



Estudo numérico de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples pelo Método de Elementos Finitos eXtendido

SERJIO MANUEL LOPES EUSÉBIO

novembro de 2018

ESTUDO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

Serjio Manuel Lopes Eusébio

Número: 1150061

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

Serjio Manuel Lopes Eusébio

Número: 1150061

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.

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutora Maria Antónia Maio Nunes da Silva Gonçalves

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Marco Paulo Lajes Parente

Professor Auxiliar, FEUP

AGRADECIMENTOS

Gostaria de expressar os meus profundos agradecimentos ao meu orientador, Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela sua contribuição técnica durante a realização desta dissertação, pela ajuda na revisão gramatical e escrita, pela sua disponibilidade, amizade e pelo apoio moral durante o processo de conclusão deste trabalho. Também quero agradecer ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) por todos os ensinamentos passados ao longo do mestrado. Por último, mas não menos importante, gostaria de agradecer à minha família, amigos e especialmente à minha companheira Patrícia da Costa Fontes por toda a motivação e compreensão demonstrada em todo o meu percurso académico.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas; Adesivo Estrutural; Epóxico; Poliuretano; Previsão de resistência; Método de Elementos Finitos eXtendido; Modelo de Dano Coesivo; Energia dissipada.

RESUMO

As juntas adesivas têm vindo a ser aplicadas em diversas áreas, devido às vantagens que estas apresentam relativamente às ligações mecânicas convencionais. O aumento da resistência, a redução de peso e a facilidade de fabrico são algumas das vantagens que esta técnica apresenta. Com a evolução na aplicação de materiais compósitos, nomeadamente no setor aeronáutico e automóvel, a técnica de ligação adesiva tem assumido um papel fundamental como meio de ligação, visto que permite a ligação de materiais dissimilares, permitindo assim a construção de estruturas híbridas (materiais metálicos + compósito). A natureza do adesivo torna-se um fator fundamental dependendo do tipo de solicitações que a junta estará sujeita. Os adesivos comerciais podem variar desde rígidos e frágeis (como é o caso do Araldite® AV138) a adesivos flexíveis e dúcteis (como por exemplo o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752).

Esta dissertação tem como objetivo o estudo paramétrico de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples quanto ao seu desempenho à tração com os adesivos supracitados e diferentes comprimentos de sobreposição (L_0) pelo Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), com ajuda da ferramenta de simulação/software ABAQUS®. O objetivo fundamental é avaliar a capacidade de previsão de resistência do MEFX, pela comparação com os respetivos resultados experimentais. É também efetuada uma comparação dos resultados obtidos com Modelos de Dano Coesivo (MDC). O estudo paramétrico numérico permite também avaliar de forma crítica o comportamento dos adesivos estudados neste tipo de junta, a distribuição de tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) para $L_0=20$ e 40 mm e a energia dissipada (E_{diss}) durante as simulações até a rotura. Concluiu-se que, com uma escolha correta dos critérios de iniciação e propagação de dano, o MEFX é um método viável e preciso para a previsão de resistência de juntas tubulares. Observou-se que, para juntas com L_0 pequenos (20 mm), o adesivo rígido e frágil (Araldite® AV138) apresenta melhores resultados de força máxima ($P_{máx}$), quando comparado com adesivos dúcteis, mas menos resistentes. Por outro lado, o adesivo Araldite® 2015 (adesivo epóxico dúctil) apresenta o melhor comportamento dos três adesivos para L_0 maiores (40 mm). O adesivo poliuretano (Sikaforce® 7752) revelou ter o $P_{máx}$ inferior em ambas situações estudadas. Isto acontece devido à sua baixa resistência.

KEYWORDS

Adhesive joints; Structure adhesive; Epoxy; Polyurethane; Strength prediction; eXtended Finite Element Method; Cohesive Zone Model; Dissipated Energy.

ABSTRACT

Adhesive joints have been applied in several areas due to their advantages over conventional mechanical joints. Increased strength, reduced weight and ease of fabrication are some of the advantages of this technique. With the evolution in the application of composite materials, namely in the aeronautical and automotive sectors, the adhesive bonding technique has assumed a fundamental role as a bonding technique, since it allows the bonding of dissimilar materials, thus allowing the construction of hybrid structures (metallic materials + composite). The nature of the adhesive becomes a key factor depending on the type of loads the joint will be subjected to. Commercial adhesives can range from stiff and brittle (such as the Araldite® AV138) to flexible and ductile adhesives (such as the Araldite® 2015 and Sikaforce® 7752).

This dissertation aims at the parametric study of single-lap tubular adhesive joints regarding their tensile performance with the above-mentioned adhesives and different overlap lengths (L_0) by the eXtended Finite Element Method (XFEM) with the help of the simulation/ABAQUS® software. The main objective is to evaluate the strength prediction abilities of the XFEM, by comparison with the respective experimental results. A comparison of the results obtained with Cohesive Zone Models (CZM) is also carried out. The parametric numerical study also allows a critical evaluation of the behavior of the adhesives studied in this type of joint, the distribution of peel (σ_v) and shear stresses (τ_{xy}) for $L_0=20$ and 40 mm and the dissipated energy (E_{diss}) during the simulations until failure. It was concluded that, with a correct choice of damage initiation and propagation criteria, the XFEM is a viable and accurate method for the strength prediction of tubular joints. It was observed that, for joints with small L_0 (20 mm), the stiff and brittle adhesive (Araldite® AV138) presents better maximum load (P_{max}) results when compared to ductile adhesives, although less resistant. On the other hand, the Araldite® 2015 (ductile epoxy adhesive) shows the best behavior of the three adhesives for the largest L_0 (40 mm). The polyurethane adhesive (Sikaforce® 7752) was found to have the lowest P_{max} in both situations studied. This is due to its low resistance.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
ADCB	<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i>
AG	Algoritmo Genético
AGPRF	Algoritmo genético de previsão da resistência à fadiga
AL	Alumínio
CO ₂	Dióxido de carbono
ERFV	Epóxido reforçado com fibra de vidro
EXP	Experimental
FPZ	<i>Fracture Process Zone</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MAXE	Critério de deformação nominal máxima
MAXPE	Critério de deformação principal máxima
MAXPS	Critério de tensão principal máxima
MAXS	Critério de tensão nominal máxima
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos

MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
PI	Poliimidas
PRFV	Polímero reforçado com fibra de vidro
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
RU	Radiação ultravioleta
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i>

Lista de Unidades

°	Graus
°C	Graus Celcius
GPa	Gigapascal
Hz	Hertz
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
mm	Milímetro
mm/min	Milímetro por minuto
MPa	Megapascal
N	Newton
N/mm	Newton por milímetro
Nmm	Newton milímetro

Lista de Símbolos

\mathbf{a}_i	Vetor dos graus de liberdade nodais
a	Comprimento da fenda
A	Área da fenda
d_{SE}	Diâmetro externo do aderente exterior
d_{SI}	Diâmetro externo do aderente interior
E	Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G_C	Taxa crítica de libertação de energia
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
k	Fator do momento fletor
K	Fator de intensidade de tensão
L_O	Comprimento de sobreposição
L_S	Comprimento dos aderentes
L_T	Comprimento total da junta tubular
M	Momento fletor
$P_{máx}$	Força máxima
t_A	Espessura do filme adesivo
T_g	Temperatura de transição vítrea
t_n	Componente de tensão normal
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_P	Espessura do aderente

t_s	Componente de tensão normal
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
t_{SE}	Espessura do aderente interior
t_{SI}	Espessura do aderente interior
U	Energia de deformação
u	Vetor de deslocamento
W	Trabalho realizado pela força
α	Parâmetro energético de propagação de dano
γ_f	Deformação de rotura ao corte
δ	Deslocamento
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação máxima
ε_n	Componente de deformação normal
ε_n^0	Limite da componente de deformação normal
ε_s	Componente de deformação ao corte
ε_s^0	Limite da componente de deformação ao corte
σ_f	Tensão de rotura à tração
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão principal máxima
σ_r	Tensão aplicada na direção perpendicular à direção da fenda
σ_y	Distribuição de tensões de arrancamento
τ_{avg}	Tensão de corte média
τ_f	Tensão de rotura ao corte

τ_{xy}	Distribuição de tensões de corte
-------------	----------------------------------

τ_y	Tensão de cedência ao corte
----------	-----------------------------

ν	Coefficiente de Poisson
-------	-------------------------

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Representação esquemática de junta adesiva [4].	8
Figura 2 – Ligações adesivas em fuselagem de aeronaves [4].	10
Figura 3 – Esquema de uma ligação adesiva de estrutura ninho de abelha [6].	11
Figura 4 - Utilização das ligações adesivas na indústria automóvel [7].	11
Figura 5 - Aplicações de ligações adesivas na indústria naval - Sikaflex 295 RU [8].	12
Figura 6 - Passadeiras com iluminação LED no solo por meio de ligação adesiva [10].	13
Figura 7 - Exemplo de ligação adesiva na indústria eletrónica [9].	13
Figura 8 - Ligação adesiva na indústria do calçado [11].	14
Figura 9 - Distribuição de tensões numa junta de topo com carregamento axial e não axial [5].	15
Figura 10 - Tipos de solicitações possíveis numa junta adesiva [12].	15
Figura 11 – Distribuição de tensão em juntas de sobreposição simples [6].	16
Figura 12 - Esquema representativo de junta adesiva sujeita a esforços de clivagem [6].	17
Figura 13 - Esquema de junta adesiva sujeita a esforço de arrancamento [6].	17
Figura 14 - Os adesivos flexíveis e tenazes permitem uma tensão mais distribuída [2].	17
Figura 15 - Representação dos tipos de rotura adesiva [13].	18
Figura 16 - Geometrias de juntas Topo a topo [5].	20
Figura 17 - Geometrias de juntas de sobreposição [5].	20
Figura 18 - Distribuição de tensões em juntas sobreposição em chanfro [5].	21
Figura 19 - Geometrias de juntas do tipo cobre-junta [5].	21
Figura 20 - Juntas cilíndricas para varões (a) e para tubos (b) [4].	22
Figura 21 - Análise de tensões simplificada em junta JSS (a); Diagrama de corpo livre por deformação diferencial (b) [4].	27
Figura 22 - Tensão de corte numa junta de (JSS): análise mais simples [2].	28
Figura 23 - Representação esquemática do fator de momento fletor de Goland e Reissner [3].	28
Figura 24 - Ilustração de singularidades possíveis em JSS [4].	30
Figura 25 - Análise de resistência numa JSS com adesivos dúcteis e com alteração do raio [22].	31
Figura 26 - Representação esquemática da deformação a uma dada distância em juntas de sobreposição simples (JSS) [2].	32

Figura 27 - Modos de rotura [29].	34
Figura 28 - Representação esquemática de ensaio ADCB [32].	35
Figura 29 - Representação esquemática da FPZ em função da espessura do adesivo t_A [36].	36
Figura 30 - Diferentes formas de modo puro das leis MDC: triangular ou exponencial (a) e trapezoidal (b) [18].	36
Figura 31 – 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) [53].	39
Figura 32 – Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [52].	40
Figura 33 – Geometrias comuns de juntas tubulares [4].	42
Figura 34 - Representação esquemática de modelo 2D de junta tubular [61].	43
Figura 35 - Representação esquemática junta tubular com solicitação axial [62].	44
Figura 36 - Distribuição de tensões de Lubkin and Reissner e MEF [62].	45
Figura 37 - Modos de Rotura de juntas tubulares: (a) arrancamento; (b) fratura no tubo de aço [66].	46
Figura 38 - Junta tubular solicitada à tração: (a) geometria genérica; (b) típico elemento diferencial [66].	46
Figura 39 - Junta cilíndrica em estudo. (a) representação esquemática; (b) aderentes retos; (c) bordas limpas no adesivo; (d) aderentes com indentação maquinada; (e) aderentes com raios nas extremidades [67].	47
Figura 40 - Distribuição de tensões de von - Mises ao longo do comprimento de sobreposição [55].	49
Figura 41 - Modelo de elementos finitos das duas juntas adesivas em estudo [69].	50
Figura 42 - Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva obtidas por MEF e solução analítica de Zou e Taheri (a) junta de sobreposição simples; (b) juntas com aplicação de casquilho [69].	50
Figura 43 - Comparação de resultados experimentais e resultados AGPRF baseados no parâmetro de temperatura [71].	52
Figura 44 - Geometria de colagem em chanfro para ligação da tubagem [75].	54
Figura 45 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [82].	60
Figura 46 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [82].	60
Figura 47 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 [37].	62
Figura 48 – Curvas σ - ϵ de adesivo SikaForce® 7752 [86].	63
Figura 49 – Geometria e dimensões das juntas tubulares.	65
Figura 50 - Fabricação dos aderentes: (a) maquinagem do diâmetro exterior; (b) maquinagem do diâmetro interior; (c) maquinagem do rebaixo.	66

Figura 51 - Preparação da superfície dos aderentes: (a) granalhagem da superfície interior; (b) granalhagem da superfície exterior.	66
Figura 52 - Montagem da junta adesiva tubular: (a) aplicação de adesivo; (b) remoção de excesso de adesivo; (c) posição final de cura da junta adesiva.....	67
Figura 53 - Junta tubular com $L_0=40$ mm na máquina Shimadzu AG-X pronta para teste.....	68
Figura 54 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=20$ mm.	68
Figura 55 - Curva $P-\delta$ obtida experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=40$ mm	69
Figura 56 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=20$ mm.	70
Figura 57 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=40$ mm.	71
Figura 58 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=20$ mm.	72
Figura 59 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=40$ mm.	72
Figura 60 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Araldite® AV138: (a) $L_0=20$ mm; (b) $L_0=40$ mm.....	73
Figura 61 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Araldite® 2015: (a) $L_0=20$ mm; (b) $L_0=40$ mm.....	74
Figura 62 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Sikaforce® 7752: (a) $L_0=20$ mm; (b) $L_0=40$ mm.....	74
Figura 63 - Gráfico de $P_{\text{máx}}$ das juntas para os três adesivos em estudo.....	75
Figura 64 - Tipos de secções dos constituintes da junta adesiva tubular no ABAQUS®	77
Figura 65 - Refinamento das malhas para: (a) análise de resistência e (b) análise de tensões.....	78
Figura 66 - Definição da malha com a função <i>Seed Edges</i> : (a) malha nos aderentes e (b) parâmetros de malha.	78
Figura 67 - Condições fronteira e de carregamento impostas ao modelo de MEF.....	79
Figura 68 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) Sikaforce® 7752.....	82
Figura 69 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) Sikaforce® 7752.....	84
Figura 70 - Exemplo de iniciação da fenda e respetiva propagação: (a) critérios de iniciação MAXPE e MAXPS; (b) critérios de iniciação MAXS, QUADS, MAXE e QUADE.....	86
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ dos diferentes critérios de iniciação MEFX das juntas adesivas com Araldite® AV138: (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	86
Figura 72 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano para o adesivo Araldite® AV138.....	87

Figura 73 - Curvas P - δ dos diferentes critérios de iniciação MEFX das juntas adesivas com Araldite® 2015: (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	88
Figura 74 - Plastificação dos aderentes de liga de alumínio AW6082-T651 nas simulações de ABAQUS® dos critérios de iniciação.	89
Figura 75 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano para o adesivo Araldite® 2015.	89
Figura 76 - Curvas P - δ dos diferentes critérios de iniciação MEFX das juntas adesivas com Sikaforce® 7752: (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	91
Figura 77 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano para o adesivo Sikaforce 7752.	92
Figura 78 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ da lei de propagação triangular com diferentes valores de <i>power law</i> para juntas adesivas tubulares com $L_0=20$ e 40 mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.	93
Figura 79 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ da lei de propagação exponencial com diferentes valores de <i>Power law</i> para juntas adesivas tubulares com $L_0=20$ e 40 mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.	95
Figura 80 - Representação simplificada de cálculo do E_{diss}	96
Figura 81 - Resultados de E_{diss} para as juntas tubulares com os três adesivos em estudo com L_0 de 20 e 40 mm.....	97
Figura 82 - Comparação das curvas P - δ para $L_0=20$ mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.	99
Figura 83 - Comparação das curvas P - δ para $L_0=40$ mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.	100

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Comparação dos tipos de ligação [5].....	9
Tabela 2 - Classificação dos adesivos estruturais [2].....	23
Tabela 3 - Características geométricas, propriedade elástica, e solicitação aplicada nas cinco juntas tubulares [62].....	45
Tabela 4 - Erro relativo entre resultados experimentais e AGPRF na resistência à fadiga (N x 1000) para os diferentes tipos de aderentes [71].	52
Tabela 5 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [84]	61
Tabela 6 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [37].....	62
Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [86].	64
Tabela 8 - Designação das cotas dos provetes e respectivos valores.	65
Tabela 9 - Valores obtidos dos ensaios das juntas adesivas com Araldite® AV138.....	70
Tabela 10 - Valores obtidos dos ensaios das juntas adesivas com Araldite® 2015.	71
Tabela 11 - Valores obtidos dos ensaios das juntas adesivas com Sikaforce® 7752.	73
Tabela 12 - $P_{m\acute{a}x}$ Médio e aumento percentual do mesmo [$\Delta P_{m\acute{a}x}$ %] para cada L_0 das juntas tubulares com os três adesivos em estudo.....	75
Tabela 13 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® AV138.....	80
Tabela 14 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® 2015.	81
Tabela 15 - Parâmetros utilizados na análise do MEFX para o adesivo Sikaforce® 7752.	81
Tabela 16 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função de L_0	83
Tabela 17 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos com $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.	84
Tabela 18 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos diferentes critérios de iniciação de dano e respectivo desvio percentual relativamente aos resultados obtidos experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138.	88
Tabela 19 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos diferentes critérios de iniciação de dano e respectivo desvio percentual relativamente aos resultados obtidos experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015.	90
Tabela 20 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos diferentes critérios de iniciação de dano e respectivo desvio percentual relativamente aos resultados obtidos experimentalmente para o adesivo Sikaforce® 7752.	92
Tabela 21 – Resultados de $P_{m\acute{a}x}$ e respectivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas tubulares com os três adesivos em estudo e $L_0=20$ mm.	99

Tabela 22 - Resultados de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas tubulares com os três adesivos em estudo e $L_0=40$ mm.	101
---	-----

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	7
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	10
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	14
2.1.4	Configurações possíveis de junta	19
2.1.5	Adesivos estruturais	22
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	26
2.2.1	Modelos analíticos	26
2.2.2	Modelos numéricos.....	29
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	30
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	32
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	35
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	37
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos eXtendido	38
2.3	Juntas adesivas tubulares	41
2.3.1	Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração.....	42
2.3.2	Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção.....	48
2.3.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga	51
3	DESENVOLVIMENTO.....	59

3.1	Trabalho experimental.....	59
3.1.1	Materiais utilizados.....	59
3.1.2	Aderentes.....	59
3.1.3	Adesivos.....	60
3.1.3.1	Araldite® AV138.....	60
3.1.3.2	Araldite® 2015.....	61
3.1.3.3	Sikaforce® 7752.....	63
3.1.4	Geometria das juntas.....	64
3.1.5	Processo de fabrico.....	65
3.1.6	Resultados obtidos.....	67
3.1.6.1	Curvas P- δ	68
3.1.6.2	Modos de rotura.....	73
3.1.6.3	Resistência das juntas.....	75
3.2	Trabalho numérico.....	76
3.2.1	Condições da análise numérica.....	76
3.2.2	Modelo de dano utilizado.....	79
3.2.3	Determinação das propriedades de dano.....	79
3.2.3.1	Araldite® AV138.....	80
3.2.3.2	Araldite® 2015.....	80
3.2.3.3	Sikaforce® 7752.....	81
3.2.4	Análise de tensões na junta.....	82
3.2.4.1	Tensões de arrancamento.....	82
3.2.4.2	Tensões de corte.....	84
3.2.5	Previsão do comportamento.....	85
3.2.5.1	Estudo do efeito do critério de iniciação.....	86
3.2.5.2	Estudo do efeito da lei de propagação.....	93
3.2.5.3	Estudo da energia dissipada.....	96
3.2.5.4	Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo.....	98
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	105

5	REFERÊNCIAS.....	109
---	------------------	-----

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Com o passar dos tempos as ligações adesivas têm evoluído consideravelmente devido às elevadas exigências impostas em diferentes tipos de indústria. A utilização de ligações adesivas é cada vez mais frequente, visto que estas apresentam vantagem significativas relativamente às ligações mecânicas tradicionais (soldadura, aparafusadas e rebitadas). Esta técnica apresenta como vantagens principais a redução de peso, facilidade de fabricação, possibilidade de unir diferentes tipos de materiais (metálicos e não metálicos), garantir uma distribuição de tensões mais uniforme e bom comportamento a cargas cíclicas. Por outro lado, apresentam certas desvantagens que podem influenciar na seleção do tipo de junta ou o tipo de adesivo, tais como baixa resistência ao arrancamento, necessidade de preparação prévia das superfícies e em alguns casos condições de cura complexas (como pressão e temperaturas elevadas).

A exigência de indústrias, tais como: indústria aeronáutica, indústria automóvel, indústria dos transportes e indústria naval foram os principais responsáveis pela evolução das juntas adesivas estruturais como são conhecidas nos dias de hoje. Este facto ocorre devido à constante procura de redução de peso em estruturas de forma a aumentar a performance e por outro lado diminuir o consumo energético do transporte. Para atingir estes objetivos, foram cada vez mais implementados materiais de baixa densidade, como é o caso dos alumínio e materiais poliméricos. O tipo de ligações adesivas mais utilizadas neste tipo de indústrias são as ligações planas. Contudo, a implementação de juntas adesivas em estruturas tubulares pode ser benéfica, visto que permite reduzir o peso final da estrutura, distribui de forma mais uniforme as tensões, possibilita a junção de materiais dissimilares e as tensões na junta são distribuídas mais uniformemente pela área de contacto.

Nas juntas adesivas é de extrema importância conhecer a natureza dos adesivos a utilizar. Os adesivos comerciais podem ser classificados desde rígidos e frágeis, como é o caso do adesivo Araldite® AV138, a adesivos poliuretanos altamente dúcteis e flexíveis, como por exemplo o Sikaforce® 7752. A resistência e a ductilidade dos adesivos são fatores de extrema importância que influenciam a resistência da junta. A resistência mecânica do adesivo é responsável pela transferência de carga ao longo da junta e a ductilidade absorve as tensões localizadas nas extremidades das juntas. Para além do tipo de adesivos, existem outros parâmetros que influenciam a resistência das juntas

adesivas, tais como o tipo de junta, parâmetros geométricos (variação do comprimento de sobreposição (L_0), alteração da geometria da aresta) e os materiais utilizados.

Atualmente, a previsão de resistência de uma junta adesiva pode ser realizada com ajuda de ferramentas computacionais que permitem elaborar com maior rapidez o dimensionamento de juntas adesivas. Estas ferramentas permitem simular desde juntas simples até estruturas mais complexas. Para esse efeito é cada vez mais utilizado o Método de Elementos Finitos (MEF), que combinado com critérios de iniciação de dano ou modelos de dano, podem prever de uma forma precisa a evolução da junta adesiva quando solicitada. Neste âmbito existem métodos como é o caso do Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), que apresentam bastantes potencialidades para a previsão da resistência de estruturas, mas que ainda não se encontram devidamente validadas para a previsão de resistência de juntas adesivas.

1.2 Objetivos

Na presente dissertação é apresentado o estudo paramétrico numérico pelo MEFX de juntas adesivas tubulares sujeitas a solicitações de tração. Numa primeira etapa, são criados modelos 2D axissimétricos com ajuda do *software* ABAQUS® para as diferentes juntas adesivas constituídas por aderentes em liga de alumínio de alta resistência AW6082-T651, ligados por três diferentes tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752). Nas simulações numéricas foram considerados para cada adesivo dois comprimentos de sobreposição (L_0) distintos (20 e 40 mm).

Este trabalho tem como objetivo analisar o comportamento dos diferentes tipos de adesivos supracitados, analisar a variação de resistência quando L_0 é modificado, e verificar se o MEFX pode ser considerado como um método fiável para a previsão de resistência de juntas adesivas. A análise numérica consiste no estudo da distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} no centro da camada adesiva, na análise por MEFX da variação de $P_{\text{máx}}$ quando é alterado L_0 , na análise dos diferentes critérios de iniciação de dano e lei de propagação mais adequados para prever a resistência da junta, e na análise da energia dissipada (E_{diss}) pela junta durante a solicitação.

A validação dos resultados numéricos obtidos pelo MEFX é realizada por comparação com resultados experimentais e numéricos por MDC obtidos do trabalho de Ferreira [1]. Desta forma, é possível estimar qual o melhor critério de iniciação e propagação de dano a utilizar para prever a resistência das juntas adesivas.

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação está dividida em 4 capítulos. No **capítulo 1** é apresentada a contextualização do tema, seguida dos objetivos propostos e da apresentação da organização do trabalho.

O **capítulo 2** é constituído pela revisão bibliográfica, que aborda as características das juntas adesivas (vantagens e desvantagens), aplicações mais comuns, os adesivos estruturais, os tipos de esforços aplicados em juntas adesivas, os tipos de rotura, e os adesivos estruturais. Também são referidos os diferentes tipos de métodos analíticos e numéricos de previsão de resistência de juntas adesivas. O final deste capítulo é dedicado a alguns trabalhos realizados em juntas adesivas tubulares sujeitas a solicitações estáticas de tração e corte, bem como solicitações de fadiga.

O **capítulo 3** está dividido em dois subcapítulos (**3.1** e **3.2**). No subcapítulo **3.1** corresponde ao trabalho experimental das juntas em estudo. É apresentada a configuração e dimensões das juntas adesivas, assim como as propriedades mecânicas da liga de alumínio AW6082-T651 e propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos em análise. São referidas as diferentes etapas do processo de fabrico e, por último, são apresentados os resultados das curvas $P-\delta$, dos modos de rotura e da resistência das juntas para diferentes L_0 . O subcapítulo **3.2** é referente ao estudo numérico por MEFX, onde são referidas as condições da análise numérica impostas no ABAQUS®, o modelo de dano utilizado, as propriedades mecânicas dos aderentes, e as propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos. De seguida, apresenta-se a análise da distribuição de tensões σ_y e τ_{xy} , a previsão da resistência, onde é apresentado o efeito dos critérios de iniciação e das leis de propagação (triangular e exponencial), e a estimativa da energia dissipada pela junta durante a solicitação até a rotura. Por último, são comparados os resultados obtidos pelo MEFX com os resultados obtidos por MDC.

O **capítulo 4** são apresentadas as conclusões finais, assim como são referidos trabalhos futuros, de forma a complementar o estudo realizado das juntas adesivas tubulares.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O presente capítulo tem como finalidade abordar a temática das juntas adesivas. São indicadas vantagens e desvantagens deste tipo de ligação, assim como também são abordadas as suas aplicações mais comuns, o tipo de esforços a que uma junta adesiva pode estar sujeita, as configurações possíveis das juntas adesivas e o tipo de adesivos existentes nos dias de hoje. Além dos pontos acima referidos também são apresentados os principais métodos analíticos e numéricos da previsão da resistência das juntas adesivas, tendo como principal objetivo a análise das juntas pelo Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX).

2.1 Ligações adesivas

Os adesivos estruturais são uma solução cada vez mais utilizada na indústria, comparando com outro tipo de ligações como é o caso das ligações aparafusadas, rebitadas ou soldadas. Os adesivos estruturais têm sofrido uma enorme evolução nos últimos anos graças ao seu elevado desempenho no que diz respeito à sua resistência mecânica e química.

As ligações adesivas não são uma técnica recente, visto que estas já eram utilizadas desde há muitos séculos. Inicialmente os adesivos eram desenvolvidos com base em elementos naturais como é o caso do adesivo baseado em caseína, que é um material polimérico natural (derivado do leite). Estes adesivos naturais tinham uma boa prestação no desempenho da junta, mas em contacto com ambientes húmidos tornavam-se muito fracos. Este problema dos adesivos naturais foi ultrapassado com o aparecimento de adesivos sintéticos poliméricos nos anos 40 do século XX [2].

Uma das indústrias que mais contribuiu para o desenvolvimento das ligações adesivas foi a indústria aeronáutica e naval devido às necessidades de utilizações de polímeros de forma a reduzir o peso final do projeto. Hoje em dia este tipo de ligação é utilizado em inúmeros sectores como é o caso generalizado da indústria automóvel.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Pode-se considerar um adesivo aquele que, quando aplicado a uma superfície, provoca a aderência entre duas ou mais superfícies e resiste a esforços externos que as tendem a separar. Um adesivo estrutural é aquele que pode suportar cargas elevadas e é responsável pela resistência e rigidez da estrutura [3]. A resistência ao corte pode variar entre 5 MPa para adesivos poliuretanos e 50 MPa para adesivos epóxidos [4].

Na **Figura 1** está representada esquematicamente uma junta adesiva com os respetivos componentes descritos de seguida.

O **aderente** é o material de ligação numa junta adesiva. Este também pode ser designado como aderente.

Os adesivos funcionam pela propriedade da adesão. **Adesão** é a atração entre duas substâncias, resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas. Este conceito é diferente de coesão que só envolve as forças intermoleculares dentro de uma mesma substância.

A região entre o adesivo e o aderente é denominada como a **interfase**. Esta é uma fina região na zona de contacto entre o adesivo e o aderente. A natureza da interfase é um fator crítico na determinação das propriedades de uma ligação adesiva.

A **interface** é o plano de contacto entre as superfícies de dois materiais, e encontra-se localizada na interfase. É útil para descrever a energia superficial. A interface também pode ser designada por **camada limite** (*boundary layer*). Na interfase podem estar contidas várias interfaces entre diferentes materiais localizadas entre o adesivo e o aderente.

O **primário** é a substância que por vezes se utiliza por aplicação direta na superfície dos aderentes com o objetivo de melhorar a adesão ou para proteger as respetivas superfícies até à aplicação do adesivo.

A **junta** é o conjunto formado pelos aderentes, o adesivo, os primários (se presentes) e todas as interfases associadas [2].

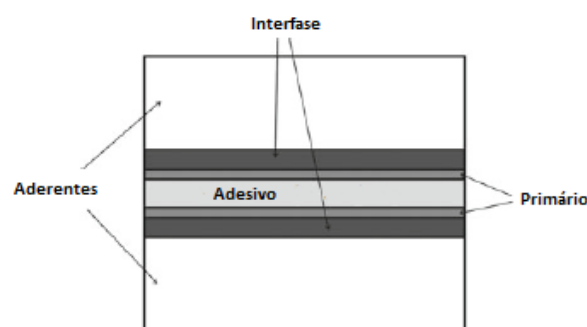


Figura 1 – Representação esquemática de junta adesiva [4].

A escolha de um tipo de ligação numa estrutura, pode não ser uma tarefa fácil. Certos processos de ligação acabam por ter as suas vantagens e subjacentemente as suas desvantagens. Na **Tabela 1** é feita uma comparação entre os diversos métodos de ligação.

Tabela 1 - Comparação dos tipos de ligação [5].

	Ligação soldada	Ligação rebitada	Ligação adesiva
Distribuição de tensões	Pontos localizados na ligação.	Grande concentração de tensões nos locais rebitados/aparafusados.	Boa distribuição de tensões ao longo da junta.
aspecto	Ligação normalmente aceitável.	Descontinuidade na superfície.	Sem deformações na superfície. Ligação quase invisível.
Materiais a ligar	Limitado geralmente a materiais da mesma família.	Ligação de alguns materiais dissimilares.	Ligação de diferentes formas e tipos de família de materiais.
Resistência à temperatura	Elevada resistência à temperatura.	Elevada resistência à temperatura.	Fraca resistência à temperatura.
Resistência mecânica	Boa resistência, em alguns casos é necessário melhorar resistência a fadiga.	Especial cuidado devido a fadiga que pode provocar afrouxamento da junta.	Excelente resistência à fadiga. Resistência elétrica reduz a corrosão.
Preparação da junta	Alguma ou nenhuma. Preparação da aresta em placas espezas.	Preparação dos furos.	Limpeza frequentemente necessária.
Pós-processamento	Tratamento térmico caso necessário.	Normalmente não necessário.	Sem pós-processamento.
Tipo de junta	Permanente.	Não permanente.	Permanente.
Custos de processo	Relativamente caro, elevados consumos elétricos.	Processo económico.	Apenas elevados recursos, dispensadores têm custos elevado.
Tempo de execução	Pode ser extremamente rápido.	Preparação da junta demorado.	Segundos ou horas, depende do tipo de colagem.
Inspeção de qualidade	Aplicação de métodos não destrutivos.	Confiança razoável na verificação do binário de aperto.	Limitado em alguns ensaios não destrutivas.

Em suma, as juntas adesivas oferecem inúmeras vantagens, mas em alguns casos, devido aos custos de processo, tempo de execução e principalmente a sua resistência a agentes químicos, à temperatura e ao meio ambiente, podem não ser a solução mais conveniente para o projeto. O conhecimento das propriedades do adesivo permite projetar a junta para garantir que o nível de tensão no adesivo não exceda a sua resistência. É necessário recorrer a métodos de dimensionamento que têm em conta a resistência mecânica estática e, eventualmente, a resistência à fadiga e à fluência [2].

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As ligações adesivas têm tido um papel fundamental para diversos setores, nomeadamente a indústria aeronáutica, automóvel, naval, construção civil, eletrónica entre outras, sendo a indústria aeronáutica e automóvel as que mais utilizam adesivos na atualidade [2]. As ligações adesivas são uma técnica com inúmeras aplicações, visto que tornam possível a união de diversos materiais, e permitem reduzir o peso de projeto devido à possibilidade de ligar materiais dissimilares [4].

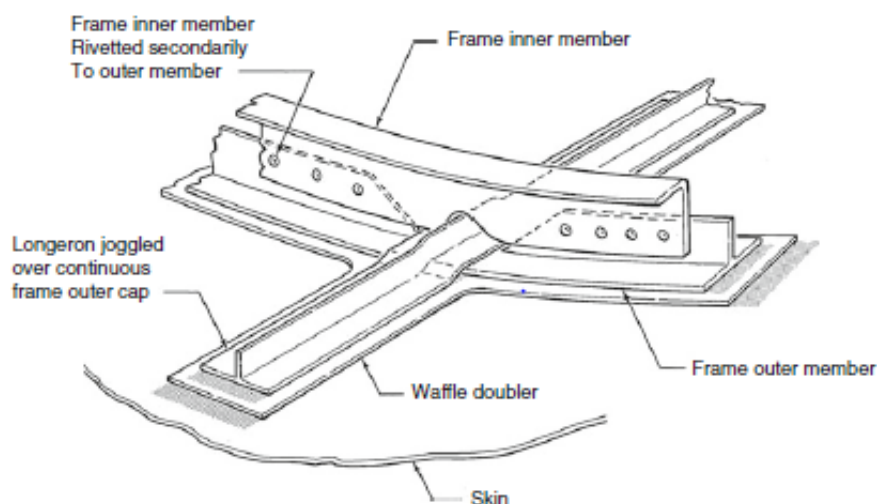


Figura 2 – Ligações adesivas em fuselagem de aeronaves [4].

Na indústria aeronáutica é possível encontrar diversas aplicações onde são utilizadas ligações adesivas. Estas podem ser ligações estruturais, ligações estas que permitem a transmissão de esforços entre componentes, como é o caso das ligações de reforço das fuselagens (**Figura 2**) e também permitem a construção de estruturas do tipo ninho de abelha (*honeycomb structure*) (**Figura 3**), este tipo de estruturas é utilizado na construção de asas de aeronaves.

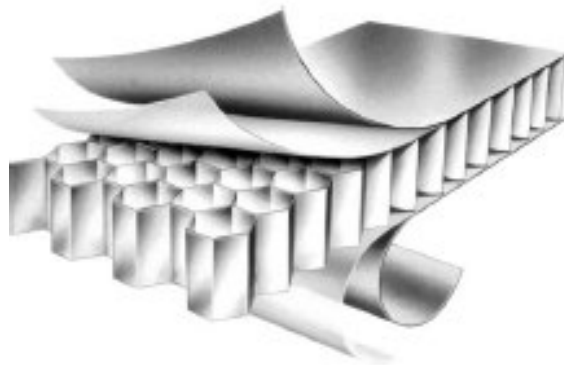


Figura 3 – Esquema de uma ligação adesiva de estrutura ninho de abelha [6].

A indústria automóvel é um bom exemplo na utilização das ligações adesivas. A preocupação em reduzir o peso do automóvel de forma a reduzir os consumos e aumentar a performance originou um aumento significativo na utilização de materiais mais leves, como o alumínio e os materiais compósitos. Os materiais compósitos são difíceis de ligar pelos métodos tradicionais, sendo o adesivo uma solução viável para o efeito. Hoje em dia os adesivos são frequentemente utilizados em diversos componentes constituintes do automóvel, nomeadamente: em capôs, para-brisas, vidro traseiro, forras de portas, óticas, entre outras (**Figura 4**). Em alguns casos considera-se a combinação de juntas híbridas entre soldadura e adesivo. Outros meios de transporte como autocarros, camiões, e ferroviários estão a ser fabricados com materiais mais leves de forma a controlar os níveis de CO₂ utilizando adesivos estruturais como meio de ligação [2].



