



ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES COM DEFEITO: ANALISE EXPERIMENTAL E NUMERICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

TIAGO PATRÍCIO VIEIRA DA SILVA

novembro de 2018

ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES COM DEFEITO: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

Tiago Patrício Vieira da Silva

1130532

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento De Engenharia Mecânica



ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES COM DEFEITO: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

Tiago Patrício Vieira Da Silva

1130532

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

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Luís Manuel Martins Leite Magalhães

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Douto Hugo Queirós Faria

Professor Adjunto Convidado, ESAN

AGRADECIMENTOS

Em primeiro, aos meus pais, que me mostraram a forma de ser quem hoje sou e por sempre me apoiarem em qualquer momento ou decisão, e claro, ao meu irmão que eu sempre vi como um exemplo do que quero ser.

Ao meu orientador, Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela sua disponibilidade infindável e conhecimentos partilhados.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto, e em especial a todos os Docentes do Departamento de Engenharia Mecânica, com quem durante estes cinco anos de formação tive o privilégio de trabalhar, e de conhecer amigos que irão durar para toda a vida.

PALAVRAS CHAVE

Epóxico, Poliuretano, Juntas adesivas tubulares, Método de Elementos Finitos, Modelos de Dano Coesivo, Parâmetros geométricos, defeitos na camada adesiva.

RESUMO

O método de união com ligações adesivas é cada vez mais utilizado na concepção de estruturas mecânicas, devido às vantagens significativas que esta técnica fornece em comparação com as ligações tradicionais. De facto, as juntas com ligação adesiva estão sob investigação intensa há bastante tempo. Entre as vantagens, destacam-se a redução de peso e possibilidade de unir diferentes materiais, incluindo compósitos, sem danificar as estruturas a ligar. Os adesivos comerciais variam desde resistentes e frágeis a menos resistentes e dúcteis. Uma nova família de adesivos de poliuretano combina elevada ductilidade com resistência moderada. Hoje em dia existem vários tipos de configurações de junta disponíveis, sendo que as mais comuns são as de sobreposição simples, sobreposição dupla e de chanfro. As juntas tubulares são um tipo de geometria particular que é usada para fins próprios, e tem vindo a ser alvo de estudo nomeadamente no que se refere à distribuição de tensões que se desenvolvem na camada adesiva relativamente a vários tipos de esforços, como torção ou tração. Contudo, o efeito de lacunas de adesivo na resistência da junta não é conhecido.

O objetivo do trabalho numérico, realizado sobre juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração, é comparar o efeito de defeitos na área de ligação em diferentes tipos de adesivos e comprimentos de sobreposição (L_0), com juntas sem defeito. Os modelos de juntas tubulares realizadas sem defeito no programa ABAQUS® são consideradas ideais. De modo a validar os resultados numéricos obtidos, foram comparadas juntas ideais, com juntas sem defeito realizadas de modo experimental. Para o estudo em questão foram usadas juntas tubulares de sobreposição simples com substratos de alumínio, e três adesivos distintos. Para cada adesivo e defeito foram realizados modelos de juntas com valores de L_0 de 20 mm e 40 mm, de modo a obter informação mais realista e ampla do efeito dos defeitos estudados (falha de adesivo com comprimento de 25%, 50% e 75% de L_0). Com o estudo desenvolvido, verifica-se que o tipo de adesivo desempenha um papel fundamental no que diz respeito à capacidade de carga ($P_{máx}$) da junta, sendo que o adesivo frágil mostra melhor desempenho para menores valores de L_0 , enquanto os adesivos dúcteis obtêm

melhores resultados para maiores valores de L_0 . Pela análise dos valores numéricos obtidos com recurso aos modelos de dano coesivo (MDC) constatou-se que a consequência dos defeito é dependente do adesivo e de L_0 .

KEYWORDS

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

ABSTRACT

Joining by adhesively-bonded methods is being increasingly used in the design of mechanical structures, because of the significant benefits of this technique compared to the traditional ones. In fact, adhesively-bonded joints are under intense investigation for a long time. Amongst the main advantages are the weight reduction and possibility to bond different materials, including composites, without damaging the parent structures. Commercial adhesives range from strong and brittle to less strong and ductile. A new family of polyurethane adhesives combines high ductility and moderate strength. There are several types of joint configurations available today, the most common of which are single-lap, double-lap and scarf joints. Tubular joints have a geometry that is used in many situations. This design has been subjected to some investigations on the stress distributions that develop in adhesive layer for various types of stress such as torsion or traction. However, the effect of adhesive flaws on the joint strength is not known.

The objective of the numerical work, performed on tubular adhesive joints subjected to tensile stresses, is to compare the effect of defects in the bonding area on different types of adhesives and overlap lengths (L_0) with non-defective joints. Tubular joint models made without defect in the ABAQUS® program are considered ideal. In order to validate the obtained numerical results of ideal joints, a comparison was made with experimental data. For the study in question, single-lap tubular joints with aluminum substrates and three different adhesives were used. For each adhesive and defect, joints with $L_0=20$ and 40 mm were used to obtain a more realistic and wide information on the effect of the defects studied (adhesive failure with length of 25%, 50% and 75% of L_0). With the developed study, it is verified that the type of adhesive plays a fundamental role in the load capacity (P_{max}) of the joint. The brittle adhesive shows better performance for lower values of L_0 , while the ductile adhesives obtain better results for higher values of L_0 . By the analysis of the numerical values obtained

using cohesive zone models, it was verified that the consequence of the defects is dependent of the adhesive and L_0 used.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
a.C.	Antes de Cristo
CFRP	Polímero Reforçado com Fibra de Carbono
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos Finitos
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
SDEG	Stiffness Degradation

Lista de Unidades

GPa	Gigapascal
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal

N Newton

Lista de Símbolos

a_{SI} Ângulo do chanfro na extremidade do substrato exterior

a_{SO} Ângulo do chanfro na extremidade do substrato exterior

d_{SE} Diâmetro externo do substrato exterior

d_{SI} Diâmetro externo do substrato interior

E Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de Young

G Módulo de elasticidade transversal

G_C Tenacidade

G_{IC} Tenacidade à tração

G_{IIC} Tenacidade ao corte

G_t Taxa de libertação de energia

k Fator de momento fletor

K Rigidez coesiva do adesivo

L Comprimento da junta

l_{ASI} Comprimento do chanfro no aderente exterior

l_{ASO} Comprimento do chanfro no aderente exterior

L_O Comprimento de sobreposição

L_S Comprimento dos substratos

L_T Comprimento total da junta adesiva tubular

$P_{máx}$ Força máxima

$P_{máx} Méd$ Media da força máxima

U	Energia dissipada
γ_f	Deformação de rotura ao corte
$\delta_{\text{máx}}$	Deslocamento máximo
$\Delta P_{\text{máx}}$	Aumento percentual
ε	Deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
θ	Ângulo entre os aderentes
ν	Coefficiente de Poisson
σ	Tensão principal
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_{rr}	Tensão radial
σ_y	Tensão de cedência à tração
$\sigma_{\theta\theta}$	Tensão circunferencial
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
τ_{zr}	Tensão de corte no plano z e direção r
τ_{zr}	Tensão de corte no plano z e direção r
$\tau_{\theta r}$	Tensão de corte no plano θ e direção r
$\tau_{\theta r}$	Tensão de corte no plano θ e direção r

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Concentração de tensões em juntas rebitadas e adesivas [4].	9
Figura 2 - Exemplo do uso de ligações adesivas na aeronave SAAB 340 [3].	10
Figura 3 – Vista explodida de um satélite, com exemplo de varias zonas de aplicação de adesivos (adaptado de [3]).	11
Figura 4 - Vista explodida do capô de um automóvel com referencia à aplicação de adesivos (adaptado de [3]).	12
Figura 5 - Influência da água nas propriedades mecânicas de um adesivo epóxico (cura feita a 80°C durante 1 hora) (adaptado de [3]).	13
Figura 6 - Câmara de testes para choques térmicos (TSA-101S, Espec, Japan) [3].	14
Figura 7 - Descolagem entre o sapato de pele e a sola de borracha (adaptado de [3]).	15
Figura 8 - Diferença na distribuição de tensões causada pela não axialidade da carga aplicada [5].	16
Figura 9 - Ensaio de clivagem: (a) ASTM D3807, (b) ASTM D5041, (c) ASTM D1062 [7].	17
Figura 10 - Juntas sujeitas a esforços de arrancamento [4].	17
Figura 11 - Distribuição de tensões de corte numa junta adesiva (adaptado de [3]).	18
Figura 12 - Tipos de rotura de uma junta adesiva (adaptado de [8]).	18
Figura 13 - Tipos de configuração de juntas adesivas (adaptado de [9]).	20
Figura 14 - Junta adesiva com macho-fêmea (adaptado de [3]).	20
Figura 15 - Junta de sobreposição simples com ressalto (adaptado de [3]).	21
Figura 16 - Junta adesiva de sobreposição simples ondulada (adaptado de [3]).	21
Figura 17 - Métodos usados para diminuir esforços de arrancamento em juntas adesivas com um aderente fino e uma base rígida (adaptado de [3]).	22
Figura 18 – Ilustração de vários tipos de defeitos possíveis de serem encontrados na camada de um adesivo (adaptado de [3]).	22
Figura 19 - Vazio na superfície de contacto entre o adesivo e o substrato [3].	23
Figura 20 - Modelo de uma junta adesiva demonstrando três tipos de defeitos possíveis (adaptado de [12]).	24
Figura 21 - Carga normalizada em função do deslocamento para diversos tamanhos de falha de adesivo (adaptado de [12]).	25
Figura 22 – Comparação de carga máxima normalizada para cada tamanho de defeito obtidos através de testes experimentais e numéricos (adaptado de [12]).	26

Figura 23 - Carga normalizada em função do deslocamento, para diferentes posicionamentos do defeito com várias dimensões d/l : (a) 0.125; (b) 0.25; (c) 0.375; (d) 0.5; e (e) 0.75.	27
Figura 24 – Diferentes tipos de uniões de juntas tubulares adesivas para cargas axiais e torsionais (adaptado de [3]).	28
Figura 25 - Juntas tubulares com chanfro (a) e sem chanfro (b) (adaptado de [3]).	29
Figura 26 - Esboço de uma junta tubular adesiva sujeita a um esforço de tração [26].	30
Figura 27 - Parâmetros geométricos de uma junta tubular adesiva (adaptado de [27]).	30
Figura 28 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes espessuras de substrato, t_{Si} e t_{So} [27].	31
Figura 29 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes ângulos de chanfro na extremidade do substrato, α_{Si} e α_{So} [27].	31
Figura 30 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes comprimentos das extremidades do adesivo, l_{ASi} e l_{ASo} [27].	32
Figura 31 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes valores de ângulos na extremidade do adesivo, α_{SAi} e α_{SAo} [27].	32
Figura 32 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes valores de diâmetro interno do tubo, d_{iSi} [27].	33
Figura 33 - Modelo de elementos finitos de uma junta tubular adesiva (adaptado de [30]).	34
Figura 34 - Funções de densidade de probabilidade S e L (adaptado de [33]).	36
Figura 35 - Esquema de uma junta tubular adesiva exposta a cargas (F) para testes de fadiga (adaptado de [33]).	36
Figura 36 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [45]) ..	40
Figura 37 – Modelo coesivo triangular [54, 56]	41
Figura 38 – Geometria do provete DCB [69].	43
Figura 39 – Geometria do provete ENF [69].	43
Figura 40 – 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) [85].	45
Figura 41 – Configuração da geometria do provete.	49
Figura 42 – Curvas tensão-deformação (σ - ε) da liga de alumínio AW6082-T651 [88].	51
Figura 43 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® AV138 [88].	51
Figura 44 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [90].	54
Figura 45 – Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [92].	54

Figura 46 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm	56
Figura 47 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm .	58
Figura 48 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm	59
Figura 49 – Lei coesiva triangular [94].....	61
Figura 50 – MDC triangular [91].....	62
Figura 51 - Atribuição dos respectivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®.	66
Figura 52 – Junta adesiva tubular a) com defeito e b) sem defeito, modelada no ABAQUS®.	67
Figura 53 – Definição de incrementos para análise no ABAQUS®.	68
Figura 54 – Representação das condições fronteira na simulação.....	69
Figura 55 – Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta a) pouco refinada, b) muito refinada.	70
Figura 56 – Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS®.....	71
Figura 57 – Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752.....	72
Figura 58 – Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752.....	74
Figura 59 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	75
Figura 60 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.	76
Figura 61 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.....	76
Figura 62 - Modelos de juntas tubulares adesivas a) sem defeito, b) com 25%, c) com 50% e d) com 75% de defeito.....	81
Figura 63 – Localização dos pontos $x=0$ e $x=1$ no modelo de uma junta tubular com 50% de defeito.....	82
Figura 64 – Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.	83
Figura 65 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.	84

Figura 66 – Representação das tensões de arrancamento num modelo de uma junta tubular de $L_0=20$ mm com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.....	85
Figura 67 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.....	86
Figura 68 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.	87
Figura 69 - Distribuição das tensões τ_{xy} / τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.....	88
Figura 70 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.	89
Figura 71 - Representação das tensões de corte num modelo de uma junta tubular de $L_0=20$ mm com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.	90
Figura 72 - Distribuição das tensões τ_{xy} / τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.....	91
Figura 73 - Distribuição das tensões τ_{xy} / τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.	92
Figura 74 – Representação da variável de dano (SDEG) em modelos numéricos de juntas tubulares no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos com $L_0=20$ mm e a) sem defeito, b) 25%, c) 50% e d) 75% de defeito ligados pelo Araldite® AV138.....	93
Figura 75 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=20$ mm para o adesivo Araldite® AV138.....	94
Figura 76 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm para o adesivo Araldite® AV138.....	94
Figura 77 – Representação da evolução do dano através da variável SDEG no adesivo Araldite® AV138 numa junta sem defeito de $L_0=40$ mm	95
Figura 78 - Representação da variável de dano (SDEG) em modelos numéricos de juntas tubulares no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos com $L_0=20$ mm e a) sem defeito, b) 25%, c) 50% e d) 75% de defeito ligados pelo Araldite® 2015.	96
Figura 79 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=20$ mm para o adesivo Araldite® 2015.	96

Figura 80 – Modo de falha de uma junta tubular sem defeito ligada pelo adesivo Araldite® 2015, a) pela variável SDEG e b) pela variável S , Mises.	97
Figura 81 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=40$ mm para o adesivo Araldite® 2015.	98
Figura 82 - Representação da evolução do dano através da variável SDEG no adesivo Araldite® 2015 numa junta com 75% de defeito de $L_0=40$ mm.	98
Figura 83 - Representação da variável de dano (SDEG) em modelos numéricos de juntas tubulares no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos com $L_0=20$ mm e a) sem defeito, b) 25%, c) 50% e d) 75% de defeito ligados pelo SikaForce® 7752.	99
Figura 84 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=20$ mm para o adesivo SikaForce® 7752.	99
Figura 85 - Modo de rotura de um modelo de uma junta tubular sem defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.	100
Figura 86 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=40$ mm para o adesivo SikaForce® 7752.	100
Figura 87 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm.	101
Figura 88 - Modo de rotura de um modelo de uma junta tubular com 50% de defeito ligada com o adesivo Araldite® AV138 em duas fases a) antes e b) depois do adesivo exterior entrar em sobrecarga.	102
Figura 89 - $P_{m\acute{a}x}$ suportado pelas juntas tubulares com Araldite® AV138, em função da percentagem de defeito, para os dois comprimentos de sobreposição, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.	103
Figura 90 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=20$ mm.	103
Figura 91 – Modo de propagação do dano num modelo de uma junta tubular com 25% de defeito ligada com o adesivo Araldite® 2015.	104
Figura 92 - $P_{m\acute{a}x}$ suportado pelas juntas tubulares com Araldite® 2015, em função da percentagem de defeito, para os dois comprimentos de sobreposição, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.	104
Figura 93 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=20$ mm.	105
Figura 94 - Modo de rotura de um modelo de uma junta tubular com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.	105
Figura 95 - $P_{m\acute{a}x}$ suportado pelas juntas tubulares com SikaForce® 7752, em função da percentagem de defeito, para os dois comprimentos de sobreposição, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.	106

Figura 96 - P_{max} suportado pelas juntas tubulares com um comprimento de sobreposição (L_0) de 20 mm, em função da percentagem de defeito, para os três adesivos estudados: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.	107
Figura 97 - P_{max} suportado pelas juntas tubulares com um comprimento de sobreposição (L_0) de 40 mm, em função da percentagem de defeito, para os três adesivos estudados: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.	108
Figura 98 - Energia dissipada das juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 em função da percentagem de defeito para cada L_0	109
Figura 99 - Energia dissipada das juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função da percentagem de defeito para cada L_0	110
Figura 100 - Energia dissipada das juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 em função da percentagem de defeito para cada L_0	110
Figura 101 - Energia dissipada das juntas tubulares de $L_0=20$ mm para cada tamanho de defeito, consoante o adesivo usado.	111
Figura 102 - Energia dissipada das juntas tubulares de $L_0=40$ mm para cada tamanho de defeito, consoante o adesivo usado.	112

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Características das juntas adesivas (adaptado de [3]).	8
Tabela 2 – Designação das cotas dos provetes e respetivos valores (em mm).	50
Tabela 3 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [86, 91].	52
Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [86, 90].	53
Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [86, 92].	55
Tabela 6 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138.	57
Tabela 7 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015.	58
Tabela 8 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752.	59
Tabela 9 – $P_{máxMéd}$ (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{máx}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares.	60
Tabela 10 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [87].	64
Tabela 11 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [102].	64
Tabela 12 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [92].	65
Tabela 13 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.	73
Tabela 14 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.	74
Tabela 15 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0 .	77
Tabela 16 – Valores de $P_{máx}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa.	79

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização da dissertação.....	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.....	9
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	15
2.1.4	Configurações possíveis de junta.....	19
2.1.5	Juntas adesivas com defeitos	22
2.2	Juntas adesivas tubulares.....	27
2.2.1	Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração.....	29
2.2.2	Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção.....	33
2.2.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga.....	35
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas	37
2.3.1	Mecânica dos meios contínuos	37
2.3.2	Mecânica da fratura	38
2.3.3	Modelos de dano coesivo.....	39
2.3.3.1	Tipos de leis coesivas	40
2.3.3.2	Métodos de estimação das leis coesivas	41
2.3.3.3	Mecânica do dano	43
2.3.3.4	Método de Elementos Finitos Extendido.....	44
3	DESENVOLVIMENTO	49
3.1	Validação dos MDC com dados experimentais.....	49

3.1.1	Descrição da geometria e materiais	49
3.1.1.1	Substratos.....	50
3.1.1.2	Adesivos	51
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	51
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	52
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	54
3.1.2	Resultados experimentais obtidos.....	55
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	56
3.1.2.2	Araldite® 2015	57
3.1.2.3	SikaForce® 7752.....	58
3.1.3	Comparação de resultados.....	60
3.1.4	Modelo de dano coesivo triangular	61
3.1.4.1	Formulação do modelo	62
3.1.4.2	Determinação das propriedades coesivas	63
3.1.4.2.1	Araldite® AV138	63
3.1.4.2.2	Araldite® 2015.....	64
3.1.4.2.3	SikaForce® 7752	65
3.1.5	Condições da análise numérica	65
3.1.6	Análise de tensões nas juntas.....	71
3.1.6.1	Tensões de arrancamento.....	71
3.1.6.2	Tensões de corte.....	73
	Previsão da resistência por MDC.....	75
3.1.7	Discussão dos resultados obtidos	76
3.1.8	Validação do MDC com resultados experimentais	78
3.2	Trabalho numérico	80
3.2.1	Condições estudadas	80
3.2.2	Análise de tensões na junta.....	81
3.2.2.1	Tensões de arrancamento.....	82
3.2.2.2	Tensões de corte.....	87
3.2.3	Estudo da variável de dano	92

3.2.3.1	Araldite® AV138.....	93
3.2.3.2	Araldite® 2015	95
3.2.3.3	Sikaforce® 7752	98
3.2.4	Previsão da resistência	101
3.2.5	Previsão da energia dissipada	108
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS	115
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	121

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As juntas adesivas, devido às suas potencialidades na ligação de uma grande variedade de materiais, e têm vindo a ter um crescimento bastante significativo na indústria. Esta técnica tem vindo a ser usada desde há milhares de anos. No início os adesivos eram baseados a partir de produtos naturais como ossos e pele de animais, peixe, leite e plantas. Só nos tempos modernos é que adesivos são fabricados a partir de polímeros sintéticos. De facto, as ligações adesivas apresentam inúmeras vantagens em comparação com as ligações mecânicas mais tradicionais, como redução de peso, possibilidade de unir diferentes materiais e com coeficientes de expansão térmica distintos, conceber ligações com geometrias complexas, boa resistência à fadiga, distribuição de tensões mais uniforme ao longo de toda a área ligada, que permite aumentar a rigidez da ligação e em certos casos, graças a estas características uma redução no preço final da junta. Outra vantagem de adesivos estruturais é a capacidade de ligar materiais de placas finas, pois apesar de a resistência de adesivos não se comparar à de ligas metálicas, quando usados entre placas finas com uma grande área de aplicação, é apto de ser usado para aplicações industriais. No entanto, apresentam como desvantagens, na maior parte dos casos, impossibilidade de desmontagem, fraca resistência ao arrancamento e eventual necessidade de cura a elevadas temperaturas. O comportamento de uma ligação adesiva é condicionado por diferentes variáveis, tais como o tipo de adesivo, o tipo de substrato e aspetos dimensionais como por exemplo o comprimento de sobreposição (L_0), a espessura dos substratos e a espessura da camada de adesivo.

No que diz respeito aos adesivos, estes variam de frágeis e rígidos, como por exemplo o epóxido Araldite® AV138, até dúcteis e flexíveis, como é o caso do epóxido Araldite® 2015. Para além destes, existem adesivos que combinam uma elevada ductilidade e resistência razoável, como por exemplo o poliuretano Sikaforce® 7752. A resistência e ductilidade são dois dos principais fatores que influenciam a resistência de uma junta adesiva.

Devido à utilização relativamente recente de ligações adesivas em grande escala, em conjunto com os comportamentos marcadamente diferentes que estes tipos de juntas podem apresentar em função dos parâmetros referidos, torna-se necessária a existência de ferramentas que permitam o projeto expedito destas ligações. Assim, o método de Elementos Finitos (EF), combinado com critérios ou modelos de dano cada

vez mais complexos, têm-se revelado como uma ferramenta fundamental para o projeto de ligações adesivas. No âmbito das técnicas disponíveis, os modelos de dano coesivo (MDC) são uma ferramenta com grande importância, por combinar os parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para previsão do desempenho das juntas. É assim possível criar modelos de juntas com grande variedade de adesivos e substratos, obtendo resultados fiáveis para diferentes tipos de ligações adesivas.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo o estudo de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração e comparar, através de análises numéricas, o efeito de defeitos na área de ligação em diferentes tipos de adesivos e comprimentos de sobreposição (L_o).

Para o estudo em questão foram usadas juntas tubulares de sobreposição simples em alumínio, e três adesivos distintos, o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752. Para cada adesivo e defeito foram realizados modelos de juntas com valores de L_o de 20 mm e 40 mm, de modo a obter informação mais realista e ampla do efeito dos defeitos. Para tal, os defeitos introduzidos consistem na falha de adesivo na região central da área de ligação, sendo que foram analisados defeitos com falhas do tamanho de 25%, 50% e 75% de L_o .

Numericamente estudaram-se as distribuições das tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva, e foi feita a previsão da resistência da junta adesiva.

No estudo por modelos de dano coesivo (MDC), é avaliada a variável de dano SDEG (*stiffness degradation*) na camada do adesivo, o que permite constatar a degradação do adesivo desde o início da aplicação de carga até à rotura completa, dada em função de L_o , do adesivo usado e do tamanho do defeito, de modo a explicar os resultados obtidos.

1.3 Organização da dissertação

Para uma melhor interpretação e análise do trabalho desenvolvido, esta dissertação foi dividida em 5 capítulos distintos.

No capítulo 1 é realizada uma introdução ao tema e são apresentadas as etapas seguidas na tese.

O capítulo 2 consiste na revisão bibliográfica, que caracteriza e aborda os temas mais importantes referentes às ligações adesivas, como aplicações comuns, configurações possíveis, parâmetros geométricos que mais influenciam o seu desempenho e estudos realizados sobre juntas tubulares adesivas com defeitos.

Numa fase inicial do capítulo 3 é realizada a descrição da geometria e materiais utilizados, bem como a validação dos resultados numéricos relativamente aos experimentais. É ainda feita a formulação do modelo e a determinação das propriedades coesivas. A segunda fase consiste na apresentação dos resultados obtidos para os valores de distribuição de tensões e é realizada uma previsão de resistência para cada defeito introduzido nas juntas adesivas tubulares.

No capítulo 4 são apresentadas as conclusões obtidas e ainda é feita referência a possíveis trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

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

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

As ligações adesivas existem e são usadas há milhares de anos, mas só aproximadamente nos últimos 200 anos é que esta tecnologia tem vindo a ser estudada e usada mais aprofundadamente, graças a diversas vantagens que apresentam em relação às ligações mecânicas ou soldadas, e ao uso de diferentes materiais que necessitam ou favorecem o uso deste tipo de ligações. Uma definição para ligações adesivas é a proposta por Kinloch (1987): *“An adhesive may be defined as a material which when applied to surfaces of materials can join them together and resist separation”* [1]. Esta é uma definição simples e bastante abrangente, que sugere que qualquer material que una mecanicamente duas superfícies pode ser considerado um adesivo [1].

