendo em conta a variação dos parâmetros anteriormente apresentados, torna-se agora necessário analisar a sua influência na resistência das juntas. Esta resistência é analisada através do valor P_m , que representa a força máxima suportada pela junta no decorrer dos ensaios numéricos. As figuras seguintes foram obtidas através da análise numérica por MDC no ABAQUS® tendo em conta as variações do L_0 (10, 20, 40 mm), diferentes materiais de adesivo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) e aderentes (CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço 55Si7). Cada gráfico representa um material de substrato e inclui três curvas que representam a resistência dos diferentes adesivos estudados.

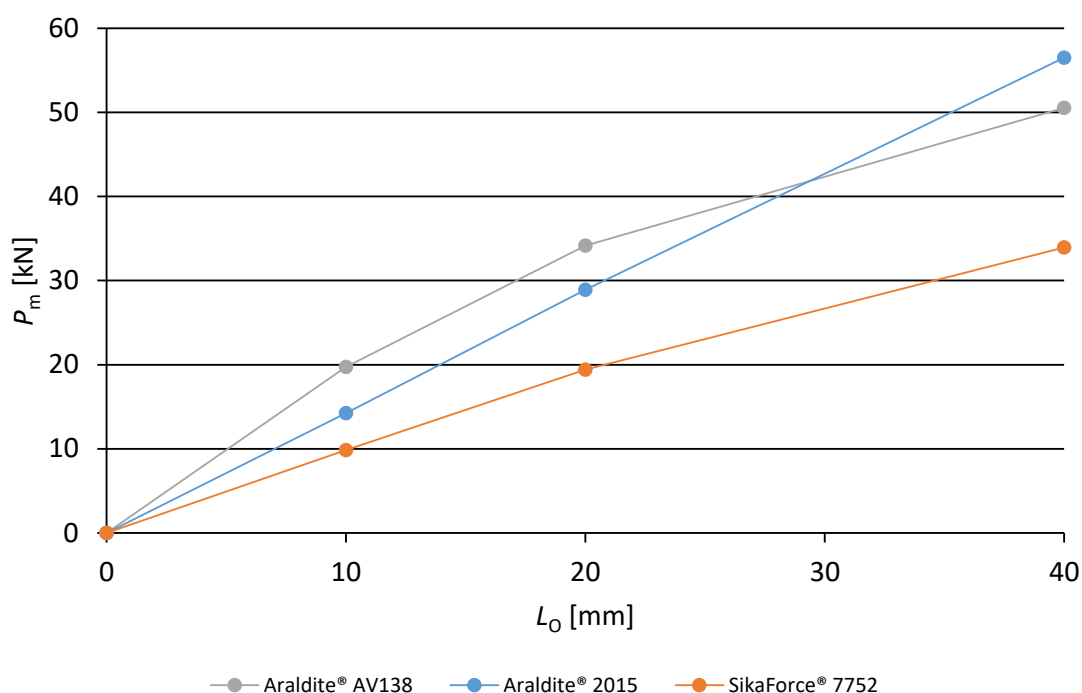


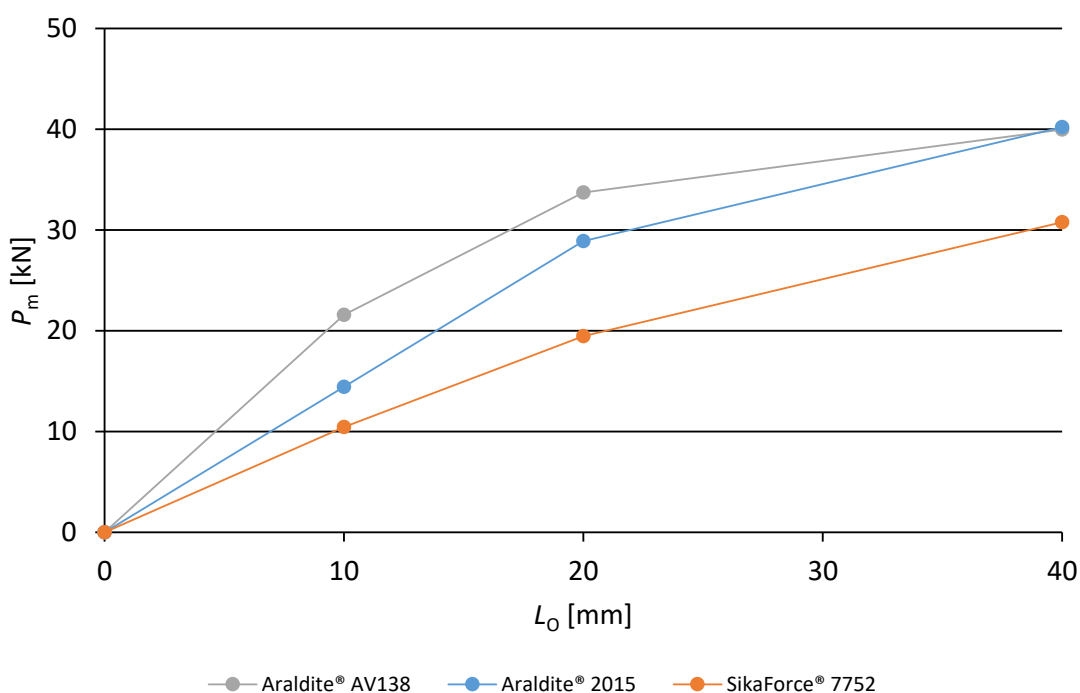
Figura 53 - Distribuição do P_m da junta de CFRP, em função de L_0 e dos diferentes adesivos.

A Figura 53 mostra a distribuição dos resultados de P_m em aderentes de CFRP. Numa primeira análise é possível observar uma variação do P_m aproximadamente linear até 20 mm de L_0 , para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Até este instante, foi o adesivo Araldite® AV138 que apresentou resistência superior, cerca de 15% superior ao adesivo Araldite® 2015 e 43% superior ao SikaForce® 7752. No entanto, o valor mais elevado de P_m registado foi cerca de 56489,2 N, na junta adesiva de Araldite® 2015 com L_0 de 40 mm. O adesivo Araldite® 2015 acaba por superar a *performance* do Araldite® AV138 quando o $L_0=40$ mm devido à plastificação do adesivo que ocorre antes da rotura. O SikaForce® 7752 é um adesivo de alta resistência e ductilidade que, no espectro aqui analisado, apresentou ser o menos resistente. No momento em que $L_0=40$ mm, o valor de P_m do adesivo Araldite® 2015 é 10% superior ao Araldite® AV138 e 40% superior ao SikaForce® 7752.