Figura 4 - Utilização das ligações adesivas na indústria automóvel [7].

A indústria naval (**Figura 5**) tem evoluído consideravelmente nos materiais de construção à semelhança da indústria automóvel. É cada vez mais frequente a utilização de polímeros devido à sua reduzida densidade e elevada resistência à corrosão e à sua facilidade de processamento [2], sendo a ligação adesiva a tecnologia utilizada como meio de ligação do compósito. Neste caso é necessário ter em consideração a resistência do adesivo ao meio marinho e à radiação ultravioleta (RU), fatores estes que podem enfraquecer a ligação. Existem inúmeras aplicações onde é possível a utilização de ligações adesivas, como é o caso da colagem do reforço do casco, convés, janelas, entre outras.

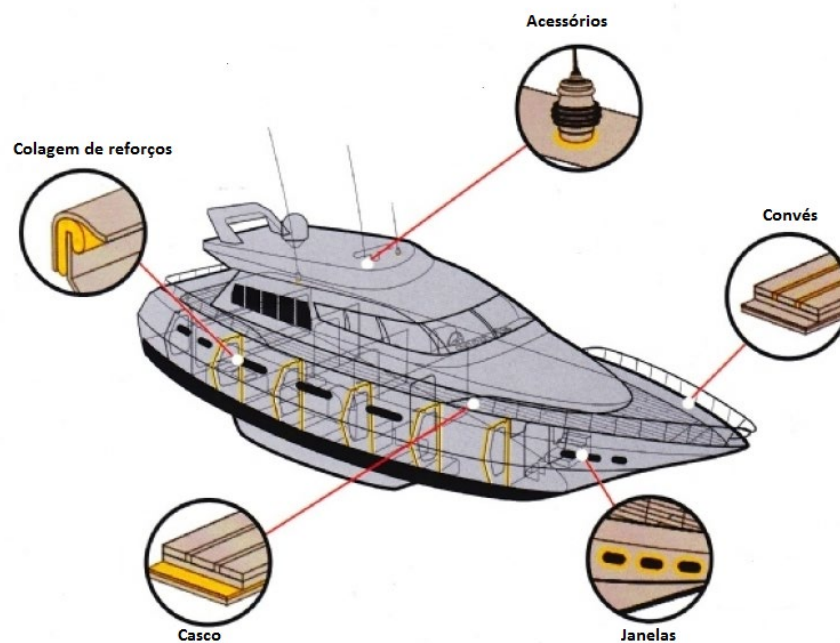


Figura 5 - Aplicações de ligações adesivas na indústria naval - Sikaflex 295 RU [8].

A indústria da construção civil pode ser considerada uma das que possui uma maior diversidade de materiais que podem ser utilizados na construção de casa, pontes, pavilhões, estradas, entre outras. No caso da construção de casas podem-se encontrar diversas ligações adesivas, como é o caso dos caixilhos das janelas, colagem de painéis de madeiras nas padieiras e rodapés. Noutros setores da construção civil é possível encontrar nos dias de hoje inúmeras aplicações que utilizam a tecnologia do adesivo, como é o caso dos painéis sanduiche, onde são ligadas chapas de aço com espuma de poliuretano. Outro exemplo da diversidade do adesivo diz respeito à construção de estradas onde o adesivo tem duas principais utilidades, a de colagem dos refletores de estrada ou luzes de passadeira (**Figura 6**) e a de colagem de *bullnosing* (guias sonoras). Os *bullnosing* requerem adesivos com uma boa resistência ao impacto e à compressão [9].

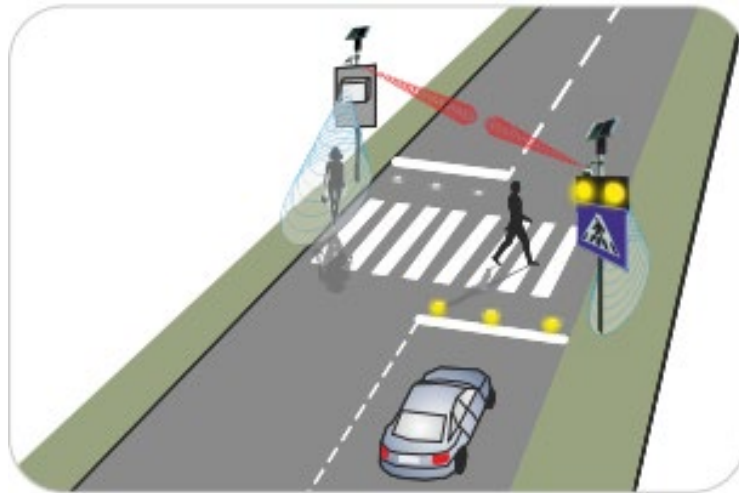


Figura 6 - Passadeiras com iluminação LED no solo por meio de ligação adesiva [10].

A indústria eletrônica utiliza inúmeras vezes no seu processo produtivo as ligações adesivas. Os ramos da micro-eletrônica e eletrônica de potência representam o ramo de crescimento mais rápido da indústria [5]. A ligação adesiva é cada vez mais importante neste setor. Existem diversas pesquisas e centros de pesquisa que estão a trabalhar para solucionar os problemas existentes na aplicação de adesivos na indústria eletrônica. Para garantir um funcionamento correto dos sistemas eletrônicos o adesivo deve oferecer um comportamento térmico e mecânico fiável [9]. O adesivo oferece inúmeras vantagens tais como: a utilização de aderentes economicamente viáveis, processo de aplicação automático, rápido e preciso, e a possibilidade de colocar uma quantidade considerável de componentes no mesmo circuito. Outra aplicação predominante do adesivo na indústria eletrônica está relacionada com a proteção ou encapsulamento do chip integrado de forma a proteger contra agentes externos (**Figura 7**).

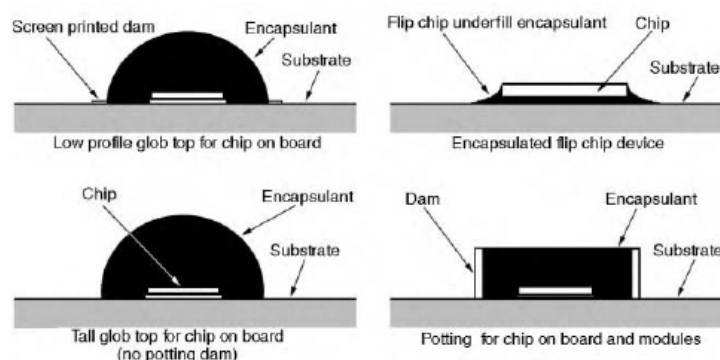


Figura 7 - Exemplo de ligação adesiva na indústria eletrônica [9].

Outros exemplos de aplicação de ligação adesivas estruturais são a indústria do calçado (**Figura 8**), e o desporto (bicicletas, raquetes de ténis, tacos de golfe, esquis, etc.) [2].



Figura 8 - Ligação adesiva na indústria do calçado [11].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

No projeto de uma junta adesiva é necessário analisar quais serão os esforços predominantes a que a junta estará sujeita, para que desta forma seja possível selecionar o adesivo que mais se adequa para as solicitações de projeto. Uma má seleção do adesivo para um determinado propósito pode dar origem a uma concentração de tensões elevadas e por consequência pode provocar o colapso parcial ou total da ligação.

É raro encontrar uma distribuição de tensões uniforme numa junta adesiva. É de facto normal encontrar uma distribuição não uniforme (**Figura 9**). As forças aplicadas produzem tensões que podem ser varias vezes a tensão média [2].

Analisando a **Figura 9** pode-se verificar que as tensões desenvolvidas na primeira situação (distribuição uniforme) são mais favoráveis para a junta. Já no segundo caso, que representa a junta com carregamento não uniforme, é possível verificar uma concentração de tensões localizadas e não distribuída ao longo da superfície.

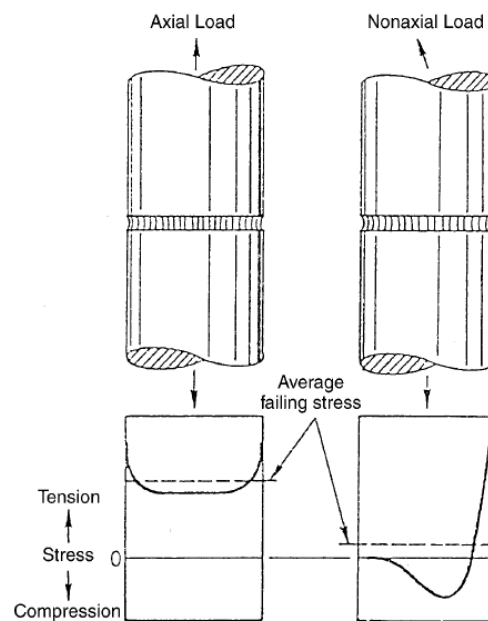


Figura 9 - Distribuição de tensões numa junta de topo com carregamento axial e não axial [5].

Em suma existem principalmente cinco modos fundamentais de carregamento: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento (**Figura 10**). Existem também outros tipos de carregamentos que correspondem a uma variação daqueles que irão ser abordados [2].

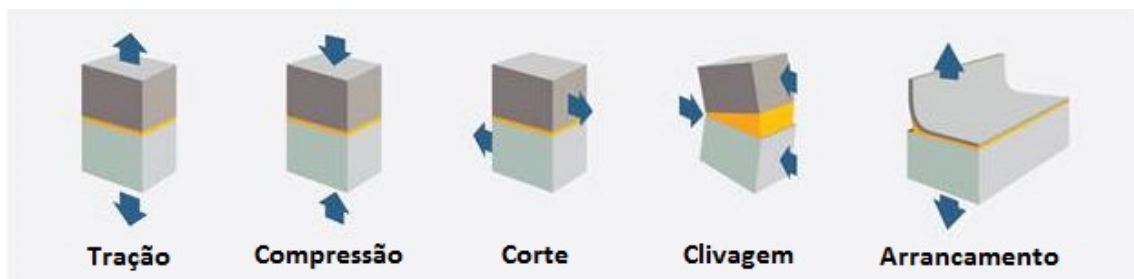


Figura 10 - Tipos de solicitações possíveis numa junta adesiva [12].

Tração e compressão

Os esforços de tração desenvolvem-se quando as forças atuando perpendicularmente ao plano da junta são distribuídas ao longo da superfície colada. As juntas sujeitas a este tipo de solicitações devem de ser desenvolvidas com restrições físicas de modo a garantir o carregamento axial uniforme e contínuo. Os aderentes também devem possuir rigidez suficiente de forma a que as tensões sejam distribuídas de forma homogénea pela junta adesiva [5]. Na prática visto que existe dificuldade em garantir tanto o alinhamento dos aderentes como a espessura do adesivo, as solicitações dificilmente são puramente axiais, o que origina tensões (**Figura 9**) de clivagem ou de arrancamento, que serão caracterizadas posteriormente [2].

As solicitações de compressão são o oposto das solicitações a tração. Tal como nos esforços de tração, é necessário garantir o alinhamento dos esforços para que desta forma o adesivo esteja solicitado à compressão pura. Uma junta adesiva em compressão só rompe se a distribuição de tensões não for uniforme. Na realidade, se uma junta estiver em compressão pura e os aderentes não tiverem movimento um em relação ao outro, esta junta quase que não necessita de adesivo [5].

Corte

Os esforços de corte resultam de forças que atuam paralelamente ao plano da junta e tendem a fazer deslizar os aderentes. Como toda a área colada resiste ao mesmo tempo, as juntas adesivas tornam-se mais resistentes e, desta forma, resistem melhor quando solicitadas. As juntas solicitadas ao corte dependem exclusivamente da resistência do adesivo, são fáceis de executar e são muito comuns na prática. Relativamente aos cuidados a ter no que diz respeito ao alinhamento da junta, neste caso é relativamente fácil garantir o dito alinhamento [5].

A junta de sobreposição simples (*single-lap joint*) mostrada na **Figura 11** representa o tipo de junta mais comum. As tensões de corte são obtidas dividindo simplesmente a força aplicada pela área colada [2, 5].

Pela análise da **Figura 11**, conclui-se que a maior parte das tensões de corte estão localizadas nas extremidades de sobreposição, o que faz com que o centro da junta contribua pouco para a resistência da mesma.

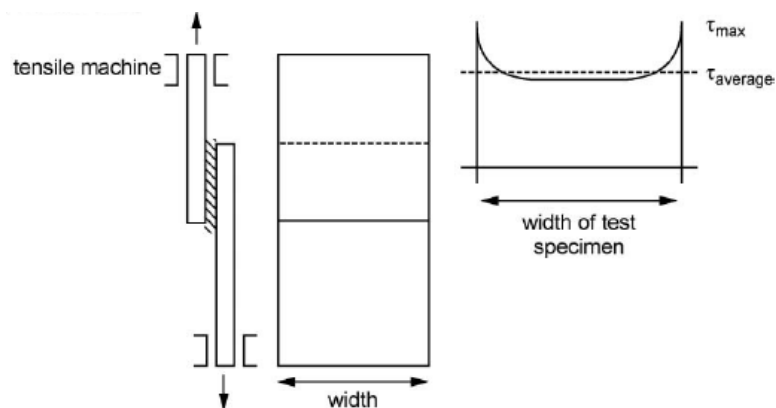


Figura 11 – Distribuição de tensão em juntas de sobreposição simples [6].

Clivagem e arrancamento

Os esforços de clivagem e arrancamento são indesejados numa ligação adesiva. A clivagem (**Figura 12**) corresponde às tensões geradas quando se aplica uma força de separação numa das extremidades dos aderentes, sendo que ambos os aderentes são rígidos. O arrancamento (*peel*) (**Figura 13**) é muito similar à clivagem, só que pelo menos um dos aderentes é flexível. Assim o ângulo gerado durante a separação dos aderentes é muito maior no arrancamento do que na clivagem.

As juntas adesivas, quando submetidas a esforços de clivagem ou arrancamento, têm um comportamento mais frágil comparando com as juntas sujeitas ao corte, porque as tensões estão concentradas numa pequena área em vez de se encontrarem distribuídas por toda a junta [5]. O diagrama de tensões de uma ligação sujeita a esforços de clivagem, está representado na **Figura 12**. Toda a tensão está concentrada no final da colagem onde está a ser feito o carregamento. O adesivo que se encontra na outra extremidade contribui pouco para a resistência da junta [2].

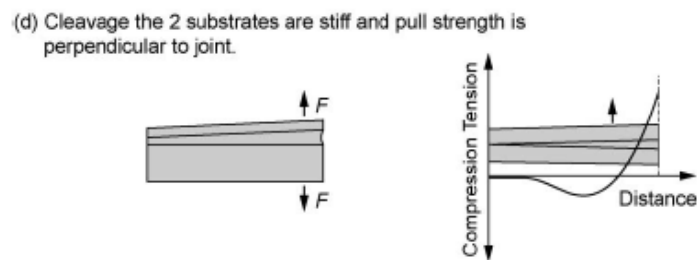


Figura 12 - Esquema representativo de junta adesiva sujeita a esforços de clivagem [6].

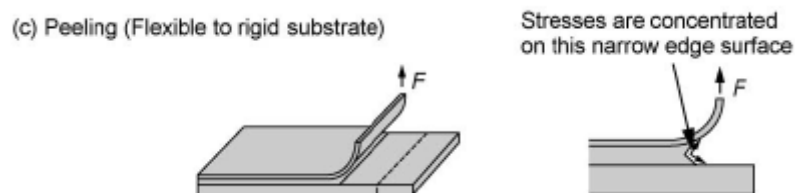


Figura 13 - Esquema de junta adesiva sujeita a esforço de arrancamento [6].

Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis a forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões mais distribuída pela camada adesiva e permitem uma maior resistência [2] (**Figura 14**).

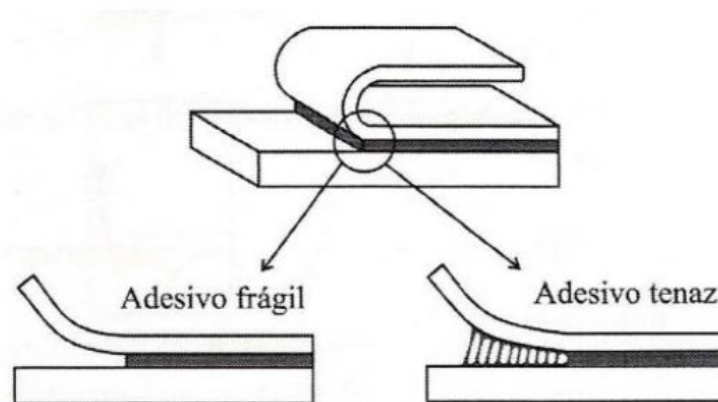


Figura 14 - Os adesivos flexíveis e tenazes permitem uma tensão mais distribuída [2].

Modos de rotura

A norma ASTM D 5573-99 prevê os principais modos de rotura numa junta adesiva (**Figura 15**), e estes podem ser:

- **Rotura adesiva**, na interface entre o aderente e o adesivo;
- **Rotura coesiva**, no interior do adesivo;
- **Rotura do aderente**;
- **Rotura mista**.

De forma a compreender o comportamento de um adesivo numa determinada junta é necessário caracterizar o tipo de rotura ocorrida durante os ensaios. O modo de rotura é determinado pela qualidade da junta, geometria da junta e tipo de carregamento [5].

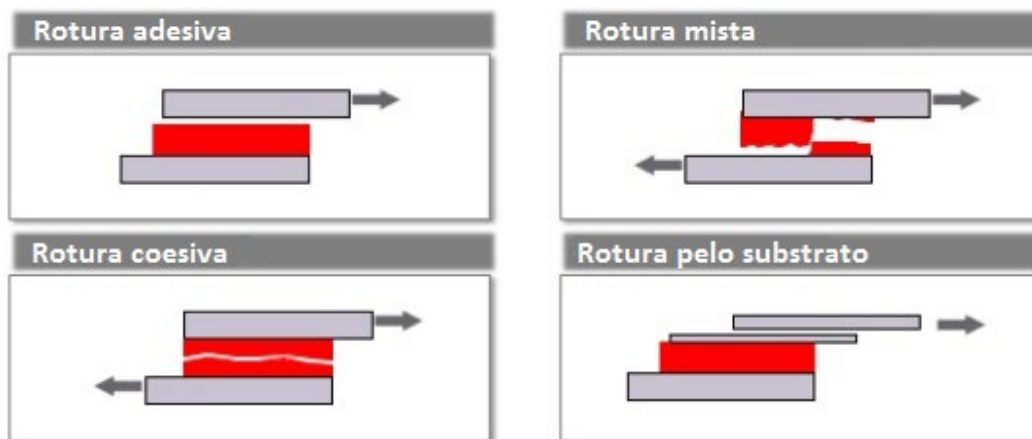


Figura 15 - Representação dos tipos de rotura adesiva [13].

A rotura adesiva ocorre na interface entre o aderente e o adesivo e, geralmente, este tipo de rotura está relacionado com uma má preparação da superfície. Neste tipo de rotura é possível verificar que um dos aderentes não contém nenhum vestígio de adesivo.

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais rígida do que a resistência interna do adesivo. Nesta situação os aderentes encontram-se ambos com vestígios de adesivo.

A rotura pelo aderente ocorre quando a resistência da junta é muito superior à resistência à tração do aderente. Este tipo de rotura é a mais desejável numa ligação adesiva.

Por último, a rotura mista é uma combinação entre a rotura adesiva e a rotura coesiva. Este tipo de rotura está relacionada com uma má preparação dos aderentes em determinadas zonas.

2.1.4 Configurações possíveis de junta

As configurações das juntas adesivas, relativamente à sua geometria, têm em consideração alguns aspetos importantes. Estes aspetos são a base para ser possível determinar uma geometria ideal [5]:

1. Evitar solicitações elevadas nas extremidades da colagem;
2. A junta tem que trabalhar maioritariamente com solicitações de corte;
3. Os esforços de clivagem e arrancamento devem de ser minimizados ao máximo;
4. Promover uma distribuição de tensões ao longo de toda a área da junta;
5. Em geral, adesivos mais rígidos são melhores ao corte e adesivos flexíveis são melhores ao arrancamento;
6. Normalmente, um adesivo mais forte pode produzir uma junta mais resistente. Um adesivo mais dúctil com uma menor resistência de coesão pode produzir uma junta mais resistente em aplicações onde as tensões são distribuídas de maneira não uniforme;
7. A rigidez do aderente e do adesivo influenciam consideravelmente a junta. Quanto mais rígido o aderente em relação ao adesivo, mais uniforme é a distribuição de tensões;
8. A resistência da junta é diretamente proporcional à largura de ligação;
9. Quanto maior o módulo de elasticidade longitudinal do aderente (E), menor é a probabilidade de este se deformar com a carga o que se traduz numa ligação mais rígida;
10. Dentro dos limites do razoável, a espessura do adesivo não é um fator predominante na resistência da junta, o mais importante é que a espessura do adesivo seja o mais uniforme possível.

A junta adesiva ideal é aquela em que, sob todas as condições de carregamento, o adesivo está a ser solicitado na direção mais resistente.

Alguns projetos de juntas podem ser impraticáveis, caros ou difíceis de alinhar. O engenheiro do Projeto muitas vezes tem que ter em consideração estes fatores de forma a conseguir o desempenho ideal da junta [5]. Entre os tipos de juntas mais comuns destacam-se as juntas topo a topo, juntas de sobreposição, juntas com cobre-juntas e juntas cilíndricas ou tubulares [5].

Juntas topo a topo

As juntas topo a topo são as juntas mais simples de produzir. No entanto, estas juntas não podem suportar solicitações à flexão, visto que o adesivo estaria sujeito a esforços de clivagem. As juntas de topo podem ser melhoradas de forma a conseguir um melhor comportamento às solicitações (**Figura 16**).

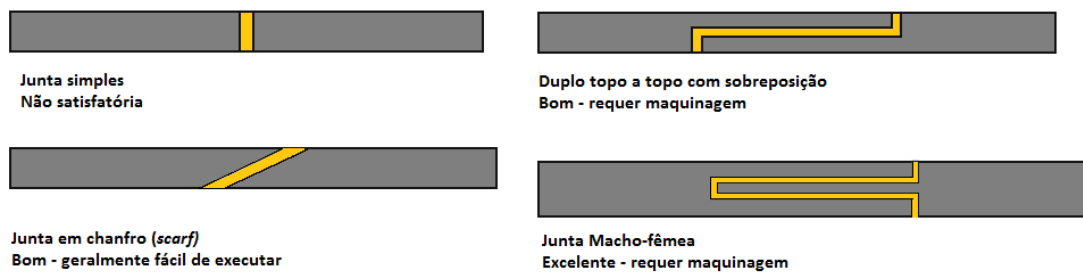


Figura 16 - Geometrias de juntas Topo a topo [5].

Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição (**Figura 17**) são as mais utilizadas tendo em conta a sua facilidade de execução, e também devido ao adesivo ser solicitado maioritariamente ao corte. Uma das limitações das juntas de sobreposição simples (JSS) está relacionada com o desalinhamento que existe entre os aderentes, logo quando este tipo de junta se encontra solicitada à tração são originadas tensões de arrancamento nas extremidades de sobreposição. De forma a reduzir o efeito destas tensões indesejadas podem ser consideradas outras geometrias, como por exemplo a juntas de sobreposição dupla (JSD), entre outras.

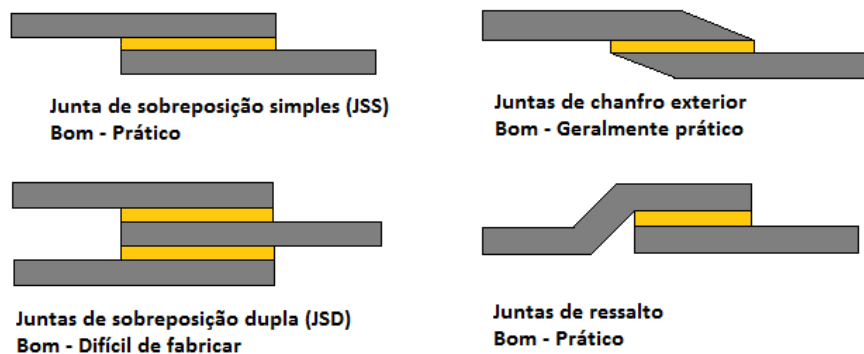


Figura 17 - Geometrias de juntas de sobreposição [5].

A vantagem das juntas de sobreposição simples com chanfro exterior relativamente às juntas de sobreposição simples (JSS) é que a aresta reduzida na extremidade da junta melhora a sua capacidade de carga, visto que permite que o aderente se deforme e assim a sua distribuição de tensões se propague ao longo do comprimento da área ligada. Na **Figura 18** é possível verificar a distribuição de tensões conforme a dimensão do chanfro aplicado.

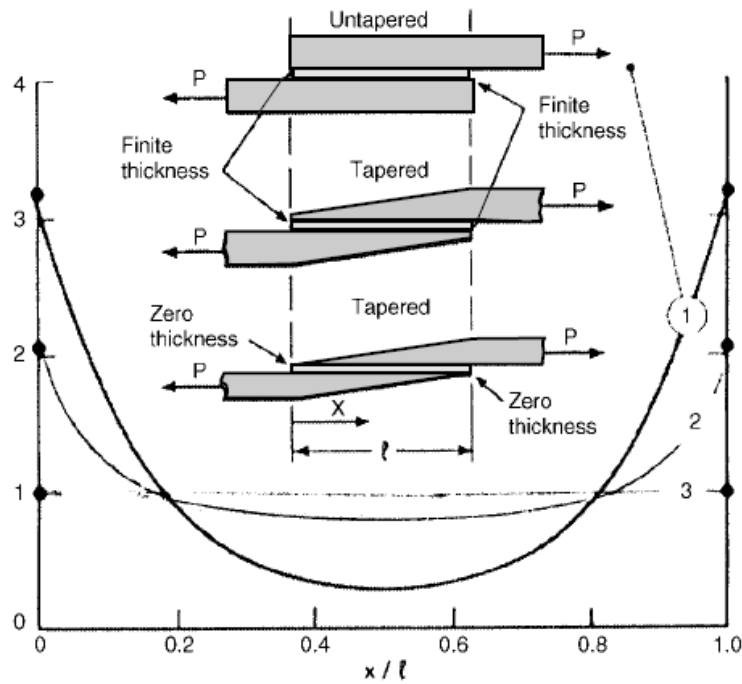


Figura 18 - Distribuição de tensões em juntas sobreposição em chanfro [5].

Juntas com cobre-juntas

As juntas do tipo cobre-junta (**Figura 19**) são utilizadas para manter as solicitações externas alinhadas com a junta. Normalmente são utilizadas quando as juntas de sobreposição são impraticáveis devido à espessura dos aderentes. Tal como nas juntas de sobreposição, as extremidades desta estão submetidas a esforços de arrancamento. As juntas cobre-juntas dupla são mais favoráveis, visto que existe uma melhor distribuição de tensões por toda a superfície colada e evita que se origine tensão de arrancamento.

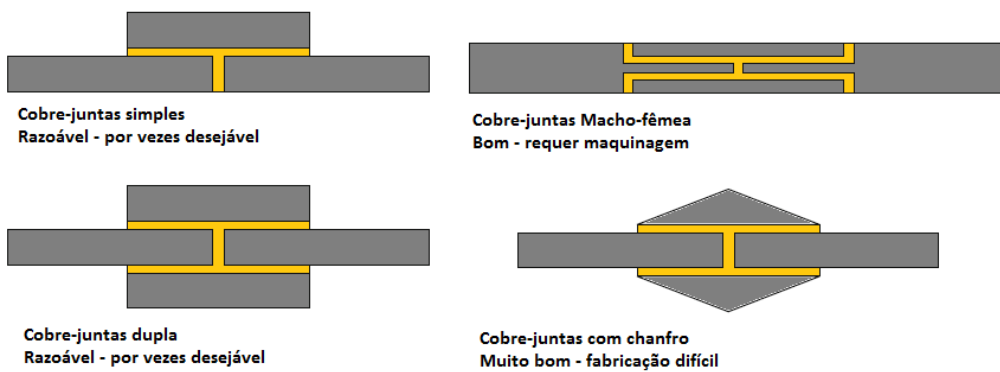


Figura 19 - Geometrias de juntas do tipo cobre-junta [5].

Juntas cilíndricas ou tubulares

As ligações adesivas são muito convenientes para a ligação entre tubos. As juntas tubulares podem ter extremidades retas ou em chanfro. Este tipo de junta oferece uma elevada resistência à flexão e subseqüentemente aos esforços de clivagem. Infelizmente quase todas as geometrias requerem um processo de maquinagem. Na **Figura 20** estão exemplificados alguns tipos de geometria para juntas tubulares [2, 5].

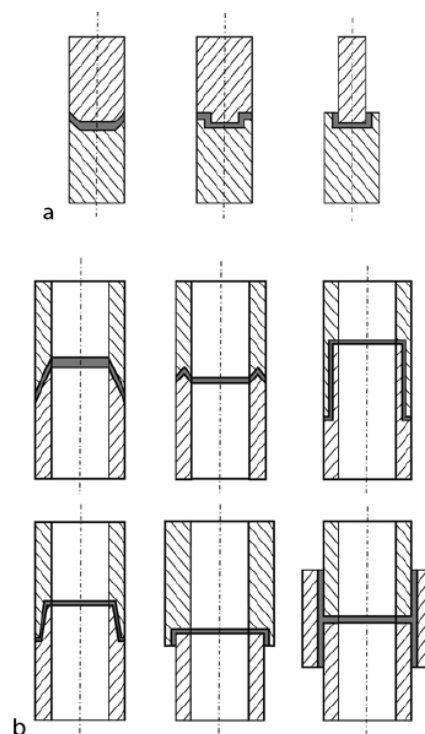


Figura 20 - Juntas cilíndricas para varões (a) e para tubos (b) [4].

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são adesivos normalmente utilizados em aplicações permanentes onde é necessária uma elevada resistência. Muitas vezes constituem o principal meio de ligação em aplicações estruturais. São geralmente termoendurecíveis que necessitam reticulação química com a adição de um endurecedor e ou fornecimento de calor [2]. Dentro da família dos adesivos estruturais podem ser encontrados os adesivos híbridos, que consistem no melhoramento das suas capacidades mecânicas ou químicas do adesivo base com outros componentes.

Na **Tabela 2** são classificadas as diferentes famílias de adesivos estruturais assim como também as possíveis modificações para melhorar as propriedades mecânicas ou químicas dos adesivos.

Tabela 2 - Classificação dos adesivos estruturais [2]

Adesivos estruturais	
Epóxico	Epóxidos-poliâmidas Epóxido-polisulfureto Epóxido-fenólicos Epóxido-nitrilo Epóxido-vinilos Epóxido-nylons Epóxido modificados Epóxido-polisulfitos Resinas de epóxido
Fenólicos	Fenólicos-vinílicos Fenólicos-nitrilos Fenólicos-policloropreno Fenólicos-neopreno
Acrílicos	Anaeróbicos Cianoacrilatos Modificados
Poliuretanos Poliaromáticos de alta temperatura Melaminas	Poliimidas Bismaleimidas Polibenzimidazol

Epóxidos

Os adesivos epóxicos foram introduzidos comercialmente em 1946 e têm uma vasta aplicação na indústria aeronáutica e automóvel. São provavelmente os mais versáteis, visto que aderem a diferentes tipos de aderentes e facilmente podem ser modificados para alcançar propriedades muito variadas. Estas modificações podem ser conseguidas da seguinte forma:

1. Adição de cargas e componentes orgânicos ou inorgânicos;
2. Aplicação de polímeros ou elastómeros de modo a aumentar as propriedades mecânicas;
3. Modificação da resina resultante através da escolha da cura, agentes e mecanismos de reação.

Os adesivos epóxicos podem oferecer uma variedade quase infinita de propriedades finais, bem como uma ampla diversidade de aplicações e tempos de cura.

Graças às suas excelentes características de molhagem, os adesivos epóxicos oferecem um elevado grau de adesão em diversos tipos de aderentes, exceto em superfícies de

baixa energia de adesão, tais como plásticos superficialmente não tratados. As resinas de epóxido oferecem um excelente comportamento à tração assim como também uma boa resistência ao meio ambiente [5].

Os epóxidos comerciais são compostos por uma resina epóxida e um endurecedor (*curing agent*). O endurecedor pode ser incorporado na resina, onde resulta um adesivo de um componente, ou pode ser fornecido num recipiente separado que deve depois ser misturado no momento da sua aplicação. Os epóxidos podem ser líquidos, pasta, filmes e sólidos.

Os adesivos epóxidos híbridos são concebidos com a finalidade de melhorar certas propriedades. Podem ser encontrados epóxidos modificados com elastómeros de forma a aumentar a tenacidade e melhorar a resistência ao arrancamento. Também são muito comuns adesivos epóxidos-fenólicos para melhorar a resistência a altas temperaturas. No que diz respeito à resistência a baixas temperaturas, são utilizados epóxidos com resinas de polisulfeto. Os epóxidos-polisulfetos têm boas propriedades até os -100°C. Outra propriedade não menos importante é a resistência ao impacto dos adesivos epóxidos e esta pode ser melhorada com a adição de polímeros de vinilo na sua composição [5].

Fenólicos

As resinas fenólicas são o produto da condensação de fenol e formaldeído. Os adesivos fenólicos e de fenol-formaldeído são usados principalmente na colagem de madeiras. Devido a sua boa resistência ao calor e boa estabilidade dimensional, têm sido usados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição.

Os adesivos fenólicos oferecem uma ligação geralmente mais resistente do que os aderentes de madeira. A sua durabilidade é boa e a ligação apresenta boa resistência a fungos e à água a alta temperatura. Podem ser utilizados no exterior e as suas propriedades não são muito afetadas por baixas temperaturas [2, 5].

As resinas fenólicas também têm sido utilizadas para colar metal e madeira. No entanto, esta ligação é frágil e tende a estilhaçar sob impacto ou vibração. Por conseguinte, os adesivos fenólicos são muitas vezes modificados pela adição de elastómeros para melhorar a tenacidade e a resistência ao arrancamento [2].

À semelhança dos adesivos epóxidos, também existem adesivos fenólicos híbridos de forma a melhorar a flexibilidade dos fenólicos. Esta modificação é feita através da inclusão de borrachas sintéticas ou termoplásticos. Este tipo de adesivo modificado pode ser aplicado em ligações estruturais, nomeadamente de metais. Os adesivos fenólicos híbridos mais comuns são vinilo-fenólico, nitrilo-fenólico e neopreno-fenólico.

Acrílicos

Os adesivos acrílicos dividem-se em cianoacrilatos, anaeróbicos e acrílicos modificados. Os cianoacrilatos tornaram-se conhecidos após a sua introdução no mercado no início

dos anos 70 com a designação de “supercola”. Estes adesivos têm a particularidade de possuírem um componente de cura rápida e têm uma excelente resistência ao corte. Estes adesivos estão disponíveis em líquidos de baixa viscosidade que curam em poucos segundos. Os cianoacrilatos aderem bem em muitos aderentes. Quando se trata de metais ou outros materiais rígidos, os cianoacrilatos de metilo são mais resistentes ao impacto do que os cianoacrilatos de etilo. No entanto, os cianoacrilatos de etilo são preferidos para borrachas ou superfícies plásticas. Os cianoacrilatos têm baixa resistência ao calor e à humidade. A sua resistência ao arrancamento e ao impacto é também reduzida [2].

Os adesivos baseados no monómero acrilato, são designados por anaeróbicos porque curam quando o ar é excluído da resina. São essencialmente líquidos finos monoméricos que polimerizam para formar uma ligação plástica tenaz quando confinados entre juntas metálicas. Estes adesivos podem ligar todos os metais comuns, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis. Os adesivos anaeróbicos são conhecidos por serem de uma parte, fáceis de usar, e com uma cura rápida à temperatura ambiente. Estes adesivos podem ser encontrados em diversas viscosidades. A velocidade de cura depende do tipo de aderentes a ligar. Podem curar em alguns minutos ou horas sem primário à temperatura ambiente, caso seja necessário acelerar o processo de cura deste tipo de adesivos pode se aplicado um primário ou calor.

Alguns acrílicos anaeróbicos podem resistir a temperaturas de aproximadamente 230 °C. No entanto, geralmente a sua temperatura máxima é de 150 °C. Têm boa resistência à humidade e solventes e a resistência à pulverização de sal é excelente [2].

Poliuretanos

Os adesivos poliuretanos podem apresentar-se sólidos ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes, tais como os adesivos epóxidos. Estes adesivos podem curar à temperatura ambiente ou a alta temperatura caso seja necessário acelerar o seu processo de cura. Os adesivos poliuretanos são flexíveis e têm elevada resistência ao corte e ao arrancamento. Os adesivos poliuretanos formam uma junta com boa tenacidade e têm melhor resistência a temperaturas baixas (criogénicas) do que outros adesivos.