Um adesivo pode ser constituído por um polímero ou, em outros casos, por uma junção de componentes que reagem quimicamente entre si para produzir um polímero. Este adesivo tem de estar no estado líquido no momento de aplicação nos respetivos materiais a unir, de modo a permitir que exista contacto molecular entre ambos, e que quando o material termine a fase de cura possa ligar os materiais e resistir à separação.

As juntas adesivas destacam-se em relação aos outros métodos de ligação principalmente por exercerem esforços sobre toda a área de contacto, ao contrário de ligações mecânicas, tais como parafusos ou rebites, que criam zonas de concentração de tensões e suscetíveis a ganhar corrosão, permitem também obter estruturas leves com elevada rigidez, e podem também fazer a ligação entre uma grande variedade de materiais, tais como ligas metálicas, polímeros, compósitos, e até mesmo ligações entre materiais de famílias diferentes [2].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As juntas adesivas têm várias características que as definem, bem como várias vantagens relativamente a outros métodos de ligação. A Tabela 1 é uma forma resumida de expor as principais características deste método de ligação.

Tabela 1 – Características das juntas adesivas (adaptado de [3]).

Principais características	Juntas adesivas
Tipo de ligação	Tipicamente permanentes
Distribuição de tensões	Uniforme
Aparência	Apenas visível no contorno da área ligada
Ligações de diferentes materiais	Boa ligação entre materiais diferentes, e com diferentes coeficientes de expansão térmica
Resistência à temperatura	Fraca resistência a temperaturas elevadas
Resistência mecânica	Boas propriedades de fadiga e de resistência à corrosão
Preparação	Preparação demorada das superfícies de adesão e com necessidade de cuidados especiais
Equipamento	Custo elevado
Automatização	Possível
Tempo de produção	Dependendo da necessidade de preparar as superfícies e/ou devido ao tempo de cura do adesivo pode demorar entre minutos a horas
Avaliação/inspeção	Métodos de controlo da qualidade e segurança da junta limitados

Uma das principais vantagens das juntas adesivas é a distribuição de tensões por toda a área ligada. Apesar de este tipo de juntas não obter uma destruição de tensões e esforços igual ao longo de toda a área ativa, é mais uniforme do que numa ligação mecânica, onde que as tensões estão acumuladas à volta dos elementos de ligação, como mostra a Figura 1, que compara uma junta rebitada com uma junta colada. Isto dá-se porque o uso de adesivos permite manter estruturas com contornos regulares, evitar furos ou marcas de soldadura e criar um contacto contínuo entre as superfícies e o adesivo [4].

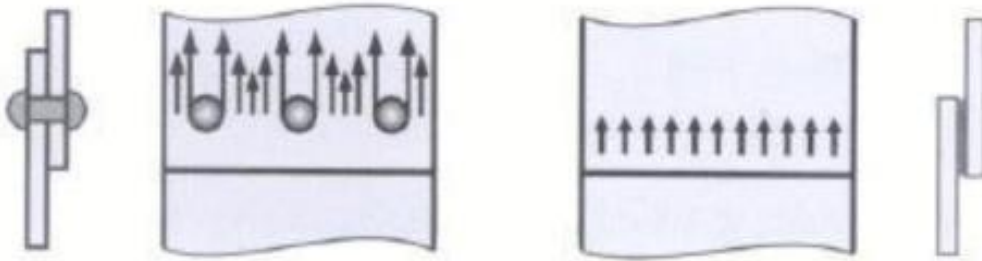


Figura 1 – Concentração de tensões em juntas rebitadas e adesivas [4].

Outra vantagem importante é a capacidade de absorver vibrações, que melhora significativamente a resistência à fadiga do conjunto ligado, e dispensa assim em muitos casos formas adicionais de amortecimento.

No entanto, o facto de o adesivo ser um polímero também traz algumas desvantagens, como a fraca resistência a condições externas, como humidade e temperaturas elevadas. O modo de solicitação da junta, ou o tipo de esforços a que vai estar sujeita tem necessariamente de ser estudado, de modo a evitar forças de arrancamento, clivagem ou impacto, que provocam uma diminuição drástica da resistência da junta, e são em vários casos um fator impeditivo do uso das mesmas.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As juntas adesivas têm várias aplicações, e cada vez mais são usadas em todo o tipo de indústrias, como a automóvel, naval, construção, têxtil e muitas outras, devido a serem cada vez mais um método com garantias de qualidade e de cada vez maior facilidade de aplicação. Por consequência, este é um método cada vez mais viável em termos económicos.

Uma das primeiras indústrias a usar adesivos foi a aeronáutica, devido ao uso de materiais leves como alumínio e compósitos, que não são facilmente ligáveis pelos métodos tradicionais. Neste caso a utilização de ligações adesivas permite melhorar a rigidez e ao mesmo tempo tornar a aeronave mais leve.

Como esta é uma indústria com muitos recursos, possibilitou desenvolver bastante este tipo de ligações. As empresas de Havilland e Fokker foram as pioneiras no uso de ligações adesivas em estruturas aeronáuticas, mas foram rapidamente seguidas e muitas outras que começaram a usar este método, sendo agora comum o uso de adesivos na fuselagem, asas, cauda, e muitos outros componentes de aviões modernos. Na Figura 2 - Exemplo do uso de ligações adesivas na aeronave SAAB 340 [3]. é possível ver o uso extensivo de ligações adesivas na aeronave SAAB 340 [3].

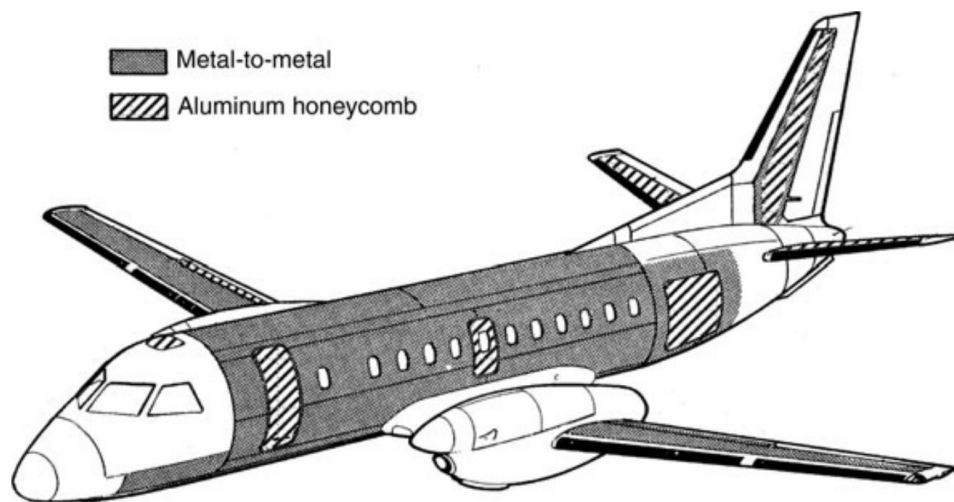


Figura 2 - Exemplo do uso de ligações adesivas na aeronave SAAB 340 [3].

Outra indústria que ajudou o desenvolvimento do uso de adesivos foi a aeroespacial pois, tal como a aeronáutica, necessita de materiais rígidos e leves, e tem muitos recursos para desenvolver métodos alternativos aos normalmente usados. No início dos anos 60, os primeiros satélites e foguetões construídos eram sobretudo feitos recorrendo ao uso de metal, mas estes começaram depois a ser substituídos por materiais compósitos, e os sistemas de porcas/parafusos e rebites passaram a ser substituído por adesivos. Apesar de na altura ainda não existirem estudos muitos aprofundados para este tipo de ligação, e que potenciava uma falta de confiança nesta tecnologia, as ligações adesivas foram aos poucos ganhando importância na indústria. Portanto, se no caso das aeronaves é necessário perder peso, na indústria aeroespacial também, pois antes de o satélite entrar em órbita necessita de descolar. No início da década de 1970, a resina epóxi associada às fibras de vidro e boro trouxe maior resistência e estabilidade aos materiais compósitos, e permitiu a introdução de peças estruturais de muito maior escala do que anteriormente. As fibras de carbono chegaram na década de 1980, passaram a ser usadas em estruturais primárias, estruturas de treliça monolíticas, ou painéis sanduíche, como partes essenciais dos satélites [3].

A proteção contra a corrosão atmosférica também foi uma das primeiras aplicações dos agentes de colagem entre partes metálicas, como barreiras à humidade. Na Figura 3 é possível observar o uso de adesivos em vários componentes de um satélite [3].

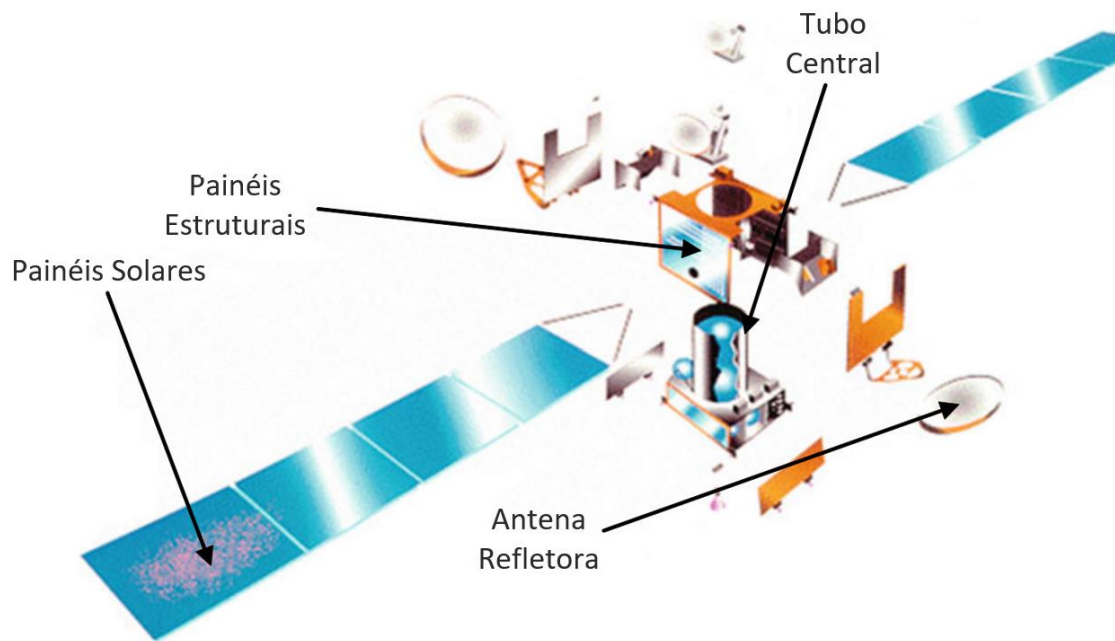


Figura 3 – Vista explodida de um satélite, com exemplo de varias zonas de aplicação de adesivos (adaptado de [3]).

A indústria automóvel uma das maiores, e mais competitivas do mundo. Necessita, portanto, de usar as tecnologias mais eficientes e viáveis, tanto em termos de segurança, performance e custo. Por estas razões, as ligações adesivas passaram também a ter uma grande influência na construção de automóveis, e é agora uma das indústrias mais ativas no uso de adesivos [3]. No entanto, foi necessário ultrapassar alguns desafios os para adesivos poderem ser usados na construção de automóveis. Por exemplo, as peças e chapas de metal normalmente têm uma superfície oleada devido a certos processos de fabrico, ou então para evitar a corrosão. No entanto, o óleo tem de ser sempre removido das superfícies a ligar para garantir uma boa adesão. Isto torna o uso de ligações adesivas um processo muito caro, e pode por vezes deixar de ser viável. Portanto, foram desenvolvidos adesivos que garantem a adesão e compatibilidade com estes resíduos de óleo. Este problema/desafio foi um grande passo no desenvolvimento dos adesivos, e para os engenheiros de processo, que precisaram de encontrar a combinação certa entre o tipo de óleos e de adesivos a juntar, o que necessitou de muitos estudos e testes para garantir a sua resistência e durabilidade. Outro desafio foi o uso de tipos de metais diferentes, visto que um automóvel usa muitos tipos de materiais, como diferentes ligas de aço e alumínio. De maneira que para ligar todo o tipo de materiais foi desenvolvido um adesivo feito a medida para um certo conjunto de substratos, para que não se torne muito complexo controlar e aplicar muitos tipos diferentes de adesivos num automóvel. A Figura 4 mostra o uso de várias técnicas e tipos de adesivo no capô de um automóvel, onde cada zona de aplicação é feita de maneira diferente de modo a garantir que a adesão seja feita corretamente para todos os modos de uso e esforços a suportar [3].

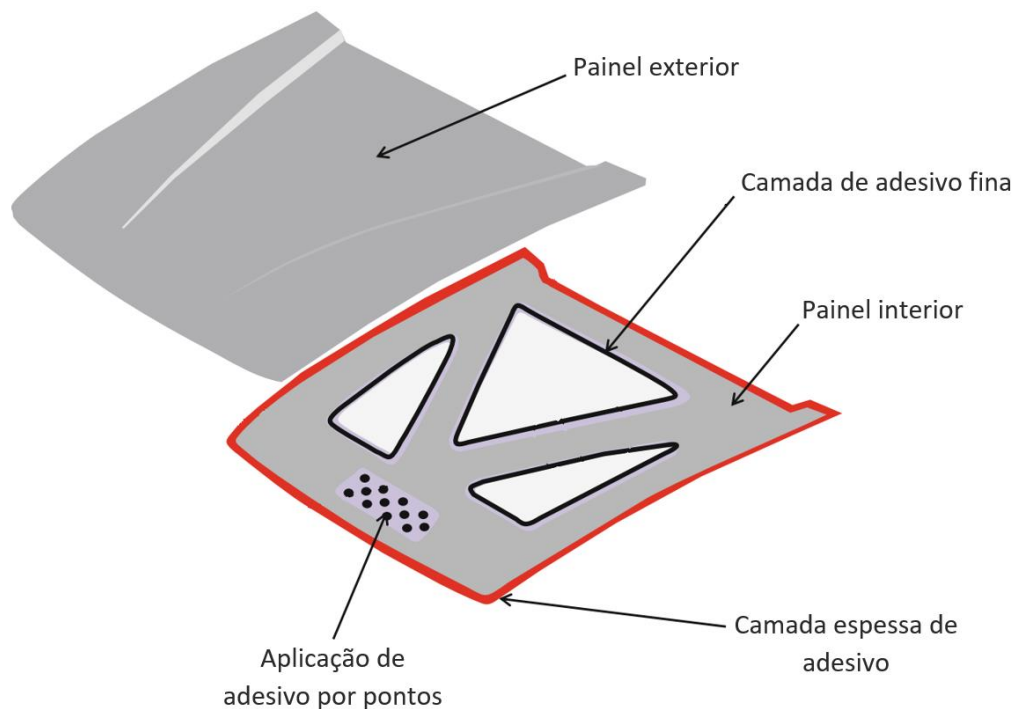


Figura 4 - Vista explodida do capô de um automóvel com referência à aplicação de adesivos (adaptado de [3]).

Os adesivos têm sido usados na construção civil desde há muito tempo. Existem registos desta tecnologia ser usada há mais de 5000 anos na Roma antiga, onde as pedras eram cimentadas com argila e outros componentes. Por exemplo, na construção da Porta Nigra em Trier (3000 a.C.), eram misturadas substâncias de origem orgânica como leite, sangue de bovino, caseína, ou até mesmo urina para melhorar a rigidez e a resistência às condições ambientais dos adesivos. Desde esta altura as ligações adesivas têm sofrido muitas evoluções e tiveram um grande progresso. O engenheiro civil moderno usa adesivos em muitas áreas da construção, muitas das vezes sem estar ciente disso [3].

A indústria marítima utiliza ligações adesivas em todo o tipo de embarcações, desde pequenos barcos, lanchas de alta performance, iates, ou até navios de carga. A grande variedade de materiais usados nesta indústria favorece o uso de adesivos. No entanto, existe o problema óbvio que o ambiente em que são usados pode trazer. Caso água entre em contacto com o adesivo, este perde propriedades físicas e mecânicas muito rapidamente [3]. Estas mudanças podem ser reversíveis ou permanentes, A cinética dessas mudanças dependerá do adesivo exato que está a ser usado e das condições ambientais a que este foi exposto, particularmente a temperatura.

A Figura 5 mostra as curvas $P-\delta$ de juntas adesivas similares, depois de serem imersas por diferentes períodos de tempo em água desionizada a 20°C. Foi possível concluir que, apesar de a resistência mecânica da junta baixar drasticamente após ser imersa na água, esta condição não piora muito com o decorrer do tempo [3].

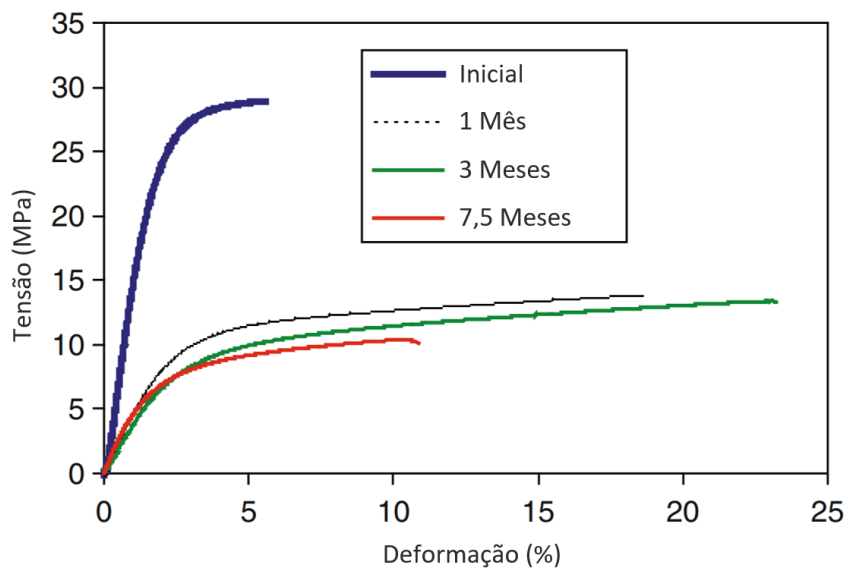


Figura 5 - Influência da água nas propriedades mecânicas de um adesivo epóxico (cura feita a 80°C durante 1 hora) (adaptado de [3]).

Adesivos usados na indústria elétrica podem ter maioritariamente dois usos: como condutores ou como isoladores elétricos [3]. Os adesivos condutores são geralmente usados para ligar outros componentes condutores num conjunto elétrico, enquanto os isoladores servem para proteger circuitos elétricos ou fios das condições de humidade e temperatura ao seu redor, bem como para evitar contactos indesejados que podem eventualmente criar curto-circuitos. Por isso, os adesivos isoladores devem ter boa flexibilidade e grande resistência elétrica e térmica. Estes adesivos normalmente são mais básicos e simples de produzir e relativamente conhecidos, não sendo necessário criar grandes alterações aos já existentes no mercado. Os adesivos condutores, por outro lado, necessitam de mais cuidados e estudo, e são tipicamente isotrópicos ou anisotrópicos. Os adesivos isotrópicos normalmente contêm uma grande percentagem de elementos condutores, aproximadamente entre 25% a 30% do seu volume, enquanto os adesivos anisotrópicos só contem entre 5% a 20%. Adesivos sem estes elementos também podem servir como condutores, caso mantenham contacto mecânico puro entre os componentes elétricos, devido à aplicação de uma força de compressão [3].

Um aspecto importante a considerar na aplicação de adesivos em placas ou componentes elétricos, é a tensão gerada pela contração do adesivo durante a cura, o que significa que o comportamento térmico e termomecânico dos adesivos durante o processo de colagem deve ser avaliado antes destes serem usados.

Para a realização de testes de fiabilidade de adesivos na indústria eletrónica, deve ser projetado e fabricado um equipamento de testes como o da Figura 6, que não só assemelhe as condições em que os adesivos vão ser utilizados, mas também que as

acelere, de modo a se poder verificar o comportamento das ligações para grandes períodos de tempo, e em condições extremas [3].



Figura 6 - Câmara de testes para choques térmicos (TSA-101S, Espec, Japan) [3].

A indústria do calçado também recorre ao uso de adesivos desde há muito tempo atrás [3]. A colagem entre a sola de borracha e o resto do sapato é uma das mais difíceis e exigentes nesta tecnologia. O uso de adesivos nesta indústria tem muitas vantagens, como juntas mais homogêneas e flexíveis, maior facilidade em automatizar o processo, distribuição da tensão ao longo do sapato melhor distribuída, o que permite assim mais conforto e diminuição do desgaste do calçado, e melhor estética do sapato, o que pode servir para criar novos designs e modas. Porém, é necessário um controlo severo de todos os passos que envolvem a formação e colagem de todos os componentes no calçado, de modo a evitar defeitos e problemas de ligação. O problema mais grave é o representado na Figura 7, e consiste na separação da sola do sapato.

Dependendo do tipo de calçado, pode ser exigido que apresente certas características para que desempenhe diferentes funções. No caso de calçado tradicional e mais comumente usado, não é esperada uma exigência e durabilidade muito alta, normalmente o tempo de uso deste tipo de calçado ronda os 3 anos. No entanto, sapatilhas de desporto require uma performance muito mais elevada da adesão, tem de ser mais leve, aguentar grandes impactos, ter maior flexibilidade e ao mesmo tempo garantir durabilidade e conforto. Mas os mais exigentes na sua construção são os sapatos de segurança, pois estes têm de conseguir trabalhar na presença de

solventes, temperaturas muito elevadas, e grandes tensões durante grandes períodos de tempo [3].



Figura 7 - Descolagem entre o sapato de pele e a sola de borracha (adaptado de [3]).

A indústria ferroviária tem três prioridades principais, o transporte em massa, rápido, e em segurança. Até há poucas décadas atrás, o uso de ligações adesivas não estava muito presente nesta indústria, mas esta condição tem vindo a ser alterada, com a necessidade de melhoria continua e pelo facto de esta indústria se estar a tornar cada vez mais, amiga do ambiente. Certos aspetos como a construção leve e com alta resistência, isolamento acústico, amortecimento de vibrações, isolamento térmico, incombustibilidade e reciclabilidade tornaram-se fatores importantes. De modo a cumprir tais exigências, foi necessário introduzir novos tipos estruturas, nas quais diferentes materiais são unidos e usados respeitando e aproveitando as suas características próprias. O método mais promissor para unir este tipo de estruturas é a adesão, por apresentar vantagens como a baixa concentração de tensões, alta rigidez e bom amortecimento [3].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Existem vários esforços em juntas adesivas. Alguns deles são preferenciais, como a compressão e o corte, enquanto esforços como a tração, clivagem e de arrancamento são críticos nas juntas adesivas.

Nos esforços de tração, a tensão é aplicada perpendicularmente ao plano de corte, como mostra a Figura 8. Isto cria tensões distribuídas uniformemente pela área ligada, com picos de tensões nas suas extremidades. No entanto, no mundo real isto é muito raro acontecer, visto que é muito difícil que as tensões se mantenham totalmente axiais, e que o adesivo mantenha exatamente a mesma espessura por toda a área colada, estes desvios criam esforços de clivagem e arrancamento, que são bastante prejudiciais para a estabilidade da junta. A Figura 8 mostra a diferença entre duas juntas, uma a sofrer esforços de tração corretamente (à esquerda) e outra incorretamente (à direita), com a força a não ser aplicada perpendicularmente ao adesivo. A distribuição de tensões, como é perceptível pelos gráficos da Figura 8, é muito pior distribuída no segundo caso, e que origina um pico de tensões na extremidade da junta e, conseqüentemente, diminui a resistência mecânica do conjunto e permite a separação dos substratos mais facilmente.

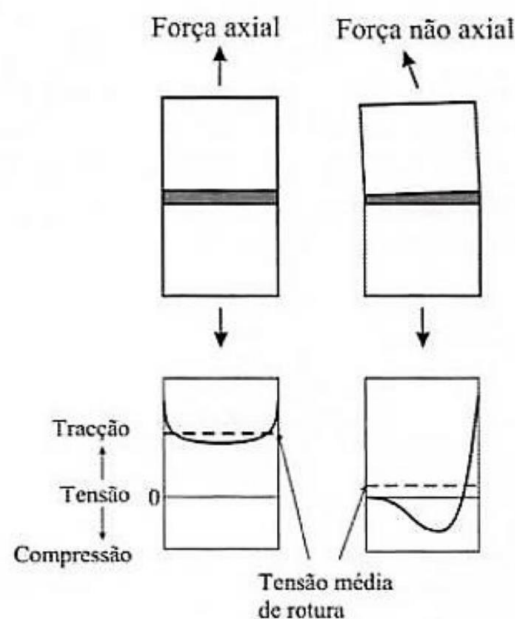


Figura 8 - Diferença na distribuição de tensões causada pela não axialidade da carga aplicada [5].

Os esforços de compressão são similares aos esforços de tração, no sentido em que as forças aplicadas devem ser perpendiculares à superfície de ligação e só criam problemas na junta se não forem aplicadas forças axiais. Neste caso, a distribuição de tensões não é uniforme, porém, no resto dos casos, este esforço praticamente não necessita de adesivo para manter a ligação dos substratos.