O Araldite® AV138 é um adesivo com elevada rigidez elástica (é o adesivo mais frágil dos analisados), o que o leva a sofrer tensões τ_{xy} e σ_y de magnitude superior aos restantes adesivos. Este efeito é agravado com o aumento de L_0 e, portanto, quanto maior for este parâmetro, maior a dificuldade do adesivo resistir à propagação de fendas. Desta forma, é possível que um adesivo dúctil apresente resistência semelhante à de um frágil, devido à capacidade limitada de plastificação que o adesivo frágil possui [90]. A Tabela 29 apresenta os valores de P_m , em N, registados para os diferentes L_0 e adesivos, bem como os aumentos percentuais relativamente à junta com $L_0=10$ mm.

Tabela 29 - Valores de P_m , em N, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de CFRP.

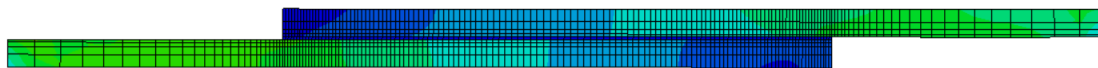
Adesivo/ L_0	$L_0=10$ mm	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	19740,7 (-)	34156,5 (73%)	50525,7 (156%)
Araldite® 2015	14243,8 (-)	28919,2 (103%)	56489,2 (297%)
SikaForce® 7752	9842,2 (-)	19423,2 (97%)	33937,8 (245%)

Figura 54 - Distribuição do P_m da junta em alumínio AW 6082-T651, em função de L_0 e dos diferentes adesivos.

A Figura 54 apresenta os resultados dos valores de P_m para diferentes L_0 e diferentes adesivos em juntas tubulares de alumínio AW 6082-T651. No momento em que $L_0=10$ mm, o adesivo Araldite® AV138 apresenta resistência mecânica superior, cerca de 33% relativamente ao Araldite® 2015 e 52% ao SikaForce® 7752. Quando L_0 atinge os 40 mm, o adesivo Araldite® 2015, que até então apresentava 14% menos resistência relativamente ao adesivo Araldite® AV138, iguala a capacidade mecânica do adesivo Araldite® AV138. Estes adesivos apresentam decréscimo acentuado na taxa de crescimento de P_m após os 20 mm devido à alteração do modo de rotura, na medida em que, para $L_0=40$ mm, se observou uma aproximação do valor máximo da resistência da junta de alumínio. Depois de ultrapassada esta resistência ocorre uma estricção no tubo interior porque, nesta região, a secção transversal é mais reduzida,

na medida em que esta corresponde ao diâmetro menor para que seja possível inseri-lo dentro do tubo exterior. A secção transversal menor origina uma maior concentração de cargas e daí surge a estricção do aderente.

(a)



(b)

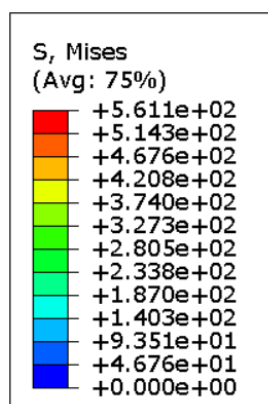
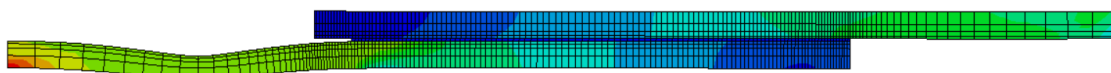


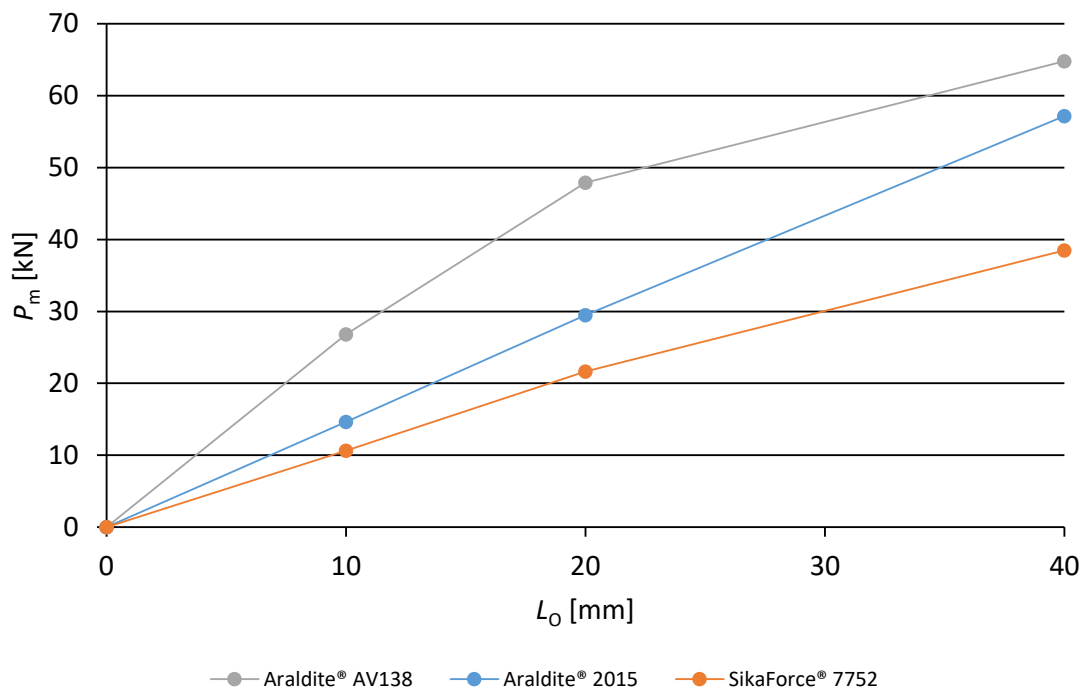
Figura 55 - Estricção gerada no tubo interior para o adesivo Araldite® 2015, com $L_0=40$ mm: (a) antes da estricção (b) após estricção.

A Figura 55 mostra a evolução do ensaio de tração da junta tubular adesiva com Araldite® 2015 e $L_0=40$ mm. O esquema de cores representa o gradiente das tensões de falha de von-Mises no momento inicial da solicitação à tração(a) e após gerar estricção (b) no tubo interior.