Os adesivos poliuretanos têm uma boa resistência química, mas inferior aos adesivos epóxidos e acrílicos. Não possuem uma elevada resistência a altas temperaturas. A temperatura máxima é de aproximadamente 150°C, mas uma grande parte dos adesivos poliuretanos são utilizados abaixo dos 120°C. Alguns poliuretanos degradam-se facilmente quando expostos a ambientes húmidos. Isto acontece no estado curado e também no estado não curado.

Os adesivos poliuretanos possuem uma boa capacidade de molhagem e também boa flexibilidade, que permitem ao adesivo aderir bem em muitos aderentes incluindo polímeros difíceis de colar. Como são flexíveis, os poliuretanos muitas vezes são

aplicados em juntas onde os aderentes não possuem uma elevada rigidez como é o caso dos filmes, folhas metálicas e elastómeros. Na indústria automóvel são utilizados inúmeras vezes os adesivos poliuretano devido às suas boas propriedades de adesão em painéis moldados por *sheet molding compound* (SMC) e nos polímeros moldados por injeção *reaction injection molding* (RIM) [2, 5].

Poliimidas

As poliimidas (PI) foram desenvolvidas pela NASA para a indústria aeroespacial. Têm uma temperatura de transição vítrea (T_g) pelo menos 100°C superior aos epóxidos e por isso podem ser utilizados a temperaturas mais elevadas. No entanto, têm um elevado custo de aquisição e requerem elevadas temperaturas para efetuar a cura, o que torna o processo mais dispendioso. Existem atualmente dois tipos de poliimidas: as que curam por reação de condensação e as que curam por reação de adição. As PI são capazes de resistir a temperaturas da ordem dos 250-300°C para longos períodos e até 540°C para períodos curtos.

A diferença entre as poliimidas de condensação e as poliimidas de adição é que as primeiras produzem humidade como subproduto, o que pode originar vazios, e necessitam de solventes para facilitar o escoamento. No caso das poliimidas de adição, estas não libertam humidade no processo de cura. No entanto, necessitam solventes de alta temperatura para permitir o escoamento do adesivo [5].

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

Quando se projeta uma junta adesiva é de extrema importância analisar qual será a sua capacidade de resistir as solicitações que serão impostas na prática. Este estudo prévio é de extrema importância, visto que desta forma é possível selecionar os adesivos e aderentes que mais satisfaçam as condições de trabalho, e assim desta forma evitar que a junta tenha um tempo de vida limitado.

Existem diferentes tipos de análise que podem ser utilizados de forma a prever a resistência de uma junta adesiva. Estas análises podem ser realizadas de forma analítica quando as juntas são simples. Quando a complexidade da análise da junta já não permite realizar através de métodos analíticos, são utilizados métodos numéricos com a ajuda de análise computacional tipicamente pelo MEF.

2.2.1 Modelos analíticos

Os métodos analíticos têm como principal função descrever o estado de tensão e deformação numa junta através de um conjunto de equações diferenciais. Os principais trabalhos a serem desenvolvidos neste âmbito foram os de Volkersen [14] e de Goland and Reissner [15].

Uma das configurações de junta mais simples é a JSS (**Figura 21**). Os ensaios experimentais das juntas de sobreposição simples permitem obter as propriedades mecânicas dos adesivos. Estes resultados são representativos na identificação dos parâmetros e comportamentos das juntas adesivas em geral [4].

Uma das análises mais simples e a mais limitada de todas consiste em considerar uma junta de sobreposição simples onde se toma como pressuposto que os aderentes são rígidos e indeformáveis e que o adesivo se deforma somente ao corte [4]. A tensão de corte, τ , é dado por:

$$\tau = \frac{F}{bl}, \quad (1)$$

onde F é a força aplicada, b é a largura da junta e l corresponde ao comprimento de sobreposição [2].

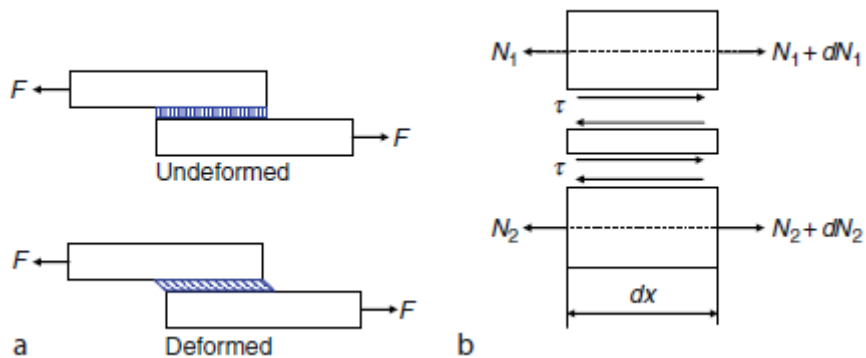


Figura 21 - Análise de tensões simplificada em junta JSS (a); Diagrama de corpo livre por deformação diferencial (b) [4].

Análise de Volkersen (1938)

Volkersen [14] introduziu na análise o que se designa por deformação diferencial (*shear lag analysis*). Se os aderentes forem elásticos e houver continuidade na interface adesivo/ aderente, os paralelogramos mostrados na junta não solicitada (**Figura 22a**) ficam distorcidas, como mostrado na **Figura 22b**. Volkersen deduziu que as tensões na extremidade de uma junta tracionada são superiores à tensão localizada no interior da junta, como representado esquematicamente na **Figura 22c** [2].

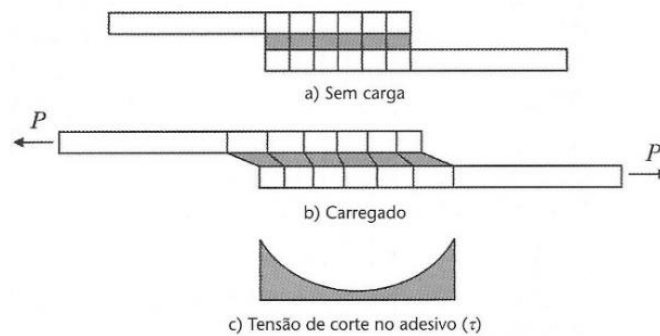


Figura 22 - Tensão de corte numa junta de (JSS): análise mais simples [2].

Análise de Goland e Reissner (1944)

Um dos aspetos que foi claramente ignorado por Volkersen foi o de não considerar a rotação da junta quando esta se encontra solicitada. Goland and Reissner [15] consideraram a rotação da junta, o que provoca esforços de arrancamento na camada do adesivo. Este efeito provoca um momento fletor na junta quando os esforços não são colineares. Este efeito é ainda mais pronunciado quando se trata das juntas JSS, visto que os aderentes não se encontram alinhados com o eixo central da junta, este desalinhamento resulta numa não linearidade geométrica [4]. Os autores aplicaram um fator de momento fletor, k , que relaciona o momento no aderente no fim da sobreposição, M , com a força aplicada de acordo com a seguinte equação:

$$M = k \bar{P} \frac{t}{2}, \quad (2)$$

onde t é a espessura do aderente e \bar{P} é a força aplicada por unidade de largura. Quando a variação da força aplicada é pequena não é considerada a rotação da junta e a linha de carregamento passa próximo do limite dos aderentes, logo é considerado $k=1$. À medida que a força aumenta, a junta de sobreposição tende a rodar o que origina que o eixo de ação da carga fique mais próximo do centro dos aderentes, como representado na (Figura 23) [2, 3].

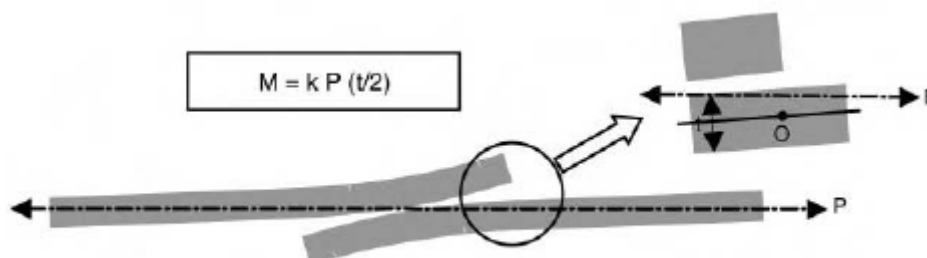


Figura 23 - Representação esquemática do fator de momento fletor de Goland e Reissner [3].

Análise de Hart-Smith

Goland and Reissner [15] assumem que tanto o adesivo como o aderente possuem durante a solicitação um comportamento elástico. No entanto, o adesivo e os aderentes podem deformar-se plasticamente.

Hart-Smith and Joints [16] desenvolveu critérios com base nas teorias de Volkersen [14] e Goland and Reissner [15] para juntas de sobreposição simples [16] e para juntas de sobreposição dupla [17] onde considerou o comportamento plástico do adesivo. O adesivo é modelado como sendo elasto-plástico, com uma área circunscrita à curva tensão-deformação. Hart-Smith and Joints [16] mostrou que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta relativamente a uma análise elástica. Um adesivo dúctil cede plasticamente e pode suportar uma força adicional até atingir a sua deformação de rotura. É preferível ter uma junta adesiva com um adesivo dúctil como é o caso de um epóxido modificado. Além de ser mais resistente, é mais seguro uma vez que se deforma plasticamente antes de romper, nesta situação existe uma melhor distribuição das deformações de corte [2, 3].

2.2.2 Modelos numéricos

As juntas adesivas são normalmente concebidas para suportar cargas estáticas ou dinâmicas por um período de tempo prolongado, sem que exista nenhum tipo de rotura que possa colocar em causa a integridade da estrutura. A falta de modelos de análise adequados e de critérios de rotura resultam num sobredimensionamento da junta adesiva. O desenvolvimento de metodologias de análise dos adesivos ou juntas adesivas de forma a prever fidedignamente o seu comportamento, tanto do adesivo como dos aderentes, contribui para um dimensionamento de junta mais otimizado. Estas metodologias de análise têm de ser capazes de determinar tensões e deformações sob um determinado carregamento e prever os prováveis pontos de falha. A análise de uma junta adesiva pode-se tornar bastante complexa caso sejam utilizados aderentes em compósito, caso exista deformação plástica ou em caso de existência de chanfro (*fillet*). Neste tipo de situações, os métodos numéricos são os mais apropriados. O principal método numérico utilizado para prever a resistência e análise de tensões de uma junta é o MEF.

O MEF é utilizado em praticamente todos os campos da engenharia, tais como na análise de estruturas, transferência de calor, mecânica dos fluidos e eletromagnetismo. Para geometrias complexas, é preferível usar este método. Um dos modelos de análise mais simples é aquele que é baseado no estado limite de tensões ou de deformação, isto é, baseado numa abordagem da mecânica contínua. Os princípios da mecânica da fratura também podem ser usados numa análise MEF. Pode ter como fundamento o fator de intensidade de tensão ou numa abordagem energética. Uma extensão deste tipo de abordagem são os modelos de dano coesivo, que permitem prever o dano de um material na continuidade de uma fenda. Outro método para prever propagação de

fendas no material é o MEFX, que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo. A principal vantagem do MEFX é que a fenda pode iniciar em qualquer ponto do material e propagar com base nas condições de carregamento. Nenhuma correção da malha é necessária para que a fenda ocorra dentro do elemento, e esta não necessita seguir os limites dos elementos [18].

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste em determinar a resistência de uma junta adesiva através de métodos numéricos. Neste caso, o adesivo e o aderente são modelados com elementos contínuos, neste método é necessário assumir que o adesivo e o aderente estão perfeitamente ligados. Na mecânica dos meios contínuos são ignoradas as propriedades da adesão na interface adesivo – aderente. Este método tem como principais critérios de análise: a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância e tensão ou deformação média sobre uma dada região. O critério de tensão ou deformação máxima é baseado no princípio de que a rotura ocorre quando uma das componentes do tensor das tensões ou deformações atinge o respetivo valor de rotura. Apesar das suas conhecidas limitações, este critério ainda é muito usado na previsão da rotura de adesivos estruturais, devido à sua simplicidade [2]. Harris and Adams [19] utilizaram com sucesso os critérios de tensão principal e da deformação principal máxima na previsão da rotura de juntas de JSS. Usando o mesmo critério em ensaios de clivagem e em ensaios de corte sob solicitações de compressão. Contudo, é difícil obter resultados conclusivos com critérios de tensão e deformação máxima devido às singularidades existentes nas extremidades de sobreposição das juntas adesivas (**Figura 24**). Uma singularidade, de acordo com a análise linear elástica, pode ser definida como sendo um ponto no modelo onde pode aparecer um valor infinito de tensões. De facto, estes pontos singulares correspondem a uma grande desvantagem desta teoria, uma vez que a tensão junto a essa singularidade vai ser dependente do grau de refinamento de malha [20].

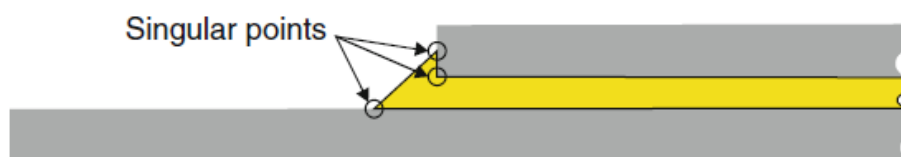


Figura 24 - Ilustração de singularidades possíveis em JSS [4].

No entanto, é necessário constatar que na prática os cantos dos aderentes normalmente não são em aresta viva, já que existem no geral, pequenos raios nas extremidades provenientes do acabamento no processo de fabrico. Isto deve afetar a distribuição de tensões localizadas nas extremidades da junta e, também, a tensão máxima localizada, visto que as tensões nestas áreas são extremamente sensíveis às alterações geométricas

[18]. Adams and Harris [21] sugeriram o arredondamento do adesivo ou o do aderente, de modo a remover a singularidade. No entanto através das simulações levadas a cabo, descobriram que o valor do pico da tensão torna-se dependente do grau de arredondamento realizado. Zhao et al. [22] estudaram os efeitos do grau de arredondamento dos aderentes na extremidade de juntas de sobreposição simples de aderentes de alumínio com um adesivo frágil e outro dúctil. Para os ensaios realizados com o adesivo frágil, o efeito de arredondamento das extremidades dos aderentes teve maior impacto para melhorar a resistência da junta comparado com os ensaios realizados com o adesivo dúctil. Este estudo também concluiu que ao aumentar consideravelmente os raios na extremidade se obtém maior resistência nas juntas com adesivos frágeis. Para adesivos dúcteis obtiveram-se piores resultados dos que nos ensaios dos aderentes com acabamentos em aresta. Na **Figura 25** está representado graficamente o comportamento de uma junta de sobreposição simples com adesivo dúctil e com diversas alterações de raio.

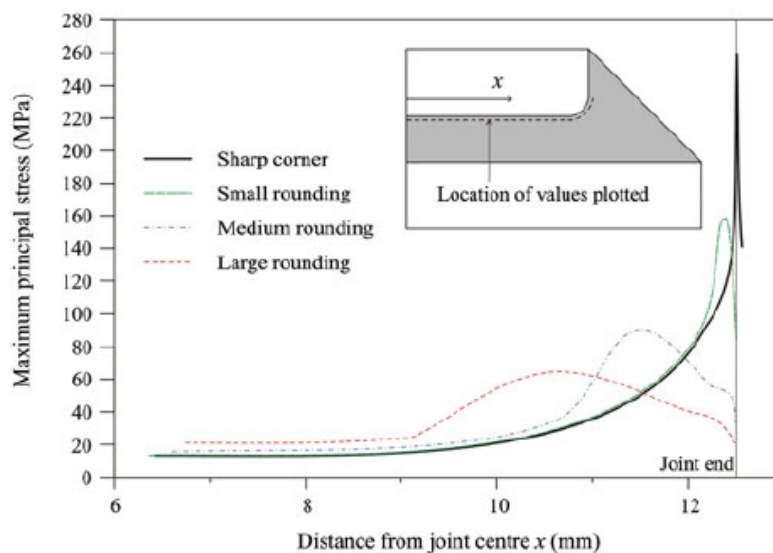


Figura 25 - Análise de resistência numa JSS com adesivos dúcteis e com alteração do raio [22].

De forma a ultrapassar as referidas dificuldades de dependência da malha dos critérios anteriormente abordados, pode-se considerar o campo de tensões num ponto mais afastado (**Figura 26**), num estudo de tensões ou deformações pontuais a uma dada distância da singularidade. Este critério tem o mesmo princípio que o critério descrito anteriormente, ou seja, que a rotura ocorrerá quando for atingida a tensão ou deformação máxima do respetivo material. Trata-se de um método semi-empírico, uma vez que é necessária a definição prévia da distância característica a partir dos dados experimentais [2].

Towse et al. [23] recorreram ao critério da deformação crítica a uma dada distância em juntas JSD. Estes autores fizeram uma análise não linear onde foram considerados os

efeitos das tensões de origem térmica e compararam os resultados numéricos com os resultados experimentais. A previsão da rotura da junta é ditada pelo facto de a deformação na vizinhança da singularidade atingir a deformação máxima do material. Os resultados obtidos apresentaram boa concordância com os experimentais, mas como a distância foi obtida através de resultados experimentais, o que faz com que seja questionável a aplicação deste tipo de métodos para outro tipo de juntas [2].

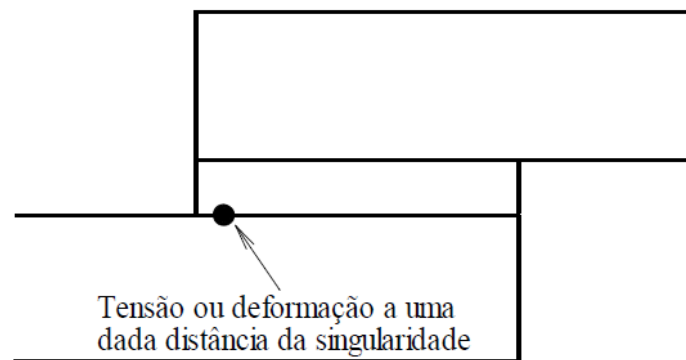


Figura 26 - Representação esquemática da deformação a uma dada distância em juntas de sobreposição simples (JSS) [2].

Zhao [24] propôs um critério de tensão principal média, onde a espessura do adesivo é usada como a distância sobre a qual é calculada a média da tensão principal máxima, que é comparada com a resistência do material. O autor recorreu a um critério similar ao descrito por Clark and McGregor [25] foi assumido que, para que a rotura ocorra, a tensão principal máxima deve exceder a tensão normal de rotura do adesivo numa dimensão finita medida perpendicularmente à direção da tensão principal máxima. O critério foi aplicado a três tipos de juntas diferentes (sobreposição simples, sobreposição dupla e juntas em T) e foram obtidas boas correlações com os ensaios experimentais [2]. Crocombe [26] assumiu que, para adesivos com uma ductilidade elevada, a cedência completa da camada adesiva só ocorre quando for atingido o estado limite que não possibilita o aumento de carga aplicada, obtendo desta forma um novo critério de cedência [2, 18]. No entanto, a maioria dos adesivos estruturais não possuem ductilidade suficiente para que numa junta adesiva o adesivo ceda por completo antes que ocorra rotura.

2.2.2.2 Mecânica da fratura

O método anteriormente abordado tem como principal consideração que o material em estudo se encontra isento de qualquer tipo de defeitos, ou seja, que as ligações da estrutura se comportam como um corpo contínuo. No entanto, numa junta adesiva, a inexistência de defeitos tais como, vazios, má preparação dos aderentes, entre outros, pode ser uma tarefa difícil de conseguir. Em contrapartida, na mecânica da fratura assume-se que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, onde podem

existir defeitos causados pelo próprio processo de fabrico ou por qualquer outro tipo de dano extraordinário que possa ocorrer durante o seu funcionamento [2]. O objetivo deste método é determinar se os defeitos existentes serão suscetíveis de causar a rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, as dimensões de um dado defeito, permanecem inferiores às críticas que levariam à rotura ou instabilidade da estrutura. Na mecânica da fratura existem dois principais critérios de análise: o critério baseado no fator intensidade de tensão e os critérios baseados em conceitos energéticos [3].

O fator de intensidade de tensão K , representa um fator de escala definidor da alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda, e pode ser dado pela seguinte expressão:

$$K = Y\sigma_r\sqrt{\pi a}, \quad (3)$$

onde Y é um fator adimensional que depende da geometria e distribuição da carga, σ_r corresponde à tensão remota aplicada na direção perpendicular à direção da fenda e a ao comprimento da fenda.

O critério energético consiste na hipótese de que a propagação de uma fenda só ocorre quando a energia disponível na extremidade do defeito em estudo (G – taxa de libertação de energia), e devida à solitação aplicada, igualar a energia necessária à propagação da fenda (G_c – taxa crítica de libertação de energia), sendo G_c uma propriedade do material [27].

A taxa de libertação de energia é dada por:

$$G = \frac{\partial(W - U)}{\partial A}, \quad (4)$$

onde W é o trabalho realizado pela força, U a energia de deformação interna do sólido e A representa a área da fenda. É de salientar que as abordagens da mecânica da fratura consideradas até agora estão intrinsecamente relacionadas entre si, e revelam-se equivalentes para materiais homogêneos [28].

Sendo assim é possível considerar as seguintes expressões:

$$G = \frac{K^2}{E}, \quad (5)$$

em estado plano de tensões e

$$G = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E}, \quad (6)$$

para estado plano de deformação. Estas relações são também válidas para respetivos valores críticos (G_c e K_c) [2, 3].

As roturas ou fraturas dos materiais e ou em juntas adesivas pode propagar-se em três modos distintos (**Figura 27**). O modo I representa o modo de abertura, e os modos II e III são os modos de corte. No modo II as superfícies das fendas têm movimento relativo perpendicular à frente da fenda, enquanto no modo III esse movimento é paralelo à frente da fenda.

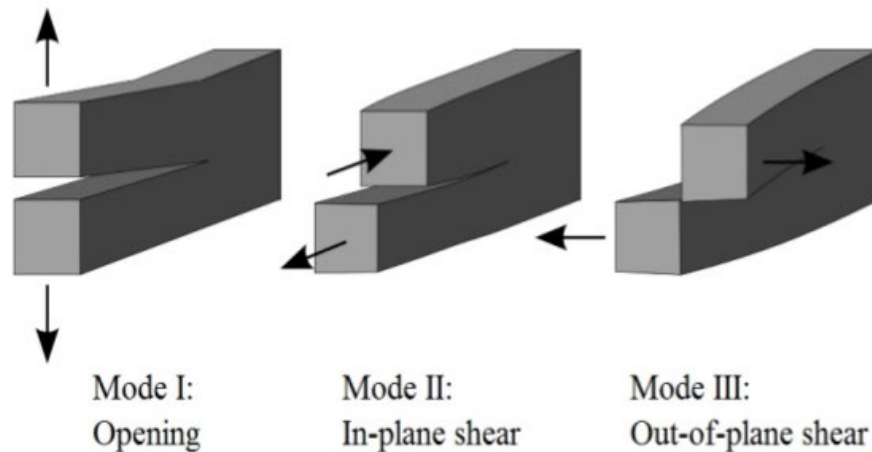


Figura 27 - Modos de rotura [29].

Numa junta adesiva a direção de propagação da fenda está restringida pelos aderentes dando origem, na maior parte das situações, uma propagação da fenda em modo misto (I + II). Neste tipo de situações é necessário o uso de critérios energéticos adequados que na maioria dos casos adotam a seguinte forma [30]

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^\beta = 1, \quad (7)$$

onde G_{Ic} e G_{IIc} são as energias críticas de fratura para o modo puro, e α e β são expoentes. O critério linear ($\alpha=\beta=1$) e o critério quadrático ($\alpha=\beta=2$) são os mais utilizados.

Os critérios de fenda baseados na mecânica da fratura pressupõem a existência de algum tipo de defeito. Estes defeitos são introduzidos artificialmente e pretendem simular a iniciação do dano ou os defeitos causados pelo processo de fabrico ou solicitação de serviço. Deste modo, os critérios baseados na mecânica da fratura estão mais direcionados para a propagação de dano e não a sua iniciação.

Ducept et al. [31] estudaram o comportamento das juntas adesivas pelos critérios de fratura através de ensaios experimentais do tipo *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB) (**Figura 28**). Neste estudo foi assumido que os materiais eram homogêneos e isotrópicos e consideraram uma abordagem do critério de fratura baseados nos fatores de intensidade de tensão, K_I e K_{II} , sob as condições de modo misto. Os resultados

numéricos obtidos foram posteriormente comparados com os resultados experimentais utilizando o “método local” e verificaram que o uso deste método resulta numa boa aproximação da energia total de fratura.

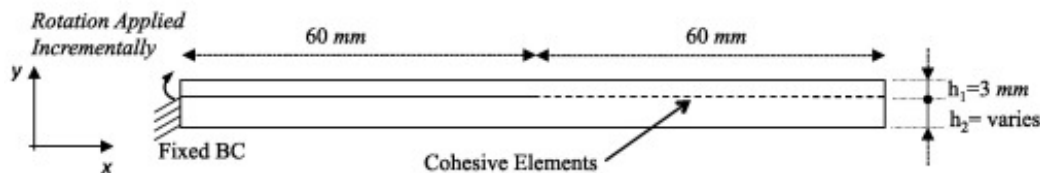


Figura 28 - Representação esquemática de ensaio ADCB [32].

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

Os modelos MDC consiste em um método refinado para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface do material, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [33]. Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [34]. 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. Uma das principais vantagens da aplicação deste modelo consiste na capacidade de simular o início e a propagação de fenda. Não necessita a aplicação ou modelação de uma fenda inicial e a propagação do dano ocorre automaticamente. Neste modelo existe a necessidade de identificar à priori as zonas críticas onde pode ocorrer dano, e artificialmente terão de ser colocados elementos coesivos nessas mesmas zonas. A precisão deste método está diretamente correlacionada com as calibrações que têm que ser implementadas nas leis MDC [35]. Apesar da eficiência computacional dos MDC em juntas adesivas, existem algumas limitações, nomeadamente relacionadas com a forma que a fratura fisicamente acontece, porque na prática a separação coesiva geralmente é acompanhada por um comportamento plástico na camada adesiva, mesmo para adesivos frágeis, estes, são representados pela média das propriedades equivalentes. Outra limitação do método MDC, consiste na dependência da geometria da junta, mas especialmente na espessura do aderente e espessura do filme adesivo (t_p e t_A), visto que estes parâmetros afetam em grande parte a dimensão da zona do processo de fratura (*fracture process zone* (FPZ)) (**Figura 29**) e a plasticidade à volta da fenda. A FPZ é uma região existente na extremidade da fenda caracterizada por processos inelásticos tais como microfissuras, micro formação plástica, entre outras. Logo, isto torna as leis MDC dependentes dos parâmetros anteriormente indicados [34].

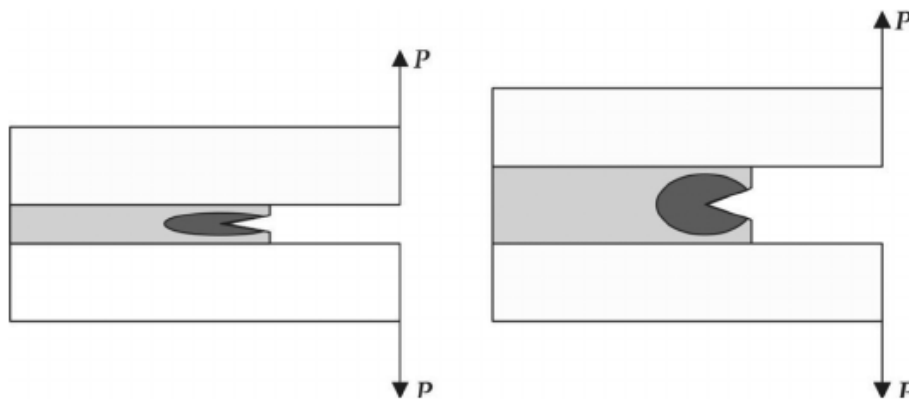


Figura 29 - Representação esquemática da FPZ em função da espessura do adesivo t_A [36].

Na **Figura 29** é possível observar a relação existente entre a dimensão da FPZ relativamente à espessura da t_A . Quanto maior for esta espessura maior será a FPZ.

Na literatura têm surgido algumas formas para as leis do MDC, dependendo estas da natureza do material ou da interface a ser simulada. As formas triangular, exponencial e trapezoidal (**Figura 30**) permitem uma previsão precisa da resistência da junta.

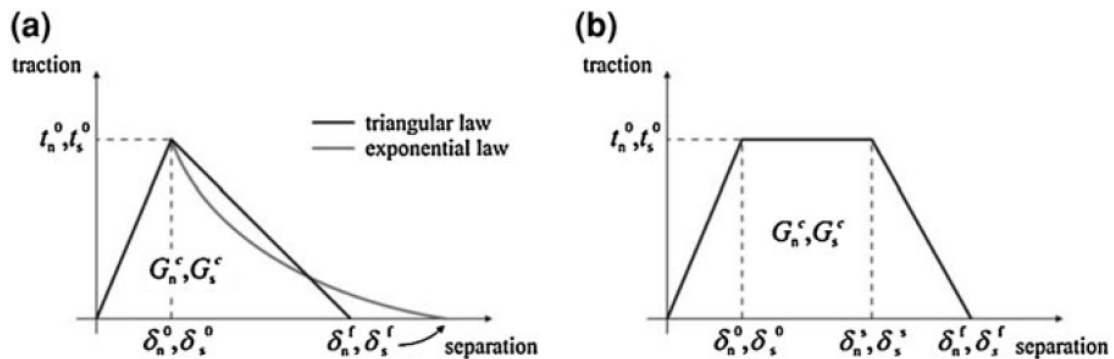


Figura 30 - Diferentes formas de modo puro das leis MDC: triangular ou exponencial (a) e trapezoidal (b) [18].

Campilho et al. [37] estudaram a influência das formas das leis MDC (triangular, exponencial ou trapezoidal) utilizadas para modelar camadas finas de adesivo em juntas JSS com aderentes em carbono-epóxico unidirecional (SEAL® Texipreg HS160 RM; Legnano, Italy), e com dois tipos de adesivos diferentes quanto à sua ductilidade (Araldite® AV138 e Araldite® 2015). Desta forma foi possível estimar a sua influência na previsão da resistência das juntas em diferentes condições. Numa primeira abordagem utilizou-se a forma triangular, visto que esta forma é a mais simples de implementar e tem menos problemas de convergência, sendo possível obter uma solução mais rapidamente. Os resultados globais mostraram que as juntas coladas com adesivos dúcteis (Araldite® 2015) são altamente influenciadas pela forma da lei coesiva, e que a forma trapezoidal se encaixa melhor neste tipo de situações. Também se concluiu que,

quanto menor for o comprimento de sobreposição (L_0), maior é a influência da forma da lei coesiva. Por outro lado, a influência da forma da lei coesiva pode ser negligenciada caso sejam utilizados adesivos frágeis (Araldite® AV138), sem comprometer muito a precisão da previsão de resistência.

De forma a verificar que as formas das leis coesivas dependem fortemente da geometria da junta ou da natureza do material, Pinto et al. [38] analisaram, através de ensaios experimentais e análise numérica por MEF, a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples com aderentes de materiais iguais e com materiais diferentes, com espessuras de aderentes (t_p) diferentes. O adesivo utilizado para os ensaios foi o adesivo acrílico 3M DP-8005®. Os autores concluíram que, para aderentes mais rígidos, a forma das leis coesivas é fundamental para a precisão dos resultados, visto que os efeitos de arrancamento são minimizados e a junta é solicitada principalmente ao corte.

2.2.2.4 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 and Ladevèze [39] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [40] 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 [33].

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 género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [41]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [42] ou do número de ciclos para análises de fadiga [43, 44]. 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 [45].

Hua et al. [46] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na

equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [47] 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 do módulo de Young (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.

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos eXtendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tração e corte correspondentes a $P_{máx}$, respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [48]. Belytschko and Black [49], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [50]. 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 [51].

Campilho et al. [52] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX e MDC (**Figura 31**). 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 aderentes, ao invés de correr 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.

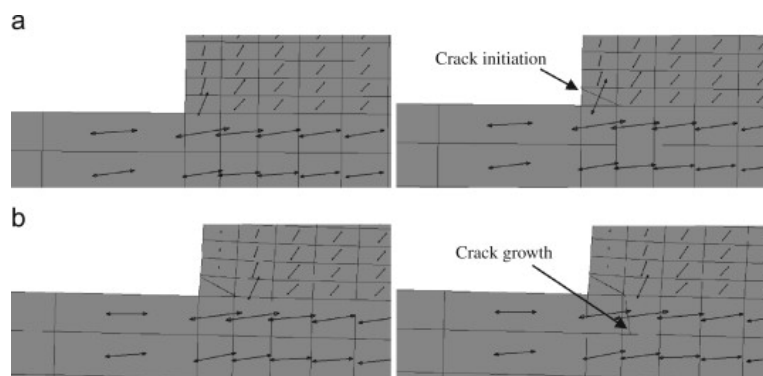


Figura 31 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [53].

Formulação

A expressão fundamental do vetor de deslocamentos \mathbf{u} , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [54]:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(\mathbf{x}) [\mathbf{u}_i + H(\mathbf{x}) \mathbf{a}_i], \quad (8)$$

$N_i(\mathbf{x})$ e \mathbf{u}_i estão relacionados com a componente convencional de MEF, e correspondem pela ordem respetiva às funções de interpolação e ao vetor de deslocamentos nodais. O segundo termo entre parêntesis retos, $H(\mathbf{x})\mathbf{a}_i$, apenas está ativo para os nós nos quais alguma função de forma é cortada pela fenda e pode ser expresso pelo produto do vetor dos graus de liberdade nodais enriquecidos incluindo os nós mencionados, \mathbf{a}_i , com as funções de forma descontínuas associadas, $H(\mathbf{x})$, nas superfícies da fenda. O método é baseado no estabelecimento de nós fantasmas, que subdividem os elementos intercetados por uma fenda e simulam a separação entre os subelementos criados. A propagação da fenda é possível pelo uso de nós fantasmas, que inicialmente têm as mesmas coordenadas que os nós reais e que estão completamente fixos aos nós reais até à iniciação do dano. Após o elemento ter sido intercetado por uma fenda, este é

dividido em dois subdomínios. A descontinuidade nos elementos é tornada possível pela adição de nós fantasmas sobrepostos aos nós originais (**Figura 32**). Quando um elemento fratura, cada um dos dois subelementos vai ser formado pelos nós reais (aqueles correspondentes à parte fraturada) e nós fantasmas (aqueles que já não pertencem à parte respetiva do elemento original). Estes dois subelementos têm campos de deslocamentos completamente independentes e substituem o elemento original. A partir deste ponto, cada par de nó real/fantasma do elemento fraturado separa de acordo com uma lei de dano até à rotura. Neste ponto os nós reais e fantasmas ficam livres de se mover sem restrições, simulando assim o crescimento do dano.

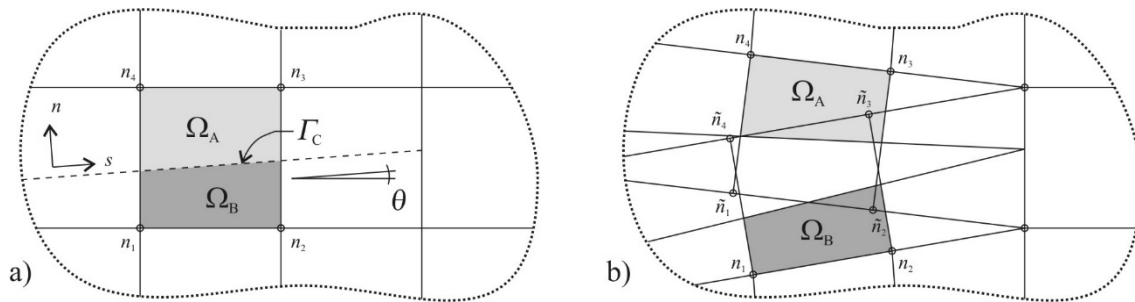


Figura 32 – Propagação do dano no MEFX usando o conceito de nós fantasmas antes (a) e depois (b) da repartição de elementos fraturados em subelementos [52].