Os esforços de clivagem ocorrem em juntas com substratos rígidos, com forças a serem aplicadas nas extremidades da mesma, como está representado na Figura 9. Isto faz com que a tensão fique concentrada na extremidade da junta numa área muito pequena sendo, portanto, um esforço a evitar neste tipo de ligações [6].

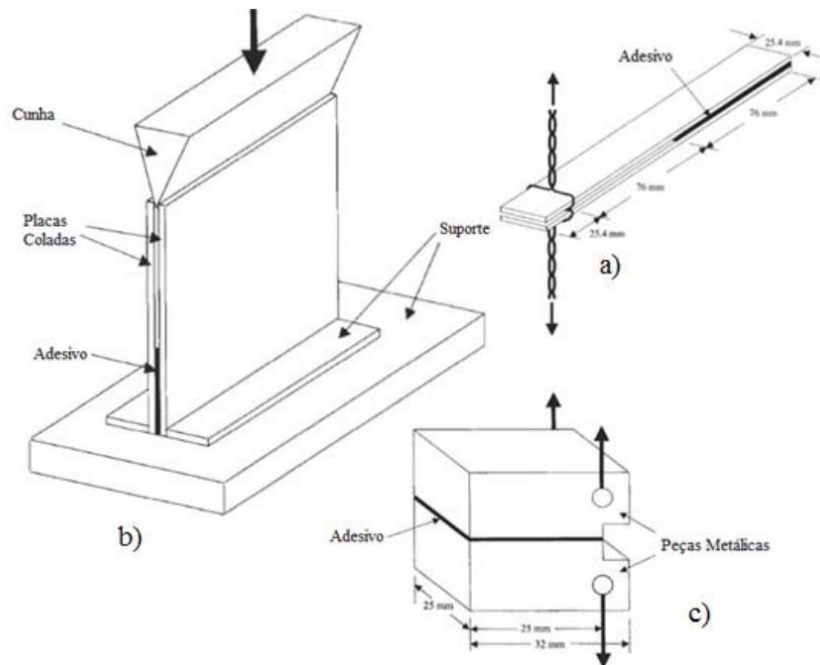


Figura 9 - Ensaios de clivagem: (a) ASTM D3807, (b) ASTM D5041, (c) ASTM D1062 [7].

Da mesma forma, o esforço de arrancamento também é crítico e de evitar nas juntas adesivas. À semelhança da clivagem, também são aplicados esforços nas extremidades dos substratos, sendo que neste caso um ou ambos os substratos são flexíveis, o que resulta em ângulos de arrancamento ainda maiores, como demonstra a Figura 10. Adesivos frágeis e rígidos são especialmente sensíveis a este tipo de esforços, enquanto adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões mais uniforme e favorável, que conseqüentemente aumenta a resistência da junta [4].

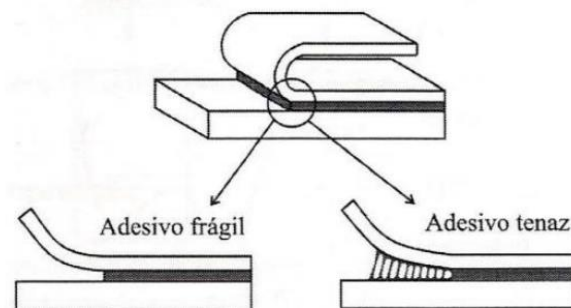


Figura 10 - Juntas sujeitas a esforços de arrancamento [4].

Esforços de corte ocorrem quando é aplicado um carregamento que provoque escorregamento entre dois ou mais substratos. Este tipo de esforços favorece juntas adesivas pois, apesar de as áreas onde vão estar aplicados os maiores esforços serem nos extremos da junta, toda a área de sobreposição está a contribuir para a resistência da junta, e melhora assim a distribuição de tensões. Esta diferença está representada

na Figura 11, e torna-se mais notória com o aumento do comprimento de sobreposição da junta, pelo que neste caso por vezes é mais favorável aumentar a largura da junta [4].

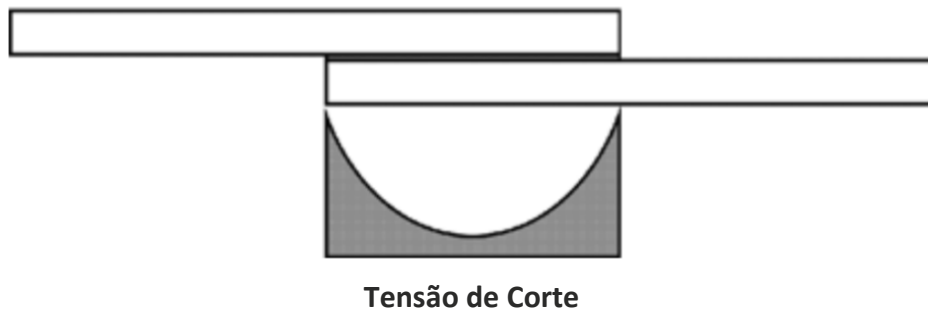


Figura 11 - Distribuição de tensões de corte numa junta adesiva (adaptado de [3]).

Estes esforços resultam de um modo geral em quatro tipos de rotura diferentes, representados na Figura 12: rotura coesiva (b), rotura adesiva (a), rotura mista (d), ou rotura pelo substrato (c). Esta última não acontece na zona ligada, mas sim no substrato, o que não é muito comum pois para isto acontecer significa que a resistência interna do substrato é inferior à da zona de ligação.

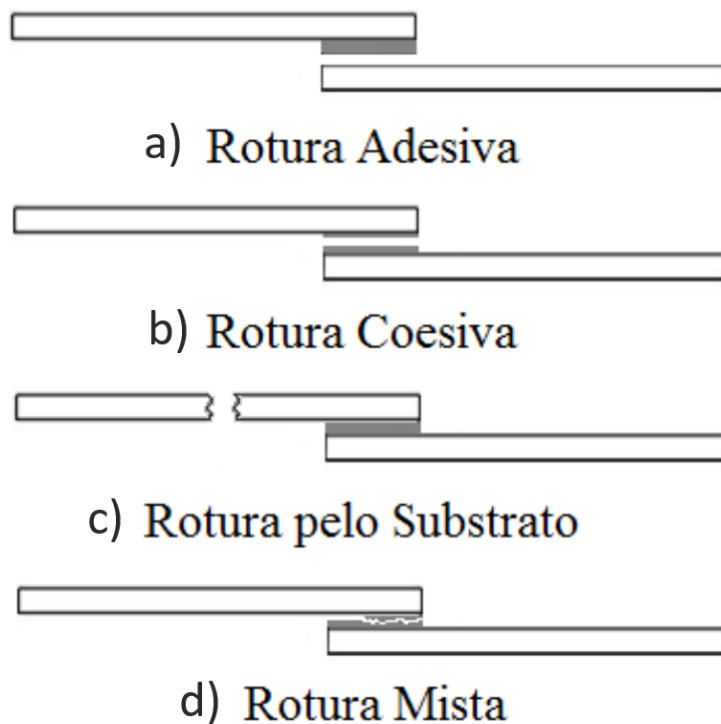


Figura 12 - Tipos de rotura de uma junta adesiva (adaptado de [8]).

Coesão é a propriedade de moléculas da mesma substância se aderirem umas as outras devido a uma atração mútua. A adesão, por sua vez, é a propriedade de diferentes moléculas ou superfícies aderirem umas às outras. Por exemplo, sólidos têm boas propriedades coesivas, de maneira que não aderem a outras superfícies com que entram em contacto. Por outro lado, água possui más propriedades coesivas. As moléculas de água entram em contacto umas com as outras de forma a formar uma esfera (pingas de chuva por exemplo), o que é o resultado de forças coesivas. No entanto, se a água estiver contida num tubo, as moléculas encostadas à superfície do mesmo estão acima relativamente às que se encontram no centro, devido a forças de adesão entre os dois.

A rotura coesiva (b), como sugere a definição do paragrafo anterior, ocorre no interior do adesivo, e ambas as superfícies do substrato retêm uma camada de adesivo, pois a ligação entre elas é mais resistente do que a coesão do próprio adesivo.

A rotura adesiva (a) ocorre na interface entre os substratos e o adesivo, onde o último fica todo numa das superfícies do substrato, enquanto o outro substrato fica isento de adesivo na face previamente colada. Este caso pode acontecer devido a uma fraca preparação da superfície de um dos substratos, e é uma das razões pela qual é tao importante fazer uma preparação e limpeza correta.

Pode ainda existir um caso em que se verifica ambos os casos de rotura, coesiva e adesiva. Este caso é designado por rotura mista (d), e deve-se normalmente à inadequada ou mesmo falta de limpeza da superfície [9].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Não existe um número certo de configurações de juntas adesivas, uma vez que podem apresentar várias formas e geometrias de modo a adaptarem-se à função pretendida. No entanto, as mais comuns e usadas mais regularmente são as nove que estão representadas na Figura 13.

A geometria da junta é um aspeto importante na sua construção pois vai alterar as propriedades mecânicas da ligação, e deve ser escolhida tendo em conta as forças e tensões a que vai estar sujeita. As juntas de sobreposição simples e de topo a topo destacam-se pela simplicidade de fabrico. No entanto, não são as que apresentam melhores resultados, por criarem zonas de concentração de tensões nas extremidades da área ligada, e devido a só poderem ser expostas a certos tipos de esforços. No caso da junta de sobreposição simples, o esforço de corte é o mais aplicável e recomendado. As juntas de sobreposição dupla (JSD), ou até as juntas tubulares, apresentam um melhor comportamento devido a uma melhor distribuição de tensões [9].

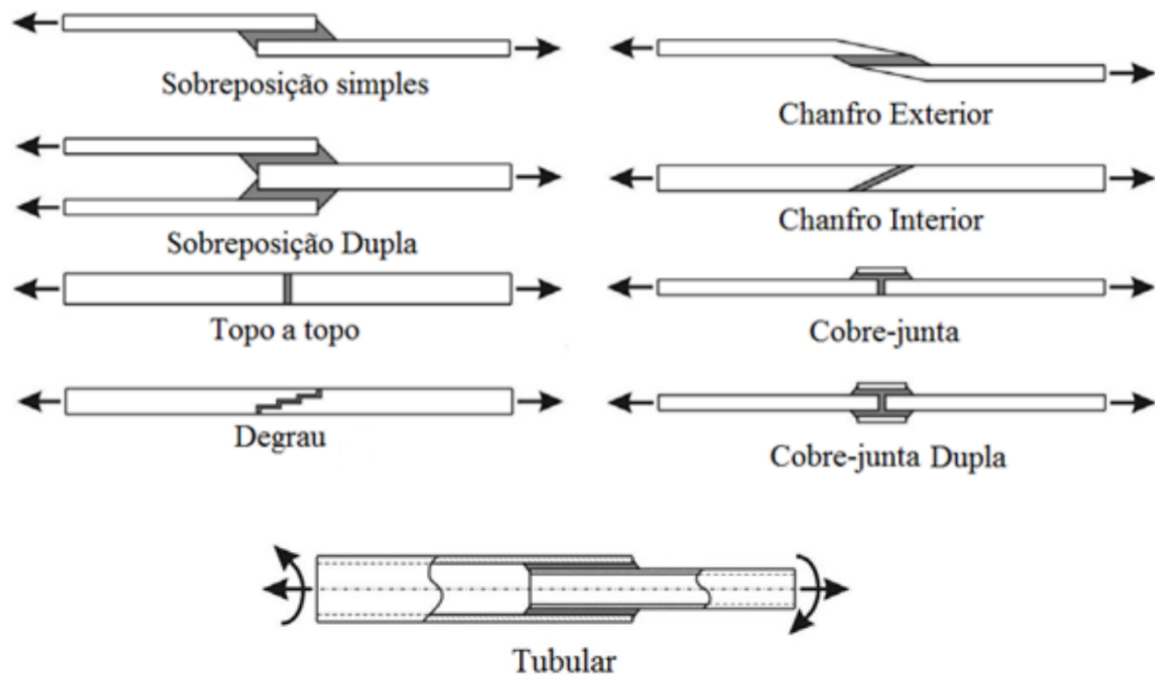


Figura 13 - Tipos de configuração de juntas adesivas (adaptado de [9]).

As juntas de topo a topo têm a vantagem de manter um formato linear e sem nenhuma perturbação visível na geometria da junta mas, como foi referido anteriormente, não resistem a forças que não sejam axiais, pois em qualquer outra direção são criados esforços de clivagem. No entanto, podem ser feitas alterações na junta de modo a melhorar este aspeto, como criar um chanfro interior, fazer a junta em degrau, ou ainda de macho-fêmea, como esta representada na Figura 14. Esta última é a que resulta em melhores comportamentos mecânicos, pois as forças laterais são absorvidas pelo próprio substrato, obrigando o adesivo a aguentar praticamente só esforços de corte. Por outro lado, este tipo de junta tem necessariamente de ser maquinada, e é necessário algum espaço para realizar a tarefa, pelo que não é possível usar sempre este método [3].

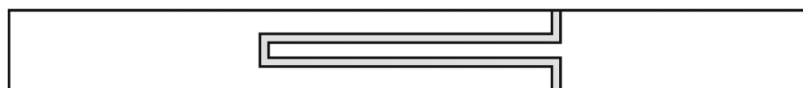


Figura 14 - Junta adesiva com macho-fêmea (adaptado de [3]).

As juntas de sobreposição simples são as mais comuns por serem as mais fáceis de fabricar. No entanto, também se caracterizam pelo desenvolvimento de elevados esforços de arrancamento. Para evitar tais esforços, foram criadas várias modificações a este tipo de junta. Por exemplo, caso o substrato seja fácil de deformar, pode ser considerada uma junta simples com ressalto, como mostra a Figura 15. Isto permite

alinhar mais facilmente a carga aplicada, de modo a que sejam evitados outros tipos de esforços ao adesivo. A junta de sobreposição dupla tem o mesmo fim, no entanto precisa de mais um substrato, o que pode encarecer a junta, e torna o processo mais demorado e difícil de executar. Apesar das juntas de sobreposição dupla apresentarem uma configuração simétrica, estas não são isentas de flexão. De facto, na linha de adesão podem desenvolver-se tensões de tração e compressão, quando os substratos exteriores sofrem flexão [3].

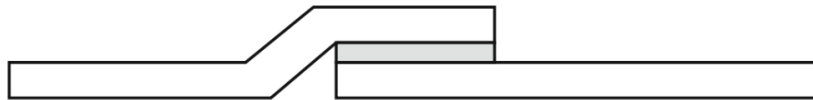


Figura 15 - Junta de sobreposição simples com ressalto (adaptado de [3]).

Mais recentemente têm sido estudada e usada a junta de sobreposição simples ondulada (Figura 16), que em estudos feitos através de elementos finitos, mostram que melhora significativamente a resistência da ligação, e em certos casos pode aumentar até 71% a capacidade da junta aguentar cargas [3].

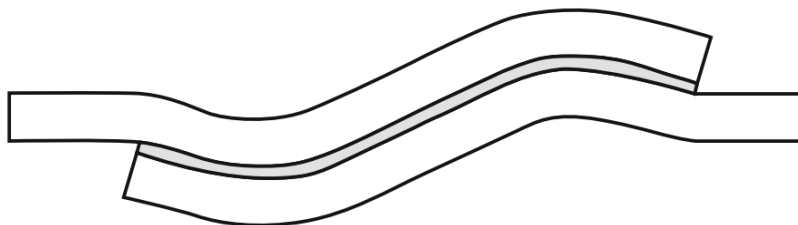


Figura 16 - Junta adesiva de sobreposição simples ondulada (adaptado de [3]).

A junta com chanfro exterior representada na Figura 13 foi desenvolvida para reduzir os picos de tensão que são normalmente criados nas extremidades das juntas de sobreposição simples. Com esta geometria ocorre uma diminuição da concentração de tensões e consegue-se uma distribuição mais uniforme de tensões na ligação [10].

As juntas com reforço, como é o caso da cobre-junta ou cobre-junta dupla, representadas na Figura 13 e Figura 6, aumentam bastante a resistência da ligação, comparativamente a uma junta de sobreposição simples ou de topo a topo. Para além de serem usadas como reforços, estas juntas têm também a vantagem de também poderem ser usadas como remendos ou para reparações de ligações adesivas danificadas e com sinais de desgaste. A junta com reforço duplo apresenta vantagens à anterior por ter um momento fletor menor, e assim estar menos sujeita a esforços de arrancamento. Este tipo de esforço demonstrado na Figura 17 a) pode ainda ser minimizando utilizando diferentes geometrias e métodos, na Figura 17 b); c); e d)

estão representadas três formas de aumentar a resistência de uma junta, no caso de uma placa fina ser ligada a um componente mais espesso [3].

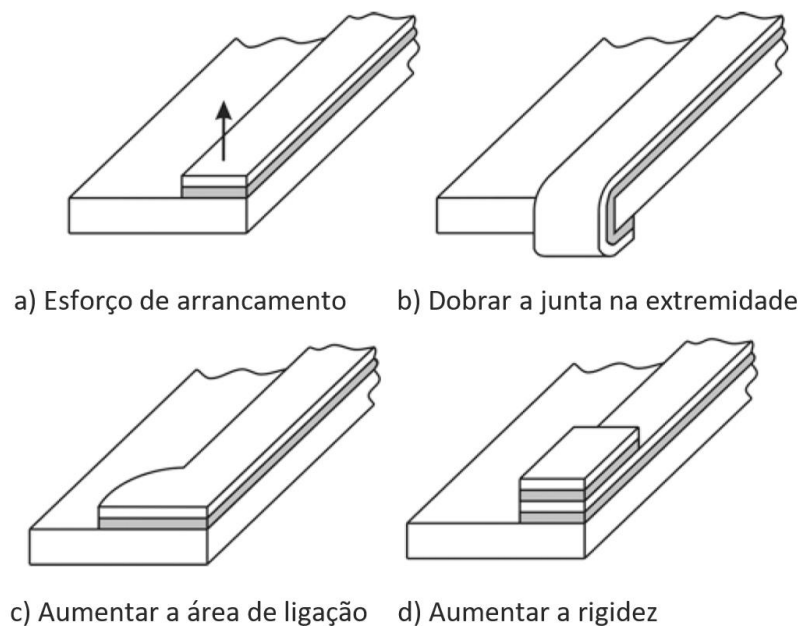


Figura 17 - Métodos usados para diminuir esforços de arrancamento em juntas adesivas com um aderente fino e uma base rígida (adaptado de [3]).

2.1.5 Juntas adesivas com defeitos

Uma das limitações das juntas adesivas é a dificuldade de prever a sua resistência após fabricação, devido a defeitos no adesivo que são difíceis de detetar após estar realizada a união [11]. Os defeitos podem ser causados logo durante o fabrico da junta devido a uma má preparação da superfície ou a uma dispersão pouco cuidada do adesivo, ou devido ao desgaste e degradação da junta ao longo do tempo de utilização.

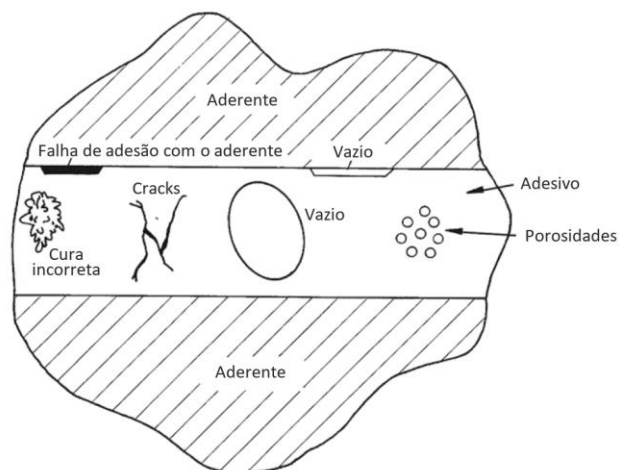


Figura 18 – Ilustração de vários tipos de defeitos possíveis de serem encontrados na camada de um adesivo (adaptado de [3]).

A Figura 18 representa vários tipos de defeitos em juntas adesivas. A porosidade é causada por voláteis e ar entranhado no adesivo, e é um defeito que até certo grau, está sempre presente na junta. As fissuras estão normalmente relacionadas com problemas na cura, como tensões causadas pela expansão térmica, ou por forças indevidas aplicadas na junta. Áreas com cura mal feita são usualmente causadas pela mistura mal feita do adesivo usado, ou ainda devido a insuficiente exposição térmica. Este defeito é por vezes corrigido sozinho com o tempo, se a reação química continuar e o processo de cura for feito lentamente. Os vazios também podem acontecer devido as reações químicas que ocorrem durante o processo de cura do adesivo, no entanto os de maiores dimensões são causados por bolhas de ar presas durante a o processo de colagem, ou devido a falta de adesivo aplicado na junta [3].

A Figura 19 demonstra o que pode acontecer numa junta tubular adesiva quando os substratos se movem antes de o adesivo ter terminado por completo o processo de cura. Estes vazios na área de contacto entre o adesivo e o substrato permitem a passagem de água ou outros fluidos, e zonas críticas para iniciar cracks. A forma mais perigosa em que este tipo de defeito se pode manifestar, é quando o adesivo e o aderente estão aparentemente em contacto, mas não existe uma ligação rígida entre eles. Este defeito normalmente é causado devido a uma má preparação da superfície [3].

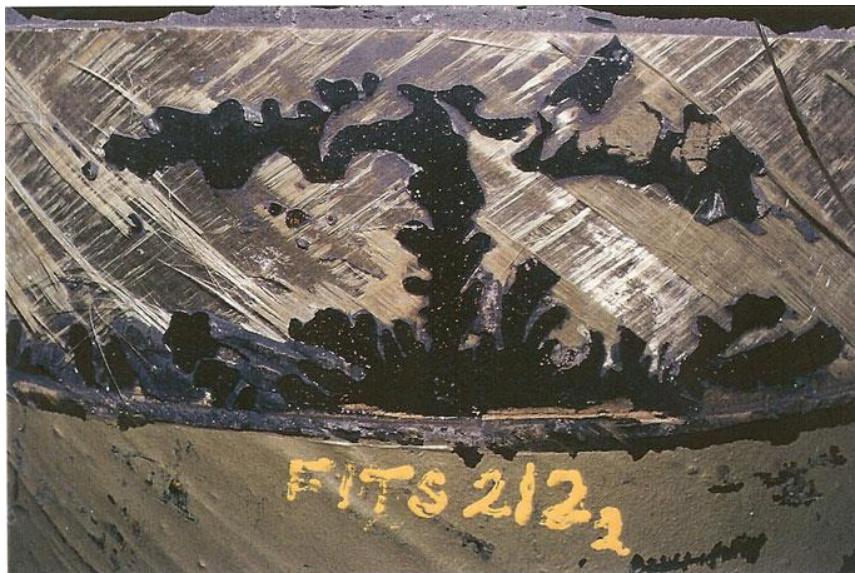


Figura 19 - Vazio na superfície de contacto entre o adesivo e o substrato [3].

De todos os defeitos possíveis de acontecer na junta, defeitos do adesivo ou substrato, que originam uma ligação fraca, vazios na junta, que podem ser causados durante a cura do adesivo ou por bolhas de ar presas durante a colagem, e falhas de adesivo são os mais comuns [12]. Estes três tipos de defeitos estão representados na Figura 20.

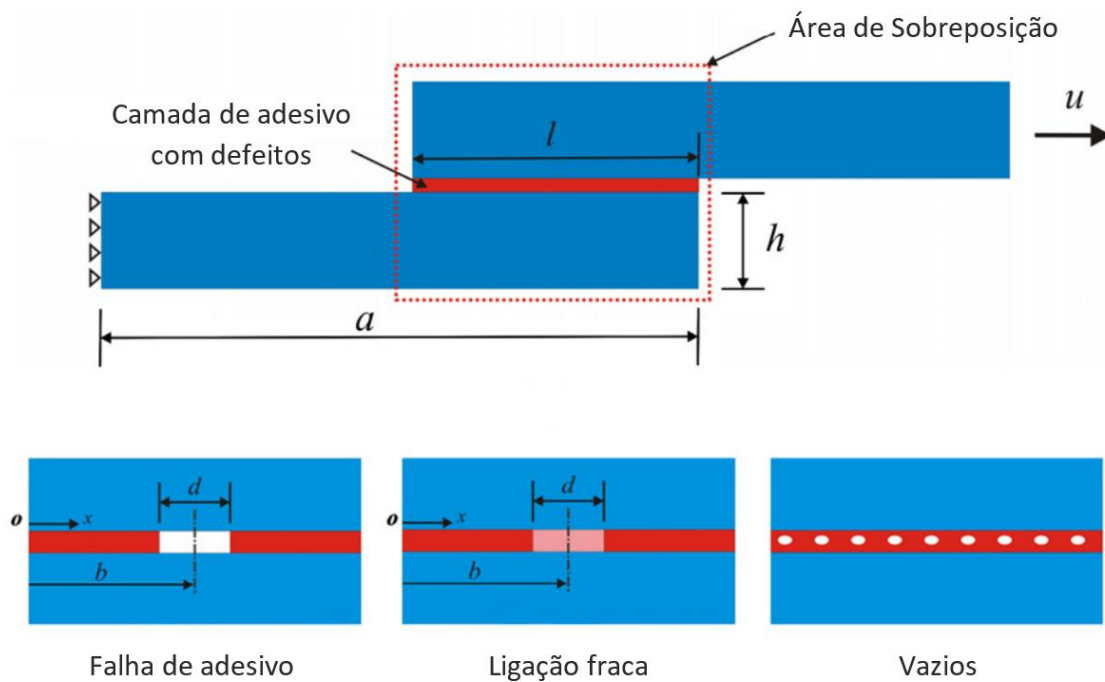


Figura 20 - Modelo de uma junta adesiva demonstrando três tipos de defeitos possíveis (adaptado de [12]).