O comportamento do adesivo SikaForce® 7752 é o mais linear porque apresenta valores de P_m reduzidos ao longo dos L_0 analisados. Para $L_0=20$ mm, existe uma diferença percentual de resistência entre o SikaForce® 7752 e o Araldite® 2015 de 33%. Por outro lado, para $L_0=40$ mm, a diferença entre adesivos é cerca de 23%. Comparativamente ao aderente CFRP, este adesivo apresenta uma diferença inferior de resistência de 10% uma vez que o CFRP apresenta valores superiores de resistência elástica E_2 . Os diferentes valores P_m registados nos diferentes L_0 e adesivos, bem como o crescimento relativo do P_m para $L_0=10$ mm, estão apresentados na Tabela 30.

Tabela 30 - Valores de P_m , em N, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de alumínio AW 6082-T651.

Adesivo/ L_0	$L_0=10$ mm	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	21584,2 (-)	33717,1 (56%)	39966,8 (85%)
Araldite® 2015	14419,3 (-)	28895,4 (100%)	40208,9 (179%)
SikaForce® 7752	10451,8 (-)	19454,9 (86%)	30776,5 (194%)

Figura 56 - Distribuição do P_m da junta em aço DIN 55Si7, em função de L_0 e dos diferentes adesivos.

A Figura 56 apresenta os resultados de P_m das juntas do aderente aço DIN 55Si7. Neste caso, a amplitude dos resultados obtidos não mostrou disparidade nas tendências dos adesivos selecionados: ao longo da variação de L_0 , o adesivo Araldite® AV138 mostrou-se sempre o mais capaz, seguido do adesivo Araldite® 2015 e por fim SikaForce® 7752. Apesar de o valor máximo 64792,3 N de P_m ter sido registado pelo Araldite® 2015, a evolução da resistência desde adesivo apresenta declínio depois dos 20 mm de L_0 . Neste L_0 , a diferença percentual do mais resistente para o Araldite® 2015 é cerca de 38%, enquanto para $L_0=40$ mm esta diferença é apenas 12%. É de notar a linearidade dos resultados do adesivo Araldite® 2015 e a variação de apenas mais 1,8% na capacidade do mesmo adesivo relativamente ao substrato de CFRP. O aderente aço 55Si7 é um material com valor de E elevado, o que origina picos de tensões τ_{xy} e σ_y

inferiores aos restantes substratos analisados, como é possível observar na Figura 44 e Figura 47. Fazendo uma comparação do resultado obtido pelo adesivo Araldite® AV138 nas juntas com aderentes CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7 é possível observar que no aço DIN 55Si7, a junta possui uma resistência 22% superior ao CFRP e 38% ao alumínio AW 6082-T651. A Tabela 31 apresenta os valores P_m registados nos diferentes L_0 e adesivos, em juntas de aço 55Si7, bem como as diferenças percentuais do aumento de P_m relativamente ao $L_0=10$ mm.

Tabela 31 - Valores de P_m , em N, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de aço 55Si7.

Adesivo/ L_0	$L_0=10$ mm	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	26832,0 (-)	47889,2 (78%)	64792,3 (141%)
Araldite® 2015	14624,4 (-)	29480,4 (102%)	57158,9 (291%)
SikaForce® 7752	10648,3 (-)	21644,4 (103%)	38489,1 (261%)

3.2.6 Previsão da energia dissipada

A capacidade que as juntas adesivas possuem de dissipar energia é determinante para uma boa ligação, na medida em que amortece a transmissão de solicitações entre aderentes, absorvendo todo o tipo de esforços. Como abordado na revisão bibliográfica, as ligações adesivas são cada vez mais utilizadas na indústria automóvel. A segurança dos ocupantes de um veículo passa, muitas vezes, pela absorção do impacto por parte do automóvel, impedindo assim a transmissão das forças para os passageiros.

O subcapítulo da previsão da energia dissipada visa estudar a dissipação de energia até à rotura, registada em cada junta adesiva ensaiada. As juntas são, novamente, construções de CFRP, alumínio AW 6082-T651 e aço DIN 55Si7, unidas pelos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 com L_0 de 10, 20 e 40 mm. Os valores da energia dissipada foram obtidos através das curvas $P-\delta$ obtidas numericamente pelo *software* ABAQUS®. A energia dissipada (U) é obtida através do cálculo da área de cada curva $P-\delta$ analisada. Para isso, foi utilizado o *software* Microsoft® Excel. O valor de U é obtido de forma aproximada, uma vez que a curva $P-\delta$ é subdividida em pequenos retângulos.

$$U = \sum_{i=1}^n ((\delta_i - \delta_{i-1}) \times P_i) \quad (5)$$

A equação (5) descreve a obtenção do valor U , onde $(\delta_i - \delta_{i-1})$ corresponde à largura do retângulo, que se encontra localizado no eixo horizontal, e P_i corresponde ao comprimento do mesmo, que está localizado no eixo vertical. A Figura 57 mostra de forma simplificada o método utilizado para obtenção de U [97].

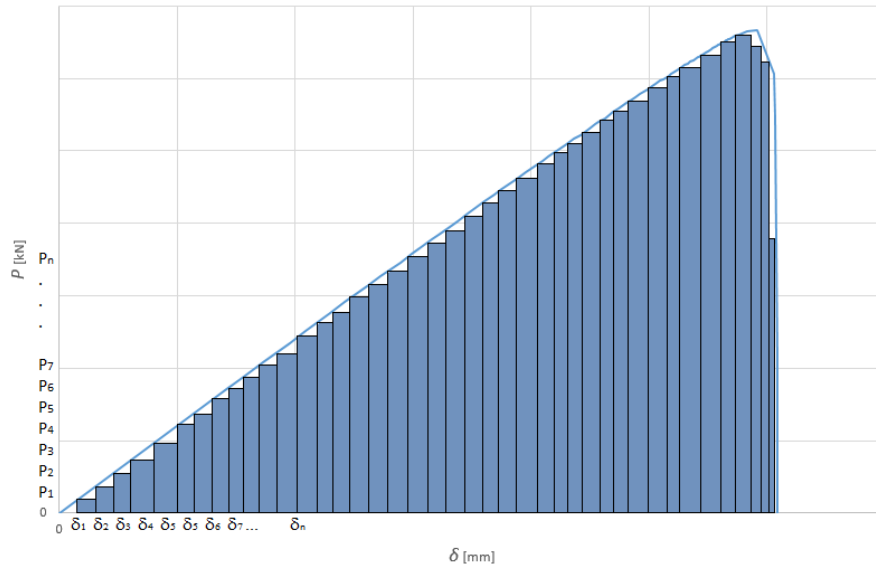


Figura 57 - Representação simplificada do cálculo de U [97].