Crítérios de início e propagação do dano

Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas (MAXPS) ou das deformações principais máximas (MAXPE), enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais. A iniciação do dano é assumida por um critério da mecânica dos meios contínuos, calculado a partir do estado de tensão ou de deformação em cada ponto de integração do MEF. A iniciação do dano pode ser avaliada por diferentes critérios. Os critérios MAXPS e MAXPE baseiam-se nas seguintes funções de dano, respetivamente [51]:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{max} \rangle}{\sigma_{max}^0} \right\} \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_{max} \rangle}{\varepsilon_{max}^0} \right\}, \quad (9)$$

onde $\sigma_{m\acute{a}x}$ é a tensão principal máxima atual num dado ponto de integração e $\sigma_{m\acute{a}x}^0$ é a resistência de um material à tração. A interpretação dos parêntesis de Macaulay é usada para especificar que uma tensão compressiva não induz dano. O critério de tensão nominal máxima (MAXS) e o critério de deformação nominal máxima (MAXE) são dados, por esta ordem, por [51]:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \quad e \quad f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}, \quad (10)$$

onde t_n e t_s são as componentes de tensão normal e ao corte da superfície fraturada, e t_n^0 e t_s^0 são os respectivos valores limite. Os parâmetros referentes ao critério MAXE têm o mesmo significado, onde ε_n e ε_s são as componentes de deformação normal e ao corte, e ε_n^0 e ε_s^0 são os devidos valores limites. Outros dois critérios de elevada importância são o critério quadrático de tensão (QUADS) e o critério quadrático de deformação (QUADE). Os critérios são dados, respetivamente, pelas seguintes funções [51]:

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

Todos os critérios referidos são satisfeitos quando o valor de f atingir a unidade. O crescimento do dano é baseado na incorporação de funções de enriquecimento na formulação convencional de MEF, e que permitem modelar o salto dos deslocamentos que existe entre as faces da fenda durante a propagação do dano.

O critério de propagação de dano energético em modo misto é definido como se apresenta na expressão seguinte:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}} \right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}} \right)^\alpha = 1. \quad (12)$$

2.3 Juntas adesivas tubulares

As juntas adesivas têm sofrido uma enorme evolução ao longo dos anos devido aos seus elevados benefícios relativamente a outro tipo de ligação e também devido aos diversos tipos de indústria que têm contribuído para a evolução significativa desta tecnologia, como é o caso da indústria dos transportes e indústria de construção. De facto, estas indústrias têm implementado juntas adesivas estruturais nos seus processos construtivos de forma a melhorar o seu desempenho relativamente à relação resistência/peso de uma estrutura. Na indústria dos transportes as geometrias mais utilizadas são normalmente planas, tais como painéis em metal ou em polímero, visto que estas oferecem áreas de colagem significativas. As ligações tubulares (**Figura 33**) suportam solicitações elevadas quando implementadas em aplicações estruturais, tais como montagem de estruturas de veículos. É assim possível o desenvolvimento de estruturas leves. Como alternativa aos tubos metálicos cada vez mais têm surgido tubos em materiais poliméricos, sendo estes em muitos casos reforçados por fibras que lhe conferem características mecânicas elevadas e com densidades muito inferiores aos materiais metálicos. Nestes casos, a ligação adesiva é preferencial para este tipo de materiais [55].

Existem na literatura alguns trabalhos de investigação relacionados com o comportamento mecânico das juntas tubulares sujeitas a esforços de corte ou torção. Lubkin and Reissner [56] analisaram uma junta tubular sujeita a carregamento axial. Esta análise revelou que as tensões de corte e normais nos dois tubos eram insignificantes quando comparadas com as tensões no adesivo [57]. Adams and Peppiatt [58] analisaram o comportamento de juntas tubulares sujeitas a solicitações de tração e torção através do MEF e da utilização de elementos finitos quadriláteros axissimétricos. Obtiveram-se resultados satisfatórios nos ensaios de torção quando comparados com métodos analíticos. Os mesmos autores também analisaram a distribuição de tensões existentes na camada do adesivo quando há existência do filete adesivo na junta (**Figura 33a**).

Outros trabalhos de investigação foram realizados nos últimos anos de forma a compreender o comportamento das ligações adesivas tubulares sujeita a outro tipo de carregamentos, tais como o efeito da pressão interna [59] e o efeito da dilatação térmica numa estrutura utilizando aderentes em compósito ou alumínio [60].

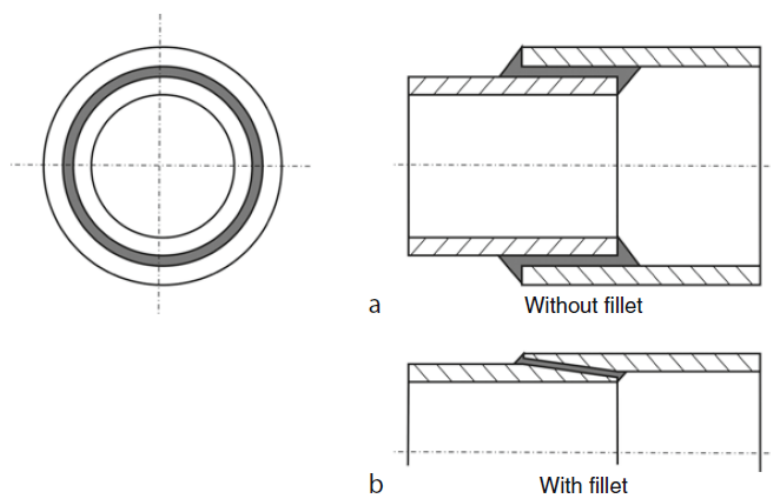


Figura 33 – Geometrias comuns de juntas tubulares [4].

2.3.1 Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração

No trabalho de investigação realizado por Labbé and Drouet [61] teve como objetivo otimizar diversos parâmetros geométricos de forma a encontrar o melhor compromisso de resistência/peso em juntas adesivas tubulares de sobreposição simples sujeitas à tração. Para esse objetivo ser atingido, foram estipuladas três etapas de desenvolvimento. A primeira etapa consistiu em desenvolver um modelo numérico 2D (**Figura 34**) da junta em estudo. Este modelo representa o comportamento final da junta visto que a geometria e a solicitação de ensaio são axissimétricas. No modelo foram consideradas variáveis de otimização geométrica tais como a espessura dos aderentes (t_{s0} e t_{si}), o chanfro na extremidade dos aderentes (α_{s0} e α_{si}), comprimento do chanfro

no adesivo (l_{Asi} e l_{Aso}) e o comprimento de sobreposição (l_A). Uma segunda etapa consistiu em determinar os parâmetros geométricos ótimos de forma a cumprir com os requisitos inicialmente impostos. Esta otimização foi realizada através de um modelo matemático de apoio à decisão que consistiu em maximizar uma função objetivo f_m , os resultados obtidos são aqueles que podem satisfazer o objetivo. A terceira etapa consistiu em introduzir os parâmetros obtidos na otimização anterior no modelo de MEF e simular o respetivo modelo.

Para este estudo foi tido em consideração materiais normalmente utilizados na indústria dos transportes, no que diz respeito aos aderentes foi considerado as propriedades do alumínio 6061-T6 e as propriedades do adesivo foram obtidas experimentalmente de um adesivo epóxico **Henkel® H9460**.

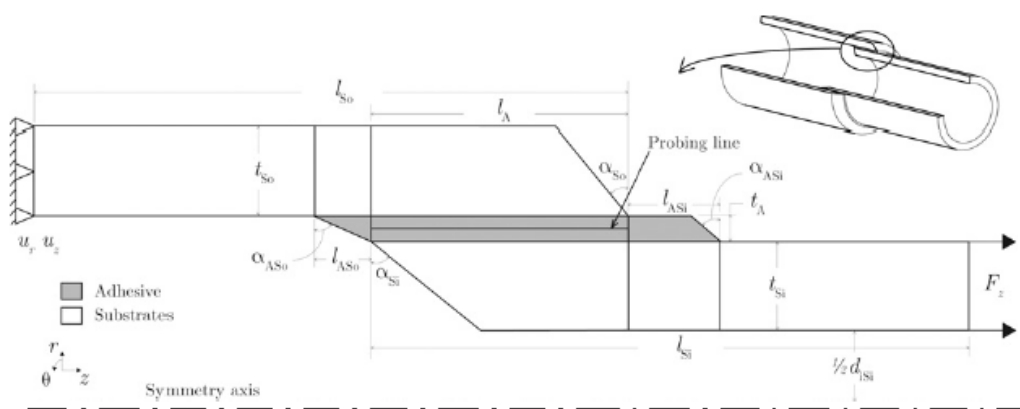


Figura 34 - Representação esquemática de modelo 2D de junta tubular [61].

Os resultados dos estudos paramétricos demonstraram que o aumento da espessura dos aderentes, t_{So} e t_{Si} , reduz a tensão de corte localizada no adesivo. Quando se diminui a espessura do aderente, a tensão normal nas extremidades também decrece. A tensão normal é menos influenciada pela variação da espessura dos aderentes no centro da junta do que nas extremidades. Referente à aplicação do chanfro α_{So} e α_{Si} nas extremidades dos aderentes, foi concluído que um ângulo entre 0° e 45° , não influencia a distribuição de tensões de corte no adesivo. No entanto, ao aumentar o ângulo existe um aumento significativo da tensão normal no aderente interior, enquanto no resto da camada de adesivo esta se mantém inalterada.

Ao aumentar o comprimento do chanfro no adesivo l_{Asi} e l_{Aso} , reduz as tensões de corte na camada de adesivo, este parâmetro tem uma grande influência na distribuição de tensões de corte. As tensões de corte atingem um pico máximo crítico quando não existe excesso de adesivo nas extremidades. O efeito do excesso de adesivo origina que as tensões de corte sejam mais suaves nas extremidades. Relativamente as tensões normais o efeito do chanfro no adesivo não tem grande influência.

A tensão de corte diminui conforme o diâmetro interno do aderente aumenta, pois o aumento deste diâmetro também aumenta a superfície adesiva. A magnitude das tensões normais também reduz quando o diâmetro interno do aderente aumenta.

Tendo em vista todos os resultados obtidos, os autores concluíram que todos os parâmetros geométricos propostos têm uma influência direta nas distribuições de tensão tanto de corte como normais, excetuando o ângulo do chanfro nas extremidades dos aderentes. De forma a cumprir com o objetivo proposto na segunda etapa, para maximizar a resistência da junta e minimizar o peso da mesma, o comprimento de sobreposição tem de ser no máximo 30 mm.

Dragoni and Goglio [62] estudaram o comportamento de uma junta de tubular de sobreposição simples sujeita a uma força de tração. O trabalho apresentado teve como principal objetivo realizar comparações e verificar a precisão de cinco modelos teóricos existentes na literatura, Lubkin and Reissner [56], Shi and Cheng [63], Nayeb-Hashemi et al. [64], Pugno and Carpinteri [65] e Nemes and Lachaud [57]. A comparação de resultados dos modelos teóricos foi feita tendo como padrão os resultados obtidos através de simulações numéricas pelo MEF. As dimensões das juntas tubulares analisadas foram obtidas de ensaios já efetuados no trabalho de Lubkin and Reissner [56]. Na **Figura 35** está representada esquematicamente a junta tubular de sobreposição que foi proposta.

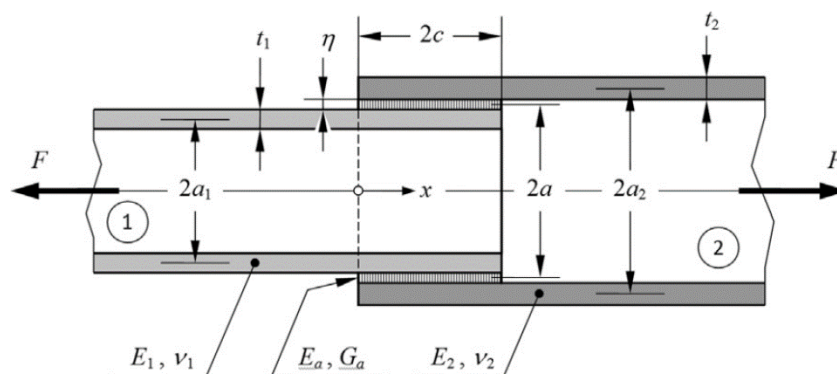


Figura 35 - Representação esquemática junta tubular com solicitação axial [62].

Na **Tabela 3** são indicadas as dimensões e parâmetros de simulação dos cinco modelos de juntas tubulares que foram tidos em consideração para ser possível realizar a comparação entre as diferentes metodologias em análise. Como indicado por Lubkin and Reissner [56], as juntas tubulares representadas na **Tabela 3** têm condições simétricas, ou seja, têm a mesma espessura ($t_1 = t_2 = t$) e as mesmas propriedades elásticas ($E_1 = E_2 = E$; $\nu_1 = \nu_2 = \nu$). Além das simplificações necessárias para ser possível realizar a comparação de resultados, os autores selecionaram as cinco juntas representadas na **Tabela 3** de forma a ser possível explorar uma maior gama de configurações oferecidas por Lubkin and Reissner [56] em termos de geometria e propriedades dos materiais. O parâmetro β corresponde a uma medida da rigidez relativa dos aderentes e do adesivo.

Tabela 3 - Características geométricas, propriedade elástica, e solicitação aplicada nas cinco juntas tubulares [62].

No.	a_1 (mm)	t_1 (mm)	a_2 (mm)	t_2 (mm)	a (mm)	η (mm)	$2c$ (mm)	E_1 (GPa)	ν_1	E_2 (GPa)	ν_2	E_a (MPa)	G_a (MPa)	β	F (N)	τ_m (MPa)
1	48.625	2.5	51.375	2.5	50	0.25	25.0	200	0.3	200	0.3	1000	375	20	7854	1.0
2	22.375	5.0	27.625	5.0	25	0.25	10.0	80	0.3	80	0.3	1000	375	4	1571	1.0
3	4.625	0.5	5.375	0.5	5	0.25	5.0	200	0.3	200	0.3	1000	375	100	157	1.0
4	123.625	2.5	126.375	2.5	125	0.25	12.5	200	0.3	200	0.3	1000	375	20	9818	1.0
5	4.625	0.5	5.375	0.5	5	0.25	2.5	200	0.3	200	0.3	1000	375	100	78	1.0

Após análise de resultados, os autores verificaram que a tensões de corte obtidas são muito semelhantes em todos os métodos de análise propostos. Relativamente às tensões de arrancamento (*peel*), só é possível obter resultados reais no modelo analítico de Lubkin and Reissner [56]. Os restantes modelos concluem que existe um pico negativo de tensões na extremidade do aderente interior. As componentes axiais e de tensões circunferenciais são de ordem similar e corresponde a metade da tensão de arrancamento. Em suma, foi concluído que o método analítico com maior aproximação relativamente ao método numérico é o desenvolvido por Lubkin and Reissner [56], como é possível verificar na **Figura 36**, onde estão representados graficamente a boa aproximação entre eles.

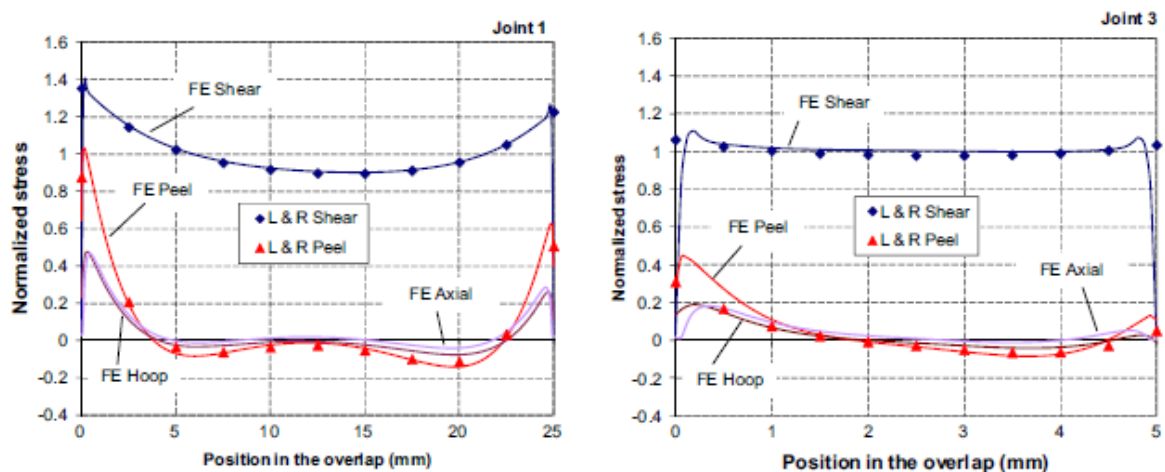


Figura 36 - Distribuição de tensões de Lubkin and Reissner e MEF [62].

O trabalho de investigação de Qiu et al. [66] teve como objetivo estudar o comportamento de juntas adesivas tubulares telescópicas com aderentes metálicos e aderentes em Polímero Reforçado com Fibra de Vidro (PRFV) (**Figura 37**). Este tipo de ligações pode ser encontrado em estruturas complexas, como é o caso das treliças ou estruturas espaciais. O principal objetivo deste trabalho foi desenvolver uma formulação teórica de forma a estimar o comportamento à tração deste tipo de juntas, no fim, os resultados foram validados com resultados experimentais e numéricos. Esta formulação teórica será utilizada para analisar os parâmetros de geometria, tais como, o L_0 e a resistência da junta adesiva.

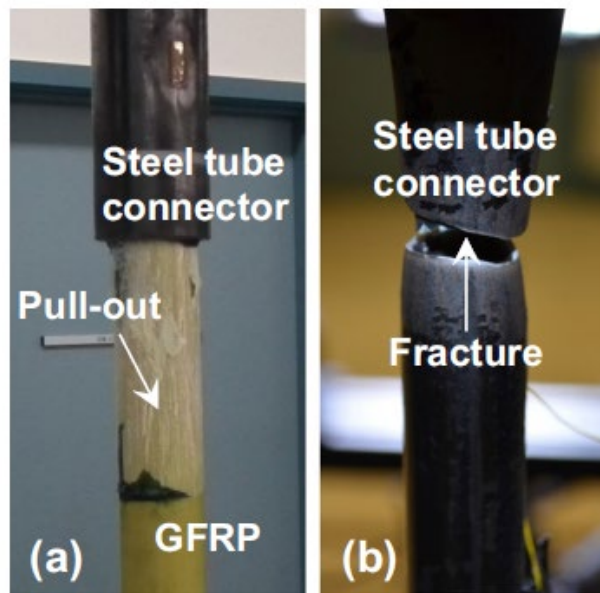


Figura 37 - Modos de Rotura de juntas tubulares: (a) arrancamento; (b) fratura no tubo de aço [66].

Para determinar as tensões de corte no adesivo e as tensões normais nos aderentes, os autores utilizaram como base o princípio de análise de tensões de Volkersen [14], onde a junta se encontra solicitada axialmente (P) e a camada do adesivo é predominantemente solicitada a esforços de corte, como ilustrado na **Figura 38**.

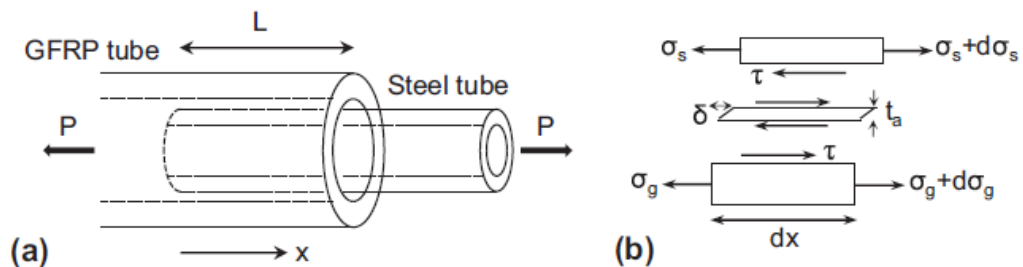


Figura 38 - Junta tubular solicitada à tração: (a) geometria genérica; (b) típico elemento diferencial [66].

Após o estudo de comportamento da junta adesiva e comparação com modelos experimentais e numéricos relativamente ao modelo matemático desenvolvido pelos autores, estes concluíram que o modelo teórico desenvolvido considerando o comportamento linear elástico demonstra uma capacidade do comportamento da junta ao arrancamento muito próxima dos resultados obtidos nos restantes métodos de análise propostos. Relativamente ao modelo de MEF, este prevê uma resistência mecânica na junta inferior aos resultados do modelo teórico, o que pode ser explicado pela representação conservadora da área de ligação e da consideração do comportamento não linear dos aderentes. Um dos parâmetros que mais contribuiu para o aumento da resistência da junta foi o seu L_0 . Este comprimento pode ser obtido

através da formulação teórica validada pelos resultados do MEF. A capacidade máxima da junta no limite elástico ocorre quando os aderentes possuem a mesma rigidez. Estes resultados são consistentes tanto para juntas de sobreposição simples ou dupla. Para o estado último de tensão, a capacidade máxima da junta surge quando o rácio de rigidez entre os aderentes está próximo de 0,8. Quando a razão de rigidez é igual a 1, a distribuição de tensões de corte é simétrica, caso contrário existe um deslocamento (δ) do aderente com menor rigidez relativamente ao de maior rigidez.

Num outro trabalho relativo ao estudo de juntas tubulares solicitadas à tração, Cognard et al. [67] tiveram como objetivo aumentar a performance das juntas adesivas estruturais atuando principalmente na influência dos efeitos de borda que diminuem drasticamente a capacidade de carga de uma junta. Os autores realizaram esta análise com ajuda do MEF tendo como suposição um comportamento linear elástico.

Este trabalho foi dividido em três etapas, onde a primeira etapa consistiu no estudo das concentrações de tensões em juntas cilíndricas solicitadas axialmente, inicialmente o modelo sofreu uma otimização o refinamento da malha do MEF de forma a calibrar dito método com o comportamento experimental. Para a calibração do método numérico foi realizado um modelo 2D simplificado (**Figura 39a**).

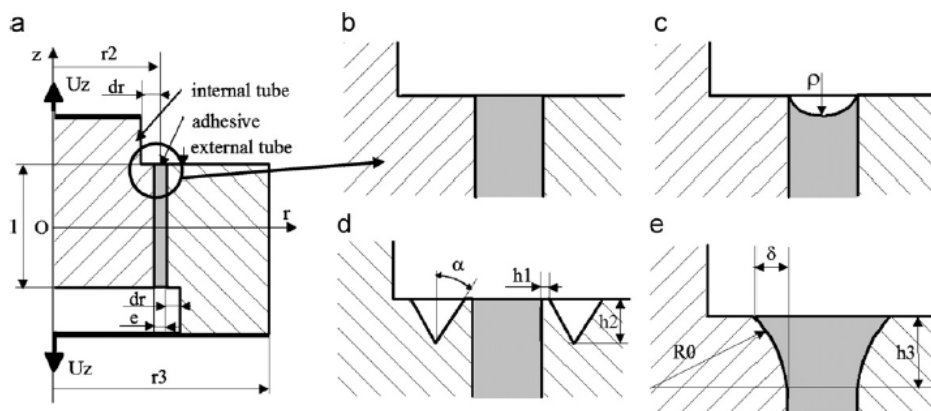


Figura 39 - Junta cilíndrica em estudo. (a) representação esquemática; (b) aderentes retos; (c) bordas limpas no adesivo; (d) aderentes com indentação maquinada; (e) aderentes com raios nas extremidades [67].

Métodos simplificados podem levar a uma subestimação da carga transmitida pelo conjunto, visto que estes modelos simplificados são geralmente utilizados para representar os efeitos da concentração de tensões na espessura do adesivo. Numa segunda abordagem foram propostas algumas geometrias que limitam fortemente a influência dos efeitos de borda. Na **Figura 39a**, **Figura 39b**, **Figura 39d** e **Figura 39e** são ilustradas algumas geometrias propostas pelos autores. Por último numa terceira etapa foi proposta uma otimização da carga máxima que uma junta cilíndrica pode transmitir, nesta análise foi considerado o limite elástico dependente da pressão hidrostática do adesivo. No que diz respeito ao comprimento de sobreposição foram utilizados quatro comprimentos diferentes ($L_0=25, 50, 75$ e 100 mm) de forma a ser possível comparar o

efeito do comprimento de sobreposição nas concentrações de tensão. No que diz respeito à tensão de corte média, esta foi normalizada para 1 MPa de forma a facilitar a análise de resultados.

Após conclusão das diferentes otimizações e das diversas verificações, os autores concluíram que a utilização de uma malha mais refinada no modelo 2D altera consideravelmente os resultados, visto que a análise do comportamento mecânico de uma junta cilíndrica é difícil de prever devido a possíveis singularidades que possam existir nas arestas da junta. No que diz respeito ao aumento da camada de adesivo ou ao aumento da espessura dos aderentes, foi verificado que para aderentes com espessura acima dos 5 mm não existe uma contribuição significativa para a resistência da junta, mas quando a camada de adesivo aumenta, esta minimiza os efeitos de borda no que se traduz num aumento significativa da resistência da junta. Na análise realizada tendo em consideração a pressão hidrostática no adesivo, os autores concluíram que o aumento do comprimento de sobreposição não influencia significativamente no estado de tensões. Já na análise da tensão equivalente de von – Mises, onde foram consideradas as alterações geométricas propostas nas bordas (**Figura 39d** e **Figura 39e**), os autores concluíram que a distribuição de tensões no adesivo é quase constante no comprimento de sobreposição da junta e quando a espessura do adesivo é aumentada existe uma diminuição da tensão equivalente no meio da junta.

2.3.2 Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção

Hosseinzadeh et al. [55] analisaram o comportamento de juntas adesivas tubulares com aderentes metálicos sujeitas a uma força torsional, teve como principal preocupação a influência do comportamento não linear do adesivo em estudo. A análise paramétrica foi realizada através do *software* ABAQUS®. Os autores utilizaram o modelo de plasticidade de Ramberg – Osgood [68] para analisar o comportamento das juntas adesivas com diferentes comprimentos de sobreposição. Os resultados obtidos nas simulações pelo MEF foram comparados com resultados experimentais.

Na análise do modelo de plasticidade de Ramberg – Osgood, foram obtidos resultados que simulam o comportamento da junta tubular com uma elevada aproximação dos resultados experimentais. O modelo de plasticidade também permitiu uma melhor percepção da distribuição de tensões da junta. Os resultados demonstraram que a capacidade da junta está extremamente dependente da energia absorvida pelo conjunto, o que significa que, quando se aumenta o comprimento de sobreposição, maior será a energia absorvida mesmo quando a junta se encontra completamente plastificada.

No que concerne aos resultados experimentais e por MEF, concluiu-se que, para determinar o comportamento à fadiga da junta para diferentes comprimentos de sobreposição, não é plausível considerar apenas a tensão máxima desenvolvida no conjunto, visto que a tensão máxima era semelhante nos diversos comprimentos de

sobreposição testados. Concluiu-se também que o aumento do comprimento de sobreposição origina um aumento da capacidade estática da junta. Visto que a capacidade estática da junta muda a medida que o comprimento de sobreposição é alterado. Logo, a resistência da junta submetida a cargas cíclicas deve ser em função da capacidade estática final.

A substituição dos parâmetros elásticos para plásticos no MEF fez com que, na junta com comprimento de sobreposição de 40 mm originou uma variação na distribuição de tensões equivalentes como indicado na **Figura 40**. Como é possível verificar, a tensão numa das extremidades mantém-se relativamente constante e até diminuiu à medida que a magnitude da torção aumenta, enquanto o nível de tensão no meio aumenta à medida que a sollicitação aumenta. Isto indica claramente que as regiões nas extremidades já se encontram deformadas plasticamente enquanto no meio o adesivo ainda se encontra no regime elástico.

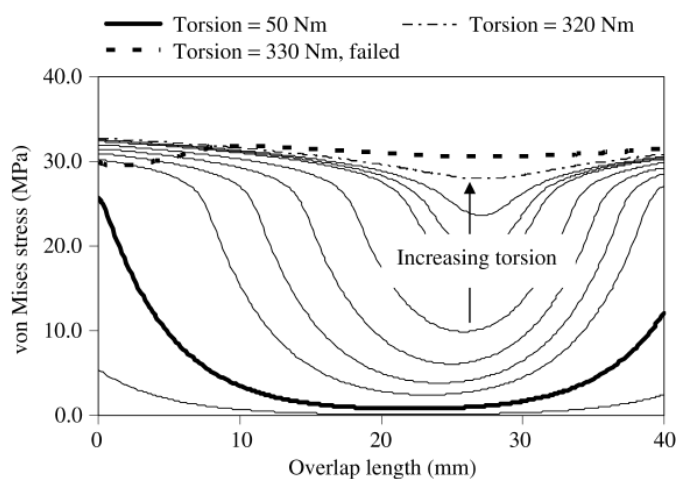


Figura 40 - Distribuição de tensões de von - Mises ao longo do comprimento de sobreposição [55].

Esmaeel and Taheri [69] analisaram o comportamento de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples (**Figura 41a**) e juntas tubulares com aplicação de casquilho “socket” (**Figura 41b**), com aderentes em materiais metálicos e compósitos. Este trabalho teve como principal preocupação o estudo do comportamento dos aderentes em material compósito, visto que um dos maiores problemas em aderentes de compósito é a sua delaminação. Esta delaminação influencia diretamente a distribuição de tensões presentes na camada adesiva. A metodologia de análise deste trabalho tem como princípio o estudo de diversas juntas com materiais iguais e materiais diferentes, através do estudo paramétrico, para dita análise foi utilizado o software de MEF ABAQUS®. Posteriormente, os resultados obtidos através de análise numérica foram comparados com o método analítico desenvolvido por Zou and Taheri [70].

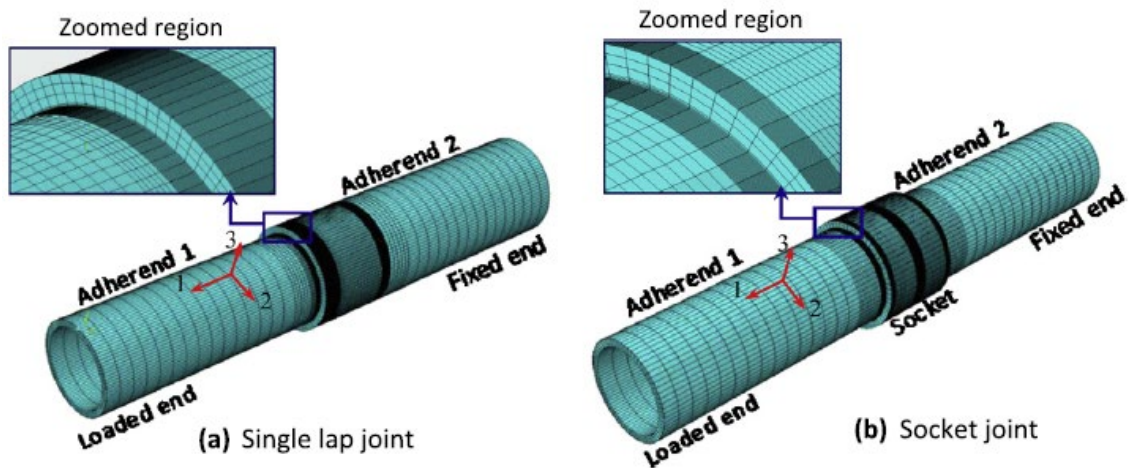


Figura 41 - Modelo de elementos finitos das duas juntas adesivas em estudo [69].

De modo a validar todo o procedimento relacionado com a análise numérica, incluindo a localização da delaminação, o método aplicado para refinamento da malha (*mesh*) e as propriedades mecânicas para cada aderente e para o adesivo, foram criados vários modelos preliminares e os resultados obtidos foram comparados com o estudo analítico desenvolvido por Zou and Taheri [70]. A solução analítica foi desenvolvida com base em juntas adesivas intactas formadas com aderentes de três materiais diferentes. Nesse estudo, um dos aderentes era em construção sanduiche e os outros dois aderentes eram em aço ou alumínio. Na **Figura 42** mostra a comparação entre a distribuição de tensões de corte em juntas de sobreposição simples (no plano medio da camada adesiva) (**Figura 42a**) e juntas tubulares com aplicação de casquilho (**Figura 42b**), obtidas pelo método analítico e pelo método numérico em estudo para juntas com aderentes em aço – aço, alumínio – alumínio, e compósito – compósito.

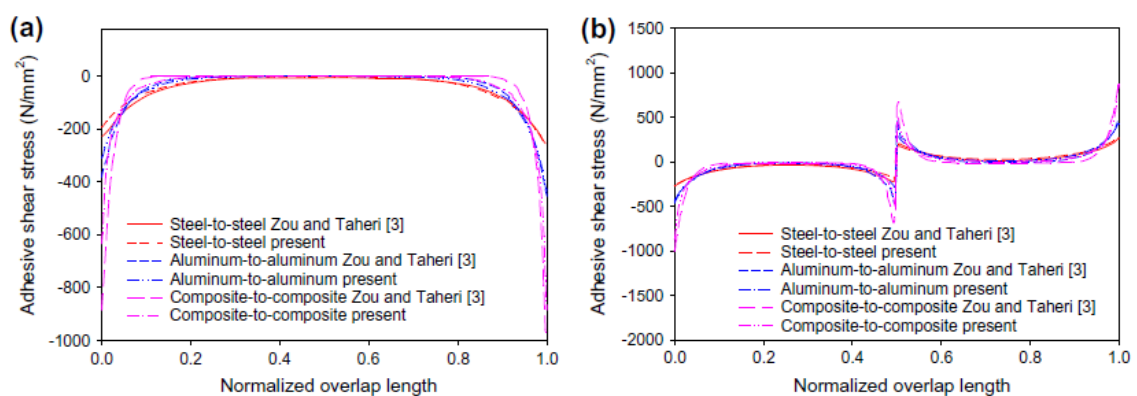


Figura 42 - Comparação da distribuição de tensões na camada adesiva obtidas por MEF e solução analítica de Zou e Taheri (a) junta de sobreposição simples; (b) juntas com aplicação de casquilho [69].

Após o estudo das tensões de corte e de arrancamento nas diferentes juntas em análise, os autores concluíram o seguinte:

- Para ambas as configurações de juntas, todas as componentes de tensões desenvolvidas na camada adesiva tendiam para valores elevados pertos das extremidades do comprimento de sobreposição, mas no centro as tensões eram quase nulas, exceto para as tensões de corte τ_{12} desenvolvidas pela junta de sobreposição simples que era diferente de zero ao longo do comprimento de sobreposição.
- Foi observada uma diminuição acentuada no valor máximo da tensão de corte na camada adesiva quando a delaminação foi alinhada com a borda de sobreposição, no entanto não se identificaram elevadas alterações das tensões localizadas no aderente em compósito na presença de dito defeito;
- As tensões máximas de corte e de arrancamento tenderam a atingir os valores observados nas juntas intactas a medida que o comprimento de delaminação aumentou. Também foi registado um segundo pico de tensões de corte e de arrancamento nas extremidades da zona delaminada;
- A configuração de junta com casquilho, desenvolve tensões com elevada descontinuidade, esta descontinuidade está localizada nas extremidades do comprimento de sobreposição e também no meio da junta;
- Finalmente, as orientações das fibras não tiveram efeitos consideráveis nas tensões de arrancamento na configuração de junta com casquilho, exceto numa junta constituída por camadas $[45]_{16}$. Além disso, a redução máxima no pico de tensão de corte foi notada na disposição de camadas $[+45/-45]_8$.

2.3.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

O estudo da durabilidade de juntas adesivas é um assunto de enorme importância quando esta é solicitada a longo prazo. Muitas das falhas de serviços são provocadas por problemas resultantes da exposição a condições hostis. Globalmente a durabilidade considera os efeitos de tensão, da humidade e da temperatura sobre o adesivo, os aderentes e a interface [2]. O estado de tensão pode ser de natureza cíclica, o que pode dar origem a um fenómeno de fadiga. À tensão aplicada pode juntar-se os efeitos da humidade e da temperatura. Normalmente o efeito combinado da solicitação mecânica e do meio envolvente é bastante mais prejudicial do que a soma de cada um dos fatores considerados isoladamente. Na preparação de uma junta adesiva é necessário considerar alguns fatores construtivos que podem influenciar a resistência da junta, tais como, rugosidade da superfície, folgas na colagem, interferências, materiais aplicados, etc. Estes fatores em conjunto com solicitações cíclicas podem provocar uma redução significativa do tempo de vida para o qual a junta foi concebida. Na engenharia é de extrema importância compreender os mecanismos de fadiga e métodos de previsão da mesma.

O trabalho de Canyurt [71] teve como objetivo o uso do processo de procura estocástica que é a base do Algoritmo Genético (AG), no desenvolvimento da estimativa da resistência à fadiga de juntas adesivas cilíndricas. Os modelos desenvolvidos foram posteriormente validados com dados experimentais. O algoritmo genético de previsão a resistência à fadiga (AGPRF) foi desenvolvido para estimar a resistência à fadiga de juntas tubulares onde se teve em consideração diversos materiais para os aderentes, tais como aço, bronze e alumínio.

Os algoritmos genéticos são conhecidos como métodos computacionais evolucionários. Semelhante ao processo de evolução natural, onde uma população de uma determinada espécie se adapta a um habitat. O algoritmo genético utiliza conceitos derivados da biologia e são filosoficamente baseados na teoria de sobrevivência do mais forte de Darwin [72].

Os dados experimentais que foram utilizados como meio de comparação no modelo AGPRF foram retirados dum estudo previamente realizado por Kwon and Lee [73]. Os dados fornecem os efeitos da rugosidade da superfície, da folga na ligação, da interferência e do tipo de material utilizado como aderentes na resistência à fadiga das juntas adesivas cilíndricas. Os parâmetros relacionados com o efeito da temperatura na resistência do adesivo foram retirados do Loctite Handbook [74].