Existem, no entanto, alguns métodos para detecção de falhas nas juntas. Heslehurst [13] usou interferometria holográfica, que consiste na sobreposição de dois hologramas de um mesmo objeto, registados antes e depois deste sofrer uma pequena deformação, de modo a estudar a resposta estrutural de defeitos de ligação na junta. Yang et al. [14] usaram uma técnica de amortecimento de vibrações e medição de frequências de modo a avaliar defeitos na junta sem a destruir. Tserpes e Labeas [15] também realizaram testes não destrutivos através do uso de imagens de raio-X e de C-scan das juntas, de modo a verificar se o adesivo se espalhou uniformemente por toda a superfície de ligação. No entanto, um dos modos mais comuns, fáceis, e fidedignos de prever defeitos e de garantir a resistência uma junta, é simular uma ligação adesiva similar à usada, e expô-la às mesmas condições de utilização da junta real. Desta maneira, pode-se testar a junta duplicada para garantir que esta mantém as propriedades pretendidas, e não acumulou defeitos. Esta pratica de criar uma segunda junta similar para testes é muito usada na área da construção civil, por ser requerido normalmente alta segurança nas construções feitas, e por estarem em muitos casos expostas a condições ambientais severas durante muitos anos [3].

Falhas ou defeitos na camada de adesivo são menos graves e apresentam menores consequências para a resistência da junta quando se encontram no centro da área ligada, visto que os pontos principais de tensão estão nas extremidades da ligação [16].

Xu e Wei [12] estudaram os três tipos de defeitos referidos na Figura 20. No caso da falha de adesivo, foram testadas várias juntas, com defeitos desde 12,5% até 75% da área de ligação da junta. É de ter em atenção que, estes defeitos estão localizados no

centro da junta (o eixo central da junta coincide com o da falha). Foi também testada uma junta sem defeito de modo a mostrar a discrepância entre um caso de uma junta bem colada (sem defeito) com as restantes representadas na Figura 21.

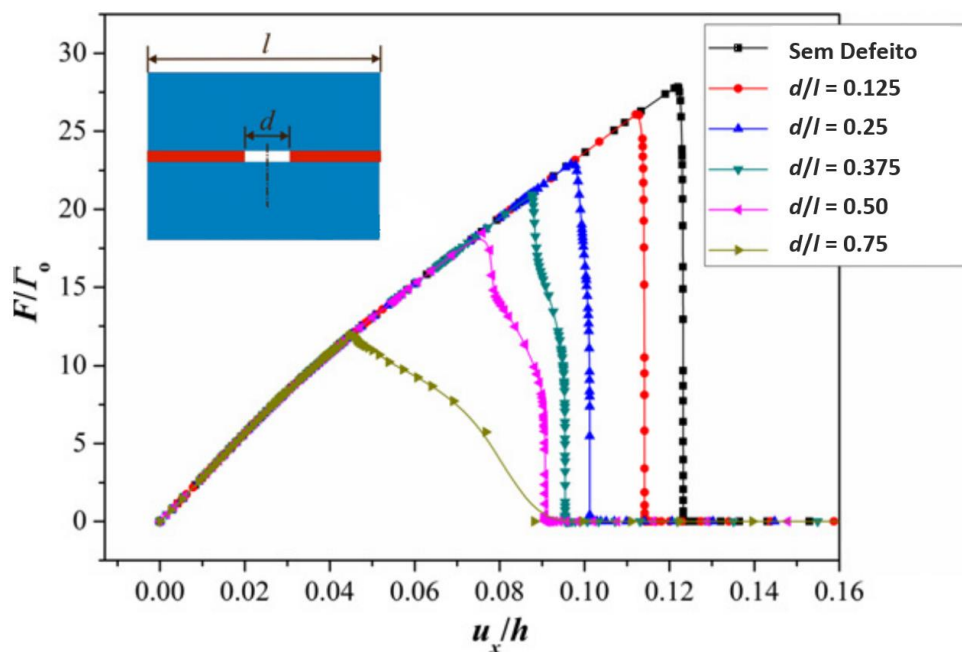


Figura 21 - Carga normalizada em função do deslocamento para diversos tamanhos de falha de adesivo (adaptado de [12]).

Como era de esperar numa primeira etapa da deformação as curvas $P-\delta$ apresentam um comportamento similar. Dito isto, quanto maior for o tamanho da falha menor é o valor da força de cedência da junta. No entanto, a forma com as curvas $P-\delta$ se comportam a partir destes pontos de cedência é menos espetável e varia com os diferentes tamanhos de falha. As curvas $P-\delta$ de juntas com comprimento de falha menor apresentam uma rutura abrupta, enquanto as curvas com defeitos de maiores dimensões apresentam uma descida muito menos acentuada. Esta diferença sugere que o modo de dano muda de fratura frágil para fratura dúctil com o aumento do comprimento de sobreposição do defeito.

Os testes experimentais feitos às mesmas juntas estudadas, confirmaram os resultados obtidos numericamente. Na Figura 22 é possível observar as diferenças entre as cargas máximas obtidas pelos dois modos, sendo que o resultado mais preciso foi o obtido sem falha. Isto vem a demonstrar a dificuldade em criar de forma precisa este tipo de defeitos durante o fabrico das juntas [17].

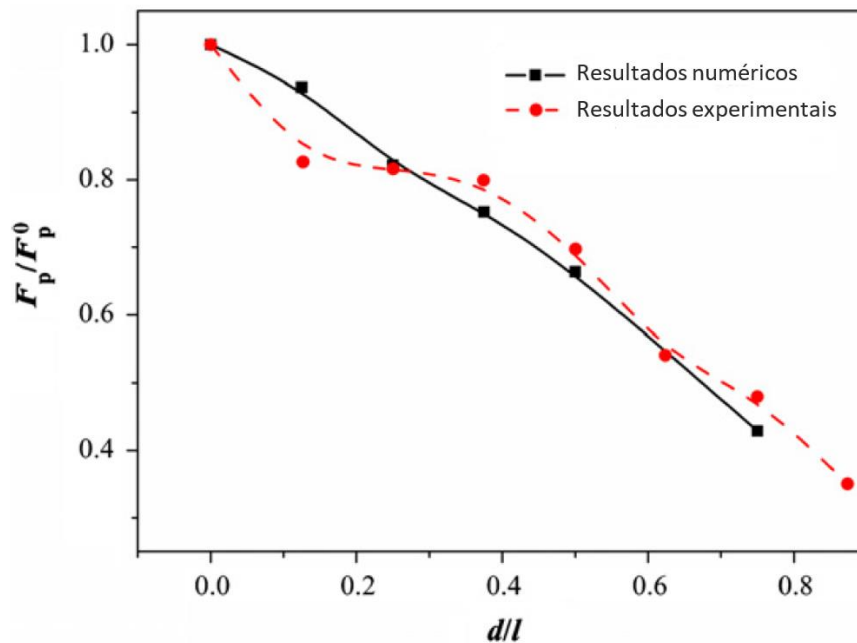


Figura 22 – Comparação de carga máxima normalizada para cada tamanho de defeito obtidos através de testes experimentais e numéricos (adaptado de [12])

A influência da localização do defeito tem também relevância no resultado final. O gráfico da Figura 21 mostra as diferenças entre diferentes tamanhos de falha, todos com o centro no eixo de simetria da junta (distância b igual para todos). Nos gráficos da Figura 23, é possível observar as diferenças relacionadas com o posicionamento do defeito. No geral, não existe uma influência muito significativa na variação do local do defeito na carga máxima suportada pela junta. No entanto, tendo em consideração que quando a junta adesiva é esticada, as tensões normais e de corte atingem os valores mais elevados nas extremidades da área de ligação, e valores significativamente mais baixos no centro da mesma [12].

Goh et al. [18] investigaram a resistência de juntas adesivas do tipo chanfro interior, com diferentes tamanhos de falhas, usando métodos experimentais, analíticos e simulações numéricas. Os resultados experimentais mostraram que a força necessária para a fratura completa das juntas com falhas é dependente do ângulo da camada adjacente à ponta da fenda, e obviamente do tamanho da falha. Através da análise fractográfica, verificou-se que a fratura das juntas ocorreu no adesivo (fratura coesiva), a uma distância que é uma fração muito pequena da espessura da camada. Esta falha perto da interface do adesivo com o compósito foi dominada principalmente pela falha de corte nas camadas de 0° e 45° e pela falha à tração nas camadas de 90° .

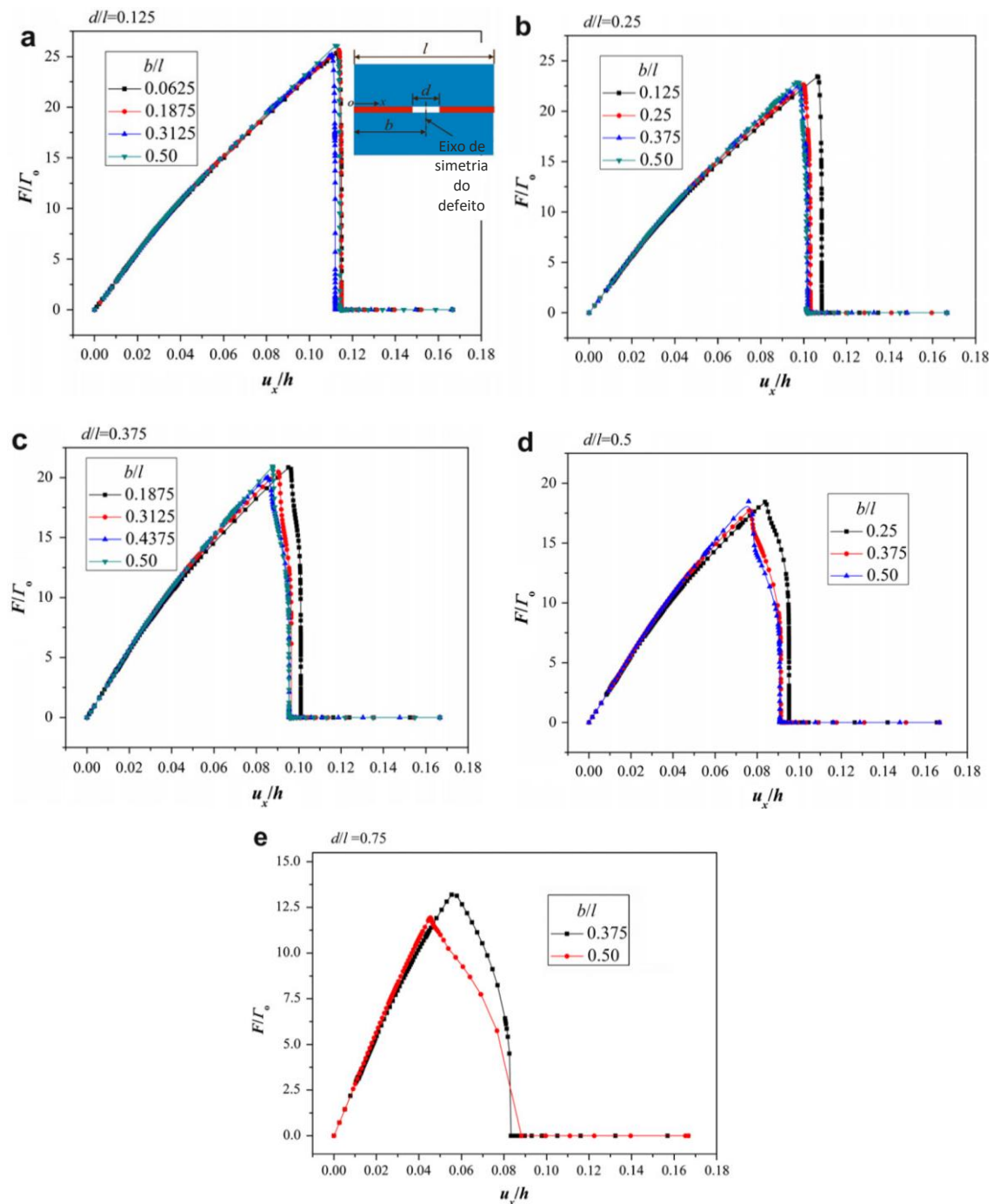


Figura 23 - Carga normalizada em função do deslocamento, para diferentes posicionamentos do defeito com várias dimensões d/l : (a) 0.125; (b) 0.25; (c) 0.375; (d) 0.5; e (e) 0.75.

2.2 Juntas adesivas tubulares

As juntas tubulares podem ter várias configurações, como por exemplo, ter a extremidade quadrada, em chanfro, ou até recorrer ao uso de cobre juntas. Na Figura 24 estão representados alguns modos de união. No entanto, o tipo de junta mais comum são juntas tubulares com sobreposição simples, onde um dos tubos tem

diâmetro maior, e o outro um diâmetro menor, como representado na Figura 25 (a). Este método tem como principal vantagem sobre os restantes o facto de não ser necessário maquinar as extremidades dos tubos, ao contrario por exemplo, de Juntas tubulares com chanfro que, como o nome indica, é feito um chanfro nas extremidades dos dois tubos a ligar, como representado na Figura 25 (b).

Apesar de não existem tantos estudos feitos a este tipo de juntas como a juntas de sobreposição simples, os mecanismos que levam a que existam concentrações de tensões são os mesmos [3].

Estudos analíticos de modelos de juntas tubulares já foram realizados e aprofundados de modo a encontrar o modelo ideal e a aperfeiçoar este tipo de ligação. Lubkin e Reissner [19] estudaram modelos sobre o efeito de esforços axiais, Adams et al. [20] analisaram modelos sobre esforços de torção, Terekhova e Skoryi [21] investigaram o efeito da pressão interna e externa, e ainda Kukovyakin e Skoryi [22] realizaram estudos de juntas adesivas tubulares sujeitas a momentos e forças assimétricas.

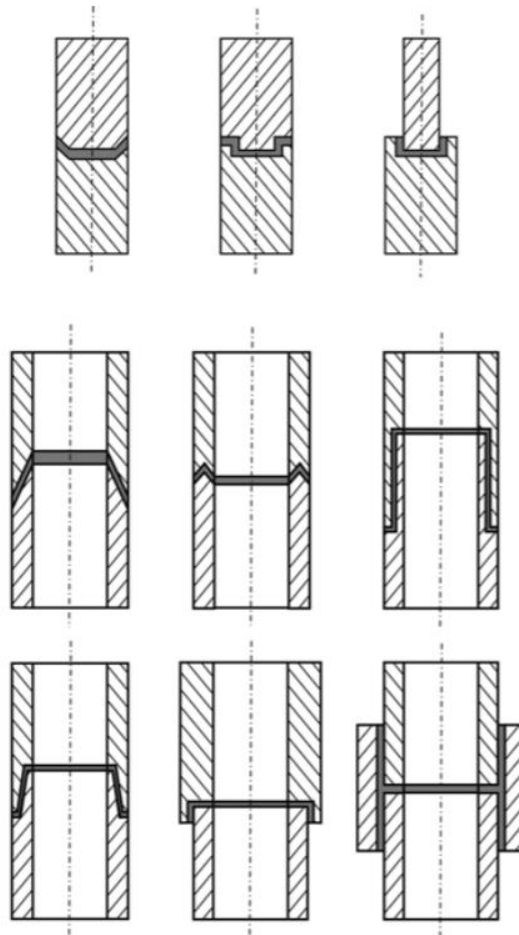


Figura 24 – Diferentes tipos de uniões de juntas tubulares adesivas para cargas axiais e torsionais (adaptado de [3]).

As juntas tubulares resultam numa boa resistência a esforços de tração e de compressão, desde que não sejam criados esforços de arrancamento causados por desalinhamentos das forças aplicadas relativamente ao eixo de revolução.

Uma forma de eliminar estes esforços de arrancamento, consiste na utilização de chanfros, canais e ressaltos, como representado na Figura 24, o que facilita a montagem dos componentes, e aumenta a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico.

No entanto, a inacessibilidade ao interior da junta dificulta a sua inspeção. Defeitos comuns são o incorreto preenchimento da área de colagem e uma distribuição pouco homogénea do adesivo pela área a ser ligada do substrato devido à geometria excêntrica do tubo, que dificulta a aplicação de adesivo na junta. Uma forma simples e eficaz de assegurar que o adesivo preenche toda a cavidade é a utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar durante o processo de colagem e de cura [10].

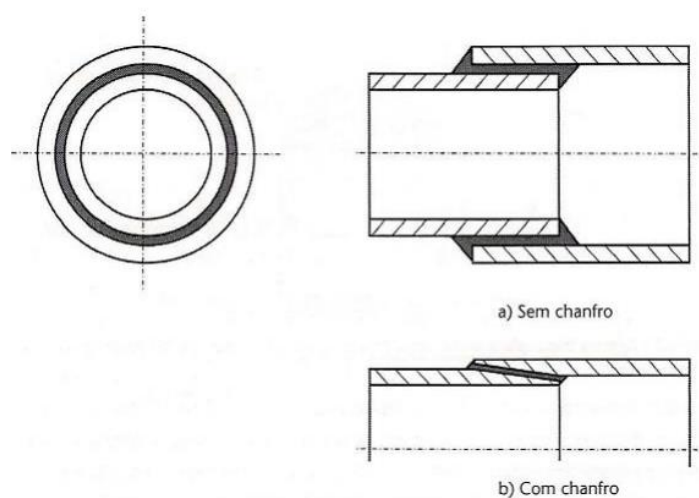


Figura 25 - Juntas tubulares com chanfro (a) e sem chanfro (b) (adaptado de [3]).

2.2.1 Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração

As juntas adesivas oferecem inúmeras vantagens, mas analisar o seu comportamento mecânico torna-se por vezes difícil, principalmente devido a pontos singulares de tensão causados por defeitos nas extremidades da junta. Existem alguns estudos de juntas tubulares adesivas submetidas a esforços de tração como o de Alwar e Nagaraja [23] que estudaram juntas tubulares através do método de elementos finitos. Ficou demonstrado que, tendo em consideração o comportamento viscoelástico do adesivo é possível prever uma redução significativa da tensão nas extremidades do adesivo. Mais recentemente têm sido realizados vários estudos de que comparam resultados experimentais com testes analíticos e numéricos [24, 25]. Nemes e Lachaud [26] realizaram estudos analíticos a juntas tubulares sujeitas a esforços de tração, como

mostra a Figura 26, tendo em consideração a tensão radial (σ_{rr}) na junta. Foi concluído que os valores máximos de tensão $\sigma_{\theta\theta}$ no adesivo são obtidos nas extremidades do mesmo, resultando de aproximadamente 40% da carga aplicada. É possível observar dois picos de tensão de corte (τ_{rz}) a distâncias iguais das extremidades sendo que, o valor de pico é aproximadamente 8% da carga aplicada. Foi, portanto, concluído que tendo em consideração tensão radial (σ_{rr}) no modelo da junta sobre esforços de tração, esta propriedade tem influência na tensão circunferencial ($\sigma_{\theta\theta}$), e na forma como a tensão de corte (τ_{rz}) se distribui na junta adesiva.

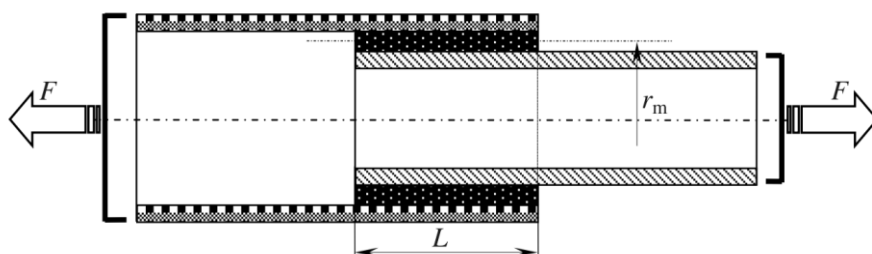


Figura 26 - Esboço de uma junta tubular adesiva sujeita a um esforço de tração [26].

Labbé e Drouet [27] investigaram o efeito da alteração de vários parâmetros geométricos em juntas tubulares adesivas através do método de elementos finitos. A Figura 27 mostra o esquema de uma junta tubular de sobreposição simples a sofrer um esforço de tração com os vários parâmetros geométricos representados.

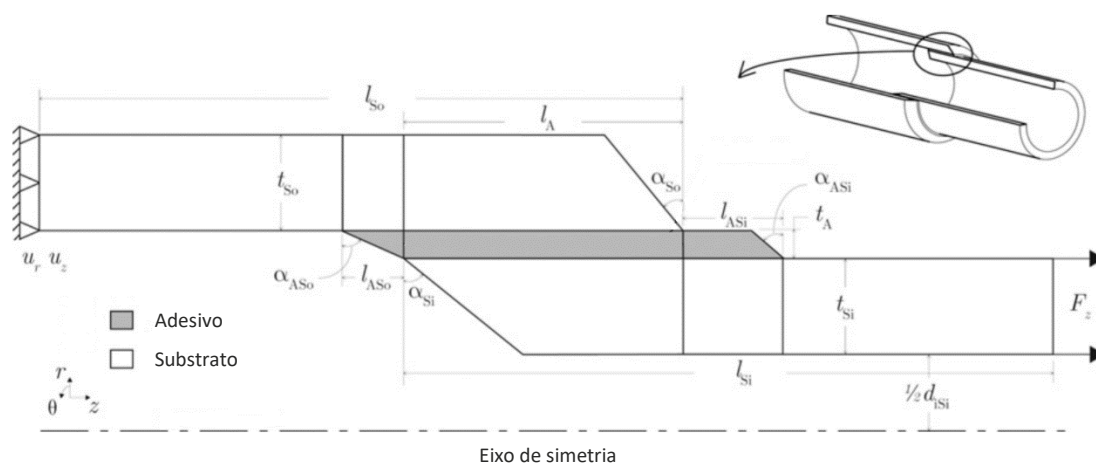


Figura 27 - Parâmetros geométricos de uma junta tubular adesiva (adaptado de [27]).

Através do aumento da espessura dos substratos, t_{Si} e t_{So} , é possível reduzir a tensão de corte no adesivo, e a tensão normal também diminui nas extremidades da área ligada. É de notar que, a tensão normal é menos influenciada pela espessura dos substratos no centro da camada adesiva do que nas suas extremidades (Figura 28).

Para ângulos de chanfro na extremidade dos substratos entre 0° e -45° , α_{Si} e α_{So} , não é obtida uma influência significativa na distribuição da tensão de corte no adesivo. No entanto, o mesmo não acontece com a tensão normal instalada no adesivo. Com o aumento do ângulo do chanfro, aumenta a tensão normal na camada de adesivo na extremidade do substrato interior, enquanto o resto do adesivo mantém uma distribuição de tensões idêntica (Figura 29). Isto indica que a maior influência causada pela geometria dos substratos é a sua espessura.

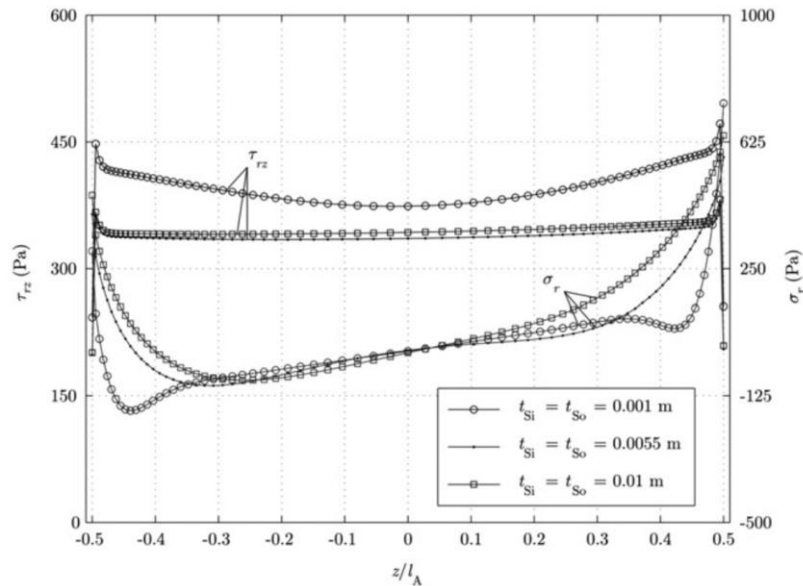


Figura 28 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes espessuras de substrato, t_{Si} e t_{So} [27].