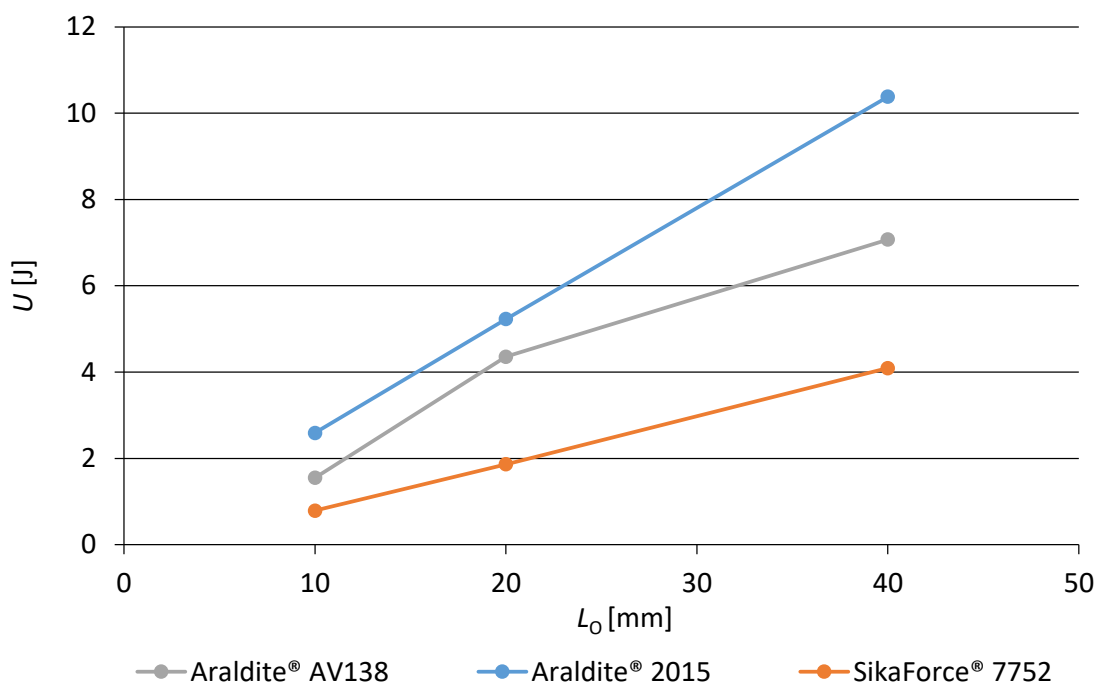


Figura 58 - Resultados de U para as juntas tubulares de CFRP, com os três adesivos em estudo e com L_0 de 10, 20 e 40 mm.

Na Figura 58 apresenta os resultados obtidos da energia dissipada pelas juntas adesivas de CFRP, unidas pelos três adesivos em estudo, com L_0 de 10, 20 e 40 mm. O

adesivo Araldite® 2015 foi o que registou U superior, cerca de 10,38 J, no $L_0=40$ mm: um aumento de 47% relativamente ao Araldite® AV138. O Araldite® AV138 apresentou em todo os registos U de magnitude intermédia. Para $L_0=10$ mm, o valor de U é cerca de 1,55 J e para $L_0=40$ mm este passa para 7,07, o que representa um aumento de 356%. A estabilidade e linearidade de U do SikaForce® 7752 ao longo de todos os L_0 mostrou valores mais baixos relativamente aos restantes adesivos. Para $L_0=10$ mm, o valor de U do SikaForce® 7752 representa cerca de 48% do de Araldite® AV138, diferença que diminui com o aumento de L_0 : Para $L_0=40$ mm, este valor é apenas de 42%. Todos os valores de U utilizados para construção da Figura 58 estão apresentados na Tabela 32, em J. A evolução percentual de U , relativamente ao $L_0=10$ mm, encontra-se junto dos valores de mencionados anteriormente.

Tabela 32 - Valores de U , em J, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de CFRP.

Adesivo/ L_0	$L_0=10$ mm	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	1,55 (-)	4,36 (181%)	7,07 (356%)
Araldite® 2015	2,59 (-)	5,23 (102%)	10,4 (301%)
SikaForce® 7752	0,79 (-)	1,87 (136%)	4,09 (417%)

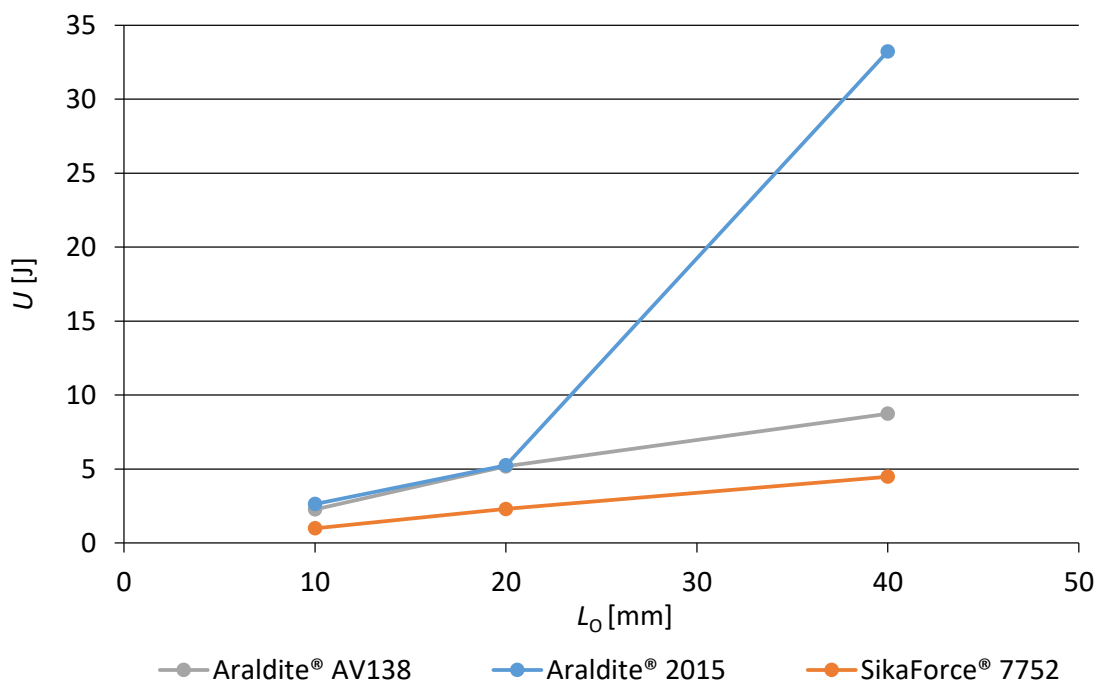


Figura 59 - Resultados de U para as juntas tubulares de alumínio AW 6082-T651, com os três adesivos em estudo e com L_0 de 10, 20 e 40 mm.