Tabela 4 - Erro relativo entre resultados experimentais e AGPRF na resistência à fadiga ($N \times 1000$) para os diferentes tipos de aderentes [71].

Material	Material coefficient (M)	$N^{\text{experimental}}$	$N^{\text{quadratic}}$	Error (%)	N^{cubic}	Error (%)
Steel-steel	1.00	105.0	99.1	-5.66	103.92	-1.03
Steel-bronze	0.98	102.3	97.1	-5.13	101.82	-0.47
Bronze-bronze	1.22	128.0	120.8	-5.62	126.75	-0.97
Aluminum-aluminum	0.49	51.5	48.6	-5.62	50.98	-1.01

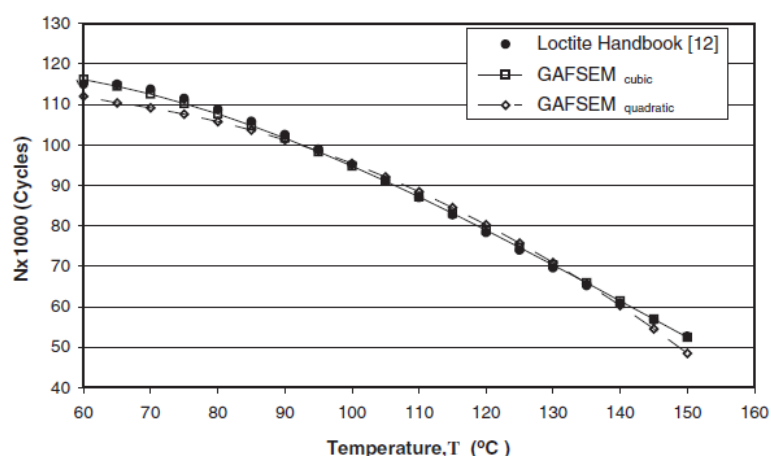


Figura 43 - Comparação de resultados experimentais e resultados AGPRF baseados no parâmetro de temperatura [71].

Na **Tabela 4** está representada o coeficiente de influência do material. Caso a ligação seja aço – aço ou bronze – bronze aumenta 2,0 vezes e 2,5 vezes respectivamente, a resistência à fadiga comparativamente com uma ligação em alumínio – alumínio. A temperatura é outro dos parâmetros de extrema importância que influencia a resistência à fadiga. Caso a temperatura aumente de 60°C para 150°C, a resistência à fadiga reduz de 115,000 para 52,700 ciclos, como indicado na **Figura 43**.

Em suma, várias formas de abordagem foram realizadas e os resultados foram previamente comparados com os dados experimentais, sendo assim possível obter as principais conclusões:

- O aumento da dimensionalidade devido a variáveis adicionais de projeto, não se traduz num custo computacional proporcional. O número de análises depende diretamente do tamanho da população;
- O modelo AGPRF pode ser utilizado como uma solução alternativa. Este por sua vez é capaz de fornecer soluções quase ótimas para estimar a resistência à fadiga. Portanto, este modelo pode ser utilizado como uma estimativa eficiente para prever a resistência à fadiga de juntas adesivas cilíndricas utilizados materiais aderentes como, aço, bronze e alumínio;
- Os resultados obtidos indicam que não existe inter-relação significativa entre os parâmetros de projeto (rugosidade da superfície, as folgas nos aderentes, o ajuste de interferências, o material dos aderentes e a temperatura).

O estudo experimental realizado por Knox et al. [75] teve como objetivo a análise do comportamento a fadiga de juntas adesivas cilíndricas em material compósito sujeitas a solicitações cíclicas externas. Nesta investigação os autores tiveram especial atenção aos fatores que podem afetar o comportamento à fadiga em tubos desenvolvidos com epóxico reforçado com fibra de vidro (ERFV) e ligados por adesivo. Os fatores que foram abordados neste estudo foram: a influência da humidade, a influência de cargas axiais cíclicas e solicitações de curvatura.

Numa primeira abordagem foi concebido um provete constituído por um tubo cilíndrico de 100 mm de diâmetro e um casquilho de acoplamento para ligação entre os dois aderentes como é demonstrado na **Figura 44**. O tubo foi fabricado por enrolamento filamentar de fibra de vidro com um ângulo de $\pm 55^\circ$. Este tipo de tubos têm a capacidade de trabalhar a temperaturas até 95°C. Para este ensaio experimental foi utilizado tubo de 3.5 mm de espessura. O adesivo utilizado para colagem dos topos foi um adesivo estrutural epóxico de duas partes de cura a quente, **RP44**.

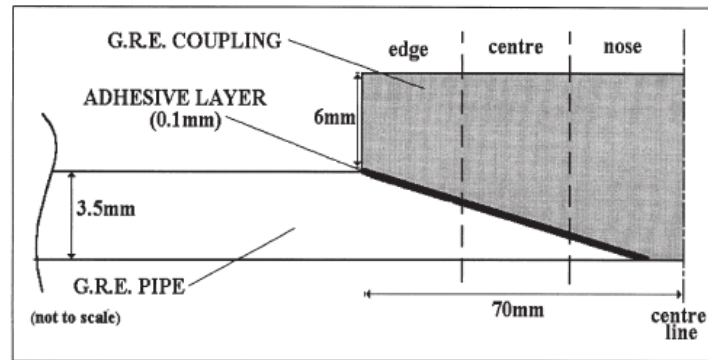


Figura 44 - Geometria de colagem em chanfro para ligação da tubagem [75].

Em paralelo com os ensaios experimentais foi realizada uma análise numérica com ajuda do software ABAQUS® V5.7. O compósito foi modelado como dez camadas ortotrópicas a $\pm 55^\circ$ utilizando elementos 3D sólidos. As propriedades do laminado foram obtidas por Frost and Cervenka [76] e foi assumido um comportamento linear elástico. O modelo foi sujeito a uma carga de tração axial que foi aplicada como uma carga de pressão nas faces do elemento. O modelo de MEF foi previamente validado pela sua precisão com recurso a estudos anteriores realizados por Cowling et al. [77].

Como mencionado anteriormente para determinar o comportamento a fadiga nos ensaios experimentais, foram abordados dois tipos de ensaios, sendo o primeiro um ensaio de tensão onde foi utilizado um quarto do provete em estudo. Os ensaios mecânicos foram realizados com uma solicitação de 100 kN a uma frequência de 2 Hz e um rácio “ $R = 0.25$ ”. A maior parte dos provetes foram testados a temperatura ambiente ($18^\circ\text{C} - 23^\circ\text{C}$), e uma pequena amostragem foi testada a 90°C . Num segundo ensaio foi submetida a secção completa do provete a ensaios de flexão em três pontos com uma distância entre apoios de 2 m. a frequência de teste foi de 0,167 Hz. O deslocamento cíclico aplicado foi de 0 – 20 mm. Este ensaio, à semelhança do anterior, foi aplicado com as mesmas condições de temperatura. Em ambos os ensaios foram tidos em consideração trabalhos anteriores, como e o caso do artigo realizado por Kujawski [78] que diz respeito a ensaios de tensão realizados em provetes em fibras com camadas empilhadas superiores a 45° . Nos ensaios a três pontos foi considerado o indicado na norma britânica **BS 7158:1989** [79]. Outro efeito que foi estudado durante os ensaios foi o de envelhecimento das fibras, de forma a perceber qual é a contribuição deste efeito na resistência a fadiga.

Após o trabalho experimental e numérico os autores concluíram que:

1. O envelhecimento ocorre a temperatura e humidade ambiente. Isto pode ser benéfico para uma maior vida útil do componente solicitado a carregamentos cíclicos. O fenómeno de envelhecimento pode ocorrer quando o adesivo plastifica devido à absorção de água do ambiente natural.

2. As solicitações axiais de fadiga em juntas tubulares com aderentes em compósito têm maior importância na determinação do tempo de vida à fadiga do que a pressão interna cíclica;
3. Nos ensaios de tensão e flexão a elevada temperatura (90°C), foi verificada uma redução significativa no número de ciclos que o componente suporta até à rotura catastrófica;
4. Podem existir defeitos de elevada dimensão na posição crítica da borda de uma junta adesiva sem que seja afetada a integridade a longo prazo.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo são abordados em detalhe os ensaios experimentais realizados no trabalho de Ferreira [1] referentes ao estudo da resistência de juntas tubulares de sobreposição simples sujeitas a esforços de tração. No trabalho prático referido foram utilizados tubos de alumínio AW6082-T651 com uma espessura de 2 mm para ambos os aderentes. Para a ligação adesiva foram utilizados três tipos de adesivos, Araldite® AV138 (adesivo epóxico frágil), Araldite®2015 (adesivo epóxico dúctil), e Sikaforce®7752 (adesivo poliuretano estrutural, combina alta ductilidade e resistência). As juntas foram projetadas com L_0 de 20 e 40 mm. Por último, será realizada uma análise dos resultados obtidos através das curvas força-deslocamento ($P-\delta$), do tipo de rotura, e da resistência das juntas.

3.1.1 Materiais utilizados

3.1.2 Aderentes

Os aderentes de todas as juntas tubulares são em alumínio, nomeadamente a liga AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só pelas boas propriedades mecânicas, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [80], onde foram obtidas as seguintes propriedades: 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%.

Na **Figura 45** é possível observar as curvas tensão-deformação ($\sigma-\epsilon$) dos aderentes de alumínio que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [80]. Está representada também a aproximação utilizada nos modelos MDC e MEFX [81].

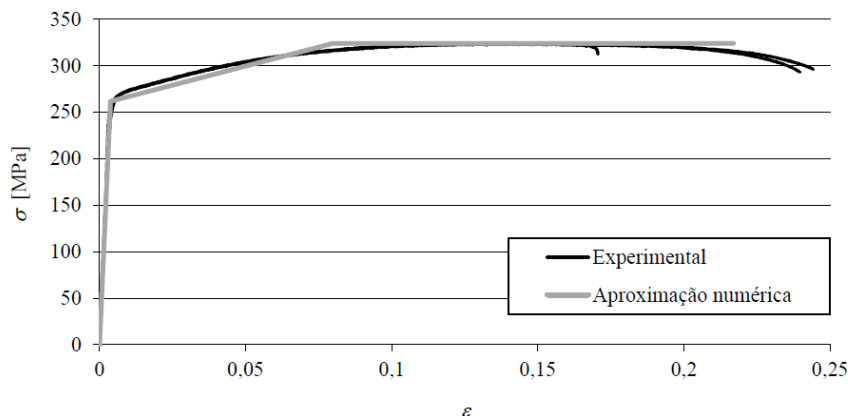


Figura 45 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [82].

3.1.3 Adesivos

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

3.1.3.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 com endurecedor HV 998 é um sistema epóxico bi-componente que, quando combinado, apresenta uma excelente resistência química e mecânica. É um adesivo frágil. A combinação dos componentes resina/endurecedor faz-se numa razão de 100 g/ 40 g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é realizada de forma manual com recurso ao uso de uma espátula [83]. Este adesivo é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [37]. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na **Figura 46**. Estas curvas foram obtidas experimentalmente. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo encontram-se na **Tabela 5**.

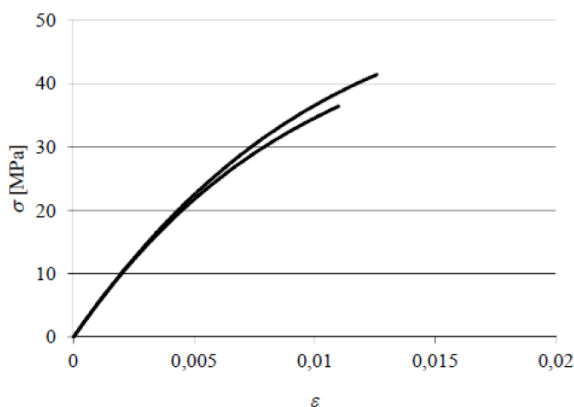


Figura 46 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [82].

Tabela 5 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [84]

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

^a valores estimados na referência [84]

^b Valor de fabricante

3.1.3.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 define-se como um adesivo estrutural bi-componente, de ductilidade moderada e que, comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração tipicamente nas extremidades da junta, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [37].

O Araldite® 2015 é fornecido em cartuchos, possui dois componentes, e a sua cura é efetuada à temperatura ambiente. A razão de aplicação é de 50 g/50 g, sendo a mistura realizada por um bico e aplicado por meio de uma pistola de aplicação [83].

As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração são dadas pela **Figura 47**. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo encontram-se na **Tabela 6**.

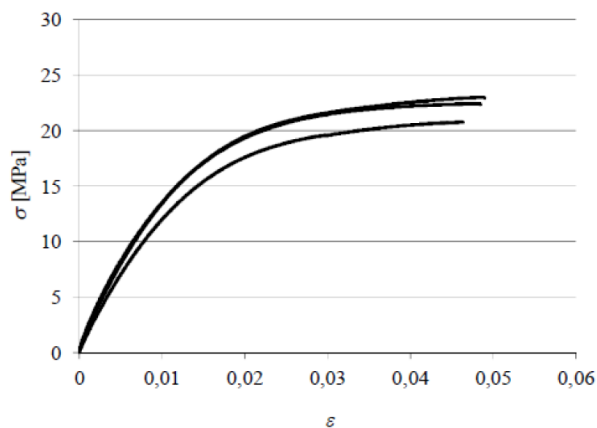


Figura 47 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 [37].

Tabela 6 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [37].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente 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 de fabricante.

Comparando os valores da **Tabela 7** com os valores da **Tabela 8**, verifica-se que a deformação de rotura ao corte do adesivo Araldite® 2015 é quase seis vezes superior ao valor apresentado para o adesivo Araldite® AV138. No entanto, a tensão de rotura ao

corte do adesivo Araldite® AV138 é praticamente o dobro da registada para o adesivo Araldite® 2015.

3.1.3.3 Sikaforce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo à base de poliuretano, que se apresenta sob a forma de dois componentes, resina e endurecedor (FRW L60). A sua relação de mistura em peso é de 5 para 1. Trata-se de um adesivo dúctil que, comparativamente a os adesivos anteriormente abordados, é o que apresenta a menor resistência ao corte e à tração.

Na **Figura 48** estão representadas as curvas σ - ϵ do adesivo e na **Tabela 7** as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes do adesivo.

Em função das propriedades obtidas, é expectável que a resistência de juntas adesivas com este adesivo seja elevada, pois o mesmo combina uma resistência muito aceitável com a elevada ductilidade dos poliuretanos. Assim, são esperadas tensões elevadas na camada de adesivo, bem como o efeito acentuado de plastificação sem rotura das extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [85].

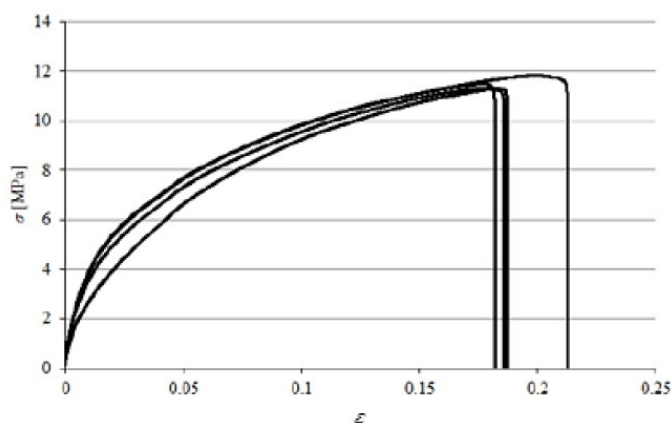


Figura 48 – Curvas σ - ϵ de adesivo SikaForce® 7752 [86].

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [86].

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 de fabricante.

3.1.4 Geometria das juntas

Este subcapítulo tem como objetivo apresentar a geometria da junta usada nos ensaios experimentais. Como já foi referido, trata-se de uma junta tubular de sobreposição simples, cuja geometria está representada na **Figura 49**. A geometria em estudo é constituída principalmente por dois aderentes de forma cilíndrica, onde um dos aderentes se sobrepõe sobre o outro com um L_0 . A espessura do adesivo t_A utilizada para todas as amostras ensaiadas foi de 0,2 mm. Neste trabalho o único parâmetro geométrico modificado foi o L_0 , os outros parâmetros mantiveram-se constantes.

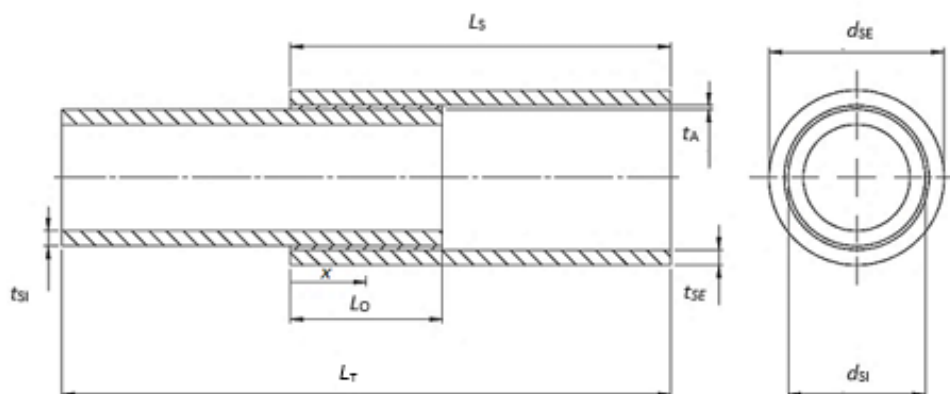


Figura 49 – Geometria e dimensões das juntas tubulares.

Na **Tabela 8** estão representados os parâmetros geométricos e respectivas cotas utilizadas dos provetes.

Tabela 8 - Designação das cotas dos provetes e respectivos valores.

Parâmetros geométricos	Cota [48]	
Comprimento de sobreposição, L_O	20	40
Comprimento dos aderentes, L_S	50	60
Comprimento total da junta tubular, L_T	80	80
Diâmetro externo do aderente interior, d_{SI}	20,0	20,0
Diâmetro externo do aderente exterior, d_{SE}	22,4	22,4
Espessura do aderente interior, t_{SI}	2	2
Espessura do aderente exterior, t_{SE}	2	2
Espessura do adesivo, t_A	0,2	0,2

3.1.5 Processo de fabrico

Para o desenvolvimento das juntas propostas foi necessário proceder com a fabricação das mesmas. O material para fabricar os aderentes foi fornecido em barras maciças de 120 mm de comprimento com um diâmetro acima do d_{SI} e d_{SE} . O processo de fabricação da junta teve como início a preparação dos aderentes para conseguir a geometria final pretendida. Para este efeito as barras foram submetidas a várias fases de maquinagem. As dimensões exteriores (**Figura 50a**) foram maquinadas por uma fresa com pastilhas de metal duro. Por outro lado, o furo longitudinal foi realizado com uma broca e posteriormente retificado com uma fresa até atingir os valores desejados de t_{SI} e t_{SE}

(Figura 50b). Além destas operações, foi feito um furo transversal de 1,0 mm de diâmetro no aderente exterior, na região não útil acima da zona que irá ser sobreposta no outro aderente. Este furo serve para permitir que o processo de colagem ocorra sem problemas. Na verdade, como os furos longitudinais dos aderentes não são totalmente abertos, a montagem dos tubos sem o furo transversal cria pressão na junta e impede o posicionamento dos aderentes [87]. Para ensaiar os provetes à tração foi maquinada a extremidade oposta ao furo longitudinal de forma a ser possível montar o conjunto nos mordentes da máquina de ensaios (Figura 50c).

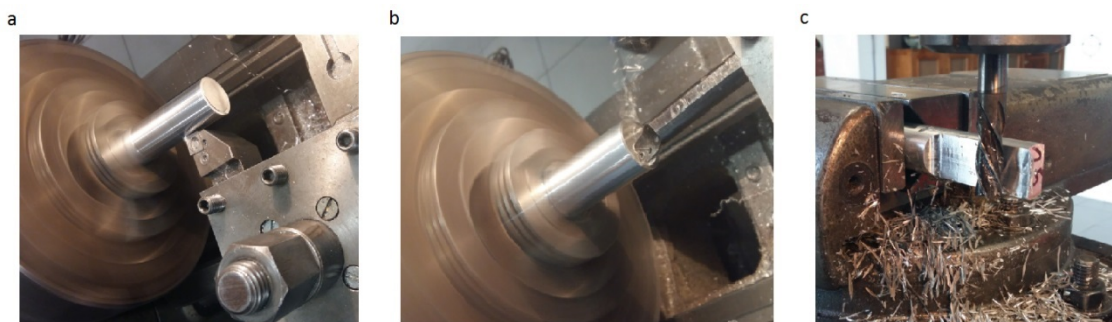


Figura 50 - Fabricação dos aderentes: (a) maquinagem do diâmetro exterior; (b) maquinagem do diâmetro interior; (c) maquinagem do rebaixo.

Posteriormente foi realizada a preparação das superfícies dos aderentes, que foi feita pelo processo de granalhagem. Este processo não só remove impurezas indesejadas da superfície assim como também confere uma certa rugosidade que será benéfica para a ligação adesiva. Por último, foi feito o desgorduramento com acetona das superfícies a colar. Na Figura 51a e Figura 51b estão representadas as superfícies dos aderentes após granalhagem.

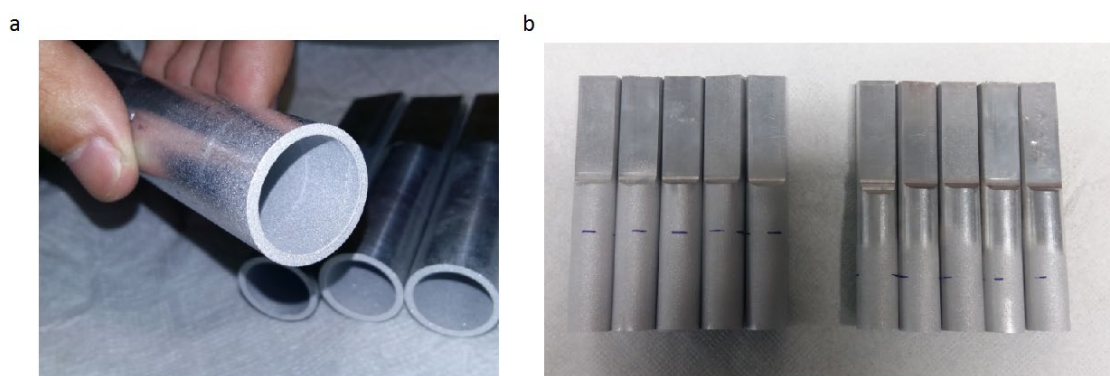


Figura 51 - Preparação da superfície dos aderentes: (a) granalhagem da superfície interior; (b) granalhagem da superfície exterior.

Para garantir a folga e a concentricidade entre ambos os aderentes durante a montagem e cura da junta adesiva, foi utilizado fio calibrado de nylon com 0,2 mm de diâmetro. Este processo consistiu em colocar três desses fios com o mesmo espaçamento ao longo

da parte interna do aderente exterior, que é exatamente o espaço disponível entre os dois aderentes. Após a montagem, os fios garantem o posicionamento correto entre os aderentes e garantem o valor desejado de t_A . A aplicação do adesivo foi feita em ambos os aderentes (**Figura 52a**), e a montagem ocorreu exclusivamente com um movimento longitudinal entre os tubos, isto é, sem rotação, para evitar a expulsão do adesivo dos locais de ligação. O L_0 de cada junta foi obtido através da medição da posição relativa de ambos os aderentes com a ajuda de um paquímetro digital. Após o posicionamento final dos aderentes foi removido o excesso de adesivo resultante do processo de montagem com a ajuda de um X-ato. Após colagem e remoção do excesso de adesivo (**Figura 52b**), as juntas tubulares foram colocadas na vertical de forma a evitar desalinhamentos (**Figura 52c**). No que diz respeito ao processo de cura das juntas tubulares em estudo, estas estiveram durante um período de uma semana à temperatura ambiente.

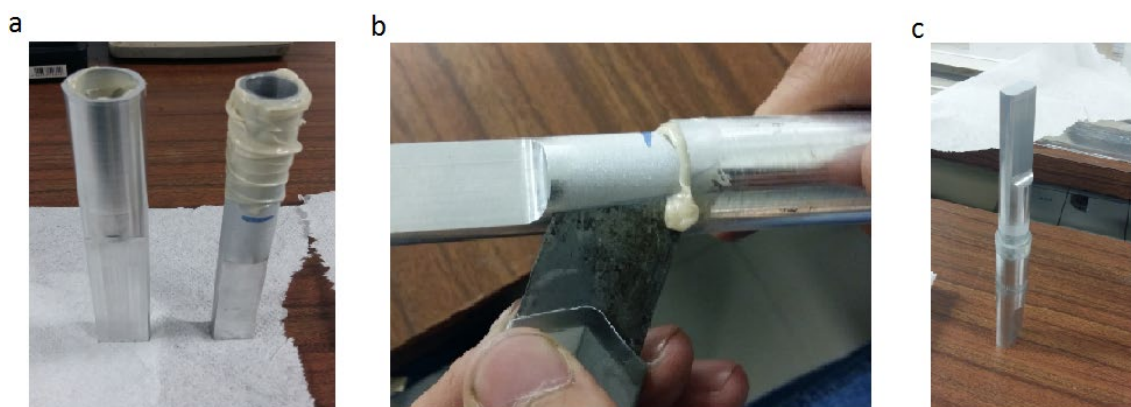


Figura 52 - Montagem da junta adesiva tubular: (a) aplicação de adesivo; (b) remoção de excesso de adesivo; (c) posição final de cura da junta adesiva.

3.1.6 Resultados obtidos

Após a fabricação das juntas tubulares, procedem-se aos ensaios de tração. Os ensaios foram realizados numa máquina Autograph AG-X (Shimadzu), onde foram utilizadas células de carga de 100 kN (**Figura 53**). As juntas foram testadas à temperatura ambiente com uma velocidade de teste de 1 mm/min. Através destes ensaios foi possível retirar as curvas força-deslocamento ($P-\delta$). Na obtenção de resultados foram considerados cinco testes para cada tipo de adesivo e para cada L_0 .



Figura 53 - Junta tubular com $L_0=40$ mm na máquina Shimadzu AG-X pronta para teste.

3.1.6.1 Curvas $P-\delta$

Neste subcapítulo serão apresentados os resultados das curvas $P-\delta$ obtidas nos ensaios experimentais das juntas tubulares de sobreposição simples. No tratamento de dados foi considerado o tipo de adesivo e o seu L_0 . Os resultados dos ensaios que serão apresentados estão organizados pelo critério de resistência do adesivo.

Araldite® AV138

Na **Figura 54** são apresentadas as curvas $P-\delta$ correspondentes às juntas tubulares com adesivo Araldite® AV138 e $L_0=20$ mm. É de salientar que nos resultados apresentados foi excluído o ensaio realizado ao provete nº 3, visto que este apresentava valores de resistência muito abaixo do expectável.

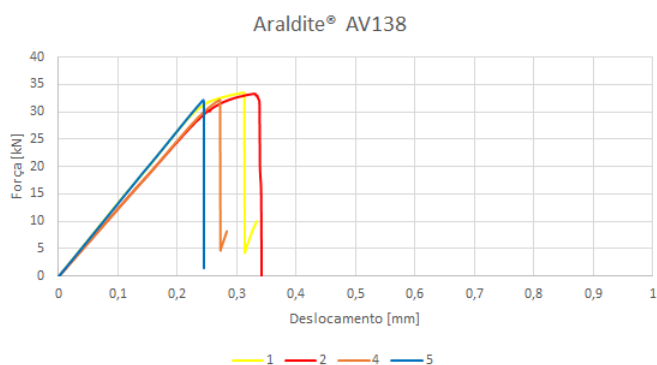


Figura 54 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=20$ mm.

Nas curvas P - δ apresentadas na **Figura 54** verifica-se que nos resultados obtidos nas juntas 1 e 2 (curva amarela e vermelha, respetivamente) existe plastificação dos aderentes. Este comportamento pode ter sido originado pelo excesso de adesivo existente no interior da ligação, que originou um aumento da área de contacto. No que diz respeito às restantes amostras, estas apresentam um comportamento linear até à rotura. Também é possível verificar que nas amostras 4 e 5 existe uma boa aproximação da carga máxima e do deslocamento obtido nos ensaios.

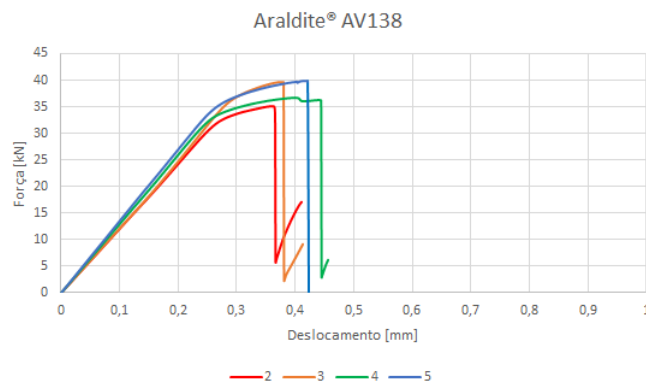


Figura 55 - Curva P - δ obtida experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=40$ mm

Os resultados obtidos nos ensaios das juntas adesivas com $L_0=40$ mm com adesivo Araldite® AV138 (**Figura 55**) permitem constatar que existe plastificação em todas as amostras testadas. No que diz respeito à resistência da junta, verifica-se que as juntas 3 e 5 (laranja e azul, respetivamente) atingem um valor próximo dos 40 kN enquanto as restantes não ultrapassam os 36 kN. Esta discrepância pode estar relacionada com o excesso de adesivo no interior da ligação, como indicado nas juntas adesivas com $L_0=20$ mm. No que diz respeito ao deslocamento registado, verificam-se pequenas flutuações, que estão relacionadas com o escorregamento existente entre os provetes e os mordentes da máquina.

Na **Tabela 9** são apresentados os resultados dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas adesivas ensaiadas com o adesivo Araldite® AV138 com L_0 diferentes. Também são apresentados os valores médios da força máxima ($P_{m\acute{a}x}$ Média), que corresponde à média das forças máximas obtidas nos ensaios, e o desvio Padrão, que fornece a dispersão, em termos numéricos e percentuais dos valores obtidos nos ensaios.

Dos ensaios realizados para o adesivo Araldite® AV138, é possível verificar que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ aumentam com o aumento de L_0 . No que diz respeito ao desvio padrão percentual, verifica-se um desvio superior nas juntas com $L_0=40$ mm (5,15%). Este fenómeno pode estar relacionado com a fabricação dos provetes ou até mesmo provocado pela máquina de ensaios. É de salientar que os provetes que foram considerados inválidos não contribuíram para os resultados da $P_{m\acute{a}x}$ Média nem para o desvio padrão.

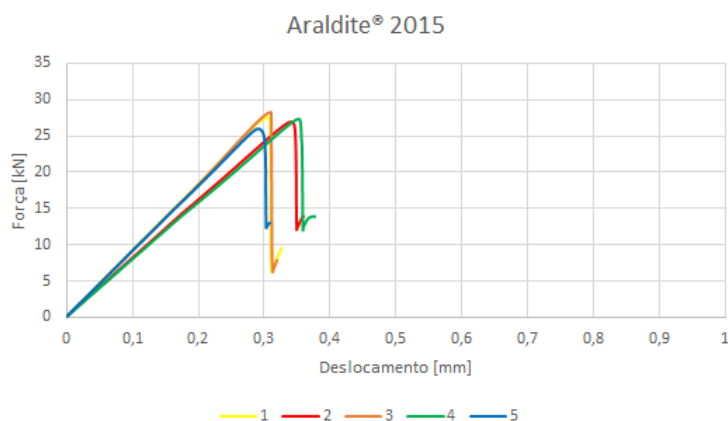
Tabela 9 - Valores obtidos dos ensaios das juntas adesivas com Araldite® AV138.

L_0 [48]	1 [N]	2 [N]	3 [N]	4 [N]	5 [N]	$P_{máx}$ Médio [N]	Desvio Padrão	
							[N]	[%]
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

Araldite® 2015

Na **Figura 56** são apresentadas as curvas $P-\delta$ correspondentes às juntas tubulares com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=20$ mm. Todos os ensaios realizados nesta configuração de junta foram considerados válidos, visto que apresentavam resultados bastante similares.

Nestes ensaios verifica-se um comportamento linear até à rotura. Os resultados obtidos de rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento apresentam no geral uma boa repetibilidade. À semelhança da análise realizada nas juntas com o adesivo Araldite® AV138, neste caso também são visíveis pequenas oscilações na rigidez elástica.

Figura 56 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=20$ mm.

Os resultados das curvas $P-\delta$ obtidas dos ensaios das juntas adesivas com $L_0=40$ mm (**Figura 57**) mostram uma plastificação dos aderentes devido ao aumento significativo da área de colagem. Relativamente ao comportamento das juntas, é possível verificar que os resultados obtidos têm no geral uma boa aproximação entre eles.

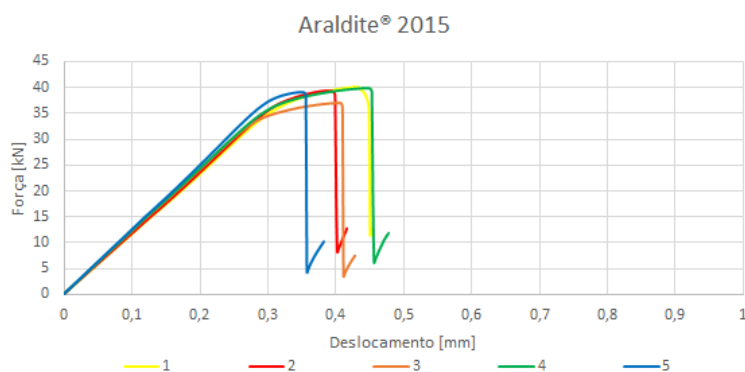


Figura 57 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=40$ mm.

Na **Tabela 10** são apresentados os resultados de $P_{m\acute{a}x}$, a média da força máxima ($P_{m\acute{a}x}$ Média), e o desvio padrão para as juntas com adesivo Araldite® 2015 e L_0 de 20 e 40 mm. Nos resultados dos ensaios verifica-se um comportamento bastante semelhante no que diz respeito ao $P_{m\acute{a}x}$ obtido em cada um dos ensaios. Ao contrário dos ensaios nas juntas com adesivo Araldite® AV138, onde o desvio padrão era mais do dobro nas juntas de $L_0=40$ mm comparativamente com as juntas de $L_0=20$ mm, neste caso o desvio padrão foi bastante aproximado em ambas as situações (2,84%).

Tabela 10 - Valores obtidos dos ensaios das juntas adesivas com Araldite® 2015.

L_0 [48]	1 [N]	2 [N]	3 [N]	4 [N]	5 [N]	$P_{m\acute{a}x}$ Médico [N]	Desvio Padrão [N] [%]	
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

Sikaforce® 7752

Tal como apresentado anteriormente, na **Figura 58** estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente das juntas adesivas tubulares com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=20$ mm.

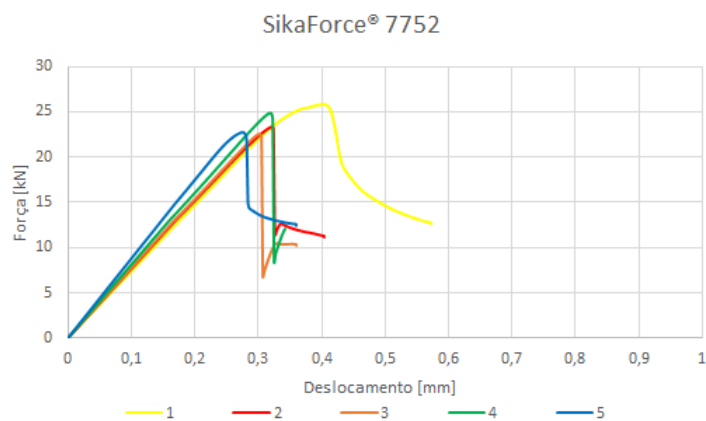


Figura 58 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=20$ mm.

Nos provetes com $L_0=20$ mm (**Figura 58**) verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura, exceto no provete 1 (curva amarela). Este apresenta plastificação nos aderentes e um deslocamento até à rotura superior em comparação com as restantes juntas adesivas. Este aumento significativo do valor de $P_{m\acute{a}x}$ e do deslocamento pode estar relacionado com o excesso do adesivo presente no interior da junta.

Nas juntas com adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=40$ mm (**Figura 59**) observa-se plastificação dos aderentes. É de notar que no ensaio realizado na junta 3 (curva laranja) existe uma redução significativa do valor de deslocamento obtido até à rotura. Este fenómeno pode estar relacionado com a espessura de adesivo ser inferior ao pretendido ou por defeitos de fabrico provocados na construção da junta.