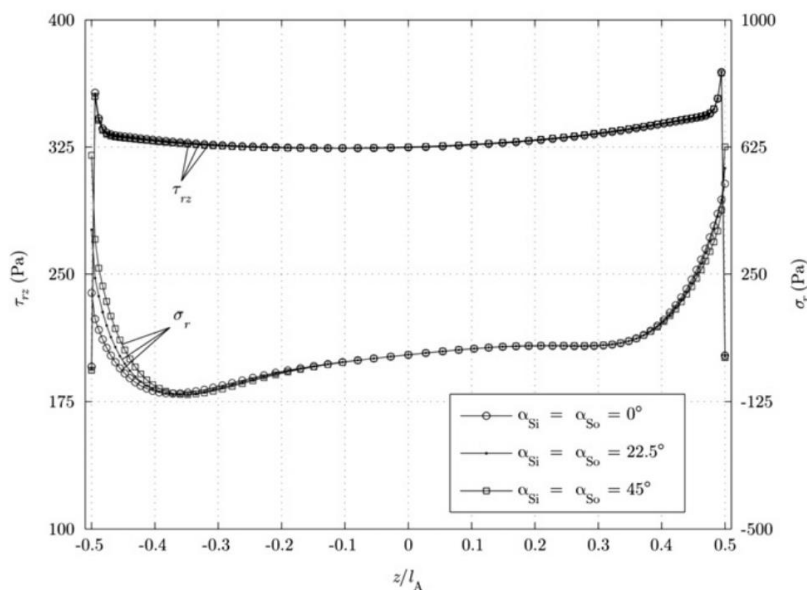


Figura 29 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes ângulos de chanfro na extremidade do substrato, α_{Si} e α_{So} [27].

É possível reduzir a tensão de corte com o aumento do comprimento das extremidades do adesivo, l_{ASi} e l_{ASo} (Figura 30). A tensão de corte atinge um pico máximo nas extremidades da junta adesiva mas, com excesso de adesivo, a distribuição de tensões é mais suave.

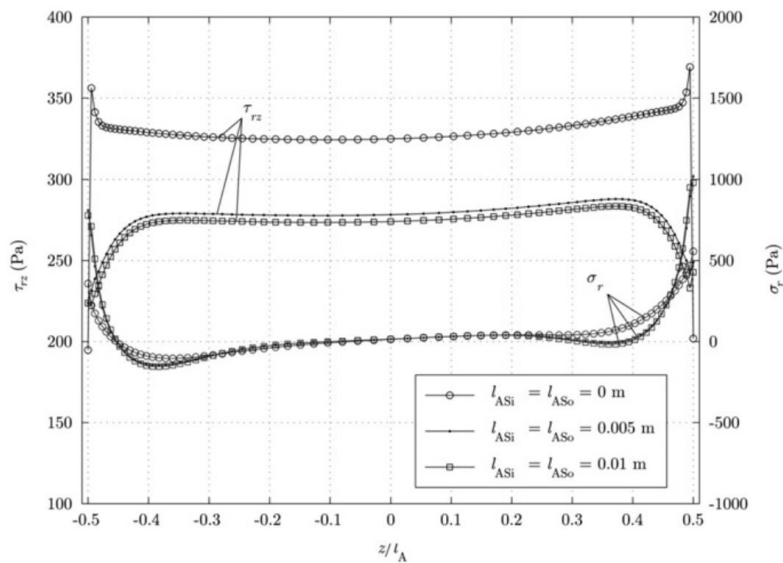


Figura 30 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes comprimentos das extremidades do adesivo, l_{ASi} e l_{ASo} [27].

Quando l_{ASi} e l_{ASo} são nulos, a presença de um ângulo de chanfro nas extremidades do adesivo reduz a tensão de corte ao longo de todo o comprimento da ligação, particularmente nas duas extremidades. No entanto, este ângulo não tem uma influência notória na distribuição da tensão normal (Figura 31).

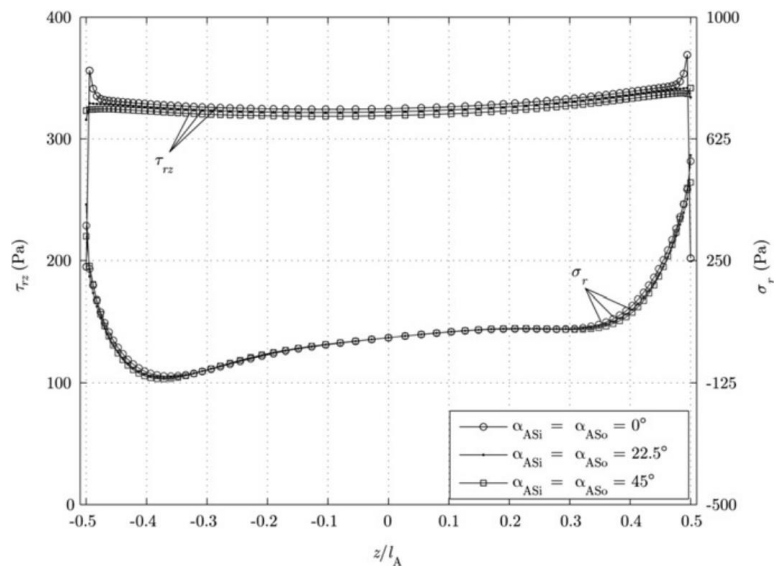


Figura 31 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes valores de ângulos na extremidade do adesivo, α_{ASi} e α_{ASo} [27].

A tensão de corte e a tensão normal diminuem com o aumento do diâmetro interno do substrato tubular, uma vez que este diâmetro está obviamente relacionado com a área a ser ligada pelo adesivo. Por outras palavras, aumenta a superfície adesiva (Figura 32).

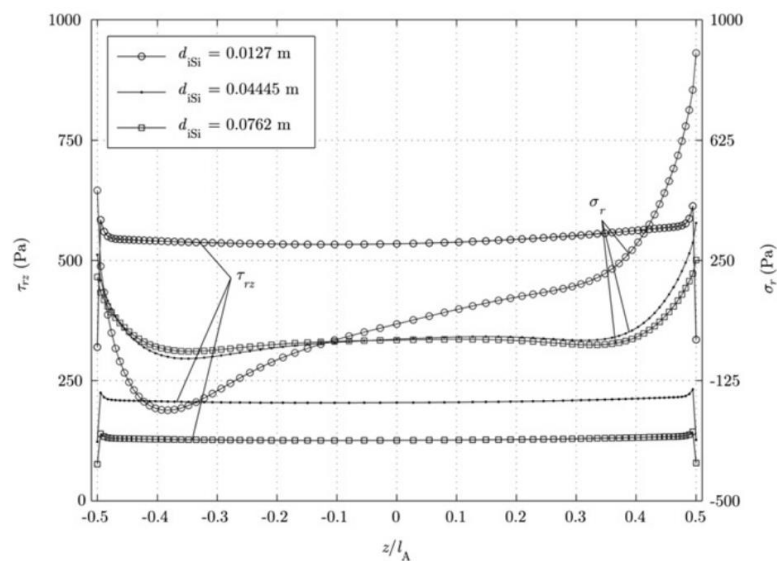


Figura 32 - Tensão de corte e tensão normal ao longo do comprimento de sobreposição para diferentes valores de diâmetro interno do tubo, d_{iSi} [27].

Em última análise, todos os parâmetros geométricos têm uma influência perceptível na tensão normal e/ou de corte, exceto pelo ângulo de chanfro na extremidade dos substratos. Consequentemente, existem oito parâmetros geométricos que devem ser considerados durante o processo de otimização: espessura dos substratos t_{s0} e t_{si} , espessura do adesivo t_A , comprimento de sobreposição do adesivo l_A , ângulos de chanfro na extremidade dos substratos α_{si} e α_{s0} , comprimento das extremidades do adesivo l_{Asi} e l_{As0} , ângulo de chanfro nas extremidades do adesivo α_{SAi} e α_{SA0} , diâmetro interno do substrato tubular d_{iSi} , comprimento do substrato tubular l_{s0} e l_{si} .

2.2.2 Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção

As juntas tubulares adesivas obtêm bons resultados quando expostas a esforços de torção, devido à sua configuração geométrica que fornece uma área de ligação maior do que outro tipo de juntas num espaço limitado. Nestas condições (torção) o adesivo é submetido exclusivamente a esforços de corte [28].

Hipol [29] foi um dos primeiros a investigar e estudar a otimização de juntas adesivas tubulares simples através do método de elementos finitos. Através do uso de modelos de juntas adesivas criadas em computador e sujeitas a torção, foi-lhe possível, realizar um esquema de otimização para minimizar as tensões máximas criadas no adesivo. Esses modelos permitiram-lho alterar a espessura do adesivo e dos aderentes, e ainda

a rigidez específica e a geometria das extremidades do aderente, de modo a avaliar a influência destas propriedades na distribuição de tensões do adesivo em toda a área ligada. Foi concluído que, existe um comprimento de sobreposição (L_0) ideal, e que de forma a reduzir a tensão de corte máxima (τ_{re}^{max}), a espessura do adesivo deve ser maximizada e o desequilíbrio entre a rigidez dos aderentes deve ser reduzida. Sendo que, uma das observações realizadas foi de que a concentração de tensões de corte máximas na camada de adesivo está localizada na extremidade ligada ao substrato menos rígido.

Hosseinzadeh e Taheri [30] estudaram o efeito do comprimento de sobreposição em juntas tubulares adesivas sujeitas a uma carga estática de torção. Foi usado um modelo de elementos finitos (Figura 33), de uma junta que liga substratos de alumínio com substratos feitos de materiais compósitos. Sendo que, foram também realizados testes experimentais para verificação e validação dos resultados produzidos em modelos numéricos.

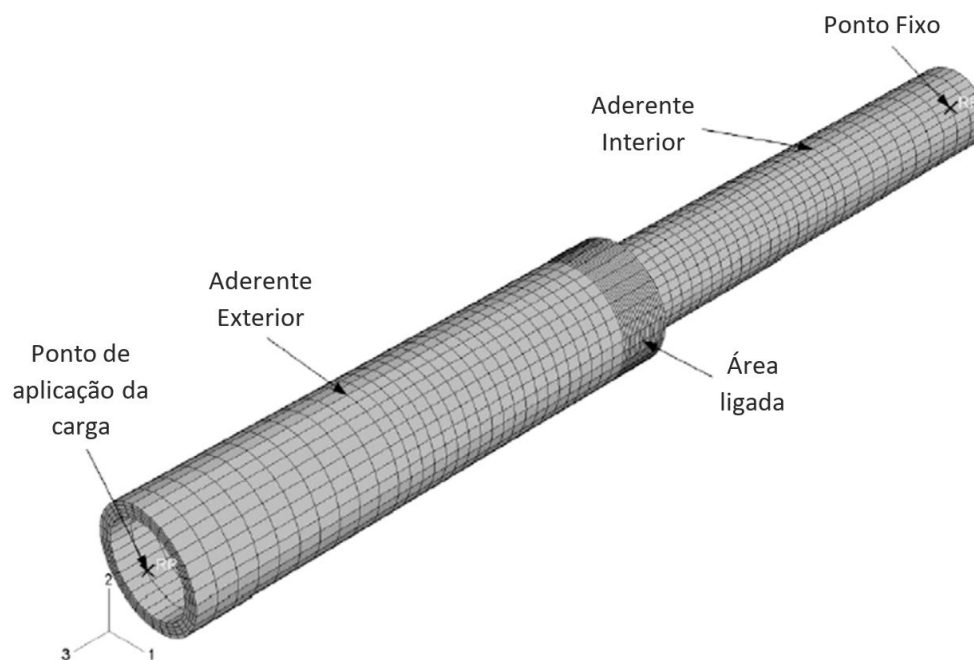


Figura 33 - Modelo de elementos finitos de uma junta tubular adesiva (adaptado de [30]).

Como ficou demonstrado em trabalhos anteriores, a distribuição das tensões de corte no adesivo ao longo do comprimento de sobreposição não pode ser reduzido de forma muito significativa através do aumento excessivo desse parâmetro. Portanto, a capacidade de torção estática de uma junta composta de substratos de alumínio e compósito aumenta com o comprimento de sobreposição. No entanto este aumento estabiliza a partir de um comprimento funcional. Os resultados obtidos mostraram também que, a resistência da junta é limitada por defeitos originados na sua fabricação. Em especial os vazios que surgem na área de ligação, que nunca foram

exequíveis de eliminar por completo. O tratamento da superfície dos aderentes mostrou-se de grande influência na consistência dos dados experimentais. Assim sendo a simulação de elementos finitos só pode representar o comportamento de juntas que são montadas e preparadas com a melhor execução possível, ou seja, juntas ideais.

2.2.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

A fadiga é caracterizada pela falha de um material sujeito a esforços síclicos, onde a carga máxima pode por vezes, ser significativamente mais baixa do que a especificada para causar a falha estática. Adesivos polímeros, tal como muitos materiais, são suscetíveis a este tipo de esforços, no entanto, se não forem expostas a condições de temperatura e humidade muito acentuadas, apresentam uma boa capacidade de resistência à fadiga quando comparados com outros tipos de ligações [3].

A resistência à fadiga de juntas adesivas é afetada por muitos fatores, como a rugosidade da superfície, tipo de carregamentos impostos à junta, folga da ligação, material dos substratos, geometria da junta, temperatura e humidade de operação, entre outros [31]. Entre estes fatores, a rugosidade de superfície é um dos parâmetros mais importantes no controlo da adesão [6]. O resultado deste parâmetro no efeito da fadiga numa junta adesiva tubular já foi estudado, e foi comprovado que a tensão média era extremamente dependente da rugosidade da superfície e da espessura do adesivo. Um aumento destes dois parâmetros leva normalmente a um decréscimo no valor da tensão de corte [32].

Sekercioglu [33] realizou um estudo com um total de 44 amostras de juntas tubulares adesivas para testes de resistência e fadiga. Metade destas foram testadas estaticamente e a outra metade foi testada dinamicamente sobre condições definidas.

O equipamento de testes usado está representado na Figura 35, e é capaz de gerar cargas dinâmicas e estáticas até 100 kN. Ajustando a força mínima e máxima aplicada aos substratos através de potenciômetros localizados na unidade de controlo, é possível obter a tensão de corte máxima e mínima. As juntas expostas a estes valores de tensão foram danificadas em números de ciclos diferentes. O número de ciclos foi medido usando um contador mecânico. Um aspeto importante tido em consideração durante a preparação das juntas, foi medir a rugosidade de superfície dos aderentes usados após serem maquinados. Para realizar esta medição foi usado um medidor de rugosidade de superfície por contacto, e apesar dos resultados obtidos serem constantes, foi possível garantir que esta variável não terá influência nos testes realizados.

A fiabilidade (R) da junta adesiva tubular é dada pela seguinte expressão:

$$R = P(S > L) = P(S - L > 0) = \int \int f_{S,L}(s, l) ds dl$$

Onde P é a probabilidade, S é a carga de falha, L é a carga aplicada, e a integral dupla tem de ser avaliada sobre a região $[(s,l) | s-l > 0]$. Esta expressão de fiabilidade é possível ser calculada, caso as funções de densidade e de probabilidade S e L sejam conhecidas como $f_S(s)$ e $f_L(l)$, como está demonstrado na Figura 34. Assim, obtém-se as integrais das duas equações.

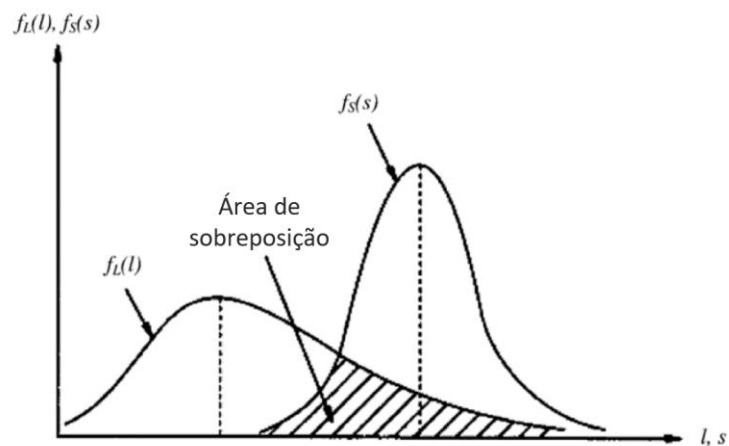


Figura 34 - Funções de densidade de probabilidade S e L (adaptado de [33]).

Através dos testes realizados, foi concluído que dependendo da carga aplicada a fiabilidade das juntas adesivas carregadas dinamicamente é de 92%, e das carregadas estaticamente é de 89%. O método usado neste estudo pode ser usado para verificar a fiabilidade de juntas adesivas tubulares em muitas industriais, tais como ligações de veios, componentes estruturais, entre outros.

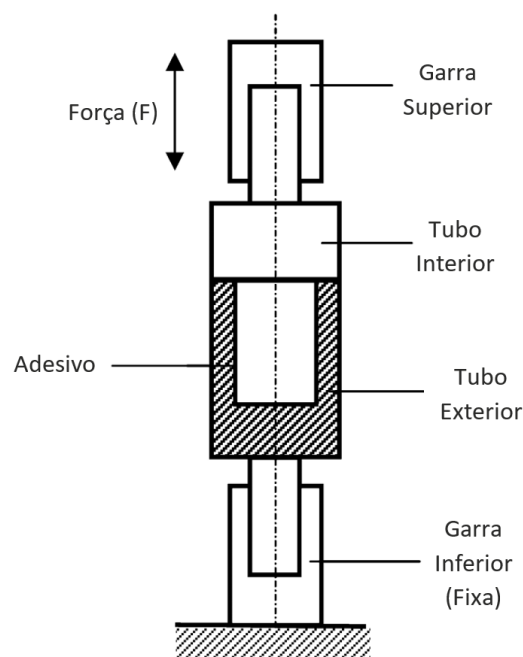


Figura 35 - Esquema de uma junta tubular adesiva exposta a cargas (F) para testes de fadiga (adaptado de [33]).

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

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

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [34], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [35] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, e foi inicialmente aplicada por Harris e Adams [36], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [37]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

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

2.3.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação

ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [34], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [20] usaram o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [38]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [36], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.3.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, e pode apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, estes mantêm-se com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [7]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [8] através do estudo de fraturas em fibras de

vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [9]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [10] e por Rice [11] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura, G_c [12], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

2.3.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com os estudos de Barenblatt [39] e Dugdale [40], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [41].

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [42]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 36), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [43], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [44].

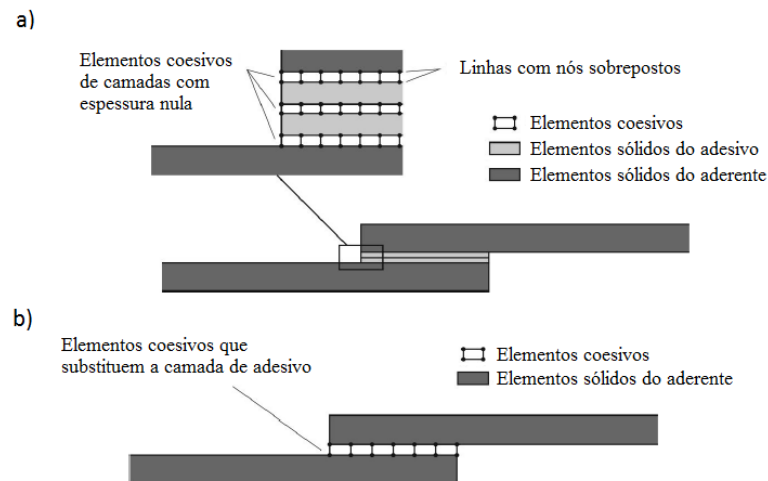


Figura 36 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [45])

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, pelo que conseguem desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [46]. Este modelo está implementado em *software*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D, apresenta uma componente adicional de corte [47].

2.3.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo parabólico [48], triangular [49], exponencial [50], polinomial [51] e trapezoidal [44]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [52].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [53]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [54] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 37).

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [55].

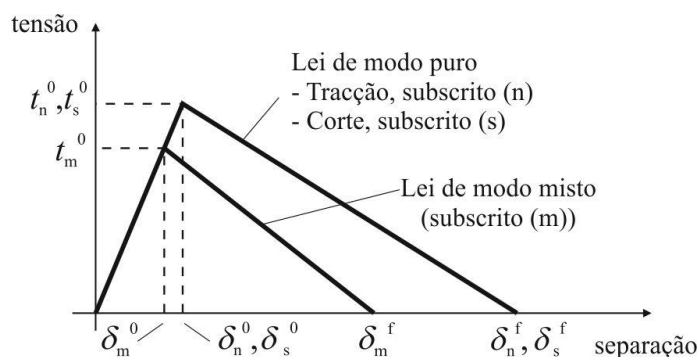


Figura 37 – Modelo coesivo triangular [54, 56]

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [57] e modo II [58].

2.3.3.2 Métodos de estimação das leis coesivas

As análises por MDC permitem explicar o comportamento do dano em juntas adesivas. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [59]. Vários estudos têm sido publicados sobre a definição dos parâmetros coesivos (t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc}). Contudo, segundo Jung Lee et al. [60], alguns parâmetros como t_n^0 e t_s^0 , ainda não se encontram devidamente padronizados. Assim surgem algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método indireto, que apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns foram trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB, ENF e JSS, alcançando bons resultados [44, 61].

O método de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. No entanto, este método é particularmente crítico devido a desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e à ligação adesiva [62]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivo entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as

fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [63]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva $P-\delta$, o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [64]. Por outro lado, o método direto define a forma exata das leis coesivas, na medida que este método calcula as leis coesivas do adesivo em tração e corte a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [62], pela diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$ (em que δ_n é deslocamento em tração e δ_s é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC, G_{Ic} e G_{IIc} são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de G_{Ic} e G_{IIc} , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande plastificação e, nestas condições, o integral- J surge como alternativa para definição de G_{Ic} e G_{IIc} [45].

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de G_{Ic} e G_{IIc} são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar G_{Ic} pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter G_{Ic} , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- J [65]. Rice [66] tornou possível obter uma expressão para o valor de G_{Ic} em provetes DCB através do método de integral- J , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [67]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [58]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [68], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 38. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato (h), de forma a evitar deformação plástica

dos substratos durante o ensaio, pela equação (1), em que T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, a é o comprimento da fenda, B é a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (1)$$

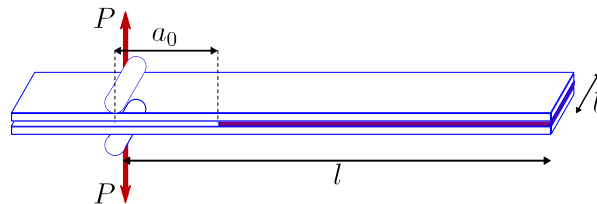


Figura 38 – Geometria do provete DCB [69]

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento da pré-fenda inicial (a_0) definido, onde a meio é aplicada uma carga P (Figura 39). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o a_0 seja pelo menos igual a 70% do comprimento total do provete ($2L$) [70]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de a durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de G_{Ic} por esta medição [71].

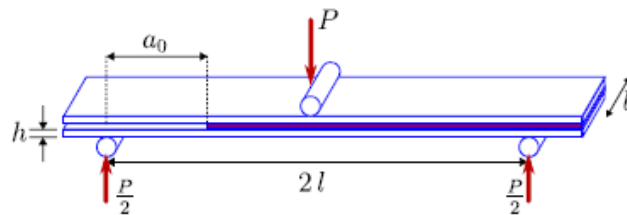


Figura 39 – Geometria do provete ENF [69]

2.3.3.3 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [72] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [73] 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 [41].

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 [74]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [75] ou do número de ciclos para análises de fadiga [76, 77]. 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 trajetórias pré-definidas [78].

Hua et al. [79] 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. [80] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.3.3.4 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. Este método é 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 discontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [81]. Belytschko e Black [82], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [83]. 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 [84].

Campilho et al. [85] 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 com os MDC (Figura 40). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

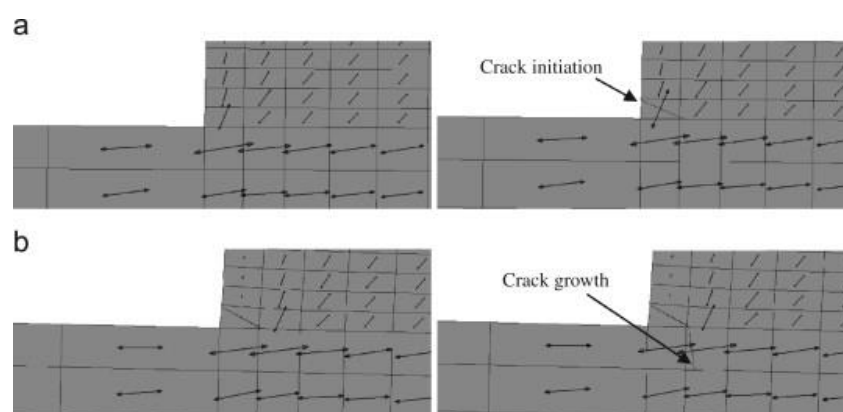


Figura 40 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [85].

DESENVOLVIMENTO

- 3.1 Validação dos MDC com dados experimentais
- 3.2 Trabalho numérico

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Validação dos MDC com dados experimentais

De maneira a validar os resultados numéricos obtidos na simulação de modelos das juntas a estudar no programa ABAQUS®, foram realizados testes experimentais com juntas reais. Os testes foram realizados por Luís Ferreira [86], e nesta verificação vão ser usados os dados recolhidos no seu trabalho com juntas adesivas tubulares para fazer uma avaliação detalhada das propriedades mecânicas da junta. Visto que criar o defeito pretendido (falha de adesivo) seria uma tarefa difícil e com pouca exatidão, vão ser apenas comparadas as unidades sem defeito produzidas na realidade com as geradas em computador, de modo a existir uma confirmação da veracidade dos valores numéricos obtidos e de os tornar adequados para o posterior estudo paramétrico nas juntas adesivas tubulares com defeito.