Os resultados de U para as juntas tubulares de alumínio AW 6082-T651 estão apresentados na Figura 59. Os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752 apresentaram capacidade de absorver energia semelhantes seja com o aderente em estudo, ou com CFRP. A diferença percentual do U do adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, para $L_0=20$ mm, é de 1%. Para $L_0=40$ mm, o Araldite® AV138 apresenta $U=8,75$, enquanto o SikaForce® 7752 apenas apresentava $U=4,49$ (Tabela 33), o que representa uma diferença de 49%. Nota-se claramente uma singularidade no adesivo Araldite® 2015 após passar o $L_0=20$ mm. Como analisado anteriormente, a junta adesiva com aderentes de alumínio AW 6082-T651, unido pelo adesivo Araldite® 2015, cede pelo aderente assim que L_0 ultrapassa o valor de 20 mm. A evolução do U , das juntas adesivas de Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, de $L_0=10$ mm para $L_0=40$ mm, é de 285% e 353% respetivamente. Estes valores e os valores máximos de U podem ser consultados na Tabela 33.

Tabela 33 - Valores de U , em J, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de alumínio AW 6082-T651.

Adesivo/ L_0	$L_0=10$ mm	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	2,27 (-)	5,19 (128%)	8,75 (285%)
Araldite® 2015	2,64 (-)	5,26 (99%)	33,2 (1158%)
SikaForce® 7752	0,99 (-)	2,30 (132%)	4,49 (352%)

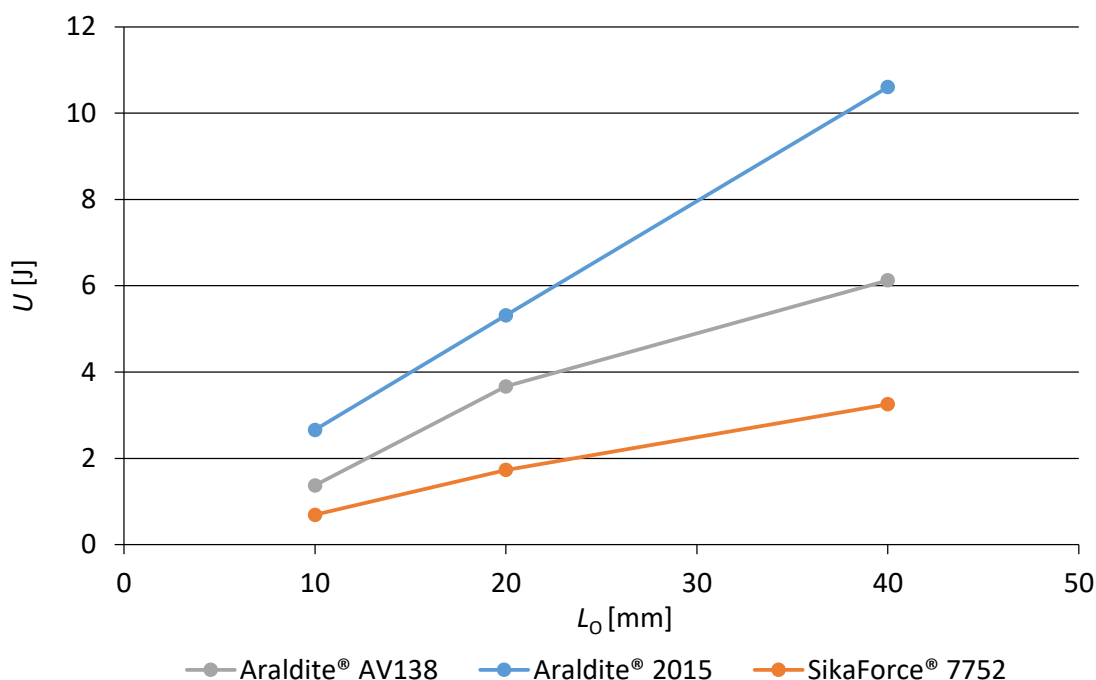


Figura 60 - Resultados de U para as juntas tubulares de aço DIN 55Si7, com os três adesivos em estudo e com L_0 de 10, 20 e 40 mm.

O valor máximo de U que cada junta adesiva com substratos tubulares de aço DIN 55Si7, apresenta está representado na Figura 60. Os adesivos Araldite® 2015 apresenta resultados aproximadamente lineares ao longo de L_0 , com aumentos de $L_0=10$ mm para $L_0=20$ mm de 100% e de $L_0=20$ mm para $L_0=40$ mm de 299%. O Araldite® AV138 apresenta uma quebra da proporção de crescimento da capacidade de absorção de energia, quando $L_0=20$ mm. O valor máximo de U foi registado no adesivo Araldite® 2015, para $L_0=40$ mm: 10,60 J, 73% superior ao Araldite® 2015 para o mesmo L_0 . Por outro lado, o valor mais baixo foi, novamente, registado pelo adesivo SikaForce® 7752 em todo espectro observado neste estudo. Os valores e aumento percentual de U relativamente ao L_0 mais baixo, podem ser consultados na Tabela 34.

Tabela 34 - Valores de U , em J, registados para os diferentes L_0 e adesivos, em juntas de aço DIN 55Si7

Adesivo/ L_0	$L_0=10$ mm	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	1,37 (-)	3,67 (167%)	6,13 (346%)
Araldite® 2015	2,66 (-)	5,32 (100%)	10,60 (299%)
SikaForce® 7752	0,69 (-)	1,73 (150%)	3,25 (370%)

3.2.7 Discussão dos resultados

Pela análise dos resultados apresentados na Tabela 29, Tabela 30 e Tabela 31 é possível observar que juntas com aderentes em aço DIN 55Si7 apresentam valores de P_m superiores, relativamente ao CFRP e ao alumínio AW 6082-T651, em qualquer L_0 estudado. Esta diferença é notória para $L_0=40$ mm, caso em que o P_m das juntas adesivas de aço atingiu 64,8 kN, enquanto o CFRP registou o valor mais elevado de $P_m=56,5$ kN (12,8% inferior) e o alumínio 40,2 kN (38% inferior), este último já depois de passar o limite de resistência do aderente e iniciar a estrição do aderente interior, como observado na Figura 55.