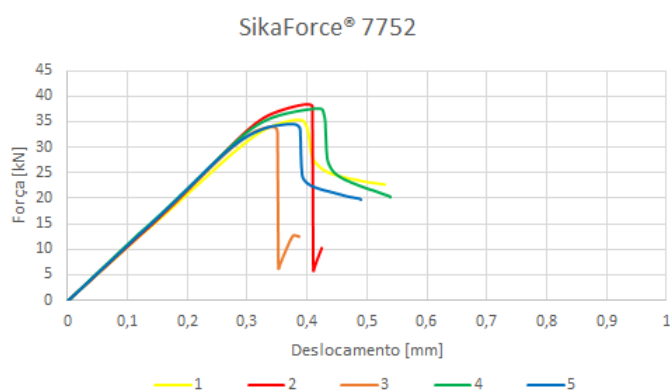


Figura 59 -Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=40$ mm.

Nas análises realizadas nas juntas com adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=20$ e 40 mm, no geral verifica-se uma boa repetibilidade das curvas $P-\delta$. Nos resultados obtidos verificam-se pequenas oscilações no comportamento das juntas, à semelhança dos adesivos anteriormente apresentados. Estas oscilações são provocadas pela variabilidade natural entre provetes devido a efeitos de fabrico e dimensionais.

Na **Tabela 11** são indicados os resultados de $P_{\text{máx}}$ obtidos nos ensaios das juntas com adesivo Sikaforce® 7752 com ambos os L_0 que foram analisados. Nos resultados da $P_{\text{máx}}$ Média e no desvio padrão percentual foram considerados os resultados de todas as amostras, visto que estas apresentavam comportamentos bastante semelhantes.

Tabela 11 - Valores obtidos dos ensaios das juntas adesivas com Sikaforce® 7752.

L_0 [48]	1 [N]	2 [N]	3 [N]	4 [N]	5 [N]	$P_{\text{máx}}$ Médio [N]	Desvio Padrão [N]	
							[N]	[%]
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

Ao analisar os resultados obtidos nos ensaios com o adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se que, dos três adesivos ensaiados, este último é o que apresenta as dispersões mais significativas: 5,24% para $L_0=20$ mm e 4,87% para $L_0=40$ mm. No entanto, mesmo assim não apresentam um desvio significativo em relação aos valores obtidos individualmente relativamente ao seu valor médio.

3.1.6.2 Modos de rotura

Os modos de rotura obtidos nos ensaios experimentais das juntas adesivas tubulares são descritos no presente capítulo. A **Figura 60a** e a **Figura 60b** ilustram o tipo de rotura ocorrida nos provetes com o adesivo Araldite® AV138 para $L_0=20$ e 40 mm, respetivamente.

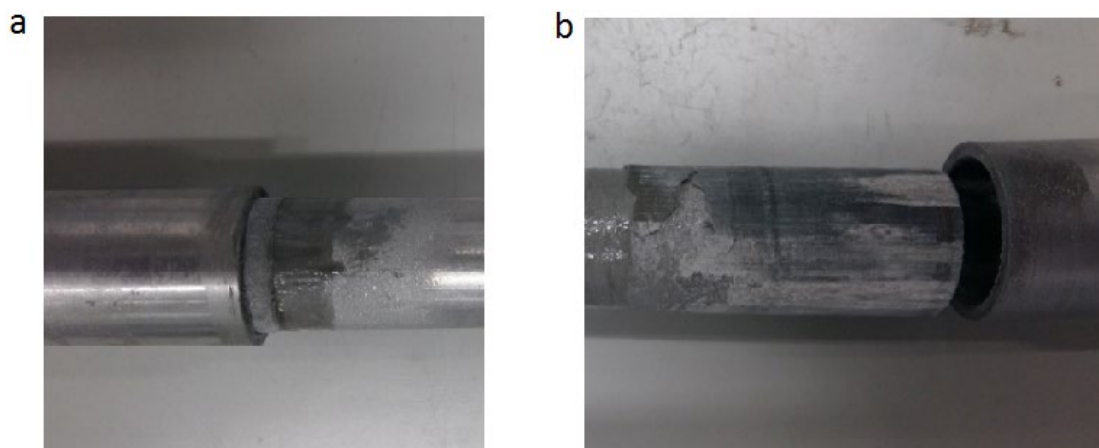


Figura 60 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Araldite® AV138: (a) $L_0=20$ mm; (b) $L_0=40$ mm.

Como é possível observar na **Figura 60a** e **Figura 60b**, as roturas dos provetes ocorreram de forma coesiva na camada adesiva. Verifica-se que ambas as superfícies da junta

contêm adesivo. Este modo de rotura permite concluir que a ligação entre o aderente e o adesivo é mais resistente do que a resistência interna do adesivo.

A **Figura 61a** e **Figura 61b** apresentam as roturas dos provetes com adesivo Araldite® 2015 para o $L_0=20$ e 40 mm, respetivamente.

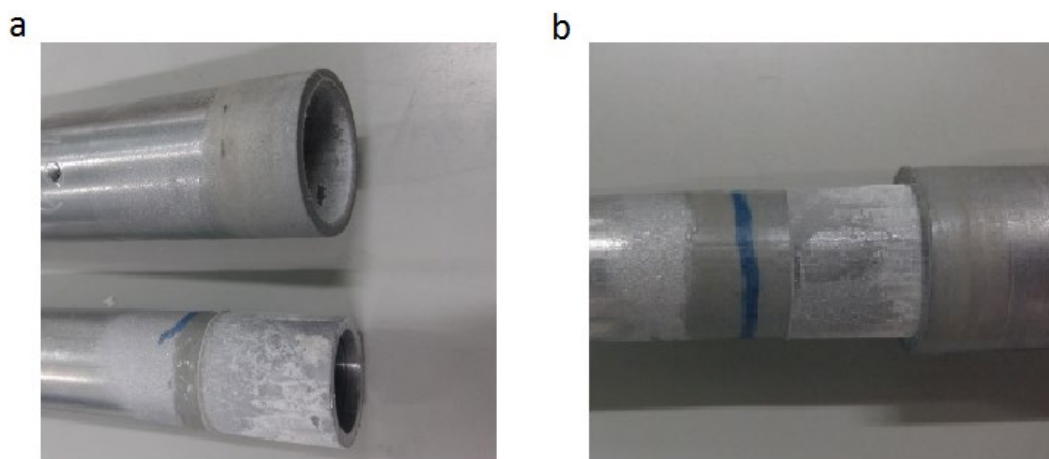


Figura 61 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Araldite® 2015: (a) $L_0=20$ mm; (b) $L_0=40$ mm.

Como se pode observar na **Figura 61a** e **Figura 61b**, as roturas dos provetes com adesivo Araldite® 2015 também foram coesivas. No provete ilustrado na **Figura 61b**, é possível observar a ausência de adesivo em algumas regiões da junta. Este fenómeno pode ter ocorrido devido a uma má preparação superficial ou devido ao método de montagem da junta da junta tubular. No geral, a rotura em todos os provetes ensaiados com o adesivo Araldite® 2015 foi coesiva.

A **Figura 62a** e **Figura 62b** representam as ruturas obtidas nos ensaios experimentais das juntas com adesivo Sikaforce® 7752 para o $L_0=20$ e 40 mm.

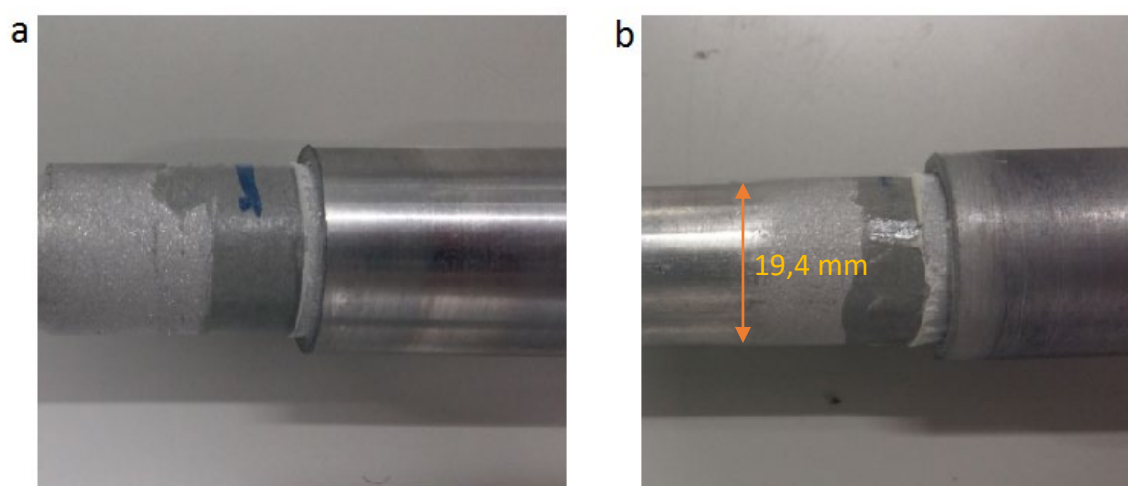


Figura 62 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Sikaforce® 7752: (a) $L_0=20$ mm; (b) $L_0=40$ mm.

Nas juntas com adesivo Sikaforce® 7752 também ocorre rotura coesiva, à semelhança das juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Na **Figura 62b**, que corresponde a uma junta com $L_0=40$ mm, é possível verificar que existiu plastificação do aderente. O mesmo não é possível visualizar nas juntas com os outros adesivos em estudo.

3.1.6.3 Resistência das juntas

Na **Figura 63** estão representados graficamente os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente, assim como o desvio padrão para cada valor de L_0 , que indica a dispersão de cada valor individual de $P_{m\acute{a}x}$ relativamente ao seu valor de $P_{m\acute{a}x}$ médio. Na **Tabela 12** são indicados os resultados experimentais do $P_{m\acute{a}x}$ Médio para as juntas tubulares com os três adesivos em estudo, e também é indicada a variação de $P_{m\acute{a}x}$ quando o seu valor de L_0 aumenta de 20 para 40 mm.

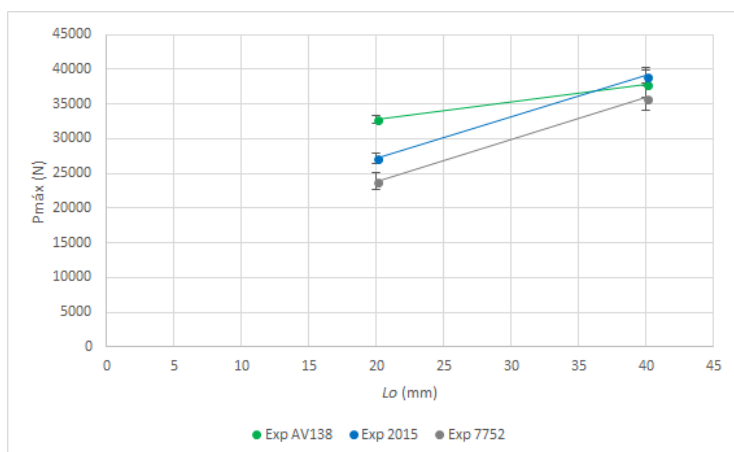


Figura 63 - Gráfico de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas para os três adesivos em estudo.

Tabela 12 - $P_{m\acute{a}x}$ Médio e aumento percentual do mesmo [$\Delta P_{m\acute{a}x}$ %] para cada L_0 das juntas tubulares com os três adesivos em estudo.

Adesivo	$L_0= 20$ mm [N]	$L_0= 40$ mm [N]	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,42
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,42
Sikaforce® 7752	23856,4	35929,9	50,61

Na análise dos resultados apresentados na **Figura 63** e **Tabela 12** é possível verificar que o adesivo que confere maior resistência à junta tubular com $L_0=20$ mm é o Araldite® AV138, que apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ médio = 32797,5 N. No entanto, para $L_0=40$ mm o valor de $P_{m\acute{a}x}$ tem um aumento de 15,42 %, o que demonstra a fragilidade do adesivo

quando comparado com os restantes. Logo o adesivo Araldite® AV138 é um adesivo ideal para comprimentos de sobreposição pequenos. No que diz respeito ao resultado obtido com o adesivo Araldite® 2015 com $L_0=20$ mm (27238,4 N), este foi inferior ao resultado do adesivo Araldite® AV138. Nos provetes com Araldite® 2015 e $L_0=40$ mm, verifica-se um aumento de resistência na ordem dos 43,42% (39066,8 N), e regista-se também plastificação dos aderentes. Logo, adesivos mais dúcteis mais adequados para comprimentos de sobreposição maiores. O resultado obtido para o adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=20$ mm de (23856,4 N) corresponde ao valor mais baixo dos três adesivos em estudo, o que se deve ao facto de que este adesivo é o que apresenta a maior ductilidade dos três adesivos. Quando o L_0 aumenta de 20 para 40 mm obtém-se um aumento percentual de resistência de 50,61 %, valor acima dos restantes adesivos. Este acontecimento deve-se ao facto deste adesivo (Sikaforce® 7752) ser o mais dúctil dos três. Contudo, apesar do grande aumento de resistência na junta adesiva, a carga máxima suportada pelos provetes com adesivo Sikaforce® 7752 foi sempre inferior à das restantes juntas com os adesivos estudados inicialmente.

3.2 Trabalho numérico

A análise numérica realizada neste estudo tem como objetivo prever a resistência das juntas com a ajuda do *software* ABAQUS®. A escolha desta ferramenta de análise recai pela possibilidade de utilização do modelo integrado de MEFX para prever a resistência de juntas tubulares sujeitas a esforços de tração. Neste trabalho numérico serão analisadas as tensões de corte e de arrancamento das juntas para os diferentes L_0 utilizados no trabalho experimental. Para além disso, serão realizadas comparações entre os diferentes critérios de iniciação de dano. Também será analisado o efeito da forma da lei de propagação e do expoente do critério de propagação de dano em modo misto. No final, é realizada uma comparação dos resultados obtidos através da análise numérica pelo método MDC com o método MEFX.

3.2.1 Condições da análise numérica

Neste subcapítulo será abordada a análise numérica da junta tubular de sobreposição simples. Esta análise é baseada no MEF e, para tal foi utilizado o *software* ABAQUS®. É um *software* que, para além de possuir uma extensa biblioteca de elementos e grande aplicação em diversos trabalhos da área dos adesivos, permite a utilização do módulo integrado de MEFX para prever a resistência das juntas. O MEFX possui diversos critérios de iniciação de dano. O critério utilizado como padrão para esta análise foi o QUADS (critério quadrático de tensões). No capítulo 3.2.5.1 será realizada uma comparação entre o critério de iniciação QUADS com os restantes disponíveis no *software*.

Na análise de MEF foi construído um modelo bidimensional axissimétrico, onde os aderentes e adesivos foram modelados por secções sólidas e homogéneas (**Figura 64**).

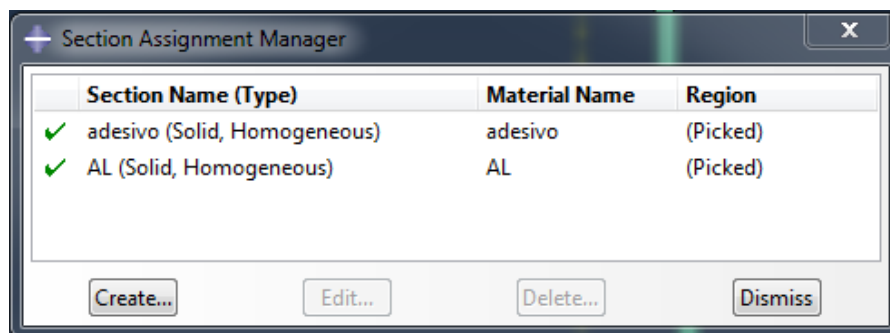


Figura 64 - Tipos de secções dos constituintes da junta adesiva tubular no ABAQUS®

Após criação do modelo 2D e atribuição do tipo de elementos para cada constituinte da junta, foram atribuídas as propriedades mecânicas e de fratura dos materiais utilizados na simulação de ABAQUS®. No que diz respeito às propriedades mecânicas da liga de alumínio, foram utilizadas as propriedades descritas no capítulo 3.1.2. Quanto as propriedades mecânicas dos adesivos em estudo foram introduzidos inicialmente os valores indicados na **Tabela 5**, **Tabela 6**, e **Tabela 7** para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015, e Sikaforce® 7752, respetivamente.

No modelo de MEF em análise foi considerada uma malha com elementos axissimétricos de quatro nós com uma formulação linear (CAX4). No que diz respeito ao refinamento da malha, foi utilizado um refinamento mais grosseiro para a previsão da resistência da junta, refinamento este constituído por 5100 elementos e 5522 nós, onde cada elemento possuía uma dimensão constante de 0,2 mm de lado ao longo do modelo (**Figura 65a**). Na análise das tensões de arrancamento e corte obtidas pelo ABAQUS®, foi considerado um refinamento de malha com 27196 elementos e 28244 nós, ou seja, uma malha muito mais refinada do que a malha utilizada para a previsão da resistência (**Figura 65b**). O refinamento da malha para obter as tensões é de extrema importância, visto que permite registar com precisão os elevados gradientes de tensões que são gerados ao longo da camada adesiva. Neste segundo refinamento foram utilizados elementos com dimensões diferentes ao longo do modelo, ou seja, nas zonas próximas da ligação adesiva os elementos apresentam dimensões inferiores comparativamente ao resto do modelo. Este refinamento variável da malha permite obter resultados mais precisos nas zonas de maior relevância e permite diminuir o tempo de análise computacional.

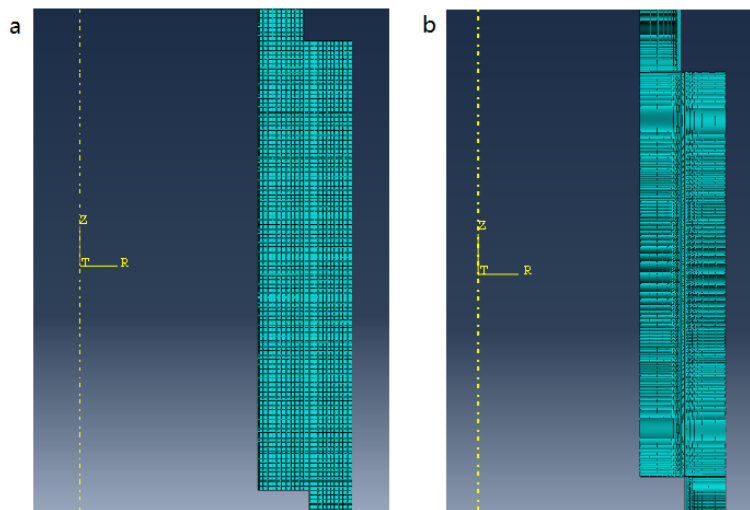


Figura 65 - Refinamento das malhas para: (a) análise de resistência e (b) análise de tensões.

O refinamento de malha variável foi feito com recurso à função *Seed Edges*. Esta função permite introduzir gradação no tamanho dos elementos ao longo de uma determinada aresta e permite definir a sua direção, dimensão do elemento menor e dimensão do elemento maior. Na **Figura 66a** está representada em pormenor a malha do MEF após aplicação da função *Seed Edges*. No que diz respeito às dimensões dos elementos na zona dos aderentes foi considerado 0,02 mm para o elemento mais pequeno e 0,5 mm para o elemento maior (**Figura 66b**).

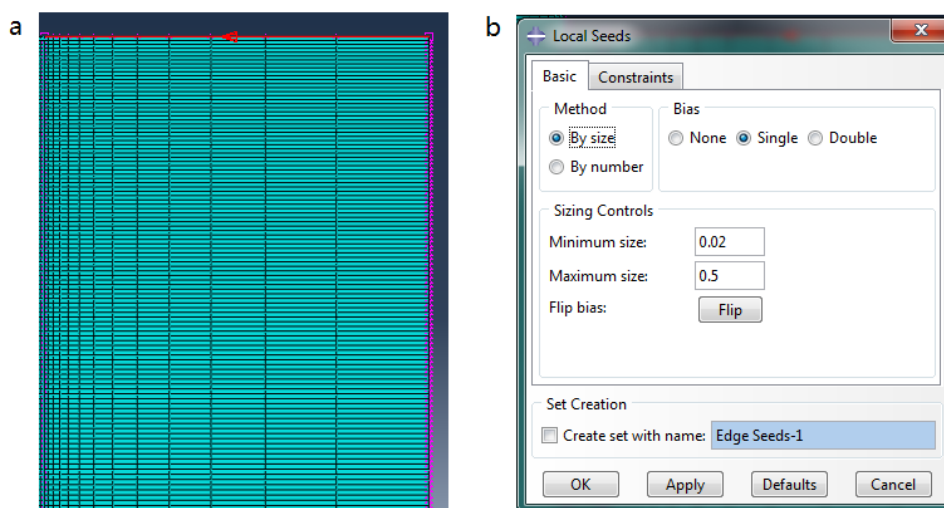


Figura 66 - Definição da malha com a função *Seed Edges*: (a) malha nos aderentes e (b) parâmetros de malha.

De forma a simular as condições reais dos ensaios experimentais, foi necessário impor as seguintes condições fronteira e de carregamento: encastramento nos eixos (x, y) na extremidade de um dos aderentes e aplicação de um deslocamento de tração na extremidade do outro aderente e restrição de deslocamentos radiais. A **Figura 67**

apresenta as condições de fronteiras e de carregamentos impostas ao modelo numérico de ABAQUS®.

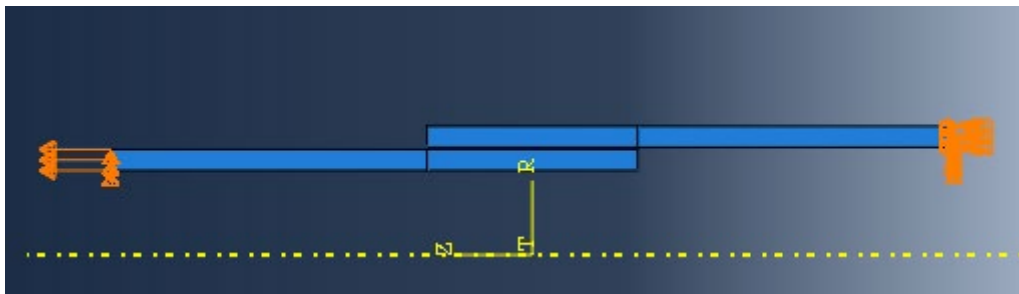


Figura 67 - Condições fronteira e de carregamento impostas ao modelo de MEF.

3.2.2 Modelo de dano utilizado

Enquanto a formulação teórica do MEFX utilizada neste trabalho foi definida anteriormente no capítulo 2.2.2.5, no presente ponto pretende-se descrever o modelo de dano utilizado e as propriedades dos adesivos utilizadas para o estudo de MEFX. O MEFX considera que os materiais assumem um comportamento inicial linear elástico. O início da degradação é simulado através de critérios de iniciação de dano. Os critérios de iniciação de dano podem ser baseados nas tensões ou deformações principais máximas (critério MAXPS ou MAXPE, respetivamente), que são comparados com os respetivos valores limite dos adesivos. Conforme apresentado no capítulo 2.2.2.5, existe a possibilidade de considerar critérios distintos: nos critérios MAXS e MAXE a iniciação do dano tem lugar quando os valores de tensões ou deformações (normal ou de corte) atingem os valores limite, respetivamente, e nos critérios QUADS e QUADE o dano inicia quando o valor de f no critério respetivo atingir a unidade. Neste trabalho, foram testados estes seis critérios de iniciação de dano. As leis de tração-separação simulam a degradação do material e podem ser lineares ou exponenciais. Neste trabalho foi escolhida inicialmente uma lei de degradação linear entre as tensões e deslocamentos, com uma redução proporcional das tensões transmitidas em função dos deslocamentos, até se dar a rotura completa. No caso dos critérios de iniciação de dano MAXPS e MAXPE, a propagação do dano tem lugar perpendicularmente às tensões ou deformações principais máximas, respetivamente. Para os restantes critérios, como será detalhado posteriormente, será possível escolher a direção de propagação de dano entre as duas direções principais locais dos elementos enriquecidos [88]. Posteriormente, vai ser estudado o efeito da forma da lei coesiva e do expoente do critério de propagação do modo misto na resistência das juntas tubulares.

3.2.3 Determinação das propriedades de dano

Para análise das juntas através do MEFX com recurso ao *software* ABAQUS®, torna-se necessário conhecer os valores de E , G , G_{IC} , G_{IIC} , $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\epsilon_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios. O valor de $\sigma_{m\acute{a}x}$ foi igualado à tensão de rotura à tração e $\epsilon_{m\acute{a}x}$ foi igualado à deformação

de rotura à tração, pela proximidade das suas características. As leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas P - δ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram então aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. As restantes propriedades encontram-se descritas no trabalho de Ferreira [1].

3.2.3.1 Araldite® AV138

Para simular a junta adesiva com Araldite® AV138 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores que constam na **Tabela 13**, para as leis de degradação da camada adesiva.

Tabela 13 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® AV138.

E [MPa]	4890
ν	0,35
$\sigma_{m\acute{a}x}$ [MPa]	39,45
t_n^0 [MPa]	39,45
t_s^0 [MPa]	25
G_{IC} [N/mm]	0,3
G_{IIC} [N/mm]	0,96
$\epsilon_{m\acute{a}x}$ [%]	1,21
ϵ_n^0 [%]	1,21
ϵ_s^0 [%]	7,8

Para a iniciação da fenda na camada adesiva, nos critérios baseados nas tensões (MAXPS, MAXS e QUADS) usaram-se os valores das propriedades $\sigma_{m\acute{a}x}$, t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} do Araldite® AV138, enquanto para os critérios de deformação (MAXPE, MAXE e QUADE) foram usados os valores de $\epsilon_{m\acute{a}x}$, ϵ_n^0 , ϵ_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} .

3.2.3.2 Araldite® 2015

Para a lei de degradação linear com o adesivo Araldite® 2015 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores das propriedades presentes na **Tabela 14**, conforme o critério a usar. Os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão ($\sigma_{m\acute{a}x}$, t_n^0 e t_s^0) são inferiores aos do Araldite® AV138, enquanto para os critérios de deformação os valores das propriedades ($\epsilon_{m\acute{a}x}$, ϵ_n^0 e ϵ_s^0) são superiores, o que é indicativo de um adesivo menos resistente, mas mais dúctil do que o anterior.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® 2015.

E [MPa]	1850
ν	0,33
$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	21,5
t_n^0 [MPa]	21,5
t_s^0 [MPa]	20,8
G_{IC} [N/mm]	0,43
G_{IIC} [N/mm]	4,5
$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	4,77
ϵ_n^0 [%]	4,77
ϵ_s^0 [%]	43,9

3.2.3.3 Sikaforce® 7752

No caso do adesivo Sikaforce® 7752 verifica-se que os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão ($\sigma_{\text{máx}}$, t_n^0 e t_s^0) diminuem, mas para os critérios de deformação ($\epsilon_{\text{máx}}$, ϵ_n^0 e ϵ_s^0) os valores são bem mais elevados quando comparados com os outros adesivos em estudo. Isto indica que o adesivo Sikaforce® 7752 é o mais dúctil dos três adesivos. Estas propriedades e respetivos valores estão presentes na **Tabela 15**.

Tabela 15 - Parâmetros utilizados na análise do MEFX para o adesivo Sikaforce® 7752.

E [MPa]	490
ν	0,30
$\sigma_{\text{máx}}$ [MPa]	11,49
t_n^0 [MPa]	11,49
t_s^0 [MPa]	14
G_{IC} [N/mm]	2,36
G_{IIC} [N/mm]	5,51
$\epsilon_{\text{máx}}$ [%]	13,92
ϵ_n^0 [%]	13,92
ϵ_s^0 [%]	54,82

3.2.4 Análise de tensões na junta

A análise da distribuição de tensões presentes na junta é realizada com ajuda do *software* ABAQUS®. Esta análise tem como objetivo comparar as tensões de arrancamento (σ_y) e as tensões de corte (τ_{xy}) no plano médio da espessura do adesivo para as juntas adesivas tubulares. São considerados os diferentes valores de L_0 testados experimentalmente de forma a compreender qual é a influencia deste parâmetro nas tensões resultantes. Nesta análise, as distribuições de tensões foram normalizadas. Para isso, as tensões σ_y e τ_{xy} foram divididas pela tensão de corte média (τ_{avg}) para cada valor de L_0 . O valor de L_0 também foi normalizado (x/L_0), dividindo a distância desde a extremidade solicitada da camada adesiva pelo comprimento total, em que x está definido na **Figura 49**. Os gráficos que serão apresentados neste capítulo mostram as distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} em função de x/L_0 , compreendido no intervalo $0 \leq x/L_0 \leq 1$, onde $x/L_0=0$ representa a extremidade da ligação que corresponde ao topo do tubo exterior e $x/L_0=1$ representa a extremidade da ligação oposta (topo do tubo interior).

3.2.4.1 Tensões de arrancamento

Na **Figura 68** estão representadas as tensões σ_y para os três adesivos em análise, em função de L_0 .

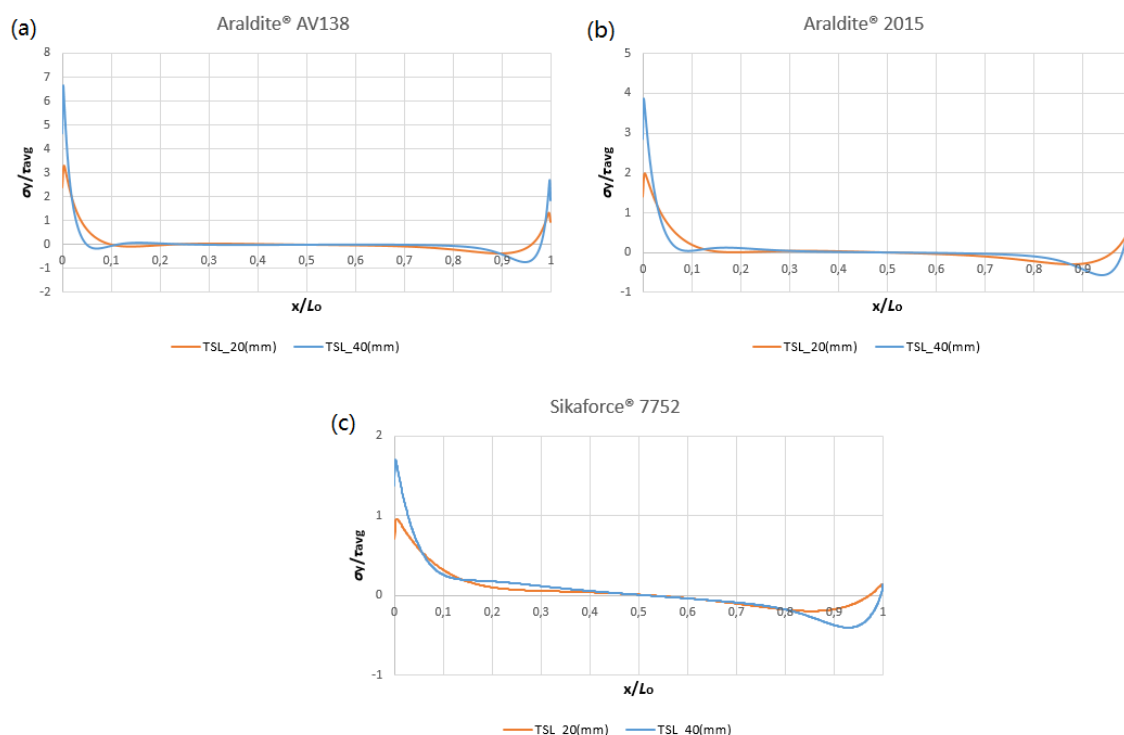


Figura 68 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) Sikaforce® 7752.

As curvas apresentadas na **Figura 68** registam picos de tensões de arrancamento próximos das extremidades da ligação ($x/L_0=0$ e $x/L_0=1$), enquanto na zona central as tensões σ_y são aproximadamente nulas. Isto acontece porque nas extremidades são geradas tensões de tração devido à deformação transversal da junta, decorrente do momento fletor criado pelos diferentes diâmetros dos tubos [89].

Na **Tabela 16** estão representados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} para cada junta adesiva com os três adesivos em estudo e para as juntas com $L_0=20$ e 40 mm.

Tabela 16 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em função de L_0 .

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	3,302	6,651
Araldite® 2015	1,993	3,881
Sikaforce® 7752	0,964	1,704

Na **Tabela 16** é possível verificar que o valor máximo que foi registado é de $\sigma_y/\tau_{avg}=6,651$, que corresponde ao resultado obtido para o Araldite® AV138 com $L_0=40$ mm. Este resultado está relacionado o elevado valor de E que o adesivo Araldite® AV138 apresenta relativamente aos outros dois adesivos. O adesivo que apresenta o segundo valor mais elevado é o Araldite® 2015, com $\sigma_y/\tau_{avg}=3,881$ para $L_0=40$ mm. Este resultado é inferior aos do Araldite AV138, devido a este adesivo ser mais flexível do que o anterior. No que diz respeito aos resultados obtidos nas juntas com adesivo Sikaforce® 7752, registou-se um valor máximo de $\sigma_y/\tau_{avg}=1,704$, para $L_0=40$ mm e, como era esperado, este apresentou os valores de pico mais baixos dos três adesivos estudados, uma vez que este é o adesivo mais flexível dos três adesivos estudados. No que diz respeito à influência do parâmetro L_0 na evolução dos picos de tensões σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, verifica-se um aumento dos mesmos devido ao aumento do efeito do momento fletor causado pelo aumento do L_0 . Registou-se um aumento praticamente proporcional dos valores de pico de σ_y/τ_{avg} entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [90]. Por outro lado, quanto maior for L_0 , maior serão os picos de compressão localizados perto das singularidades [89, 91]. Este fator impede a propagação do dano após danos localizados na extremidade de sobreposição [92]. Os perfis obtidos de tensões σ_y (presentes na **Figura 68**) apresentam alguma semelhança aos de JSS. No entanto, enquanto nas JSS os picos de tensões nas extremidades da junta são simétricos, nas juntas tubulares o mesmo não ocorre. Esta diferença dos picos de tensão de σ_y registados está relacionada com a diferença da secção transversal entre o tubo exterior e o tubo interior nas juntas tubulares, o que faz com que o tubo interior apresente maior deformação para a mesma carga transmitida.

3.2.4.2 Tensões de corte

A **Figura 69** mostra a distribuição de tensões τ_{xy} nas juntas adesivas ligadas com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em função de L_0 . A distribuição de tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares mostra uma zona central da ligação menos solicitada e picos de tensões nas extremidades de sobreposição [93, 94]. Este fenómeno está relacionado com a deformação diferencial de cada tubo ao longo da sobreposição, que é nula na sua extremidade livre e aumenta gradualmente até à extremidade oposta [95, 96]. Estes efeitos são anulados na região central de L_0 , com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta.

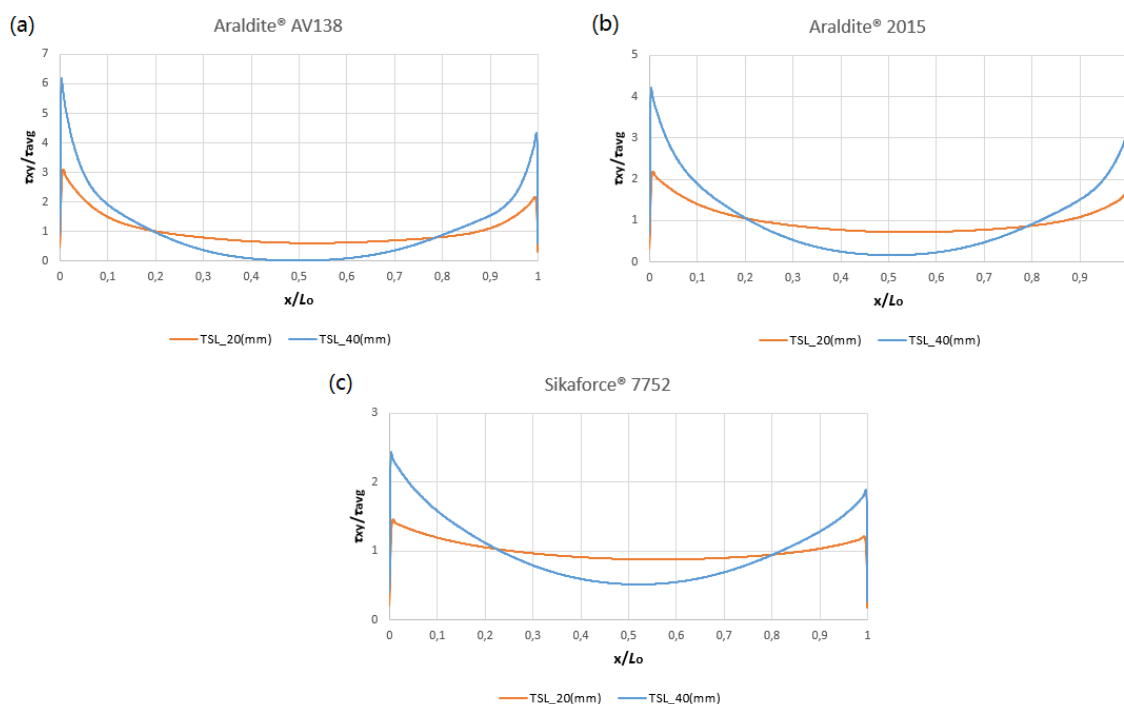


Figura 69 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) Sikaforce® 7752.