3.1.1 Descrição da geometria e materiais

Neste estudo foram usadas juntas tubulares com sobreposição simples, como está representado na Figura 41, onde estão também representadas as designações das cotas utilizadas nos provetes. Os respetivos valores das cotas estão expostos na Tabela 2, tanto para as juntas com área de sobreposição (L_o) de 20 mm como para as de 40 mm, visto que vão ser estudados os mesmos defeitos para cada uma delas.

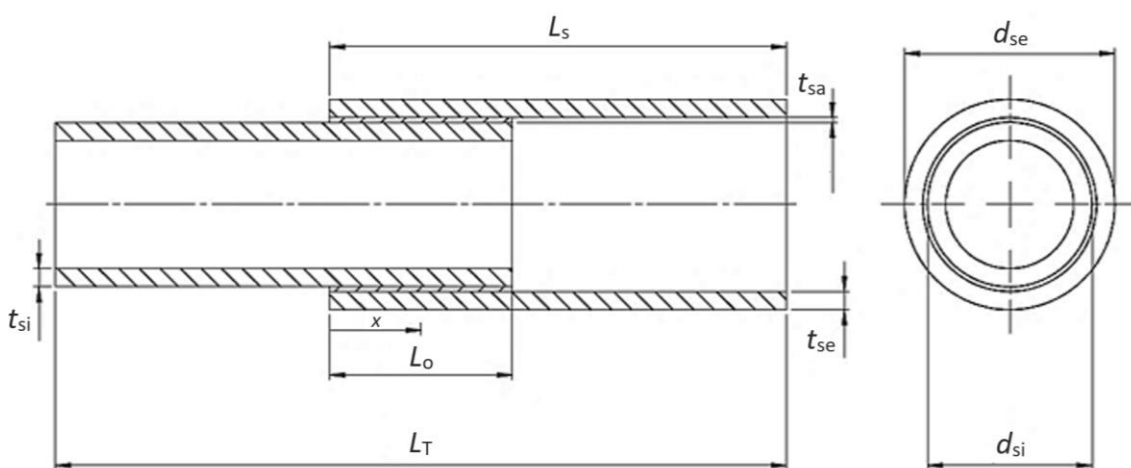


Figura 41 – Configuração da geometria do provete.

Tabela 2 – Designação das cotas dos provetes e respectivos valores (em mm).

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

A espessura do adesivo (t_A) é a mesma para todas as amostras (0,20 mm) tal como a espessura dos substratos interior (t_{SI}) e exterior (t_{SE}) (2 mm). O mesmo se sucede relativamente ao diâmetro externo dos tubos: interior (d_{SI}) 20 mm e exterior (d_{SE}) 24,4 mm. O comprimento dos substratos (L_S) até aos pontos de amarração é de 20 mm e 40 mm para valores de 50 mm e 60 mm de comprimentos de sobreposição, respetivamente. Foram concebidas dez amostras para cada um dos três adesivos em estudo, cinco delas com um comprimento de sobreposição (L_O) de 20 mm e as restantes cinco com 40 mm. O valor do comprimento total (L_T) da amostra em estudo é 80 mm, e é independente de L_O .

3.1.1.1 Substratos

Os substratos de todas as juntas adesivas concebidas e estudadas são em alumínio, nomeadamente a liga AW6082-T651. Esta liga de alumínio é obtida através de envelhecimento artificial a uma temperatura de 180°C. A sua seleção deveu-se não só pelas boas propriedades mecânicas que apresenta, mas também ao amplo campo de aplicações estruturais em forma extrudida e laminada. Esta liga de alumínio foi caracterizada em trabalhos anteriores [87], onde foram obtidas as seguintes propriedades:

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

Na Figura 42 é possível observar as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) dos substratos de alumínio que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [87]. Está representada também a aproximação numérica usada nos modelos MDC e MEFX [8].

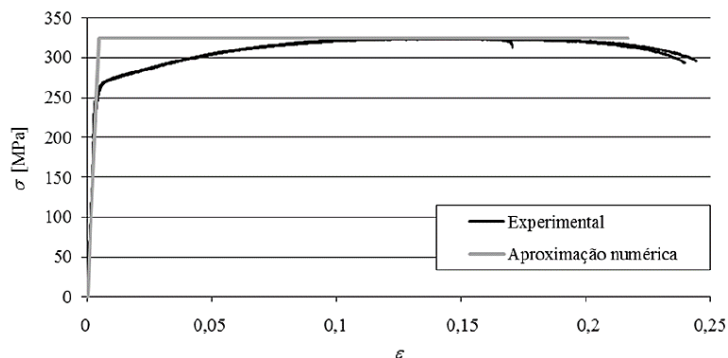


Figura 42 – Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [88].

3.1.1.2 Adesivos

De forma a promover a união entre os substratos, 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, que combina alta ductilidade com resistência moderada).

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 com o 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 e endurecedor faz-se numa razão de 100 g por 40 g, respetivamente. A aplicação deste adesivo é feita de forma manual com recurso ao uso de uma espátula [89].

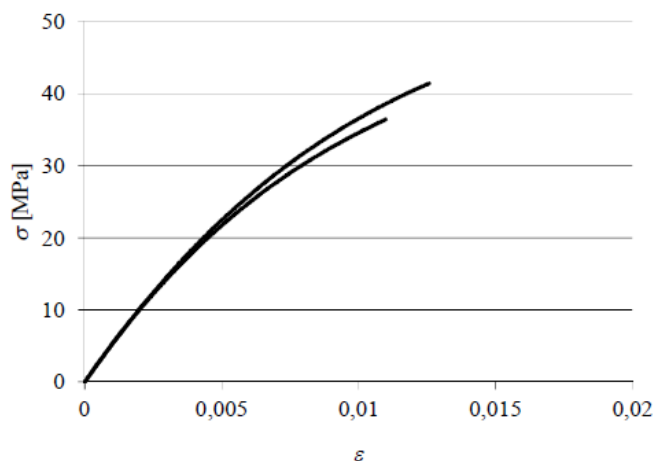


Figura 43 – Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [88].

Este adesivo é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [90]. As curvas σ - ε de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 43. Estas curvas foram obtidas experimentalmente, e as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo estão expostas na Tabela 3.

Tabela 3 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [86, 91].

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 [91]

^b valor do fabricante

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural bi-componente, de ductilidade moderada e que, comparando 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 típicas de concentração, que normalmente são nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes [90]. O adesivo Araldite® 2015 é fornecido em cartuchos, possui dois componentes, e a sua

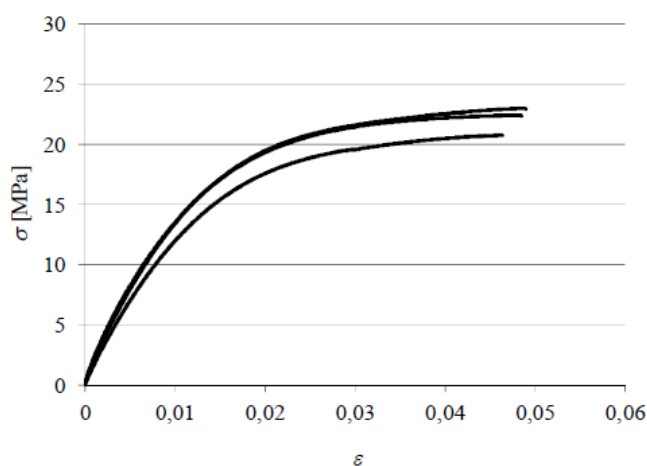
cura é efetuada à temperatura ambiente. A sua razão de aplicação é de 50 g por 50 g, sendo a mistura realizada por um bico e inserido por meio de uma pistola de aplicação [89]. As curvas σ - ε de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 44, e as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo estão expostas na Tabela 4.

Tabela 4 – Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [86, 90].

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

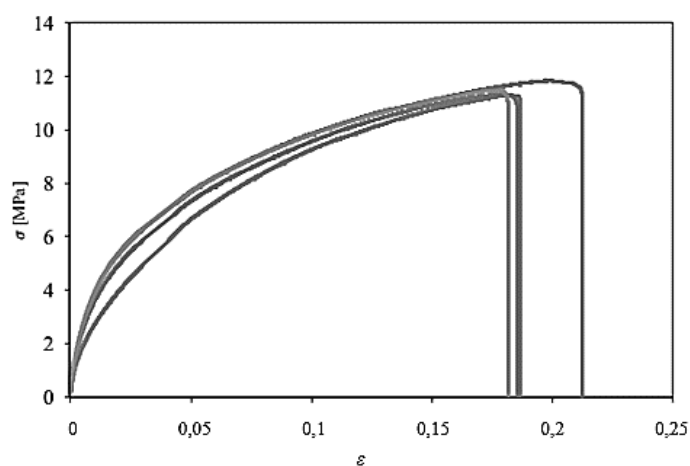
^a valor do fabricante

Comparando os valores da Tabela 3 com os valores da Tabela 4, 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.

Figura 44 – Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [90]

3.1.1.2.3 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 aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, é o que apresenta a menor resistência ao corte e à tração. Na Figura 45 estão representadas as curvas σ - ε do adesivo e na Tabela 5 as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo.

Figura 45 – Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [92]

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 um efeito acentuado de plastificação sem rotura das

extremidades do adesivo com o carregamento progressivo das juntas, o que conduz a uma elevada resistência [93].

Tabela 5 – Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [86, 92]

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

^a valor do fabricante

3.1.2 Resultados experimentais obtidos

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas força-deslocamento (P - δ) para os diferentes adesivos e valores de L_0 . Os valores de $P_{m\acute{a}x}$ estão apresentados em tabelas, sendo que cada tabela corresponde a um material diferente. Foram realizados cinco ensaios para cada caso e obtiveram-se ruturas coesivas para todas as amostras testadas. Em cada tabela estão apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos nos ensaios para cada valor de L_0 , a força máxima média ($P_{m\acute{a}x}$ Méd), que corresponde à média das forças máximas recolhidas e o desvio padrão, que fornece a dispersão, em termos numéricos e percentuais, dos valores obtidos dos ensaios. A análise destes dados experimentais é de extrema importância pois os mesmos servirão para validar as soluções obtidas pelos estudos numéricos.

3.1.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 46 são apresentadas as curvas P - δ . Na Tabela 6 podem-se visualizar os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente, em juntas adesivas tubulares, para o Araldite® AV138 e para os diferentes valores de L_0 , bem como o desvio padrão associado. De referir que alguns provetes foram considerados inválidos e, como tal, as respetivas curvas não são apresentadas.

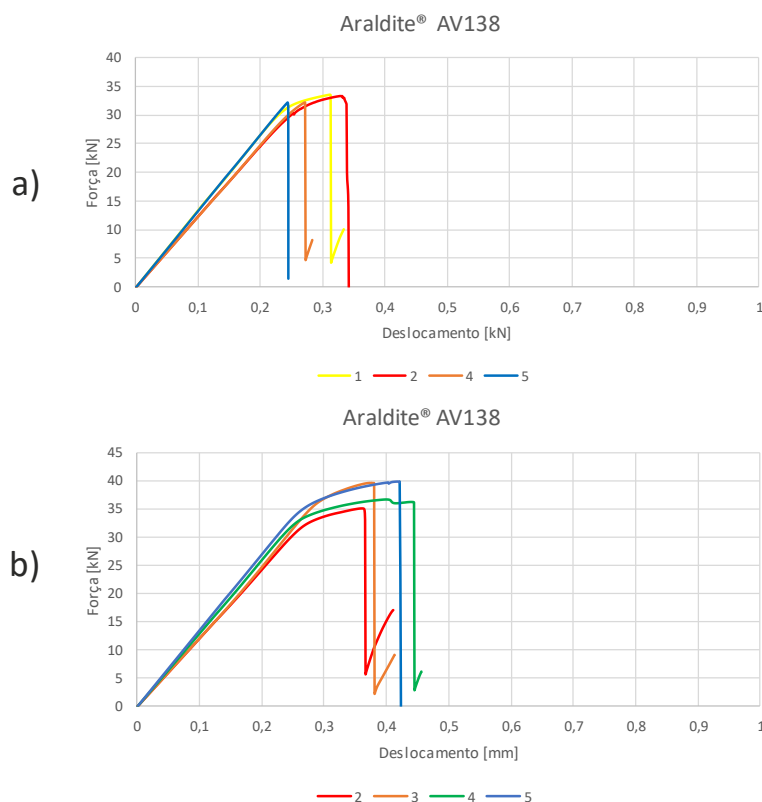


Figura 46 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 46 (a)) verifica-se a ocorrência de plastificação dos substratos nas amostras 1 e 2 (curva vermelha e amarela, respetivamente), muito provavelmente devido a um excesso de adesivo na junta que se infiltrou dentro do tubo interior, gerando uma área de contacto superior à desejada. As restantes amostras apresentam um comportamento linear até à rotura.

Para as juntas adesivas com $L_0=40$ mm (Figura 46 (b)) ocorre a plastificação dos substratos em todas. No geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento para ambos os casos de estudo. Apenas se regista a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas devido à flexibilidade da máquina de ensaios e questões de amarração dos provetes. Refira-se que os provetes cujos valores não são apresentados na Tabela 6 foram considerados inválidos.

Tabela 6 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138

L_0 [mm]	1	2	3	4	5	$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio	
							Padrão/ %	
20	33468,2	33342,3	-	32162,6	32216,9	32797,5	609,7	1,86
40	-	35209,8	39546,9	36770,2	39902,1	37857,2	1951,1	5,15

Os provetes considerados inválidos foram removidos desta análise uma vez que apresentavam discrepâncias demasiado elevadas entre $P_{m\acute{a}x}$ e $P_{m\acute{a}x}$ Méd. Desta forma, verifica-se uma redução do desvio padrão percentual relativamente ao respetivo valor médio. Com esta ação é possível obter uma boa repetibilidade das curvas P - δ . A dispersão dos valores obtidos é muito reduzida, sendo que o maior desvio padrão percentual registado para o Araldite® AV138 foi nos provetes com $L_0=40$ mm (5,15%). Questões relacionadas com o fabrico dos provetes, constituição dos materiais ou mesmo com a máquina de ensaios, podem ter contribuído para esta diferença.

3.1.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 47 são apresentadas as curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015. Na Tabela 7 é possível observar os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente para o mesmo adesivo, em função de L_0 .

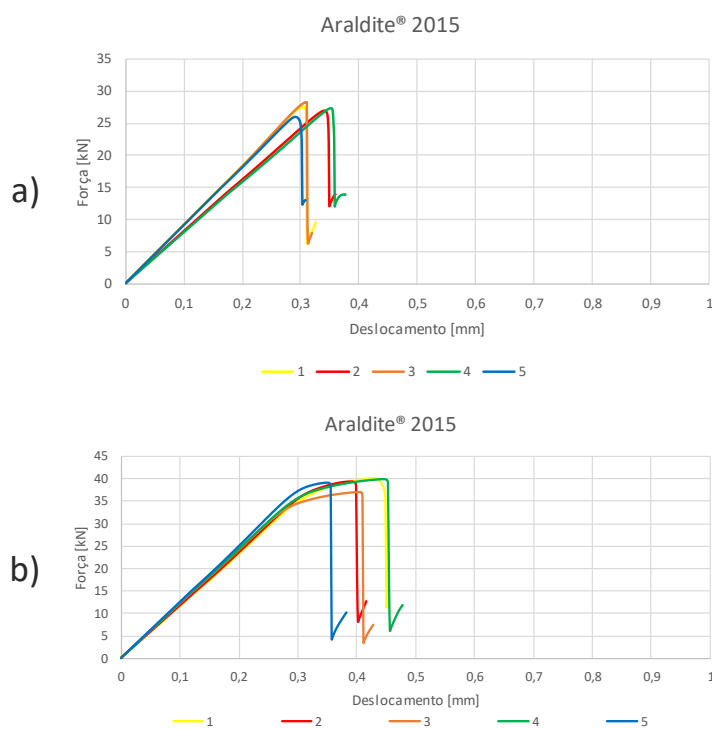


Figura 47 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Aqui verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura para $L_0=20$ mm (Figura 47 (a)). Para o caso dos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 47 (b)) já se verifica plastificação dos substratos. No geral, verifica-se uma boa repetibilidade das curvas na rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento. As pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas observadas para o Araldite® AV138 também são visíveis nestes ensaios, especialmente para $L_0=20$ mm.

O adesivo Araldite® 2015 é aquele que apresenta mais coerência em relação à dispersão dos valores obtidos. Tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ mm, o desvio padrão percentual registado foi de 2,84%. Para além de não ser um desvio significativo, foram considerados todos os provetes ensaiados, o que reforça a validade dos dados recolhidos.

Tabela 7 – Valores de $P_{\text{máx}}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015

L_0 [mm]						$P_{\text{máx}}$ Méd	Desvio Padrão/ %	
	1	2	3	4	5			
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

3.1.2.3 SikaForce® 7752

Tal como para o adesivo anterior, são apresentadas as curvas $P-\delta$ (Figura 48). Na Tabela 8 estão presentes os valores de $P_{\text{máx}}$ obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 em função de L_0 .

Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 48 (a)) verifica-se um comportamento linear das juntas até à rotura, exceto na amostra nº1 (curva amarela). Esta última apresenta plasticidade dos substratos e um deslocamento até à rotura evidentemente superior em comparação com os restantes provetes. Este comportamento pode ter sido o resultado da deposição de uma espessura de adesivo superior à prevista ou por se ter acumulado adesivo em excesso dentro da junta adesiva.

Nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 48 (b)) observou-se plastificação dos substratos. O provete 3 (curva laranja) apresenta uma deformação até à rotura menor em relação aos outros provetes. Este comportamento poderá ter-se gerado sobretudo devido a uma espessura de adesivo na junta inferior à pretendida.

Apesar das diferenças registadas, em geral assiste-se a uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez. Como foi apontado para os adesivos anteriores, é notória a ocorrência de pequenas oscilações na rigidez elástica das juntas, provocada pela flexibilidade do equipamento de ensaio e problemas da amarração dos provetes.

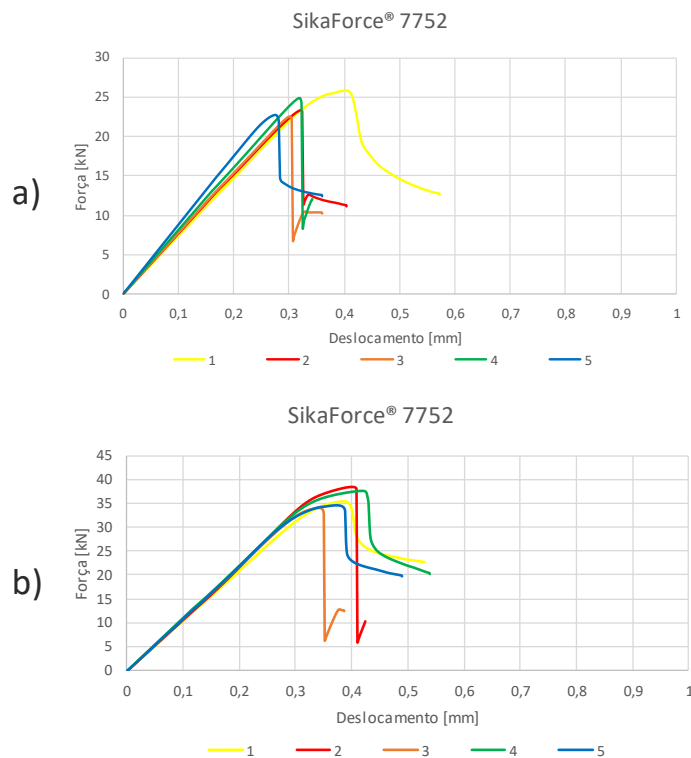


Figura 48 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm

Tabela 8 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752

L_0 [mm]	$P_{m\acute{a}x}$					$P_{m\acute{a}x}$ Méd	Desvio Padrão/%
	1	2	3	4	5		
20	25776,6	23329,9	22552,7	24848,6	22774,0	23856,4	1250,6 5,24
40	35247,2	38345,6	33909,8	37634,2	34512,8	35929,9	1749,0 4,87

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

3.1.3 Comparação de resultados

Na Tabela 9 está representada a comparação geral dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas com os três adesivos assim como o desvio padrão de cada valor de L_0 , que mostra a dispersão dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ individuais de cada provete relativamente à respetiva média.

Tabela 9 – $P_{m\acute{a}xMéd}$ (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares

Adesivo	$L_0=20\text{mm}$	$L_0=40\text{ mm}$	$\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%]
Araldite® AV138	32797,5	37857,2	15,4
Araldite® 2015	27238,4	39066,8	43,4
SikaForce® 7752	23856,4	35929,9	50,6

Relativamente ao Araldite® AV138, para o valor de L_0 de 20 mm, este adesivo apresenta-se como sendo, dos três, o que suporta o maior carregamento (32797,5 N). Para $L_0=40$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ aumenta em cerca de 15,4% até 37857,2 N. Este aumento relativamente reduzido do Araldite® AV138 evidencia a sua fragilidade.

O adesivo Araldite® 2015 apresenta $P_{m\acute{a}x}=27238,4$ N para um $L_0=20$ mm. Contudo, apresenta um aumento percentual muito superior ao Araldite® AV138 devido ao facto de ser um adesivo mais dúctil e, por isso, serão induzidas cargas mais elevadas e, consequentemente, dá-se a plastificação dos substratos. O aumento percentual é de 43,4% e, por esta razão, para um $L_0=40$ mm, a carga máxima que a junta adesiva suporta é de 39066,8 N, ou seja, apresenta uma resistência superior à do Araldite® AV138.

O adesivo SikaForce® 7752 é aquele que apresenta o maior aumento de resistência percentual (50,6%) entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm. Este acontecimento deve-se ao facto deste adesivo ser o mais dúctil dos três em estudo. Desta forma, para um L_0 de 20 mm, $P_{m\acute{a}x}$ é de 23856,4 N, e para $L_0=40$ mm é de 35929,9 N. Contudo, apesar do grande aumento de resistência na junta adesiva, a carga máxima suportada pelos provetes com o adesivo SikaForce® 7752 manteve-se sempre abaixo dos adesivos anteriormente descritos.

Através da realização dos ensaios experimentais verifica-se que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 varia consoante o adesivo, o que evidencia um comportamento bastante distinto entre os três adesivos. Deste modo, o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são os que oferecem maior resistência para juntas adesivas tubulares para ambos os L_0 , seguidos do Sikaforce® 7752, que apresenta um decréscimo significativo em termos de resistência face aos dois referidos adesivos. Por outro lado, o Araldite® 2015

e o SikaForce® 7752, por se apresentarem como os adesivos mais dúcteis, são os que revelam um maior aumento percentual com o aumento de L_0 .

3.1.4 Modelo de dano coesivo triangular

O uso de MDC na análise de juntas adesivas requer uma lei constitutiva para descrever o comportamento elasto-plástico da camada de adesivo. Podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de modo a obter resultados mais precisos, em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação [52]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o modelo triangular [49], o linear-parabólico [48], o exponencial [50], o polinomial [51] e o trapezoidal [44]. Devido a vários fatores, tais como a simplicidade, reduzido número de parâmetros a determinar e resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [53].

A Figura 49 exemplifica uma lei coesiva triangular. No ponto O, o material ainda não está em carga e não há separação. Ao longo da linha OA, o material encontra-se no domínio elástico. No ponto A (com a separação δ^0) a tração coesiva alcança o valor máximo admissível (resistência coesiva ou t^0). A seguir ao ponto A, o material começa a sofrer dano e a rigidez coesiva diminui (amaciamento do material). Num ponto genérico B (com separação δ) entre os pontos A e C, a trajetória do descarregamento é linear em direção ao ponto O. A rigidez coesiva cai assim do valor inicial K para K^δ e a tração admissível desce da resistência coesiva t^0 para o valor atual t . Quando a tração admissível cai para zero no ponto C (que corresponde à extremidade da fenda), a separação é igual a δ^f e ocorre a separação completa do material. Depois, outra fenda é nucleada ou a ponta de uma fenda existente avança. Qualquer ponto à frente de C (por exemplo o ponto D) está agora fora da zona coesiva e pertence às superfícies da fenda localizadas atrás da ponta da mesma [94].

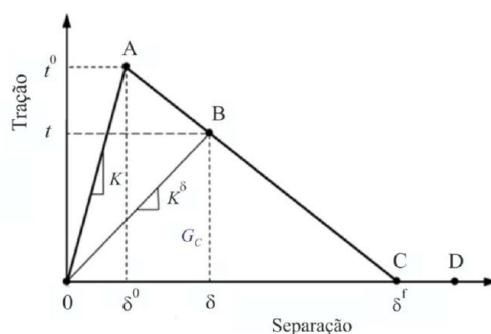


Figura 49 – Lei coesiva triangular [94]

A energia crítica coesiva ou tenacidade à fratura, G_c , que é dada pela área do triângulo, está relacionada com outros dois parâmetros através da relação de área $G_c = t^0 \times \delta^f / 2$. Assim, quaisquer dois dos três parâmetros (por exemplo t^0 e G_c) podem ser escolhidos

como entradas para a lei coesiva triangular. Além dos dois parâmetros t^0 e δ^f , outro parâmetro tem de ser definido para descrever completamente a forma da lei coesiva triangular. Este parâmetro pode ser a rigidez coesiva inicial K ou a separação normal característica δ^0 , que corresponde à tração máxima. Estes parâmetros relacionam-se por $\delta^0 = t^0/K$ [94].