No que diz respeito aos diferentes L_0 analisados, pela análise da Figura 53, Figura 54 e Figura 56 conclui-se que a resistência mecânica à tração, de todas as juntas estudadas, foi influenciada positivamente com o aumento deste parâmetro. Analisando $L_0=10$ e $L_0=20$ mm, de forma a isolar e retirar o fenómeno de estrição do aderente que ocorreu em $L_0=40$ mm, é possível observar que o aumento da sobreposição em adesivos dúcteis traduz um crescimento significativo da junta: em juntas de CFRP, por exemplo, entre estes dois L_0 o adesivo Araldite® 2015 apresentou um crescimento relativo ao P_m para o $L_0=10$ de 100% e o SikaForce® 7752 de 97%. Por outro lado, o Araldite® AV138 apenas registou um aumento de 73%. As relações entre estes resultados são transversais aos três tipos de aderentes apresentados.

O adesivo que mostrou ser mais resistente foi o Araldite® AV138. Esta superioridade é comprovada pelo desempenho da junta de 55Si7 com $L_0=40$ mm, com $P_m=64,8$ kN. Para o mesmo L_0 na junta de CFRP, o adesivo Araldite® 2015 registou $P_m=56,5$ kN que, comparativamente com a que utiliza o Araldite® AV138, apenas apresenta P_m superior em 5,9 kN, ou seja, 11,8%. Assim, adesivos frágeis e dúcteis apresentam resistências similares devido à capacidade limitada de plastificação que o adesivo frágil possui [90]. O adesivo SikaForce® 7752 está presente em todos os estudos realizados como o menos resistente, independente do L_0 analisado. No entanto, este apresenta um elevado crescimento de P_m (261% na junta adesiva de aço DIN 55Si7, por exemplo). Os adesivos dúcteis analisados, Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, apresentam aumentos percentuais mais elevados entre $L_0=10$ e $L_0=40$ mm, comparativamente ao Araldite® AV138. A fragilidade do Araldite® AV138 reduz a capacidade de plastificação, o que acaba por limitar a evolução da resistência da junta com o aumento de L_0 . Por este motivo, a rotura das juntas ocorre próximo do momento em que as tensões, nas extremidades, atingem o valor máximo.

A Tabela 35 resume os dados utilizados para análise dos resultados finais e para esta breve discussão de resultados.

Tabela 35 - Tabela resumo dos valores de P_m das juntas ensaiadas, em kN e aumento percentual relativamente ao $L_0=10$ mm.

Aderente	Adesivo	$L_0= 10$ mm	$L_0= 20$ mm	$L_0= 40$ mm
CFRP	Araldite® AV138	19,7 (-)	34,2 +73%	50,5 +156%
	Araldite® 2015	14,2 (-)	28,9 +103%	56,5 +297%
	SikaForce® 7752	9,8 (-)	19,4 +97%	33,9 +245%
Alumínio AW 6082- T651	Araldite® AV138	21,6 (-)	33,7 +56%	40,0 +85%
	Araldite® 2015	14,4 (-)	28,9 +100%	40,2 +179%
	SikaForce® 7752	10,5 (-)	19,5 +86%	30,8 +194%
Aço DIN 55Si7	Araldite® AV138	26,8 (-)	47,9 +78%	64,8 +141%
	Araldite® 2015	14,6 (-)	29,5 +102%	57,2 +291%
	SikaForce® 7752	10,6 (-)	21,6 +103%	38,5 +261%

CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

4.1 CONCLUSÕES

Uma vez validado o método numérico utilizado, procedeu-se à análise paramétrica numérica das variáveis em estudo recorrendo ao *software* ABAQUS®. Obtiveram-se distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} , a propagação do dano através da variável SDEG, o P_m e a energia dissipada em todos os aderentes, L_0 e adesivos das juntas adesivas tubulares. Relativamente às tensões, foi observado que na globalidade das curvas analisadas existe uma tendência crescente (e conseqüentemente de dano) junto das extremidades $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. Os principais motivos para este comportamento são a deformação diferencial dos aderentes a curvatura da junta, que geram tensões de corte e arrancamento mais significativas nestas regiões. Nota-se também um decréscimo da intensidade dos picos nas extremidades, nomeadamente de $x/L_0=0$ para $x/L_0=1$, porque $x/L_0=0$ corresponde à secção transversal mais reduzida da junta (onde apenas é contabilizado o diâmetro do tubo interior). Sendo a área da secção mais reduzida, geram-se maiores deformações longitudinais e transversais, o que aumenta os picos de tensão e retira a simetria das distribuições de tensões. A influência da área da secção nas extremidades do adesivo mostrou ser menor comparativamente à influência das propriedades dos adesivos e aderentes, nas geometrias analisadas.

De seguida apresentam-se as conclusões obtidas do estudo do material de aderente, L_0 e adesivo.

- Efeito do material - Pela análise dos dados inerentes às tensões σ_y e τ_{xy} concluiu-se que a rigidez elástica do material aderente influencia diretamente a resistência da junta. O E elevado dos materiais regista valores superiores de tensões σ_y e valores inferiores de tensões τ_{xy} . O baixo valor de E aumenta a flexibilidade dos aderentes, o que potencia a deformação diferencial entre os dois e resulta em picos de tensão τ_{xy} superiores devido ao maior efeito de corte gerado. A variável de dano mostrou-se mais influenciada pelas tensões τ_{xy} : mais uma vez, quanto maior o valor de E , menor a degradação verificada na junta (Tabela 26). Estas tensões contribuem diretamente para rotura prematura das juntas adesivas. Esta conclusão foi comprovada pela análise do P_m das juntas adesivas que, em diferentes L_0 e adesivos, mostram que as juntas realizadas com o aderente aço DIN 55Si7 (aderente com rigidez elástica superior) têm

maior resistência mecânica. O mesmo fenómeno acontece com a rigidez do adesivo: adesivos com maior resistência mecânica têm melhor resultado. No entanto, a combinação entre adesivos e aderentes apresenta melhores resultados quando são combinados adesivos dúcteis com aderentes rígidos, ou adesivos frágeis com aderentes flexíveis. O estudo da energia dissipada, visível na Tabela 32, Tabela 33 e Tabela 34 mostrou que o aumento da ductilidade do aderente produz maior absorção de energia. O alumínio mostrou valores superiores de dissipação de energia todas as juntas com diferentes adesivos e L_0 analisados.