Na **Tabela 17** estão representados os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para cada junta adesiva com os três adesivos em estudo com $L_0=20$ e 40 mm.

Tabela 17 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos com $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
Araldite® AV138	3,087	6,183
Araldite® 2015	2,188	4,234
Sikaforce® 7752	1,456	2,437

O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} foi observado no adesivo Araldite® AV138 (**Tabela 17**). Como o adesivo Araldite® AV138 é o mais rígido dos três adesivos em estudo, são gerados picos de concentração de tensões τ_{xy}/τ_{avg} muito elevados nas extremidades da ligação. Este aumento de rigidez pode condicionar a resistência da junta e levar a uma degradação prematura da mesma. O segundo valor máximo registado foi o do adesivo Araldite® 2015. No entanto, como este adesivo apresenta um valor de E inferior ao do adesivo Araldite® AV138, logo os picos gerados apresentam valores inferiores. No que diz respeito ao Adesivo Sikaforce® 7752, este é o que apresenta valores mais baixos de tensões de τ_{xy}/τ_{avg} dos três adesivos em estudo, à semelhança do que acontece nas tensões σ_y/τ_{avg} . Isto acontece devido ao baixo valor de E que o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta em comparação aos outros adesivos. Por outro lado, a comparação entre os dois valores de L_0 estudados mostra que o gradiente de tensão τ_{xy} aumenta com L_0 devido ao aumento crescente das deformações longitudinais nos aderentes causados pelo aumento da área de colagem e cargas aplicadas.

No caso dos adesivos mais rígidos, a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões de σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades de sobreposição [96]. Já no que diz respeito aos adesivos mais flexíveis, estes permitem uma melhor redistribuição das tensões nas extremidades, ao mesmo tempo que a região interna de sobreposição é gradualmente colocada sob carga crescente, o que permite um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 .

3.2.5 Previsão do comportamento

No seguinte capítulo serão abordados os resultados obtidos pelo MEFX para os diferentes critérios de iniciação que foram abordados no capítulo 3.2.2. Neste estudo, considerou-se sempre $\alpha=1$ no critério de propagação de dano. Também serão abordados os efeitos da lei de propagação quanto ao expoente α da equação (12) (foram considerados valores de 0,5; 1,0; 2,0). Por último será realizada uma comparação entre os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ e energia dissipada obtidos para os três adesivos em estudo.

Como já referido, os critérios de iniciação de dano baseiam-se numa análise das tensões ou deformações. Os critérios MAXPE e MAXPS baseiam-se na utilização de um parâmetro (deformação e tensões principais máximas, respetivamente), o que não é representativo do processo de fratura das camadas de adesivos finas, devido ao efeito condicionante imposto pelos aderentes rígidos na proximidade da fenda [37]. A propagação da fenda nos critérios MAXPE e MAXPS segue uma direção ortogonal da direção de tensão/deformação principal na extremidade da fenda [97]. Na **Figura 70a** está representada a propagação da fenda resultante das simulações em ABAQUS® quando utilizados os critérios MAXPE e MAXPS. Neste tipo de situações é impossível modelar a propagação do dano, logo foi considerado que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ corresponde ao início da fenda na camada adesiva. Nos que diz respeito à simulação com os critérios de propagação de dano MAXS, QUADS, MAXE, e MAXPS, é possível obter uma

propagação da fenda paralela à camada adesiva (**Figura 70b**), visto que o *software* ABAQUS® permite escolher a direção de crescimento do dano, entre normal e paralelo.

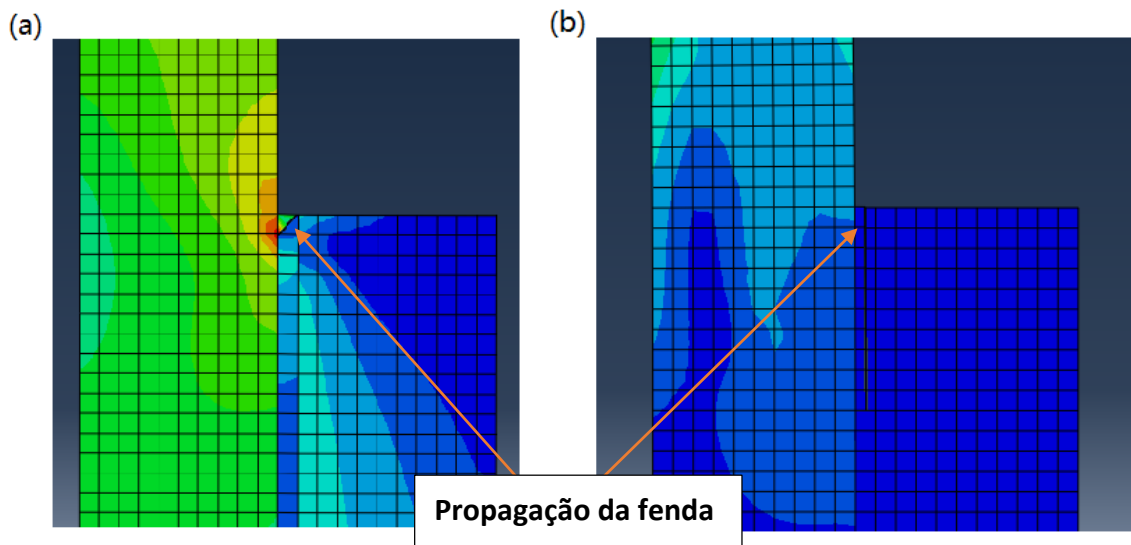


Figura 70 - Exemplo de iniciação da fenda e respetiva propagação: (a) critérios de iniciação MAXPE e MAXPS; (b) critérios de iniciação MAXS, QUADS, MAXE e QUAE.

3.2.5.1 Estudo do efeito do critério de iniciação

Neste subcapítulo são apresentados os resultados das curvas P - δ obtidas numericamente pelas simulações em ABAQUS® das juntas adesivas tubulares com os três adesivos em estudo e respetivo L_0 . Os resultados de $P_{\text{máx}}$ obtidos serão comparados com os resultados experimentais inicialmente estudados. Na **Figura 71** e **Figura 72** estão representados os resultados obtidos para os diferentes critérios de iniciação para as juntas com adesivo Araldite® AV138 com L_0 de 20 e 40 mm.

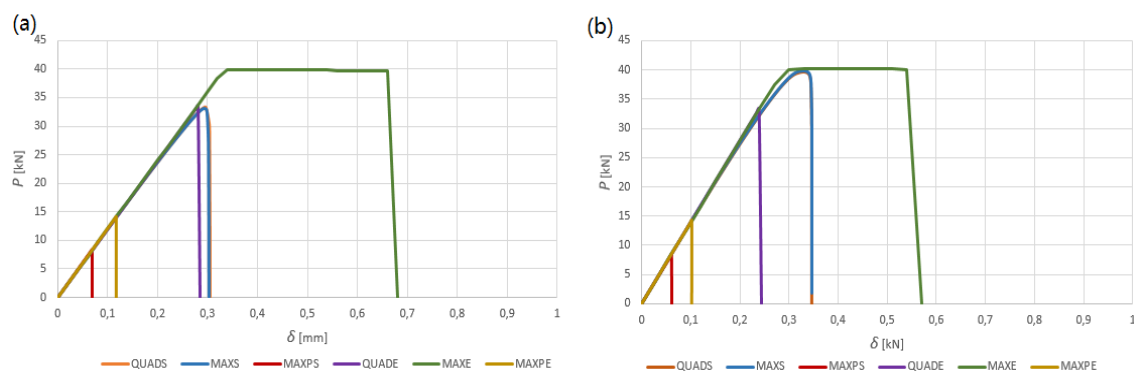


Figura 71 - Curvas P - δ dos diferentes critérios de iniciação MEFX das juntas adesivas com Araldite® AV138: (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.

Nos gráficos apresentados verifica-se que para os diferentes critérios de iniciação o QUADS e MAXS são os que mais se aproximam dos resultados obtidos experimentalmente. Nestes dois critérios foram obtidos desvios de 1,6% e 1,2%,

respetivamente, para as juntas com $L_0=20\text{mm}$, e de 5,0% e 5,1%, pela mesma ordem, para juntas com $L_0=40\text{ mm}$. Logo, verifica-se que à medida que o L_0 aumenta o desvio percentual dos critérios QUADS e MAXS também aumentam. As curvas $P-\delta$ dos critérios QUADS e MAXS encontram-se praticamente sobrepostas. O outro critério que é baseado nas tensões, à semelhança do QUADS e MAXS, é o MAXPS. Este último demonstrou ser um critério bastante desajustado, com uma variação percentual máxima de -74,7% para o $L_0=20\text{ mm}$ e de -77,9% para o $L_0=40\text{ mm}$. No que diz respeito aos resultados dos critérios de iniciação de dano baseados na deformação, verifica-se que os resultados obtidos para os critérios QUAD e MAXE com $L_0=20\text{mm}$ possuem um desvio percentual de 2,4% e 18,8%, respetivamente, mas quando $L_0=40\text{ mm}$, o desvio passa a ser de -11,7% e 6,4%. Por último, os resultados obtidos para o critério MAXPE para as juntas com adesivo Araldite® AV138 com $L_0=20$ e 40 mm resultaram num desvio de -56,7% e -62,4%, respetivamente. À semelhança do critério MAXPS, o critério MAXPE revela-se bastante desajustado para a previsão da resistência da junta adesiva com adesivo Araldite® AV138.

Na **Figura 72** estão representados graficamente os resultados de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes critérios de iniciação para as juntas tubulares com adesivo Araldite® AV138 e respetivo $L_0=20$ e 40 mm, também são apresentados graficamente a média dos resultados de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente e respetivo desvio padrão. Dos resultados obtidos verifica-se que nos critérios MAXPS, MAXPE, MAXE e QUADE, o valor $P_{\text{máx}}$ se mantém praticamente constante, mesmos quando o L_0 aumenta de 20 para 40 mm, isto demonstra que estes critérios não se encontram ajustados para a simulação de juntas adesivas com MEFX.

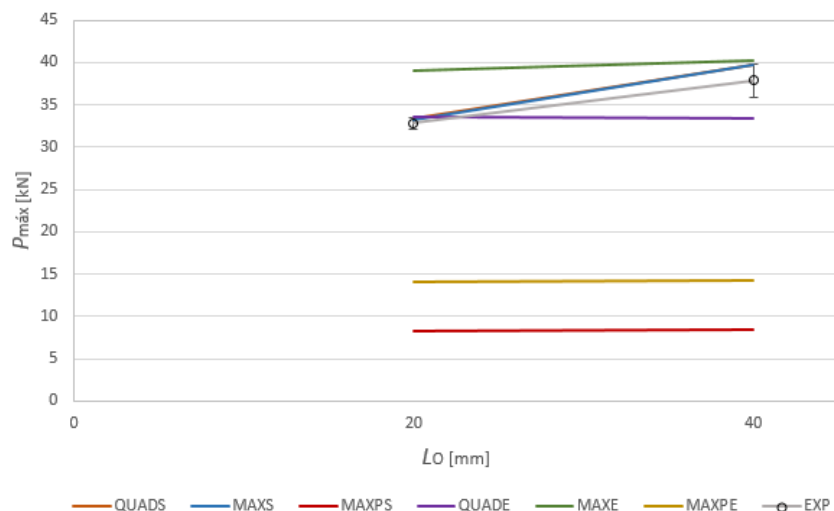


Figura 72 - Valores de $P_{\text{máx}}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano para o adesivo Araldite® AV138.

Na **Tabela 18** são apresentados de forma resumida os resultados de $P_{\text{máx}}$ obtidos para os diferentes critérios de iniciação de dano, assim como também é apresentado o desvio percentual (Desvio (%)), que corresponde ao desvio do resultado obtido para cada

critério de iniciação de dano relativamente ao resultado de $P_{\text{máx}}$ médio obtido experimentalmente das juntas tubulares.

Tabela 18 - Valores de $P_{\text{máx}}$ dos diferentes critérios de iniciação de dano e respetivo desvio percentual relativamente aos resultados obtidos experimentalmente para o adesivo Araldite® AV138.

Critério de iniciação de dano	$L_0=20\text{mm}$ [N]	$L_0=40\text{mm}$ [N]	Desvio (%)	
			$L_0=20\text{mm}$	$L_0=40\text{mm}$
QUADS	33319,1	39746,2	1,6	5,0
MAXS	33180,2	39779,6	1,2	5,1
MAXPS	8300,5	8379,1	-74,7	-77,9
QUADE	33584,7	33430,5	2,4	-11,7
MAXE	38971,3	40260,1	18,8	6,4
MAXPE	14186,5	14237,2	-56,7	-62,3

Na **Figura 73** estão representadas as curvas P - δ para os diferentes critérios de iniciação de dano obtidas através das simulações de ABAQUS® para as juntas adesivas tubulares com adesivo Araldite® 2015. À semelhança dos resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138, verifica-se que as curvas P - δ para os critérios QUADS e MAXS se encontram sobrepostas, mesmo quando o L_0 é alterado de 20 (**Figura 73a**) para 40 mm (**Figura 73b**).

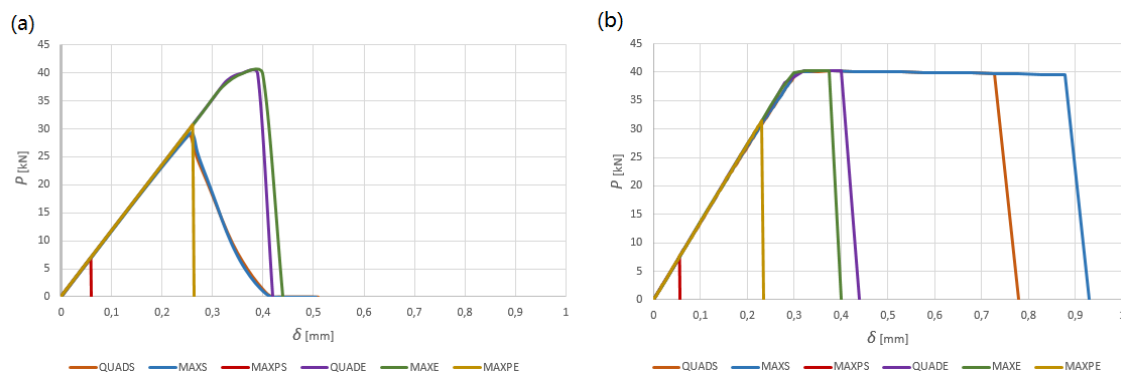


Figura 73 - Curvas P - δ dos diferentes critérios de iniciação MEFX das juntas adesivas com Araldite® 2015: (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.

Nas simulações de ABAQUS® para as juntas com $L_0=40$ mm com os critérios de iniciação QUADS e MAXS, verifica-se que existe plastificação dos aderentes (**Figura 74**). No que diz respeito às curvas P - δ dos critérios de iniciação MAXPS, QUADE, MAXE, e MAXPE, é possível observar que os valores de pico são muito aproximados em ambos os L_0 .

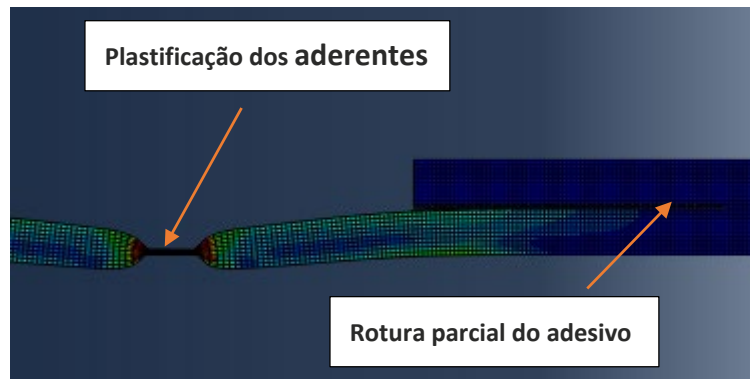


Figura 74 - Plastificação dos aderentes de liga de alumínio AW6082-T651 nas simulações de ABAQUS® dos critérios de iniciação.

Na **Figura 75** estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos para os diferentes critérios de iniciação de dano e respetivos resultados médios obtidos experimentalmente das juntas tubulares com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=20$ e 40 mm. No que diz respeito ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano, verificou-se que o critério MAXPS realiza uma previsão da resistência da junta muito abaixo dos valores obtidos nos outros critérios de iniciação. À semelhança do ocorrido nos resultados do adesivo Araldite® AV138, também se verifica que os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ dos critérios de iniciação de dano MAXPS, QUADE, MAXE, e MAXPE para o adesivo Araldite® 2015 não se alteram significativamente quando alterado o L_0 de 20 para 40 mm.

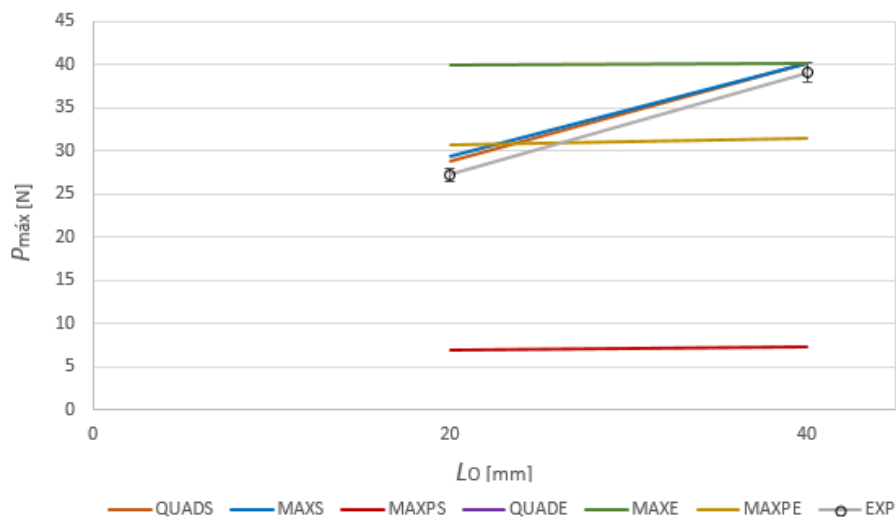


Figura 75 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano para o adesivo Araldite® 2015.

Na **Tabela 19** são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano para as juntas adesivas com adesivo Araldite 2015 e $L_0=20$ e 40 mm. Também está representado o desvio percentual dos resultados obtidos para cada critério de iniciação relativamente aos resultados de $P_{m\acute{a}x}$ médio obtidos experimentalmente. Os resultados dos critérios de iniciação QUADS e MAXS são os que

apresentam uma maior aproximação dos valores experimentais, onde os desvios percentuais para as juntas com $L_0=20$ mm foram de 6,0% e 7,8%, respetivamente. Para as juntas com $L_0=40$ mm o desvio foi de 2,8% para ambos os L_0 . No que diz respeito ao desvio dos resultados obtidos para o MAXPS relativamente aos resultados experimentais, existe uma discrepância significativa da previsão da resistência da junta por este método, onde foram obtidos desvios na ordem dos -74,5% para $L_0=20$ mm e de -81,1% para $L_0=40$ mm. Os critérios QUADE e MAXE apresentam resultados acima do expectável para as juntas com $L_0=20$ mm (46,8% e 46,7%, respetivamente), mas para $L_0=40$ mm os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são muito próximos dos resultados experimentais. Isto se deve ao facto que as simulações das juntas tubulares com adesivo Araldite® 2015 com $L_0=40$ mm atingem a plastificação dos aderentes, logo a junta atinge o seu $P_{m\acute{a}x}$ sem que o adesivo fracture definitivamente. Os resultados do critério de iniciação MAXPE para as juntas com $L_0=20$ mm e 40 mm apresentam desvios inferiores (12,7% e -19,3%, respetivamente) quando comparados com os desvios dos resultados obtido para o adesivo Araldite® AV138. Esta variação da previsão da resistência relativamente aos resultados experimentais está relacionada com as propriedades mecânicas e de fratura do próprio adesivo.

Tabela 19 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos diferentes critérios de iniciação de dano e respetivo desvio percentual relativamente aos resultados obtidos experimentalmente para o adesivo Araldite® 2015.

Critério de iniciação de dano	$L_0=20$ mm [N]	$L_0=40$ mm [N]	Desvio (%)	
			$L_0=20$ mm	$L_0=40$ mm
QUADS	28880,0	40160,4	6,0	2,8
MAXS	29357,2	40166,6	7,8	2,8
MAXPS	6954,3	7385,3	-74,5	-81,1
QUADE	39972,9	40248,6	46,8	3,0
MAXE	39967,9	40250,5	46,7	3,0
MAXPE	30686,2	31521,0	12,7	-19,3

Na **Figura 76** são apresentadas as curvas P - δ para os diferentes critérios de iniciação estudados para as juntas adesivas tubulares com o adesivo Sikaforce® 7752. Como já foi constatado nas análises realizadas para os outros dois adesivos, verifica-se que existe um padrão de semelhança quando são comparados os resultados dos diferentes critérios de iniciação de danos. Relativamente às curvas P - δ dos critérios QUADS e MAXS, estas encontram-se sobrepostas em ambos os L_0 estudos (20 e 40 mm). Na curva do critério MAXPS, o comportamento também é semelhante aos resultados obtidos nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, visto que este critério utiliza um parâmetro

de tensões principais máximas para prever a resistência da junta. A curva para o critério QUADE com $L_0 = 20$ mm tem um pico máximo muito superior ao do adesivo Araldite® AV138 e acima dos resultados obtido no adesivo Araldite® 2015, o que está relacionado com a flexibilidade que o adesivo Sikaforce 7752® apresenta em relação aos outros dois adesivos. Por último, as curvas P - δ para os critérios de iniciação de dano MAXE e MAXPE apresentam valores de pico muito acima dos indicados no critério de dano QUADS e MAXS em ambos os L_0 estudados.

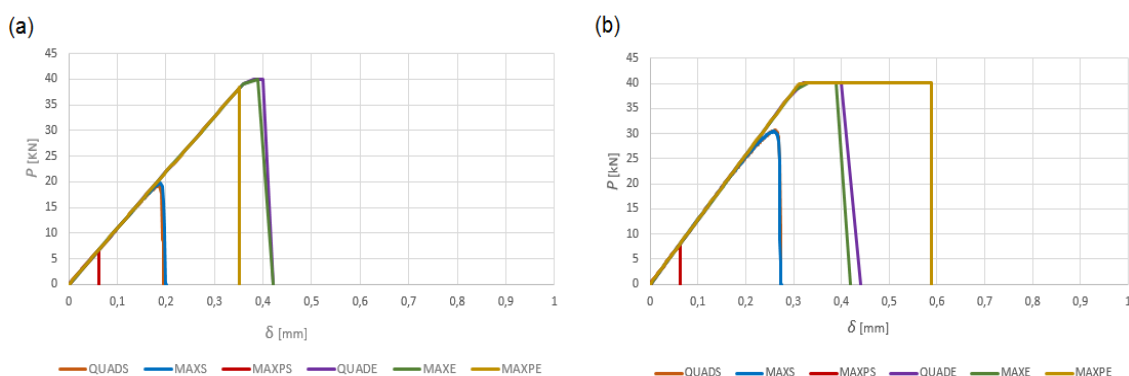


Figura 76 - Curvas P - δ dos diferentes critérios de iniciação MEFX das juntas adesivas com Sikaforce® 7752: (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.

Na **Figura 77** são apresentados os valores de $P_{\text{máx}}$ para cada critério de iniciação estudados com $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm, assim como também estão representados os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente e respetivo desvio padrão. Verifica-se um comportamento semelhante aos obtidos nos outros adesivos estudados anteriormente (Araldite® AV138 e Araldite® 2015). No que diz respeito ao comportamento da junta quando o L_0 altera de 20 para 40 mm, verifica-se que não existe uma variação significativa, como acontece nas juntas testadas experimentalmente. Esta variação só é significativa em adesivos flexíveis como é o caso dos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. No gráfico de $P_{\text{máx}}$, verifica-se que os critérios de iniciação de dano QUADE, MAXE e MAXPE realizam uma previsão da resistência da junta acima dos resultados obtidos experimentalmente em ambos os L_0 estudados. No caso do critério MAXPS a previsão fica muito abaixo do expectável. Isto revela o quão desajustados os critérios de iniciação de dano MAXPS, QUADE, MAXE e MAXPE se encontram para prever a resistência de uma junta adesiva.

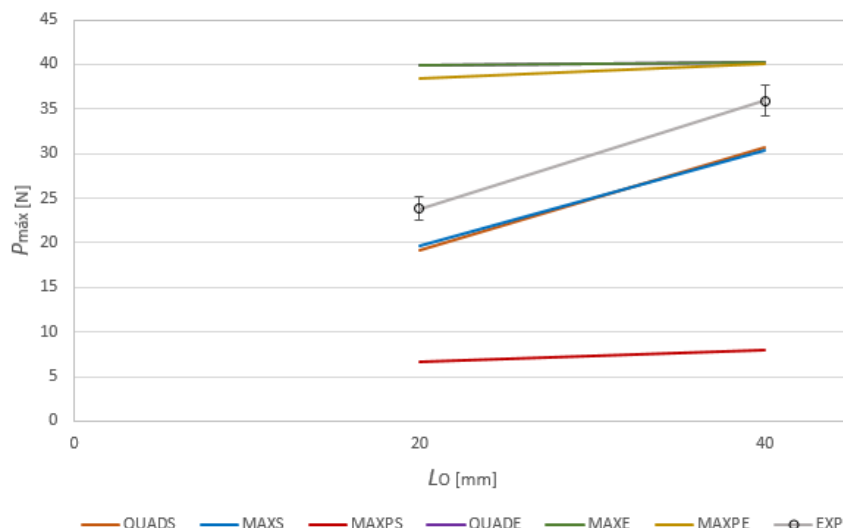


Figura 77 - Valores de $P_{máx}$ para os diferentes critérios de iniciação de dano para o adesivo Sikaforce 7752.

Na **Tabela 20** são apresentados os resultados dos diferentes critérios de iniciação de dano estudados para os diferentes L_0 em estudo. Também são apresentados os desvios percentuais de cada critério em relação aos resultados experimentais para as juntas adesivas com adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 20 - Valores de $P_{máx}$ dos diferentes critérios de iniciação de dano e respetivo desvio percentual relativamente aos resultados obtidos experimentalmente para o adesivo Sikaforce® 7752.

Critério de iniciação de dano	$L_0=20\text{mm}$ [N]	$L_0=40\text{mm}$ [N]	Desvio (%)	
			$L_0=20\text{mm}$	$L_0=40\text{mm}$
QUADS	19247,4	30608,6	-19,3	-14,8
MAXS	19726,9	30377,6	-17,3	-15,5
MAXPS	6677,0	7994,4	-72,0	-77,8
QUADE	39979,4	40211,3	67,6	11,9
MAXE	39976,5	40215,0	67,6	11,9
MAXPE	38355,9	40029,9	60,8	11,4

O maior desvio apresentado é referente os resultados obtidos pelo critério MAXPS (-72,0% e 77,8%) para as juntas com $L_0=20$ e 40 mm, respetivamente. Os resultados obtidos para os critérios QUADE, MAXE, e MAXPE têm um padrão semelhante aos resultados obtido para o adesivo Araldite® 2015, onde na junta com $L_0=20$ mm, os resultados obtidos são muito superiores aos resultados experimentais (66,6%, 67,6% e 60,7%, respetivamente). Quando analisados os resultados para $L_0=40$ mm, verifica-se

uma maior aproximação entre os resultados experimentais e os resultados dos respectivos critérios de propagação. Este fenómeno ocorre devido à plastificação dos aderentes sem ocorrer rotura total da camada adesiva.

3.2.5.2 Estudo do efeito da lei de propagação

No seguinte subcapítulo será abordado o efeito da lei de propagação triangular e exponencial para as diferentes juntas tubulares com respetivos adesivos em estudo e diferentes L_0 (20 e 40 mm). Para realizar esta análise foram considerados três critérios energéticos de *power law* (0,5; 1; 2) em ambas as leis de propagação (lei triangular e lei exponencial). Para efeito de análise foi utilizado o critério de propagação de dano QUADS visto que, pelos estudos anteriores, este apresenta resultados mais próximos dos experimentais.

Na **Figura 78** estão representados graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ da lei de propagação triangular com diferentes critérios energéticos (0,5; 1,0; 2,0) para os diferentes adesivos em estudo, também esta representado graficamente os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e respetivo desvio padrão.

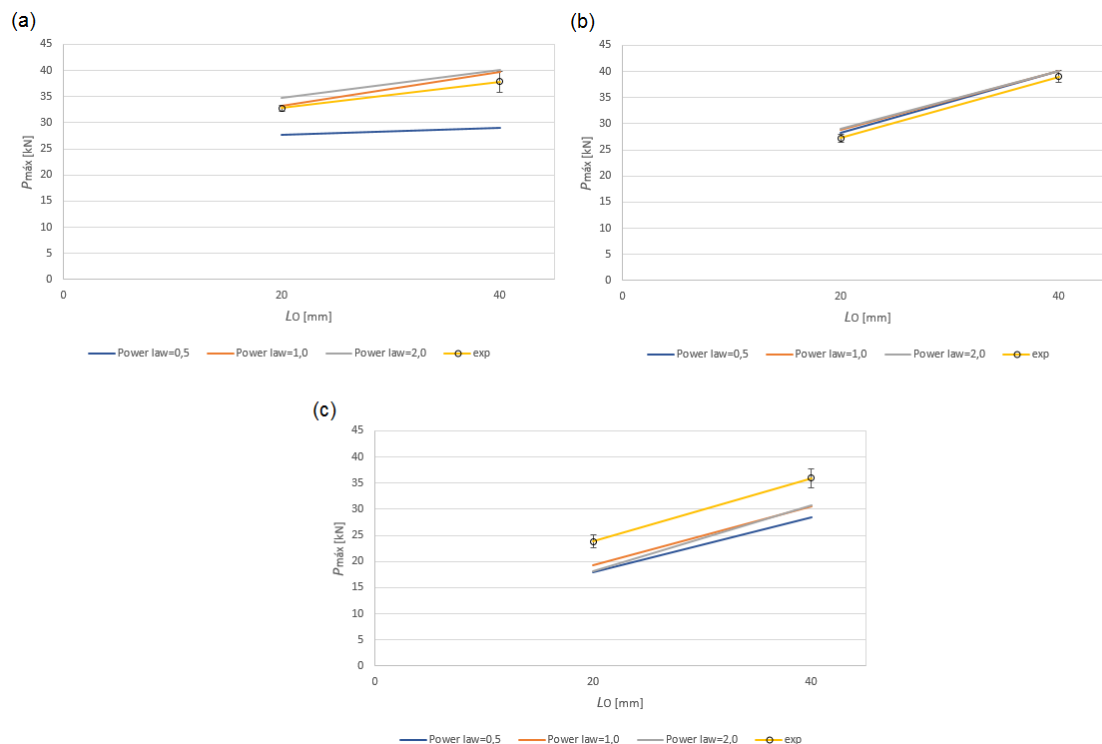


Figura 78 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ da lei de propagação triangular com diferentes valores de *power law* para juntas adesivas tubulares com $L_0=20$ e 40 mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.

Nos resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138 (**Figura 78a**), verifica-se que quando o parâmetro energético assume o valor de 1 os resultados obtidos são mais próximos dos resultados obtidos experimentalmente, onde a diferença obtida foi de

1,6% para um $L_0=20$ mm e de 5,0% para um $L_0=40$ mm em relação aos resultados experimentais. Quando o parâmetro assume o valor de 0,5 as diferenças obtidas são de -15,8% e -23,4% para juntas com $L_0=20$ e 40 mm, respectivamente. Isto acontece porque, quando o envelope de fratura assume o valor de 0,5, a rotura na junta ocorre prematuramente, visto que esta acontece com valores de G_{IC} e G_{IIC} mais baixos. Para o parâmetro de 2 verifica-se o comportamento oposto, onde os desvios de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos para as juntas com adesivo Araldite® AV138 e $L_0=20$ e 40 mm foram de 5,8% e 6,0%, respectivamente. Isto acontece porque, neste caso, os valores de G_{IC} e G_{IIC} na linha do envelope de fratura assumem valores superiores. No caso do Adesivo Araldite® 2015 (**Figura 78b**), verifica-se que, para o parâmetro de 1, os resultados obtidos têm um desvio de 6,0% para juntas com $L_0=20$ mm e de 2,8% para juntas com $L_0=40$ mm, relativamente aos resultados experimentais. Para um parâmetro de 0,5 o desvio máximo foi de 3,61% ($L_0=20$ mm) e 2,76% ($L_0=40$ mm). Quando o parâmetro é igual a 2 o desvio máximo é de 6,7% ($L_0=20$ mm) e 2,8% ($L_0=40$ mm). Com estes resultados, verifica-se que, para adesivos mais flexíveis como é o caso do adesivo Araldite® 2015, o valor do parâmetro energético não influencia na previsão da resistência da junta. Por último, os resultados obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752 (**Figura 78c**) mostram desvios superiores aos verificados para o adesivo Araldite® 2015. Quando o parâmetro assume o valor de 1,0, o desvio é de -19,3% para o $L_0=20$ mm e de -14,8% para o $L_0=40$ mm. No caso do parâmetro igual a 0,5, o desvio é de -24,86% ($L_0=20$ mm) e de -20,7% ($L_0=40$ mm). Quando o parâmetro é igual a 2, ocorre o inverso do que acontece no adesivo Araldite® 2015, isto é, o desvio é superior ao apresentado no parâmetro igual a 1 (para $L_0=20$ mm o desvio é de -23,7% e para $L_0=40$ mm o desvio registado é de -14,5%). No caso do adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se que a previsão de resistência da junta obtida pelo MEFX apresenta valores bastante inferiores aos resultados obtidos experimentalmente [83], uma vez que se trata de um adesivo muito dúctil, e as leis triangulares sobrestimaram os resultados experimentais. Por esta razão, os resultados experimentais ($P_{m\acute{a}x}$) são maiores que os numéricos.

Na análise dos resultados de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos para os diferentes valores do parâmetro energético (0,5;1; 2) para a lei de propagação triangular, observa-se que para adesivos mais frágeis o parâmetro energético influencia o valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido. Por outro lado, quando o adesivo é mais flexível, como é o caso do adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, o parâmetro do critério energético de propagação de dano tem uma influência pouco significativa no comportamento da junta adesiva.

A **Figura 79** apresenta os valores de $P_{m\acute{a}x}$ da lei de propagação exponencial com diferentes valores do parâmetro energético (0,5; 1; 2) para as juntas tubulares com os diferentes adesivos em estudo e diferentes L_0 (20 e 40 mm). Para validação de resultados, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos serão comparados com os resultados experimentais.

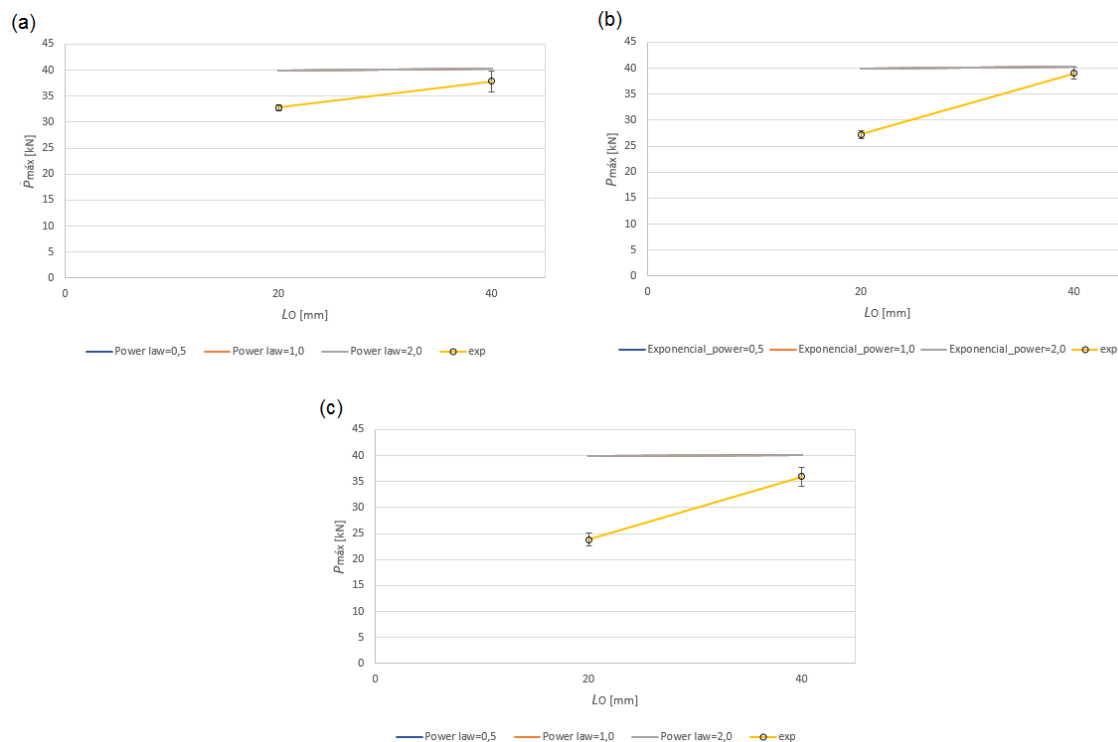


Figura 79 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ da lei de propagação exponencial com diferentes valores de *Power law* para juntas adesivas tubulares com $L_0=20$ e 40 mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.