3.1.4.1 Formulação do modelo

O modelo de dano triangular pode ser do tipo 2D ou 3D. No modelo 2D distinguem-se dois modos: o puro e o misto (Figura 50). O modo puro divide-se em modo I, em que a fenda abre por esforços de tração, e em modo II, em que a fenda desliza por esforços de corte [95]. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. No modo misto os modos puros I e II atuam simultaneamente, e são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar tração e corte [96].

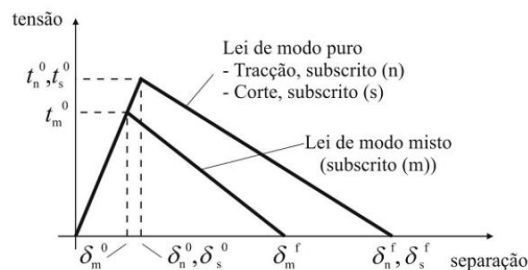


Figura 50 – MDC triangular [91]

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

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

No caso de a formulação ser local, os elementos coesivos são usados para simular fraturas de espessura nula. Nestas condições, os parâmetros de K_{COH} possuem valores extremamente elevados, tendo por finalidade não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [97]. Na formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para as ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (2), onde G é o módulo de elasticidade transversal:

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

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [96]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério da tensão nominal quadrática, expresso pela expressão (3):

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

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. A evolução do dano descreve a taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0 na Figura 50), a rigidez do material é degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_m^f , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{II} [45]:

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

3.1.4.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivo maciço [97, 98]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [99-101]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

3.1.4.2.1 Araldite® AV138

Na determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso num trabalho anterior [102]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente do procedimento mais indicado. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de adesivo maciço e de corte designados por *Thick Adherend Shear Test* (TAST), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando

inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L = 20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que reproduzam os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e corte (TAST), respetivamente. No referido trabalho [87] foi concluído que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. Na Tabela 10 estão apresentados os parâmetros utilizados na simulação da camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 10 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [87]

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
4890 MPa	1560 MPa	39,45 MPa	30,20 MPa	0,20 N/mm	0,38 N/mm

3.1.4.2.2 Araldite® 2015

As leis coesivas da camada de adesivo no caso do adesivo Araldite® 2015 foram igualmente determinadas num trabalho anterior [102], por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Esta metodologia consiste basicamente na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do respetivo teste de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo.

Tabela 11 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [102].

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
1850 MPa	650 MPa	21,63 MPa	17,90 MPa	0,43 N/mm	4,70 N/mm

Na Tabela 11 estão apresentados os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva de modo misto [103]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [104] e ensaios TAST, respetivamente.

3.1.4.2.3 SikaForce® 7752

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [105]. Os valores utilizados são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos no trabalho de Azevedo [105], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [92] nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [92]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solicitação à tração, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25 % do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [92], não foi considerada relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente [92]. A Tabela 12 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada do adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 12 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [92].

E	G	t_n^0	t_s^0	G_{IC}	G_{IIC}
493,81 MPa	37,49 MPa	12,25 MPa	10,50 MPa	2,36 N/mm	5,56 N/mm

3.1.5 Condições da análise numérica

A análise numérica é baseada no MEF e, para tal, foi escolhido o *software* ABAQUS®, versão 2017 (*Dassault Systèmes*). É um *software* que, para além de possuir uma extensa biblioteca de elementos e grande aplicação em diversos trabalhos na área da adesão, permite a utilização do módulo integrado de MDC para prever a resistência das juntas adesivas tubulares. Apresentam-se de seguida os procedimentos de pré-processamento da modelação em MEF, fazendo referência aos módulos de *software*

em que a informação foi introduzida: *Parts, Property, Assembly, Step, Load* e *Mesh* [106].

A análise de MEF tem por base a utilização de elementos axissimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) de estado plano de deformação para a modelação dos substratos, e elementos coesivos axissimétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para a camada do adesivo como aproximação da geometria em análise, que fornece resultados precisos para este tipo de geometrias (Figura 51). O MDC usado é o modelo de dano triangular que existe no ABAQUS® e que se encontra descrito na secção 3.1.4.1. Este modelo caracteriza adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo e requer poucos parâmetros para a simulação.

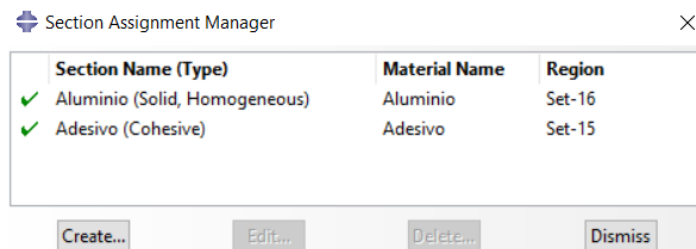


Figura 51 - Atribuição dos respetivos materiais aos substratos e adesivo para análise por MDC no ABAQUS®.

É de salientar que na interface gráfica existem vários passos que devem ser completados de forma sequencial. Deste modo, são de seguida descritas as operações realizadas na criação das juntas tubulares adesivas através da interface do ABAQUS®.

1º Passo – Part

Neste passo foi efetuado o desenho da junta adesiva com e sem defeito, tal como mostra a Figura 52 a) e b), respetivamente. Para modelar os substratos e o adesivo desenhou-se apenas um corpo, que foi posteriormente dividido em partições para a atribuição dos respetivos materiais. Na camada do adesivo, modelada por elementos MDC, considerou-se apenas um elemento na direção de t_A . A modelação dos aderentes foi efetuada com elementos axissimétricos deformáveis de estado plano de deformação. Na análise de rotura por MDC considerou-se o comportamento não linear geométrico das juntas.

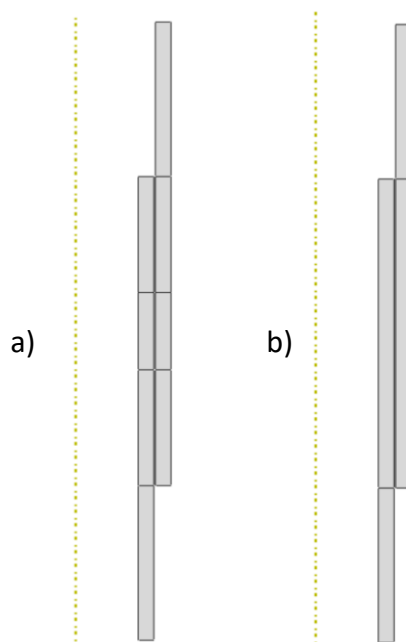


Figura 52 – Junta adesiva tubular a) com defeito e b) sem defeito, modelada no ABAQUS®.

Na simulação numérica foram construídos modelos com as dimensões de cada configuração de junta testada. Como está em causa a análise de elementos axissimétricos, o eixo de revolução é de extrema importância (representado pela linha amarela a tracejado na Figura 52, porque além de posicionar o modelo no centro do sistema de eixos, vai ditar o diâmetro da junta adesiva tubular. Desta forma, é possível a obtenção de forças, deslocamentos e tensões na camada de adesivo que se liga os dois tubos de alumínio. Após o desenho do conjunto substratos-adesivo foi necessário efetuar partições por forma a atribuir diferentes propriedades e diferentes comportamentos às secções. As partições criadas devem isolar diferentes zonas da junta, como a camada de adesivo com $t_A=0,2$ mm e os aderentes. No caso das juntas tubulares com defeito, é necessário criar duas partições separadas para o adesivo, de modo a criar a falha pretendida no centro da área de ligação.

2º Passo – Property

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

3º Passo – Assembly

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

4º Passo – Step

É nesta secção que os parâmetros de computação da simulação são introduzidos. Na Figura 53 estão descritos os incrementos utilizados e o tamanho dos incrementos. De modo a evitar a paragem da análise por exceder o número de incrementos permitido, foi considerado 10000 incrementos como valor máximo. Considerou-se um tamanho inicial de incremento, e máximo de 0,0025. O tamanho mínimo do incremento foi um valor extremamente reduzido para contabilizar a redução de tamanho do incremento que o *software* tem necessidade de aplicar durante a fase da propagação de dano para evitar os problemas de convergência associados.

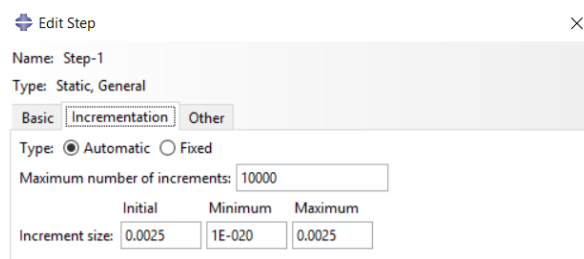


Figura 53 – Definição de incrementos para análise no ABAQUS®.

5º Passo – Interaction

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

6º Passo – Load

De modo a simular o carregamento de tração é necessário aplicar condições fronteira à junta adesiva. Na Figura 54 é possível visualizar as condições fronteira utilizadas nas simulações realizadas no ABAQUS®. Numa das extremidades do substrato (inferior) é simulado um encastramento, enquanto na outra extremidade (superior) é aplicado um deslocamento vertical e uma restrição horizontal à secção.

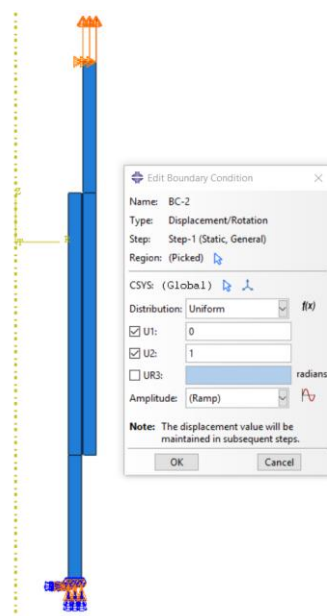


Figura 54 – Representação das condições fronteira na simulação.

7º Passo – Mesh

Neste passo de construção do modelo é efetuada a discretização da geometria em elementos finitos. As zonas onde ocorrem os maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinados possível. Na junta adesiva existe uma variação das dimensões da malha, mais refinada na zona da camada adesiva e nas suas proximidades, como mostra a Figura 55. Aqui, é possível verificar que as zonas mais próximas das extremidades da sobreposição estão mais refinadas do que o centro da junta.

Devido à necessidade de correr a simulação completa para determinar o valor da força máxima suportada pela junta, o mesh é menos refinado nesses modelos (Figura 55 a)), do que nos modelos realizados para simular as tensões de arrancamento e de corte (Figura 55 b)), visto que apenas é necessário ser executado um incremento para obter os resultados necessários. Para isso, foram atribuídos valores ao número de elementos e ao *bias ratio*, em função dos diferentes modelos. O *bias ratio* é definido como o rácio de refinamento crescente ao longo de uma aresta do modelo. Os diferentes valores atribuídos têm como finalidade a redução do esforço computacional, garantindo simultaneamente que a precisão dos resultados em zonas com grandes variações de tensões não é comprometida [106]. Seguidamente foi introduzida viscosidade aos elementos coesivos de forma a evitar problemas de convergência, pois torna o processo mais suave. Além disso, foram aplicados os *mesh controls* em função do tipo de elemento.

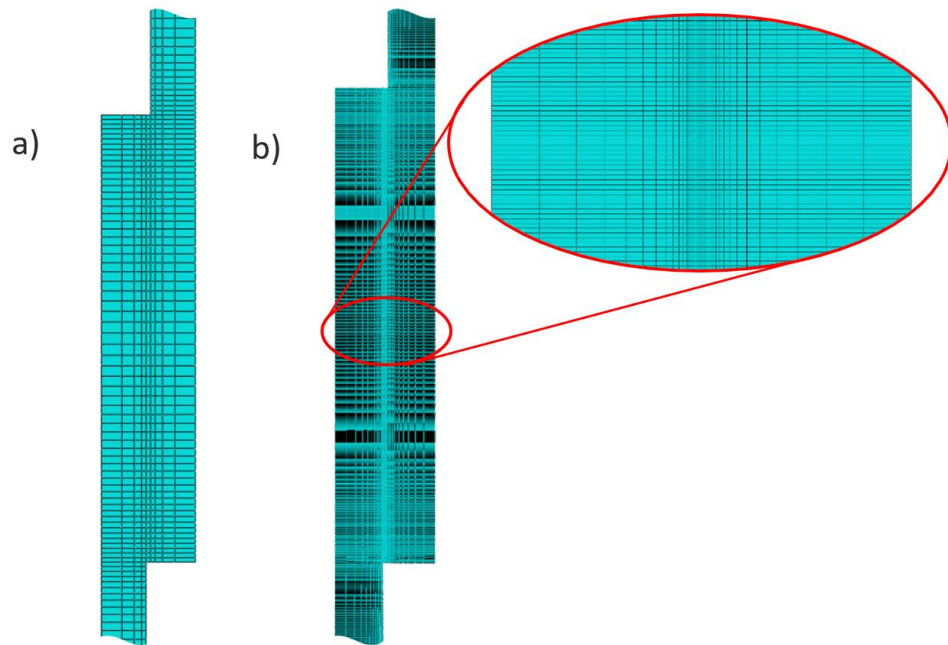


Figura 55 – Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição para uma junta a) pouco refinada, b) muito refinada.

8º Passo – Job

É nesta secção que se dá início à simulação da junta. Aqui é inserido o nome e a capacidade computacional que se pretende dedicar à simulação. De seguida submete-se a simulação e, caso seja desejado, segue-se a evolução da análise. Através do comando “Results” avança-se para o passo seguinte.

9º Passo – Visualization

Nesta secção visualizam-se os resultados obtidos para a junta adesiva. Na Figura 56 é possível observar uma junta adesiva tubular com $L_0=20$ mm após rotura completa da camada de adesivo. Depois de terminada a simulação, procede-se à análise dos resultados para produzir as curvas $P-\delta$. Através do “output” da criação de dados XY, somam-se todas as reações do encastramento e são retirados os valores do deslocamento para criar as curvas $P-\delta$.

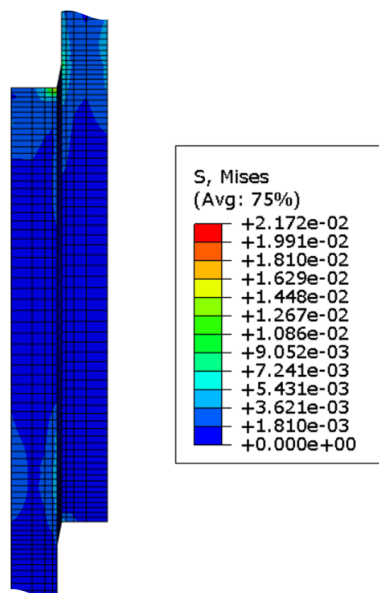


Figura 56 – Aspeto da junta adesiva tubular após a simulação no ABAQUS®.

3.1.6 Análise de tensões nas juntas

Neste capítulo é feita a comparação da distribuição das tensões de arrancamento (σ_y) e das tensões de corte (τ_{xy}) a meio da espessura do adesivo para as juntas adesivas tubulares. São considerados os diferentes valores de L_0 de forma a compreender a forma como as mesmas variam em função deste parâmetro. Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , que representa a média de valores de τ_{xy} na ligação adesiva para cada valor de L_0 . As figuras seguintes mostram as distribuições das tensões σ_y e das tensões τ_{xy} em função de x/L_0 ($0 \leq x \leq L_0$), em que x está definido na Figura 41.

3.1.6.1 Tensões de arrancamento

As distribuições das tensões σ_y para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 57.

De uma forma geral verifica-se que as tensões σ_y possuem uma magnitude inferior às tensões τ_{xy} , exceto em zonas localizadas nas extremidades da ligação da junta, nas quais existem singularidades devido à geometria das extremidades da junta [107, 108]. Na região interior da camada do adesivo geram-se tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tração devido à curvatura ou deformação transversal da junta, que é governada pela deformação dos substratos e que provoca separação nas extremidades da camada de adesivo e compressão na zona intermédia da mesma. As tensões de arrancamento originam uma diminuição da resistência das juntas adesivas, podendo levar à sua rotura prematura [97, 109]. As tensões σ_y na região central da

sobreposição são aproximadamente nulas, com gradientes crescentes ao longo da sobreposição com o aumento de L_0 .

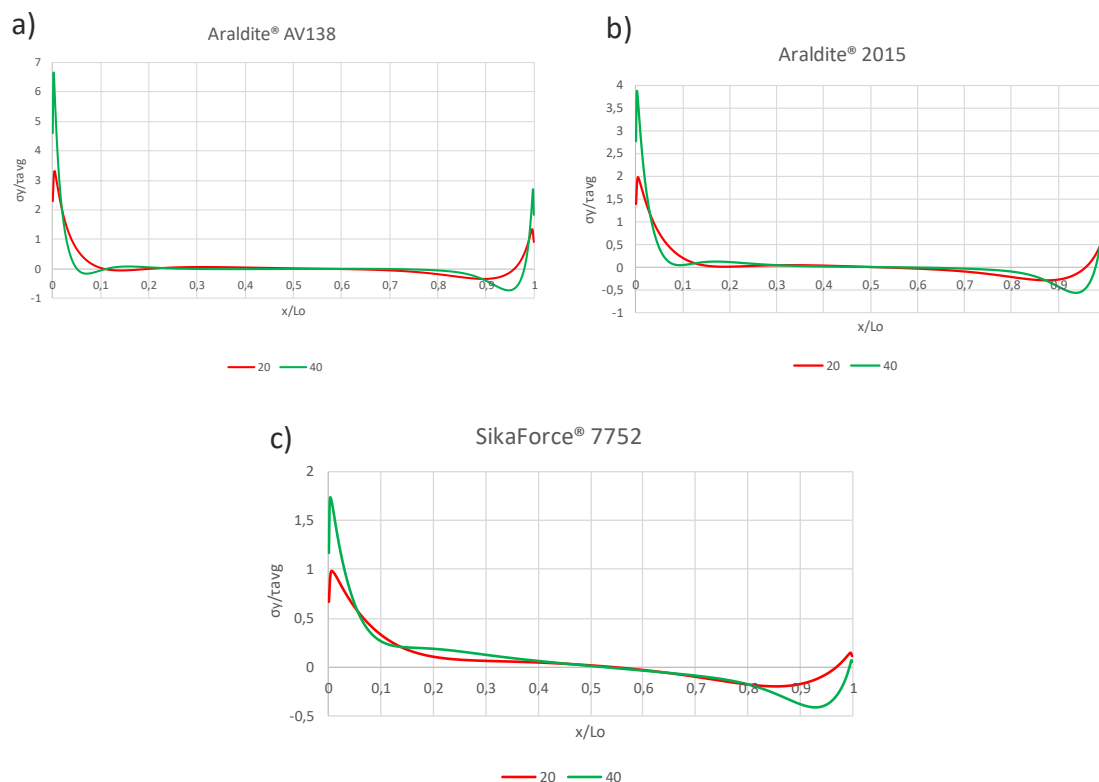


Figura 57 – Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

Para valores de L_0 mais elevados, observam-se picos compressivos na proximidade das singularidades, que aumentam de magnitude com L_0 . Ao mesmo tempo, as tensões compressivas na zona interior da camada do adesivo tornam-se menos significativas. Esta tendência tende a parar a propagação de dano após dano localizado nas zonas de singularidades [110], o que justifica algumas vezes que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ é obtido após a iniciação da fenda [111]. O aumento dos picos de tensão com o aumento de L_0 deve reduzir a resistência média da junta na área de ligação, especialmente para juntas com adesivos frágeis [112].

A partir dos gráficos apresentados na Figura 57 é possível verificar que o adesivo Araldite® AV138, comparativamente com os outros dois adesivos, possui gradientes mais elevados na proximidade de $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$, que correspondem às extremidades de L_0 na junta da camada de adesivo. Este adesivo possui uma rigidez elevada, o que origina estes picos de concentração de tensões mais elevados que podem levar à rotura prematura da junta. Na Tabela 13 estão presentes os valores máximos de σ_y / τ_{avg} para os três adesivos, em função de L_0 . É possível verificar que tanto para um $L_0=20$

mm como para um $L_0=40$ mm, o adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta picos de concentração de tensões mais elevados, quando comparado com os outros dois adesivos.

O SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os menores valores de σ_y/τ_{avg} . Estes resultados mostram-se lógicos e satisfatórios pois este adesivo é o que apresenta menor rigidez. Como é possível observar na Figura 57 (c), formaram-se picos de concentração de tensões nas extremidades da junta adesiva claramente inferiores aos dos outros adesivos (Tabela 13).

Tabela 13 – Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,30	6,65
Araldite® 2015	1,99	3,88
SikaForce® 7752	0,98	1,73

3.1.6.2 Tensões de corte

As distribuições das tensões τ_{xy} para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos utilizados são apresentadas na Figura 58.

Tal como para a distribuição de tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} demonstra valores mais reduzidos na região central de L_0 e atinge o máximo nas extremidades da sobreposição [113, 114]. Isto deve-se à deformação diferencial de cada um dos tubos ao longo da sobreposição, que é nula na sua extremidade livre e aumenta progressivamente até à extremidade oposta [20, 34, 115]. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, com o desenvolvimento de tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta. Os gradientes de tensão τ_{xy} aumentam com L_0 devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos substratos causado pelas grandes áreas de colagem e cargas aplicadas. Nas juntas adesivas em que se empreguem adesivos frágeis a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões σ_y e τ_{xy} não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição [115]. Por sua vez, os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nessas regiões, ao mesmo tempo que a região interna da sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes, o que possibilita um aumento da resistência da junta [97, 116].

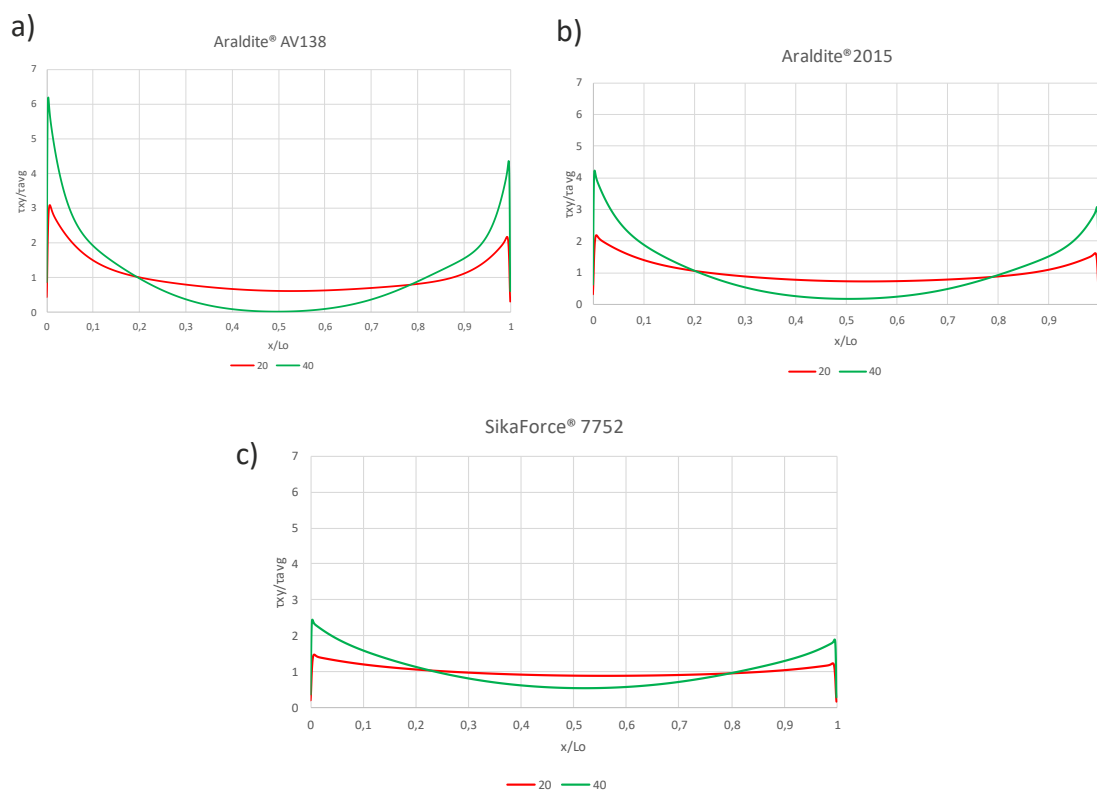


Figura 58 – Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752

O valor máximo de τ_{xy}/τ_{avg} observado foi para o Araldite® AV138 (Tabela 14). Este é o adesivo mais frágil dos três e, por esta razão geram-se picos de concentração de tensões τ_{xy} muito elevados nas extremidades das juntas. Como tal, o valor de rigidez que apresenta pode condicionar a resistência da junta e conduzir a uma rotura prematura da mesma.

Tabela 14 – Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Adesivo	L_0 [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,08	6,19
Araldite® 2015	2,19	4,24
SikaForce® 7752	1,46	2,43

O mesmo se verifica para o caso do Araldite® 2015. Contudo, como este adesivo apresenta uma rigidez inferior quando comparado ao Araldite® AV138, os picos gerados apresentam valores inferiores. Tal como sucedeu durante a análise de tensões ao arrancamento, o adesivo SikaForce® 7752 demonstrou ser o menos resistente uma vez que os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} registados são os mais baixos, devido a um E inferior em relação aos outros adesivos (Tabela 14).