- Efeito de L_0 - Conclui-se que o aumento do valor de L_0 traduz um aumento da resistência da junta, até à plastificação do aderente. No entanto, as grandes áreas de colagem e as cargas aplicadas provocam um aumento dos gradientes de tensão τ_{xy} com o aumento de L_0 . Contrariamente, ao longo da sobreposição, as tensões σ_y globalmente diminuem, apesar de os picos nas extremidades serem coerentes com os τ_{xy} . Tal como mencionado anteriormente, as tensões τ_{xy} contribuem para a rotura prematura da junta. A variável SDEG mostra, na Figura 51, uma distribuição uniforme para os L_0 menores devido à baixa magnitude dos picos de tensão σ_y e τ_{xy} , relativamente ao $L_0=40$ mm. No entanto, para o L_0 superior, a distribuição não foi uniforme e apresenta extensão de L_0 não afetada pelos esforços reduzida. Posto isto, através da análise do P_m das juntas adesivas observa-se que, em diferentes aderentes e adesivos, o aumento de L_0 traduz um aumento da resistência mecânica da junta adesiva. O aumento de L_0 causa um aumento da rigidez da junta adesiva e, por este motivo, a junta adquire uma maior capacidade de absorção de energia. Este facto pode ser rapidamente verificado através da análise da Figura 58, Figura 59 e Figura 60.
- Efeito do adesivo - No que diz respeito aos adesivos, as tensões σ_y e τ_{xy} são influenciadas pela rigidez elástica dos adesivos. Quando possuem E elevado, os adesivos causam concentração de tensões elevadas nas extremidades, o que pode conduzir à rotura prematura das ligações adesivas. Quando utilizados adesivos frágeis, a resistência da junta é afetada uma vez que esta fragilidade não permite a plastificação do adesivo nas extremidades da sobreposição. Um adesivo frágil apresenta uma falha catastrófica na junta, ou seja, tem pouca região com deformação plástica, o que baixa a resistência geral da junta. Os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição das tensões nas extremidades da sobreposição, o que possibilita o aumento da resistência da junta. Pela análise da Figura 52, é possível observar com clareza a influência da fragilidade do adesivo Araldite® AV138, que apresenta falha catastrófica no sentido em que apresenta uma extensão do L_0 muito reduzida com deformação plástica. Por outro lado, o adesivo Araldite® 2015 apresenta deformação plástica, mas não apresenta rotura quando a junta atinge P_m .

Globalmente, nos ensaios efetuados, o Araldite® AV138 apresentou valor P_m superior aos restantes adesivos, à exceção da junta de CFRP, para $L_0=40$ mm, onde o valor de E_2 apresenta ser superior. Contrariamente, o valor P_m do adesivo SikaForce® 7752 foi inferior aos restantes adesivos em todos os aderentes e L_0 (consultar Tabela 35).

Os diferentes resultados obtidos e analisados permitiram relacionar o desempenho de uma junta tubular adesiva solicitada à tração com as propriedades dos materiais envolvidos na sua construção (adesivos e aderentes). Além disso, também introduzida a variação do L_0 que influenciou a resistência da junta de forma proporcional ao seu aumento. Ficou estabelecido que o E dos materiais tem um grande impacto no desempenho da junta. Apesar da junta com valor superior de P_m ter o adesivo e aderente de valor superior de E , este pode nem sempre ser o resultado ideal, uma vez que adesivos com elevada rigidez apresentam pouca capacidade de plastificação, o que prejudica a resistência mecânica da junta e diminui a capacidade de absorção de energia.

4.2 PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Como proposta de trabalhos futuros apresentam-se as seguintes possibilidades:

- Realizar análises numéricas com diferentes diâmetros e espessuras dos tubos de forma a perceber a influência dos parâmetros geométricos na resistência da junta;
- Realizar estudos numéricos de diferentes combinações de aderentes, no sentido de replicar aplicações que se observam na vida real para efeitos de otimização de estruturas e que podem conduzir a alterações consideráveis no comportamento devido à degradação das distribuições de tensões;
- Validar os resultados numéricos com ensaios experimentais para as mesmas condições materiais e geométricas;
- Estudar outros tipos de carregamentos e solicitações que possam ocorrer durante o funcionamento das estruturas ligadas;
- Estudo de juntas com defeitos, para reproduzir defeitos de fabrico que muitas vezes ocorrem em aplicações industriais;
- Realizar trabalhos experimentais de forma a perceber qual a influência de parâmetros experimentais, como a temperatura e a velocidade da solicitação, em juntas adesivas tubulares;
- Estudar a influência do envelhecimento do adesivo na resistência mecânica de uma junta adesiva tubular.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Barbosa, D., R. Campilho, R. Rocha, e L. Ferreira, *Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2019. **233**(3): p. 452-464.
2. Labbé, S. e J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2012. **33**: p. 26-35.
3. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdão, Países Baixos: Elsevier.
4. Smith, K.N. *Neanderthal glue was a bigger deal than we thought*. 2019 [Acedido em: Novembro de 2021]; Disponível em: <https://arstechnica.com/science/2019/10/neanderthal-glue-was-a-bigger-deal-than-we-thought/>.
5. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Tese de Doutoramento em Engenharia Mecânica. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
6. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova Iorque, EUA: McGraw-Hill.
7. Da Silva, L.F., O. Andreas, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
8. Da Silva, L.F., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindústria Portugal.
9. Pinto, A., *Sebenta aulas teóricas. Unidade curricular de Processos de Ligação*. ISEP, 2019.
10. Oliveira, T.J.d.S., *Análise numérica de juntas adesivas tubulares sujeitas a um carregamento de torção*. 2019, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
11. SIKA, *Automotive Realizing Visions, Brochura interna*. 2010, Sika: Baar, Suíça.
12. Brandão, A., C. Oliveira, F. Beleza, J. Pinto, J. Couto, R. Mendes, e V. Correia, *Adesivos em automóveis: que adesivos se utilizam em automóveis e qual a sua função?* 2010, Relatório do Projecto FEUP do Grupo MMM512, Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.
13. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
14. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.

15. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
16. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
17. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London, England: Chapman & Hall.
18. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
19. Griffith, A.A., *The phenomena of rupture and flow in solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**: p. 163-198.
20. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
21. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
22. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
23. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
24. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics, 1959. **23**(3): p. 622-636.
25. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
26. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
27. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
28. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
29. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
30. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, Berlim/Heidelberg, Alemanha: Springer.
31. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.

32. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
33. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
34. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
35. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements: Practical applications with computer tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
36. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
37. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
38. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
39. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
40. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
41. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
42. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Hoboken, EUA: Wiley.
43. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
44. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
45. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
46. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
47. Ramalho, L., R. Campilho, J. Belinha, e L. da Silva, *Static strength prediction of adhesive joints: A review*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2020. **96**: p. 102451.

48. Tsai, C., Y. Guan, D. Ohanehi, J. Dillard, D. Dillard, e R. Batra, *Analysis of cohesive failure in adhesively bonded joints with the SSPH meshless method*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2014. **51**: p. 67-80.
49. Bodjona, K. e L.J.C.S. Lessard, *Nonlinear static analysis of a composite bonded/bolted single-lap joint using the meshfree radial point interpolation method*. 2015. **134**: p. 1024-1035.
50. Mubashar, A. e I.A. Ashcroft, *Comparison of cohesive zone elements and smoothed particle hydrodynamics for failure prediction of single lap adhesive joints*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(6): p. 444-460.
51. Qiu, C., P. Feng, Y. Yang, L. Zhu, e Y.J.C.S. Bai, *Joint capacity of bonded sleeve connections for tubular fibre reinforced polymer members*. 2017. **163**: p. 267-279.
52. Liu, Y., S. Lemanski, e X.J.C.S. Zhang, *Parametric study of size, curvature and free edge effects on the predicted strength of bonded composite joints*. 2018. **202**: p. 364-373.
53. Cognard, J.Y., H. Devaux, e L. Sohier, *Numerical analysis and optimisation of cylindrical adhesive joints under tensile loads*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2010. **30**(8): p. 706-719.
54. Goh, J., S. Georgiadis, A. Orifici, e C. Wang, *Effects of bondline flaws on the damage tolerance of composite scarf joints*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013. **55**: p. 110-119.
55. Hosseinzadeh, R., K. Shahin, e F. Taheri, *A simple approach for characterizing the performance of metallic tubular adhesively-bonded joints under torsion loading*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(16): p. 1613-1631.
56. Kumar, S. e M. Khan, *An elastic solution for adhesive stresses in multi-material cylindrical joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2016. **64**: p. 142-152.
57. Sekercioglu, T., *Strength based reliability of adhesively bonded tubular lap joints*. Materials & Design, 2007. **28**(6): p. 1914-1918.
58. Das, R.R. e B. Pradhan, *Adhesion failure analyses of bonded tubular single lap joints in laminated fibre reinforced plastic composites*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2010. **30**(6): p. 425-438.
59. Rosas, M., R. Campilho, e R. Moreira, *Numerical analysis of geometrical modification combinations of the tensile strength of tubular adhesive joints*. Procedia Structural Integrity, 2021. **33**: p. 115-125.
60. Eusebio, S. e R. Campilho, *Modelling of tubular adhesively-bonded joints by the Extended Finite Element Method*. Procedia Manufacturing, 2019. **41**: p. 484-491.
61. Silva, A., L. Peres, R. Campilho, e R. Rocha, *Impact loading analysis of tubular adhesive joints*. Procedia Structural Integrity, 2021. **33**: p. 138-148.
62. Ferreira, L.R.F., R.D.S.G. Campilho, R.J.B. Rocha, e D.R. Barbosa, *Geometrical and material optimization of tensile loaded tubular adhesive joints using cohesive zone modelling*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(5-7): p. 425-449.
63. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Mestrado em Engenharia Mecânica - Ramo

- de Construções Mecânicas. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
64. Limited., A.M., *Aluminium Alloy 6082 - T6~T651 Plate*. 2021.
 65. Campilho, R.D., M.D. Banea, A.M. Pinto, L.F. da Silva, e A. De Jesus, *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. *International Journal of Adhesion & Adhesives*, 2011. **31**(5): p. 363-372.
 66. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
 67. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, e L.F. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013. **44**: p. 48-56.
 68. Neto, J., R.D. Campilho, e L. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **37**: p. 96-101.
 69. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
 70. Fernandes, T.A., R.D. Campilho, M.D. Banea, e L.F. da Silva, *Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction*. *The Journal of Adhesion*, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
 71. Pinto, A.M.G., A. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M. De Moura, e A. Baptista, *Single-lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. *The Journal of Adhesion*, 2009. **85**(6): p. 351-376.
 72. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. *International journal for numerical methods in engineering*, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
 73. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. *International Journal of Fracture*, 1996. **77**(2): p. 111-140.
 74. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. *International Journal of Solids and Structures*, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
 75. Liljedahl, C., A. Crocombe, M. Wahab, e I. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. *International journal of fracture*, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
 76. Chen, X., *Numerical study of stable tearing crack growth events using the cohesive zone model approach*. 2013.
 77. Jousset, P. e M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2014. **132**: p. 48-69.
 78. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. *International Journal of Solids and Structures*, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.

79. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
80. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction, 2nd Edition*. 2002, Munique, Alemanha: Hanser.
81. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
82. Leffler, K., K.S. Alfredsson, e U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
83. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
84. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. 2015, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
85. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
86. Davis, M. e D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999. **19**(2–3): p. 91-105.
87. Campilho, R., M. De Moura, J. Domingues, e J. Morais, *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008. **22**(13): p. 1565-1591.
88. Vallée, T., J.R. Correia, e T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1903-1914.
89. Shishesaz, M. e N. Bavi, *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **27**(11): p. 1197-1225.
90. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
91. Owens, J.F.P., *Studies on stiffness and fracture behaviour in adhesively bonded composite-to-metal shear joints*. 1999, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, Universidade de New Brunswick: Otava, Canadá.
92. Grant, L., R. Adams, e L.F. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International journal of adhesion and adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
93. Yang, Q. e B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. International Journal of Fracture, 2005. **133**(2): p. 107-137.
94. Silva, M.R.G., *Impact of mixed adhesive joints for the automotive industry*. 2015, Tese de Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto, Portugal.

95. Radice, J. e J. Vinson, *On the use of quasi-dynamic modeling for composite material structures: analysis of adhesively bonded joints with midplane asymmetry and transverse shear deformation*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(14): p. 2528-2547.
96. Taib, A.A., R. Boukhili, S. Achiou, e H. Boukehili, *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2006. **26**(4): p. 237-248.
97. Eusébio, S.M.L., *Estudo numérico de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples pelo Método de Elementos Finitos eXtendido*. 2018, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.