Nos gráficos apresentados na **Figura 79** é possível verificar que a lei de propagação exponencial sobrestima de forma significativa os valores de $P_{m\acute{a}x}$, para os três adesivos estudados. A variação do parâmetro energético (0,5; 1; 2) pouco influencia na variação dos resultados, já que o valor de pico de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos foi muito próximo dos 40 kN. Pelas simulações de ABAQUS® verifica-se que em todas as juntas simuladas com os diferentes parâmetros energéticos, para os três adesivos em estudo e diferentes L_0 (20 e 40 mm), ocorre plastificação nos aderentes sem ocorrer rotura total do adesivo. O desvio entre os resultados experimentais e numéricos para o adesivo Araldite® AV138 (**Figura 79a**) foi de 21,9% para o $L_0=20$ mm e de 6,4% para o $L_0=40$ mm (gráfico amarelo). No caso do Araldite® 2015 (**Figura 79b**), os desvios foram de 46,8% e de 3,0% para $L_0=20$ e 40 mm, respetivamente. Os resultados obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752 (**Figura 79c**) com os diferentes parâmetros energéticos e diferentes L_0 resultaram num desvio de 67,6% para $L_0=20$ mm e de 11,9% para $L_0=40$ mm. O adesivo Araldite AV138 apresenta um desvio percentual inferior aos restantes dois adesivos nas juntas com $L_0=20$ mm. Isto acontece porque os adesivos frágeis (Araldite® AV138) registam melhor comportamento em L_0 pequenos do que os adesivos dúcteis (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752).

3.2.5.3 Estudo da energia dissipada

Nesto subcapítulo será apresentado o estudo da dissipação de energia registadas nas juntas adesivas tubulares com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 com $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm. Os valores da energia dissipada foram obtidos através das curvas $P-\delta$ obtidas numericamente pelo *software* ABAQUS®. O critério de iniciação de dano utilizado para este estudo foi o QUADS com uma lei de propagação triangular e parâmetro energético igual a 1. Este critério foi seleccionado devido à melhor aproximação registada relativamente aos resultados experimentais mostrados anteriormente.

A energia dissipada (E_{diss}), conforme dito anteriormente, é obtida através das curvas $P-\delta$ de cada junta tubular para cada adesivo em estudo com o respetivo L_0 . Para isso foi calculada a área de cada curva $P-\delta$ para cada junta adesiva com a ajuda do *software* Microsoft® Excel. A E_{diss} é obtida de forma aproximada, visto que a curva $P-\delta$ é subdividida em pequenos retângulos, onde E_{diss} é dada pela seguinte equação:

$$E_{diss} = \sum_{i=1}^n ((\delta_i - \delta_{i-1}) \times P_i), \quad (13)$$

onde $(\delta_i - \delta_{i-1})$ corresponde à largura do retângulo e se encontra localizado no eixo horizontal e P_i corresponde ao comprimento do mesmo e está localizado no eixo vertical. Na **Figura 80** está representado de forma simplificada o método utilizado para o cálculo da E_{diss} .

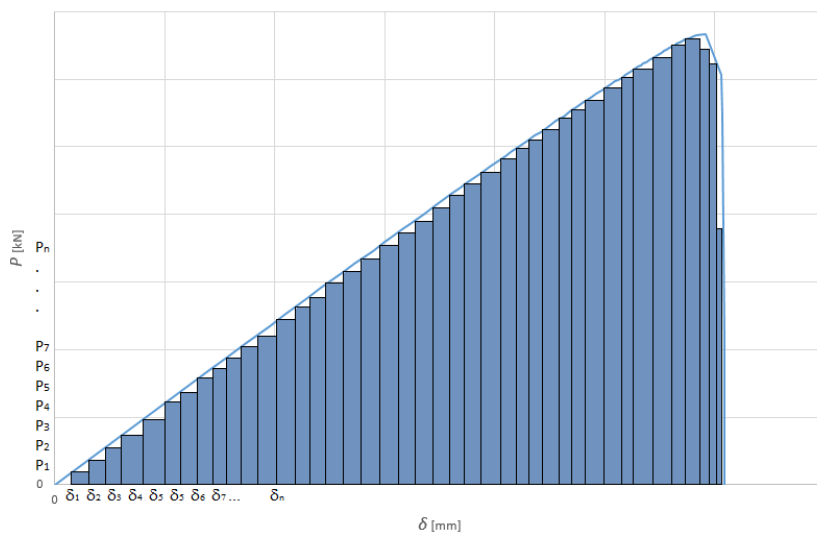


Figura 80 - Representação simplificada de cálculo do E_{diss} .

Na **Figura 81** estão representados graficamente os resultados obtidos da energia máxima dissipada pelas juntas adesivas com os três adesivos em estudo e com $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm. Na análise dos resultados obtidos, verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que regista valores mais elevados de E_{diss} para as juntas com $L_0=20$ mm

(4367,32 Nmm). Logo, as juntas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=20$ mm são as que possuem maior capacidade de absorver maior quantidade de energia relativamente aos outros dois adesivos em estudo. O adesivo que apresenta o segundo valor mais elevado de E_{diss} para $L_0=20$ mm é o Araldite® 2015 (3806,2 Nmm). Por último, o adesivo que apresentou valores mais baixo de E_{diss} para juntas com $L_0=20$ mm foi o Sikaforce® 7752 (1551,2 Nmm). No que diz respeito à análise da E_{diss} para juntas com $L_0=40$ mm, verifica-se que o valor de E_{diss} mais elevado foi o do adesivo Araldite® 2015 (10917,6 Nmm). É de salientar que este resultado foi baseado em simplificações de modo a ser possível a comparação gráfica entre os três adesivos visto que, na análise numérica de MEF, a junta adesiva com adesivo Araldite® 2015 cede pelo aderente sem ocorrer rotura total da camada adesiva, o que resulta num maior deslocamento da junta e consequentemente um valor mais elevado de E_{diss} . Neste caso, com $L_0=40$ mm, o adesivo Araldite® AV138 apresenta resultados mais baixos quando comparados com o adesivo Araldite® 2015 (7170,2 Nmm). O resultado apresentado para o Araldite® AV138 com $L_0=40$ mm não sofreu nenhum tipo de simplificação visto que, na análise de MEF, a junta com adesivo Araldite AV138 e $L_0=40$ mm apresenta fratura total na camada adesiva. Por último, o resultado obtido para o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=40$ mm foi de 4208,2 Nmm. Este adesivo é o que apresenta os valores mais baixo nas duas situações analisadas ($L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm). Neste caso as simulações de MEF apresentam uma rotura total da camada adesiva.

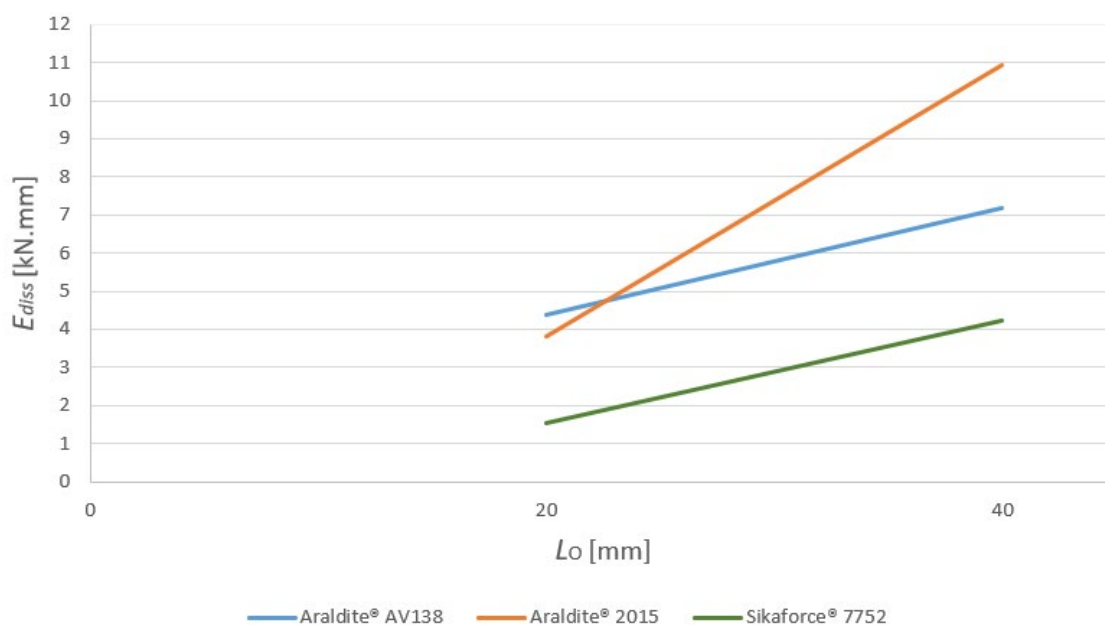


Figura 81 - Resultados de E_{diss} para as juntas tubulares com os três adesivos em estudo com L_0 de 20 e 40 mm.

Da análise da **Figura 81** e dos resultados apresentados anteriormente, conclui-se que os adesivos frágeis e resistentes (Araldite® AV138) com L_0 pequenos são os adesivos com maior capacidade de absorver energia, o que se traduz numa maior capacidade de suportar solicitações mais elevadas, quando comparados com adesivos mais dúcteis

(Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) para o mesmo L_0 . Para L_0 maiores, os adesivos que apresentam melhores resultados são os adesivos com uma resistência e ductilidade média (Araldite® 2015). No caso de adesivos muito dúcteis, mas pouco resistentes (Sikaforce® 7752), estes apresentam uma baixa capacidade de absorção de energia, logo uma baixa capacidade de suportar solicitações elevadas.

3.2.5.4 Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo

Neste subcapítulo é feita a comparação entre os resultados obtidos nas previsões numéricas por MDC para as juntas adesivas tubulares do trabalho realizados por Ferreira [1] e o estudo numérico de MEFX abordado neste trabalho. Esta análise será realizada tendo em consideração o comportamento das juntas adesivas com os três adesivos em estudo para $L_0=20$ e 40 mm. Será feita uma comparação entre as diferentes curvas $P-\delta$ obtidas em ambos os estudos assim como também serão analisados os $P_{m\acute{a}x}$ obtidos e o deslocamento que cada junta com respetivo adesivo apresentam após simulação. No que diz respeito à iniciação de dano em ambos os casos, esta inicia sempre na extremidade de sobreposição no tubo interior e propaga-se para o interior da camada adesiva. Relativamente ao estudo por MEFX, o critério de iniciação de dano escolhido para efetuar a comparação com os resultados obtidos por MDC foi o QUADS, visto que este apresenta resultados mais próximos dos experimentais.

Na **Figura 82** são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas nos estudos numéricos MDC e MEFX para as juntas adesivas com os três adesivos estudados anteriormente e com $L_0=20$ mm. Verifica-se que as curvas $P-\delta$ obtidas para o adesivo Araldite® AV138 (**Figura 82a**) apresentam uma boa aproximação entre o estudo numérico MDC e o estudo MEFX, visto que as duas curvas estão quase sobrepostas e apresentam praticamente o mesmo deslocamento até à rotura da camada adesiva. No que diz respeito ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido para as juntas com Araldite® AV138, este foi de 33568 N para a análise por MDC e de 33319 N para a análise por MEFX. Isto revela que, em ambos os estudos, o comportamento do adesivo apresenta uma aproximação bastante elevada para a previsão da resistência. No que diz respeito aos resultados obtidos para o adesivo Araldite® 2015 (**Figura 82b**), estes apresentam algumas diferenças no comportamento do adesivo. Na curva $P-\delta$ verifica-se que o declive da reta até o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é diferente em ambos os estudos, ao contrário do que acontece no adesivo Araldite® AV138. O valor de $P_{m\acute{a}x}$ obtido foi de 28897 N para o MDC e 28880 N para o MEFX. Apesar dos resultados apresentarem uma boa aproximação, a rotura da camada adesiva acontece em primeiro lugar no método numérico MDC. Por último, as curvas $P-\delta$ obtidas para o adesivo Sikaforce® 7752 (**Figura 82c**) apresentam o mesmo comportamento do que o obtido no adesivo Araldite® 2015, onde se verifica que a curva $P-\delta$ obtida por MEFX apresenta um declive mais significativo do que a curva obtida por MDC. Os resultados obtidos para $P_{m\acute{a}x}$ na previsão por MDC e MEFX foi de 19455 N e 19247 N, respetivamente. Relativamente ao deslocamento até a rutura, o MEFX apresenta um deslocamento

inferior do que o MDC. Logo, na análise de MEFX a junta adesiva fratura primeiro do que na análise de MDC.

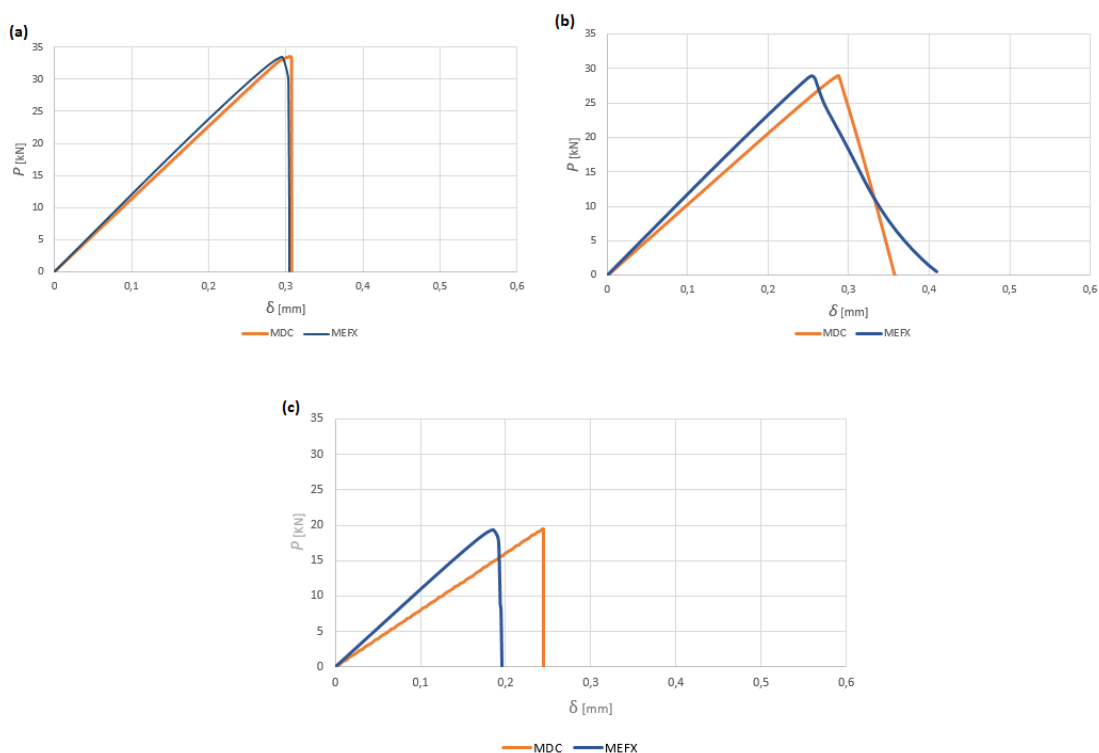


Figura 82 - Comparação das curvas P - δ para $L_0=20$ mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.

Na **Tabela 21** são apresentados os resultados obtidos nos métodos numéricos MDC e MEFX para as juntas tubulares para os três adesivos em estudo e $L_0=20$ mm. Também é apresentado o desvio percentual do método MEFX relativamente ao método MDC.

Tabela 21 – Resultados de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas tubulares com os três adesivos em estudo e $L_0=20$ mm.

Adesivo	MDC	MEFX	Desvio [%]
	$L_0=20$ mm [N]	$L_0=20$ mm [N]	
Araldite® AV138	33568	33319	0,74
Araldite® 2015	28897	28880	-0,06
Sikaforce® 7752	19455	19247	-1,07

Na **Figura 83** estão representadas as curvas P - δ obtidas do estudo numérico MDC e MEFX para as juntas com os três adesivos em estudo e $L_0=40$ mm. À semelhança do que ocorre para $L_0=20$ mm, as curvas apresentam um comportamento idêntico para os dois

L_0 . No caso do adesivo Araldite® AV138 (**Figura 83a**), a aproximação entre as duas curvas P - δ é bastante elevada até à rotura. Os resultados obtidos para $P_{m\acute{a}x}$ foram de aproximadamente 39631 N para o MDC e 39746 N para o MEFX. No caso do adesivo Araldite® 2015 (**Figura 83b**), verificou-se na curva P - δ que, para as duas técnicas (MDC e MEFX), as juntas adesivas cederam pelo aderente sem fratura total da camada adesiva. Os valores registados de $P_{m\acute{a}x}$ para o MDC e MEFX, para as juntas com adesivo Araldite® 2015 e $L_0=40$ mm, foram de aproximadamente 40210 N e 40160 N, respetivamente. Por último, para o adesivo Sikaforce® 7752, as curvas P - δ de ambos os estudos numéricos apresentam um desfasamento semelhante ao registado anteriormente para o mesmo adesivo com $L_0=20$ mm. Verifica-se que o deslocamento da junta de MEFX é inferior ao da junta estudada por MDC. Os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos nos dois métodos em estudo foram de aproximadamente 30779 N para o MDC e de 30608 N para o MEFX.

Desta forma conclui-se que, para adesivos frágeis, o método MEFX tem uma previsão bastante aproximada ao método MDC quando se refere ao comportamento da junta até à rotura. No caso da previsão da resistência da junta para adesivos dúcteis, o método MEFX subestima o valor de δ até a rotura. No entanto, em ambos os estudos numéricos, os resultados obtidos de $P_{m\acute{a}x}$ foram muito próximos para os três adesivos, onde o desvio máximo percentual foi de aproximadamente 1% e foi registado no adesivo Sikaforce® 7752 com $L_0=20$ mm.

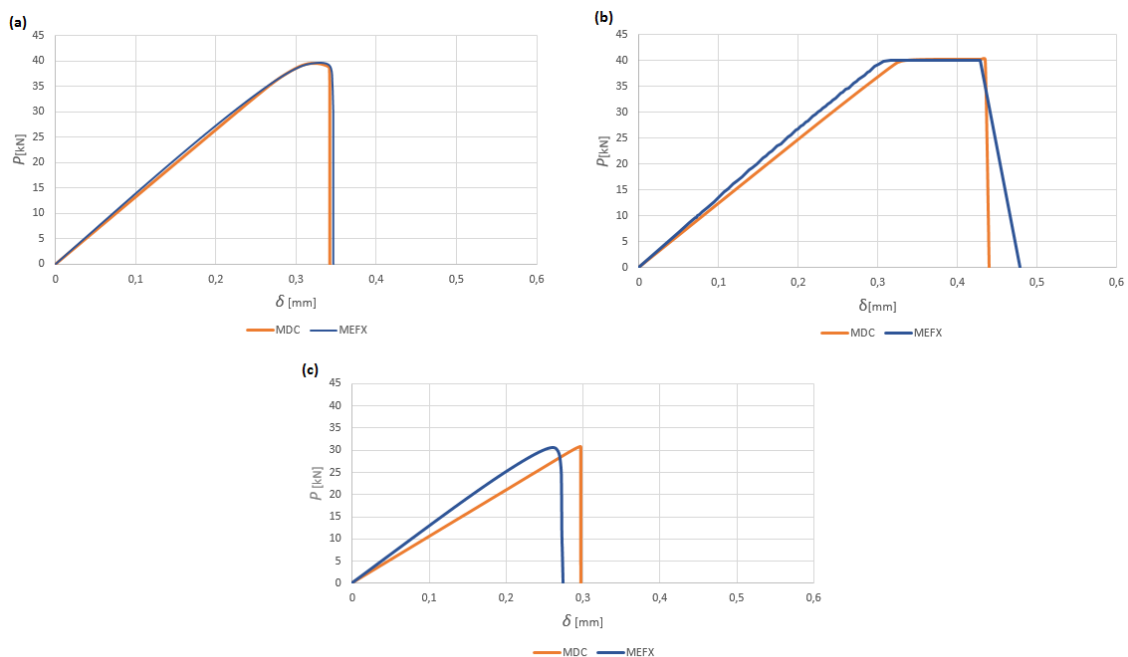


Figura 83 - Comparação das curvas P - δ para $L_0=40$ mm: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752.

Na **Tabela 21** são apresentados os resultados obtidos nos métodos numéricos MDC e MEFX para as juntas tubulares para os três adesivos em estudo e $L_0=40$ mm. Também é apresentado o desvio percentual do método MEFX relativamente ao método MDC.

Tabela 22 - Resultados de $P_{\text{máx}}$ e respetivo desvio percentual entre os métodos MDC e MEFX para as juntas tubulares com os três adesivos em estudo e $L_0=40$ mm.

Adesivo	MDC $L_0=40$ mm [N]	MEFX $L_0=40$ mm [N]	Desvio [%]
Araldite® AV138	39631	39747	0,29
Araldite® 2015	40210	40160	-0,12
Sikaforce® 7752	30779	30609	-0,55

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Nas juntas adesivas é de extrema importância conhecer e validar o comportamento e propriedades dos adesivos estruturais em diferentes configurações de juntas, para que desta forma seja realizada uma seleção correta do adesivo. A dissertação apresentada teve como objetivo o estudo numérico pelo MEFX da previsão de resistência de juntas adesivas tubulares de sobreposição simples com aderentes em liga de alumínio de alta resistência, considerando diferentes L_0 (20 e 40 mm) e adesivos com diferentes características de resistência e ductilidade. O estudo numérico incidiu na análise das distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} presentes na camada adesiva, no estudo do efeito do critério de iniciação, no efeito da lei de propagação triangular e exponencial com diferentes valores de α e no estudo da energia dissipada pela junta até a rotura. Para validar e verificar a adequação do MEFX para prever a resistência das juntas tubulares, os resultados obtidos nas diferentes etapas de estudo foram validados posteriormente com resultados experimentais e numéricos por MDC obtidos no trabalho de Ferreira [1].

Na análise da distribuição das tensões σ_y e τ_{xy} verificam-se picos de tensão nas extremidades de sobreposição, enquanto na zona central as tensões σ_y e τ_{xy} são aproximadamente nulas. O adesivo que registou picos mais elevados de tensão σ_y e tensões de τ_{xy} foi o adesivo Araldite® AV138. Este resultado está relacionado com a rigidez que este adesivo apresenta relativamente aos outros adesivos em estudo (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752). No que diz respeito à influência do parâmetro L_0 na evolução dos picos de tensão σ_y e τ_{xy} , conclui-se que quanto maior o L_0 maior é o gradiente de tensões, devido ao aumento do efeito do momento fletor. Por outro lado, quanto maior o L_0 , maiores são os picos de compressão localizados perto das singularidades. De forma geral, para adesivos mais rígidos, a resistência da junta é afetada pelo facto das tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades de sobreposição. Já no que diz respeito a adesivos flexíveis, estes permitem uma melhor redistribuição das tensões nas extremidades, ao mesmo tempo que a região interna de sobreposição é gradualmente colocada sob carga crescente, o que permite um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 .

O estudo do efeito do critério de iniciação de dano revelou que os critérios mais adequados para a previsão de resistência pelo MEFX foram o QUADS e MAXS, visto que os resultados obtidos eram os mais próximos dos resultados experimentais nos três adesivos em estudo. Conclui-se que o MEFX com critérios de iniciação QUADS e MAXS torna possível prever com elevada precisão a resistência da junta para adesivos rígidos (Araldite® AV138) e com ductilidade moderada como é o caso do adesivo Araldite®

2015. Quando se trata de adesivos extremamente flexíveis (Sikaforce® 7752), o MEFX com critérios de iniciação QUADS e MAXS faz uma previsão de resistência da junta adesiva abaixo do expectável, mas aceitável. O critério MAXPS subestima de forma desajustada a previsão de resistência da junta adesiva. No que diz respeito aos critérios QUADE, MAXE e MAXPE, estes demonstraram desvios significativamente diferentes consoante o tipo de adesivo em estudo. Quanto à influência do parâmetro L_0 na previsão de resistência para os critérios MAXPS, QUADE, MAXE e MAXPE, verifica-se que o valor de $P_{máx}$ sofre alterações pouco significativas quando o L_0 é alterado de 20 para 40 mm.

No estudo da lei de propagação de dano, verifica-se que a lei de propagação triangular revela-se bastante precisa para a previsão da resistência das juntas adesivas quando comparada com a lei exponencial. A variação do parâmetro energético α (0,5; 1 e 2) na lei de propagação triangular influencia a previsão de resistência, enquanto na lei exponencial a variação do parâmetro α é irrelevante.

No estudo da E_{diss} , conclui-se que os adesivos frágeis (Araldite® AV138) com L_0 pequenos (20 mm) são os que apresentam maior capacidade para absorver maior quantidade de energia comparativamente com os outros adesivos em estudo (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) para o mesmo L_0 . Para L_0 maiores (40 mm), os adesivos com resistência e ductilidade média (Araldite® 2015) apresentam capacidade de absorver energia muito acima dos adesivos frágeis. No caso dos adesivos extremamente flexíveis e dúcteis (Sikaforce® 7752), e independentemente de L_0 , a capacidade de absorção de energia é significativamente baixa, o que se traduz numa baixa capacidade de suportar solicitações elevadas.

Na comparação de resultados entre o MEFX e o MDC, verificou-se que a previsão por MEFX apresenta resultados bastante aproximados nas curvas P - δ e valores de $P_{máx}$ quando se trata de adesivos rígidos e frágeis como é o caso do Araldite® AV138, e neste caso as curvas P - δ ficam praticamente sobrepostas. Quanto ao comportamento dos adesivos dúcteis e flexíveis (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752), verifica-se que o valor de $P_{máx}$ também apresenta uma boa aproximação. No entanto, o valor de δ até à rotura difere consoante o tipo de adesivo. No caso do adesivo Araldite® 2015, o δ até à rotura é superior no MEFX e, no adesivo Sikaforce® 7752, o δ até à rotura é inferior no MEFX. Observa-se que para $L_0=40$ mm, o comportamento relativo entre o MEFX e o MDC é semelhante.

Como sugestões de trabalhos futuros apresentam-se as seguintes:

- Estudo das juntas tubulares sujeitas a solicitações dinâmicas;
- Estudo das juntas tubulares com aderentes com maior σ_y ;
- Estudo de alterações geométricas, como por exemplo utilização de chanfro e filete de adesivo;
- Estudo de esforços combinados (tração + torção).

REFERÊNCIAS

5 REFERÊNCIAS

1. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Tese de Mestrado de Engenharia Mecânica. Instituto Superior Engenharia do Porto: Porto.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S.T. De Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007: Publindustria.
3. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005: Elsevier.
4. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
5. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2007: McGraw-Hill Education.
6. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 1. 2005: Elsevier.
7. *Araldite - Reliable and comprehensive bonding solutions*. 2014, Huntsman Corporation: Basel, Suíça.
8. Sikaforce. *SIKA MARINE APPLICATION GUIDE*. 2013; Available from: https://www.sika.com/en/solutions_products/industry-markets/marine-market/download/marine-application-guide.html.
9. Pizzi, A. and K.L. Mittal, *Handbook of adhesive technology*. 2017: CRC press.
10. Soltráfego, *Passadeiras seguras*. 2011.
11. Henkel. *Technologies and application-footwear solutions*. 2018; Available from: <http://gbccorporationbd.com/Footwear&Leather.html>.
12. HUNTSMAN, *Adhesives technology - User guide*. 2014.
13. Henkel, *Designing with Adhesives*. 2015.
14. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.
15. Goland, M. and E. Reissner, *J. of Applied Mechanics*. Trans ASME, 1944. **66**: p. A17-27.
16. Hart-Smith, L. and A.-B.D.-L. Joints, *NASA contract report*. NASA CR-112236, 1973.
17. Hart-Smith, L., *NASA contract report 1973*. NASA CR-112235.
18. Da Silva, L.F. and R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2012, Springer. p. 1-93.
19. Harris, J. and R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.

20. De Moura, M., J. Gonçalves, J. Chousal, and R. Campilho, *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
21. Adams, R. and J. Harris, *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987. **7**(2): p. 69-80.
22. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Single Lap Joints with Rounded Adherend Corners: Stress and Strain Analysis*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(8): p. 819-836.
23. Towse, A., R.G.H. Davies, M.R. Wisnom, R.D. Adams, and K.D. Potter, *4th International Conference on Deformation and Fracture of Composites, Institute of Materials*. 1997.
24. Zhao, X., *Stress and failure analysis of adhesively bonded joints*. 1991, University of Bristol.
25. Clark, J. and I. McGregor, *Ultimate tensile stress over a zone: a new failure criterion for adhesive joints*. The Journal of Adhesion, 1993. **42**(4): p. 227-245.
26. Crocombe, A., *Global yielding as a failure criterion for bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1989. **9**(3): p. 145-153.
27. Griffith, A.A. and M. Eng, *VI. The phenomena of rupture and flow in solids*. Phil. Trans. R. Soc. Lond. A, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
28. Broek, D., *Elementary engineering fracture mechanics*. 2012: Springer Science & Business Media.
29. Wikipedia, *Fracture mechanics*. 2018.
30. Dillard, D.A., H.K. Singh, D.J. Pohlit, and J.M. Starbuck, *Observations of decreased fracture toughness for mixed mode fracture testing of adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1515-1530.
31. Ducept, F., D. Gamby, and P. Davies, *A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens*. Composites Science and Technology, 1999. **59**(4): p. 609-619.
32. Conroy, M., A. Kinloch, J. Williams, and A. Ivankovic, *Mixed mode partitioning of beam-like geometries: A damage dependent solution*. Engineering Fracture Mechanics, 2015. **149**: p. 351-367.
33. Duan, K., X. Hu, and 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.
34. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, and 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.
35. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, and J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
36. Chaves, F.J.P., L.F.M. da Silva, M.F.S.F. de Moura, D.A. Dillard, and V.H.C. Esteves, *Fracture Mechanics Tests in Adhesively Bonded Joints: A Literature Review*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(12): p. 955-992.

37. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, and 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.
38. Pinto, A.M.G., A. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M. De Moura, and 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.
39. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
40. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, and 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.
41. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
42. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
43. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, and 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.
44. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, and 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.
45. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, and 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.
46. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and 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.
47. Chen, Z., R.D. Adams, and 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.
48. Mohammadi, S., *Extended finite element method: for fracture analysis of structures*. 2008: John Wiley & Sons.
49. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
50. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
51. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
52. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, and 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.

53. Campilho, R., M. Banea, F. Chaves, and L. Da Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
54. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modelling of Adhesive Joints*, in *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2012, Springer Berlin Heidelberg: Berlin, Heidelberg. p. 1-93.
55. Hosseinzadeh, R., K. Shahin, and 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. Lubkin, J. and E. Reissner, *Stress distributions and design data for adhesive lap joints between circular tubes*. 1955: American Society of Mechanical Engineers.
57. Nemes, O. and F. Lachaud, *Modeling of cylindrical adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1383-1393.
58. Adams, R. and N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints*. The Journal of Adhesion, 1977. **9**(1): p. 1-18.
59. Apalak, M.K., *Stress analysis of an adhesively bonded functionally graded tubular single lap joint subjected to an internal pressure*. Science and Engineering of Composite Materials, 2006. **13**(3): p. 183-212.
60. Esmaeel, R.A. and F. Taheri, *Stress analysis of tubular adhesive joints with delaminated adherend*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(13-14): p. 1827-1844.
61. Labbé, S. and J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **33**: p. 26-35.
62. Dragoni, E. and L. Goglio, *Adhesive stresses in axially-loaded tubular bonded joints—Part I: Critical review and finite element assessment of published models*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **47**: p. 35-45.
63. Shi, Y. and S. Cheng, *Analysis of adhesive-bonded cylindrical lap joints subjected to axial load*. Journal of engineering mechanics, 1993. **119**(3): p. 584-602.
64. Nayeb-Hashemi, H., J. Rossettos, and A. Melo, *Multiaxial fatigue life evaluation of tubular adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 1997. **17**(1): p. 55-63.
65. Pugno, N. and A. Carpinteri, *Tubular adhesive joints under axial load*. Journal of applied mechanics, 2003. **70**(6): p. 832-839.
66. Qiu, C., P. Feng, Y. Yang, L. Zhu, and Y. Bai, *Joint capacity of bonded sleeve connections for tubular fibre reinforced polymer members*. Composite Structures, 2017. **163**: p. 267-279.
67. Cognard, J.Y., H. Devaux, and L. Sohier, *Numerical analysis and optimisation of cylindrical adhesive joints under tensile loads*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(8): p. 706-719.
68. Mendelson, A., *Plasticity : theory and application*. 1983, Malabar, Fla.: R.E. Krieger Pub. Co.
69. Esmaeel, R.A. and F. Taheri, *Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion*. Composite Structures, 2011. **93**(7): p. 1765-1774.

70. Zou, G. and F. Taheri, *Stress analysis of adhesively bonded sandwich pipe joints subjected to torsional loading*. International Journal of Solids and Structures, 2006. **43**(20): p. 5953-5968.
71. Canyurt, O.E., *Fatigue strength estimation of adhesively bonded tubular joint using genetic algorithm approach*. International journal of mechanical sciences, 2004. **46**(3): p. 359-370.
72. Sinnott, E.W. and L.C. Dunn, *Principles of genetics*. 1950: McGraw-Hill: New York.
73. Kwon, J.W. and D.G. Lee, *The effects of surface roughness and bond thickness on the fatigue life of adhesively bonded tubular single lap joints*. Journal of adhesion science and technology, 2000. **14**(8): p. 1085-1102.
74. Corporation, L., *Loctite Worldwide Design Handbook*. 1998: Loctite Corporation.
75. Knox, E., M. Cowling, and S. Hashim, *Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes*. International journal of fatigue, 2000. **22**(6): p. 513-519.
76. Frost, S. and A. Cervenka, *Glass fibre-reinforced epoxy matrix filament-wound pipes for use in the oil industry*. Composites Manufacturing, 1994. **5**(2): p. 73-81.
77. Cowling, M., S. Hashim, I. Winkle, and S. Lafferty, *Structural integrity of bonded connections between polymer composites components in marine applications*. Cost Effective Use of Fibre Reinforced Composites Offshore, Phase III, Final Report, 1994. **1996**: p. 1996.
78. Kujawski, D., *Width effects on the tensile strength and fatigue behavior of angle-ply laminates*. International journal of fatigue, 1998. **20**(8): p. 575-580.
79. code, B.s., *BS 7159: 1989. British standard code of practice for design and construction of glass reinforced plastics (GRP) piping systems for individual plants or sites. bsi 1989*. 1989.
80. Campilho, R.D., M.D. Banea, A.M. Pinto, L.F. da Silva, and A. De Jesus, *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
81. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014.
82. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013.
83. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015.
84. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
85. Fernandes, T.A., R.D. Campilho, M.D. Banea, and 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.
86. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014.
87. Sekercioglu, T., *Strength based reliability of adhesively bonded tubular lap joints*. Materials & design, 2007. **28**(6): p. 1914-1918.

88. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Tensile Behaviour of a Structural Adhesive at High Temperatures by the eXtended Finite Element Method*. The Journal of Adhesion, 2013. **89**(7): p. 529-547.
89. Radice, J. and 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.
90. de Sousa, C., R. Campilho, E. Marques, M. Costa, and L. da Silva, *Overview of different strength prediction techniques for single-lap bonded joints*. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications, 2017. **231**(1-2): p. 210-223.
91. Taib, A.A., R. Boukhili, S. Achiou, and H. Boukehili, *Bonded joints with composite adherends. Part II. Finite element analysis of joggle lap joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(4): p. 237-248.
92. Campilho, R., M. De Moura, and J. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion science and technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
93. Vable, M. and J.R. Maddi, *Boundary element analysis of adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(3): p. 133-144.
94. Luo, Q. and L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(7-8): p. 2349-2370.
95. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, and W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
96. Grant, L., R. Adams, and 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.
97. Moës, N. and T. Belytschko, *Extended finite element method for cohesive crack growth*. Engineering Fracture Mechanics, 2002. **69**(7): p. 813-833.