Previsão da resistência por MDC

Neste capítulo faz-se a comparação dos resultados dos ensaios experimentais com as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ pelos MDC, de forma a efetuar a respetiva validação das propriedades obtidas nas análises numéricas. Com isto, será possível a posterior realização do estudo paramétrico uma vez que os valores das constantes de engenharia utilizadas estarão de acordo com a realidade.

Segue-se a apresentação das curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente pelo MDC (Figura 59, Figura 60 e Figura 61, para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente).

A correlação geral para as juntas adesivas tubulares foi bastante aceitável, especialmente para as juntas adesivas em que se empregou os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 59 e Figura 60, respetivamente), em relação à $P_{m\acute{a}x}$, rigidez e deslocamento de rotura [8]. No caso do SikaForce® 7752 (Figura 61), uma vez que se trata de um adesivo muito dúctil, as leis triangulares do MDC subestimaram os resultados experimentais [89], por esta razão os resultados experimentais ($P_{m\acute{a}x}$ e deslocamento) são um pouco maiores que os numéricos. Contudo, existe uma boa correlação das curvas obtidas experimentalmente para este adesivo.

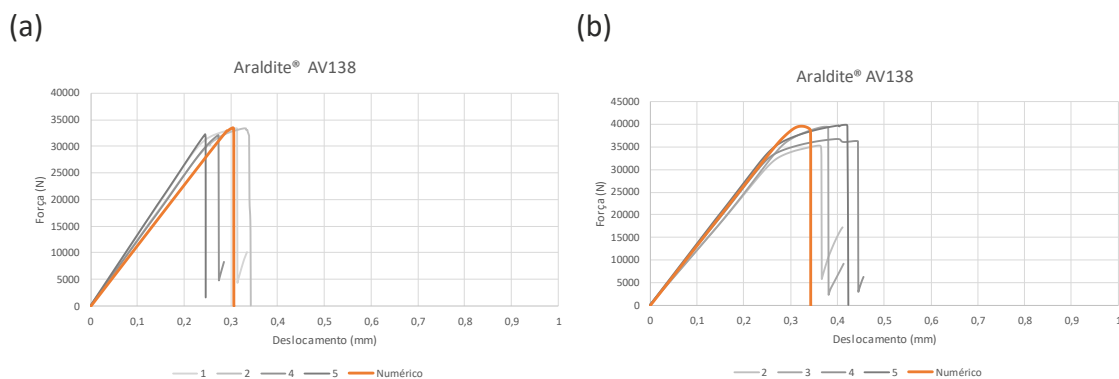


Figura 59 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.

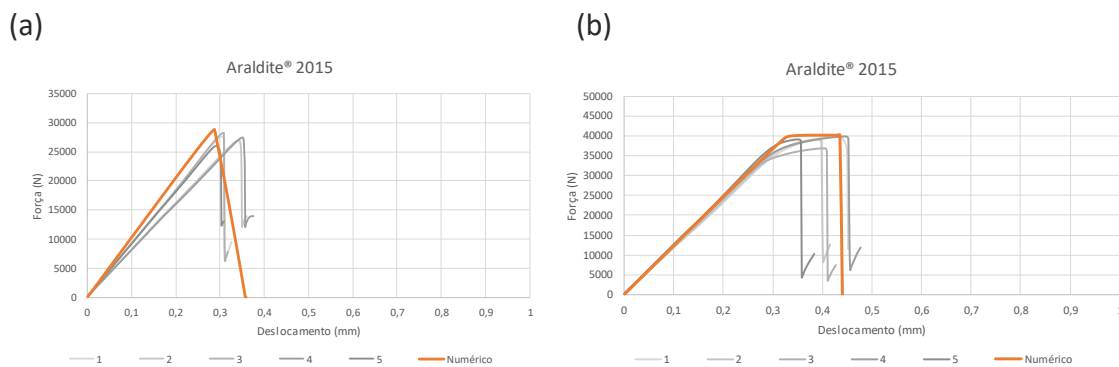


Figura 60 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.

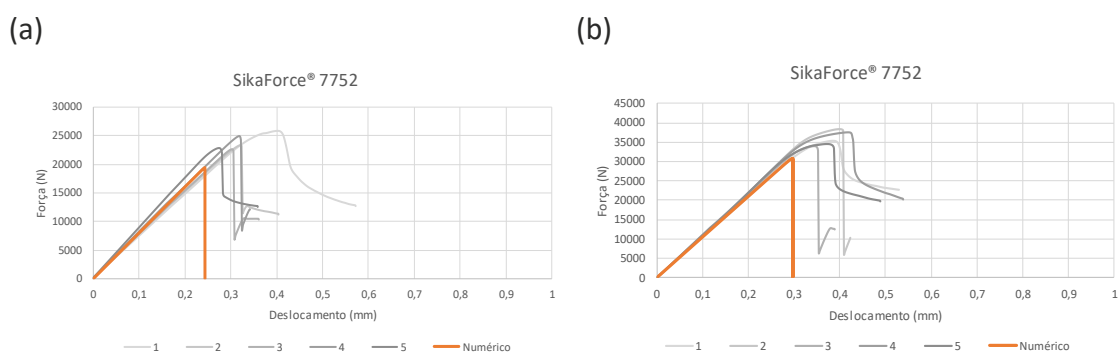


Figura 61 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm.

3.1.7 Discussão dos resultados obtidos

Observou-se que o adesivo Araldite® AV138 consegue uma resistência superior relativamente ao Araldite® 2015 e ao SikaForce® 7752 (Tabela 15). Esta diferença é bem evidente para um $L_0=20$ mm, cujo $P_{m\acute{a}x} \approx 33$ kN. Com o aumento de L_0 (até 40 mm), o Araldite® 2015 passa a apresentar um comportamento superior ao do Araldite® AV138 devido à plastificação que ocorre antes da rotura. Desta forma é possível que um adesivo dúctil apresente uma resistência similar à de um adesivo frágil, devido à capacidade limitada de plastificação deste último mencionado [117]. Assim, o resistente, mas frágil Araldite® AV138 permite um valor mais elevado de $P_{m\acute{a}x}$ do que os restantes adesivos para $L_0=20$ mm, mas a ductilidade característica do Araldite® 2015, permitiu um aumento percentual de 43,4% e, como tal, um aumento significativo de $P_{m\acute{a}x}$, superando o $P_{m\acute{a}x}$ do Araldite® AV138. O Sikaforce® 7752 combina uma alta resistência e ductilidade, e a rotura ocorre em condições que se assemelham à plastificação generalizada até grandes valores de L_0 [116]. As juntas com este adesivo apresentaram-se como sendo as menos resistentes, uma vez que tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ foi sempre inferior aos outros adesivos. Por outro lado,

uma vez que se trata de um adesivo extremamente dúctil, o elevado aumento percentual (50,6%) permitiu uma grande subida de $P_{m\acute{a}x}$, aproximando-o dos restantes adesivos para $L_0=40$ mm.

Posto isto, verifica-se que o Araldite® 2015 e o SikaForce®, que são os adesivos mais dúcteis, apresentam aumentos percentuais elevados entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm. Este comportamento provoca um aumento de $P_{m\acute{a}x}$, o que origina uma melhoria substancial do seu comportamento mecânico. Pelo facto de o Araldite® AV138 ser um adesivo frágil, a sua capacidade de plastificação é bastante limitada. Por esta razão, o seu aumento percentual foi de apenas 15,4%. Tal facto induziu uma rotura das juntas praticamente no momento em que as tensões nas extremidades atingem o valor limite.

Tabela 15 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de L_0

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

Os resultados das juntas adesivas tubulares apresentam diferentes tendências, dependendo das características dos adesivos (rigidez, resistência e ductilidade). O módulo de elasticidade (E) dos adesivos está intimamente relacionado com a sua rigidez e influencia a distribuição das tensões e conseqüentemente a resistência: um adesivo com menor valor de E tem uma distribuição de tensões mais uniforme (Figura 58) [1].

No que concerne às tensões σ_y (Figura 57), na extremidade interior da ligação registam-se picos de compressão [118]. Isto deve-se sobretudo ao carregamento simétrico nas juntas, que evita a deflexão transversal do substrato interior [95, 119]. Com isto ocorre uma redução generalizada das tensões de pico σ_y para todos os valores de L_0 [120]. Na região central os valores das tensões σ_y são aproximadamente nulos, com gradientes crescentes para as extremidades da sobreposição com o incremento de L_0 .

No que respeita ao perfil de tensões τ_{xy} (Figura 58), verificam-se picos de tensões τ_{xy} de maior magnitude na extremidade exterior, ao passo que na extremidade oposta os

picos de tensões τ_{xy} são menos preponderantes. Isto é decorrente da solicitação a que o substrato intermédio é sujeito, que se traduz na indução de cargas elevadas na proximidade de $x/L_0=0$ [117].

Dos três adesivos ensaiados, o Araldite® AV138 é aquele que apresenta maior valor de E . Por este motivo é que este adesivo apresenta os maiores picos de concentração de tensões, como se pode observar a partir dos perfis das tensões σ_y e τ_{xy} (Figura 57, Figura 58, Tabela 13 e Tabela 14). Este comportamento é mais evidente para valores de L_0 mais elevados. A Figura 57 e a Figura 58 mostram que os perfis das tensões σ_y e τ_{xy} tornam-se mais constantes com a redução de L_0 , o que torna as sobreposições menores mais dependentes da resistência do adesivo. Por outro lado, um adesivo frágil sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona de ligação, enquanto os adesivos dúcteis permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, ao mesmo tempo que o interior da zona de ligação aumenta a sua contribuição para a resistência da junta.

Com isto, é possível aferir que o adesivo Araldite® AV138 é o que confere à junta adesiva tubular a maior resistência mecânica. Por outro lado, trata-se de um adesivo frágil, ou seja, à semelhança dos gradientes de tensões σ_y , verifica-se que os gradientes de tensão τ_{xy} são extremamente prejudiciais para a resistência das juntas. A fratura ocorre no momento em que é atingida τ_f e também devido à capacidade de plastificação quase nula destes adesivos [115]. O adesivo Araldite® 2015, devido à menor rigidez, apresenta picos de tensões de magnitude inferior ao Araldite® AV138. Para além disto, a ductilidade característica deste adesivo permitiu uma distribuição mais uniforme das tensões por toda a zona de sobreposição. O SikaForce® demonstrou ser o adesivo menos resistente dos três. A partir do perfil de tensões τ_{xy} da Figura 58 (c) é fácil constatar uma boa uniformidade na distribuição de tensões, mais óbvia para valores de L_0 inferiores (20 mm). Os picos de tensão gerados são muito reduzidos quando comparados com os dos outros adesivos, o que é benéfico à ligação adesiva, pois reduz a probabilidade da mesma sofrer uma rutura prematura (desde que a carga aplicada esteja dentro dos limites de resistência do material).

3.1.8 Validação do MDC com resultados experimentais

Neste subcapítulo pretende-se aferir a validade dos resultados numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pela lei coesiva triangular, a partir da sua comparação com resultados experimentais.

Na Tabela 16 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente para os três adesivos, em função de L_0 . Na mesma estão igualmente presentes as diferenças relativas para cada um, de forma a permitir uma maior facilidade na comparação dos mesmos.

Tabela 16 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de L_0 , e respetiva diferença relativa

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

As previsões demonstraram, de um modo geral, que os valores obtidos por MDC e experimentais relativamente a $P_{m\acute{a}x}$ são muito próximos para as juntas adesivas tubulares com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Por outro lado, observa-se uma discrepância não desprezável para o adesivo SikaForce® 7752.

O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta as menores diferenças relativas entre os resultados experimentais e numéricos. Para $L_0=20$ mm a diferença relativa foi de 2,4% e, para $L_0=40$ mm, de 4,7%. Os valores numéricos são ligeiramente superiores aos experimentais, contudo é uma diferença muito reduzida e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

Relativamente ao adesivo Araldite® 2015, verifica-se uma diferença percentual entre os resultados de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos de 6,1% para $L_0=20$ mm (com os valores obtidos pelo MDC superiores aos experimentais). Esta discrepância é aceitável pois é, de facto, muito reduzida, uma vez que $P_{m\acute{a}x}$ experimental ≈ 27 kN e $P_{m\acute{a}x}$ numérico ≈ 29 kN. Esta percentagem torna-se ainda mais reduzida para $L_0=40$ mm (2,9%). Posto isto, tal como sucedeu com o Araldite® AV138, apesar das pequenas diferenças observadas, aceitam-se os valores obtidos pelo MDC e, como tal, consideram-se estes resultados adequados.

No caso das juntas com o adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos pelo método numérico são bastante inferiores. Isto acontece porque, para juntas adesivas com adesivos dúcteis simulados com leis coesivas triangulares, podem surgir previsões aquém do expectável, dada a depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [90]. No entanto, alguns trabalhos sobre delaminação em compósitos mostraram que leis coesivas pouco adequadas para modelar um determinado material ainda permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento, desde que os valores de resistência coesiva (t_n^0 e t_s^0) e de tenacidade à fratura (G_{IC} e G_{IIC}) tenham sido estimados corretamente [121]. Posto isto, a diferença entre os valores experimentais e do MDC para o SikaForce® 7752 é bastante evidente:

18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3 para $L_0=40$ mm, com os valores experimentais superiores aos numéricos. Portanto, tendo em conta os fatores envolvidos, aceitam-se os valores obtidos numericamente, apesar da respetiva dispersão de valores.

Após esta análise, consideraram-se os resultados numéricos obtidos válidos e, como tal, adequados para serem utilizados como fonte de comparação para o estudo paramétrico.

3.2 Trabalho numérico

O objetivo principal deste capítulo é estudar as consequências e o efeito de defeitos na resistência de juntas adesivas tubulares, através de modelos numéricos criados no programa ABAQUS®. Para este estudo foram usadas juntas com dois comprimentos de sobreposição diferentes, e para cada um deles foram induzidos três tamanhos de falta de adesivo. Estas falhas encontram-se centradas na área de ligação da junta tubular e representam 25%, 50%, e 75% do comprimento de sobreposição da junta adesiva. A análise de tensões, e a previsão da resistência das juntas tubulares com estes defeitos em três adesivos diferentes, Araldite® AV138, Araldite® 2015, e SikaForce® 7752, é estudado nos subcapítulos seguintes.

3.2.1 Condições estudadas

Os modelos das juntas tubulares adesivas criados para os estudos numéricos, apresentam a mesma configuração geométrica que as juntas criadas para a análise experimental mencionada no capítulo 3.1.1, e as mesmas condições da análise numérica indicada no capítulo 3.1.5. Dito isto, nos modelos de juntas com defeito concebidos no ABAQUS®, foi necessário criar uma partição adicional, e retirar uma parte do adesivo no centro da área de ligação. Na Figura 62 a) esta representado o modelo de uma junta tubular, com um comprimento de sobreposição (L_0) de 20 mm, enquanto na Figura 62 b), c) e d), é possível observar os modelos com os três tamanhos de falha de adesivo estudados, 25%, 50% e 75% do comprimento de sobreposição, respetivamente. O mesmo estudo foi realizado para as juntas com $L_0=40$ mm.

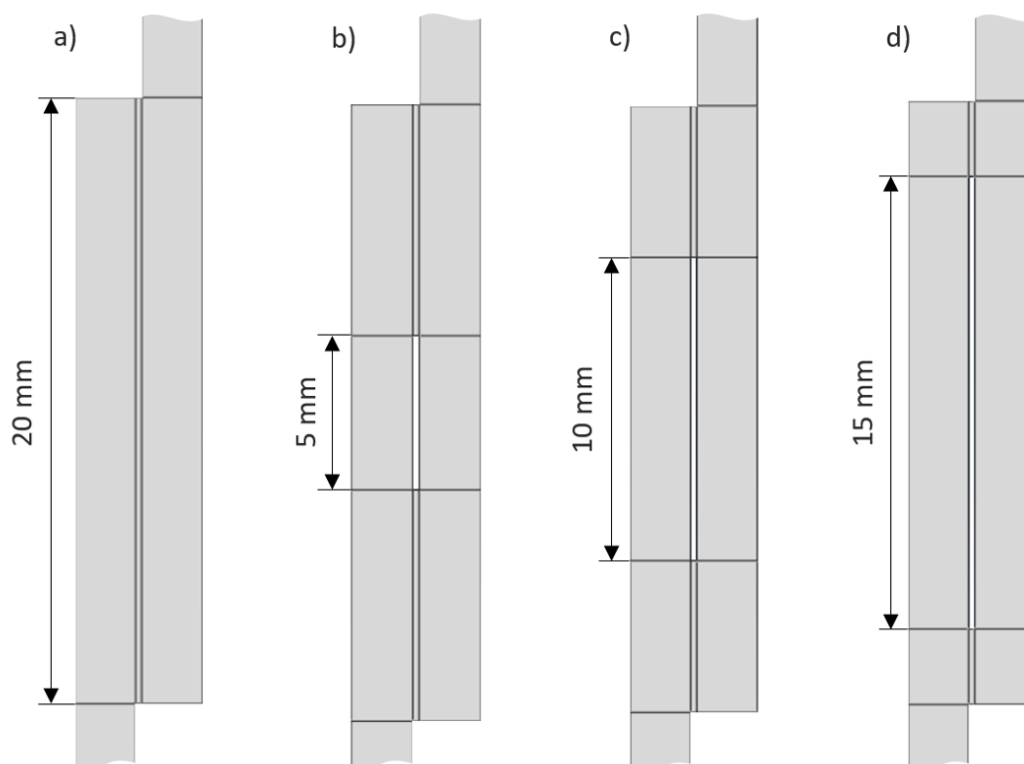


Figura 62 - Modelos de juntas tubulares adesivas a) sem defeito, b) com 25%, c) com 50% e d) com 75% de defeito.

3.2.2 Análise de tensões na junta

Neste capítulo são analisadas as tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}), obtidas através de modelos numéricos gerados no programa ABAQUS®. Tal como foi referido no capítulo 3.1.6, os gráficos produzidos servirão para comparar a distribuição de tensões normalizadas (τ_{xy}/τ_{avg} e σ_y/τ_{avg}) para cada dimensão de falha de adesivo e para cada L_0 , em função de x normalizado (x/L_0). As curvas representadas nos seguintes capítulos mostram a distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} e σ_y/τ_{avg} para um caminho criado no modelo numérico da junta tubular. Este caminho está representado na Figura 63, onde se pode observar onde se encontra o ponto em que $x=0$ e $x=1$, sendo que as tensões representadas nos gráficos demonstram a distribuição de tensões localizada no centro do adesivo.

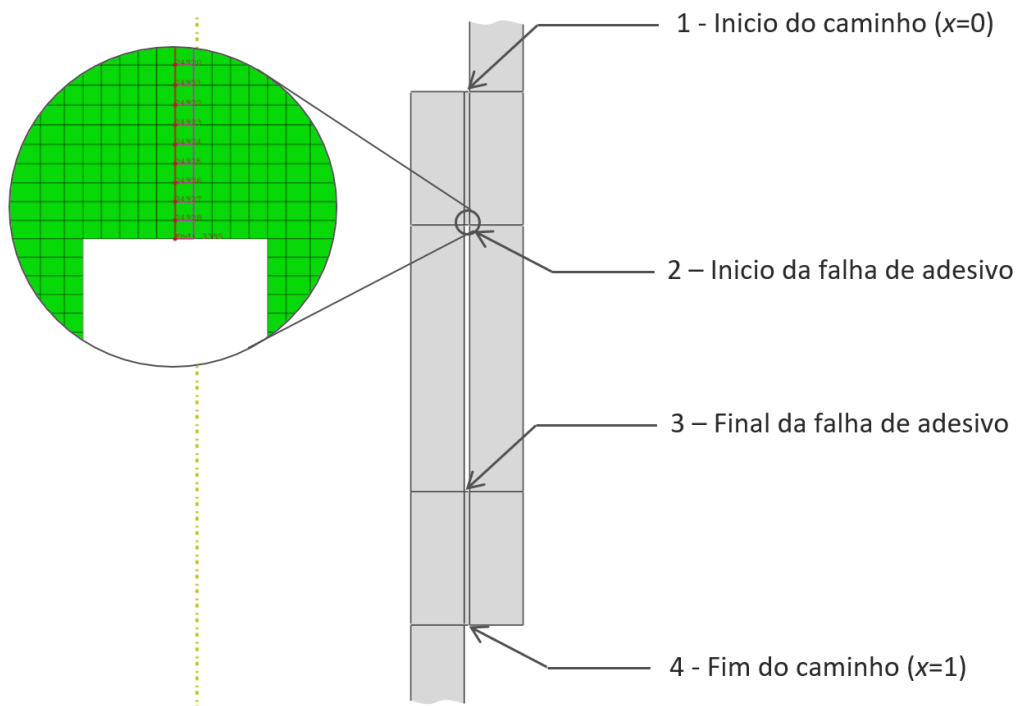


Figura 63 – Localização dos pontos $x=0$ e $x=1$ no modelo de uma junta tubular com 50% de defeito.

3.2.2.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 64 estão representadas as curvas de distribuição de tensões σ_y normalizadas, dos modelos de juntas tubulares, em função de x normalizado, para os três adesivos estudados: Araldite® AV138; Araldite® 2015; SikaForce® 7752. Nos gráficos é possível observar a influência dos três defeitos criados nas juntas e comparar a distribuição de tensões σ_y / τ_{avg} de cada um deles com a de uma junta ideal (sem defeito) para cada adesivo.

Como era de esperar, quanto maior é a dimensão do defeito, maior são as tensões σ_y aplicadas nas extremidades das juntas. No entanto, o Araldite® AV138 (Figura 64 a)) por se tratar de um adesivo rígido, é dos três estudados, o que apresenta um aumento menor da tensão máxima de arrancamento nas extremidades da junta, principalmente para as falhas de adesivo de menores dimensões, 25% e 50% de defeito, onde a tensão de arrancamento máxima normalizada apenas tem um aumento percentual em relação à junta sem defeito de 7% e 25%, respectivamente. No entanto, com uma falha de adesivo de 15 mm (75% de defeito), já se pode observar um aumento mais significativo, de 63,5%. Esta diferença mais acentuada significa que a falha de adesivo está a atingir uma área onde se concentram tensões, que é fundamentalmente nas extremidades, sendo que o centro da área de sobreposição praticamente não contribui para a resistência da junta.

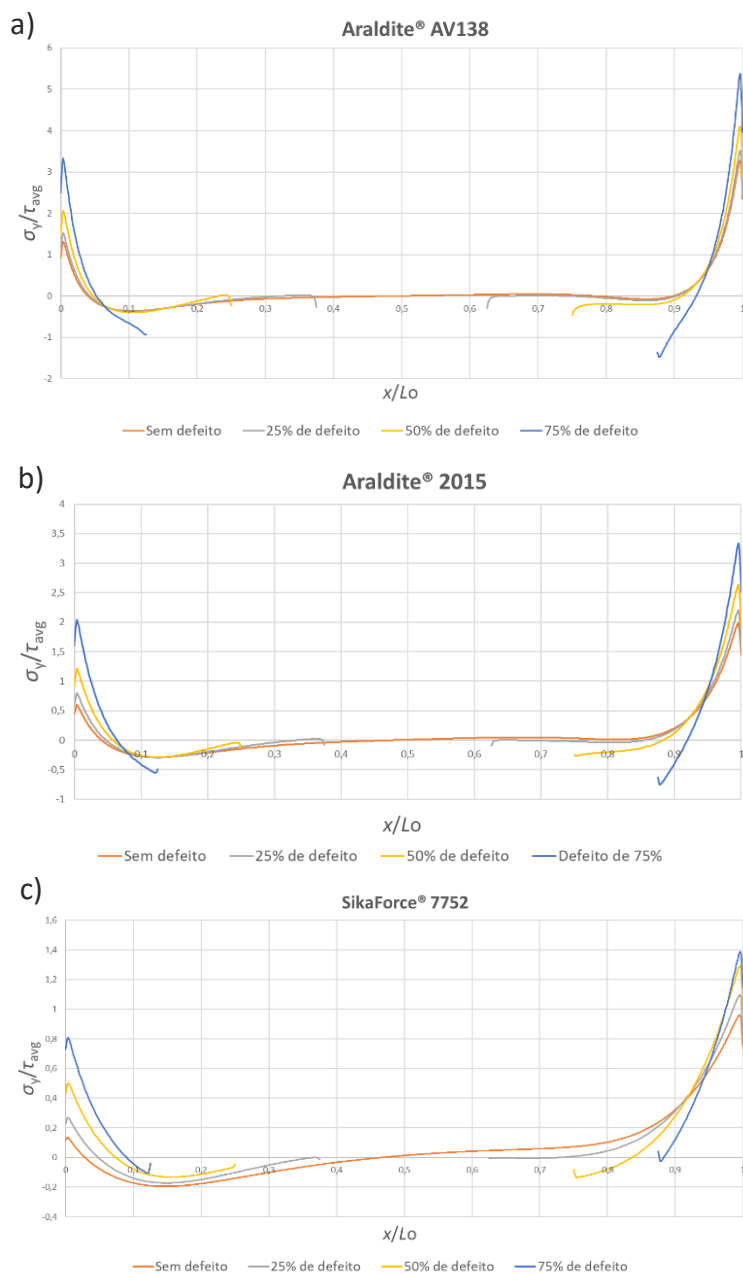


Figura 64 – Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.

Na Figura 64 b) estão representadas as curvas σ_y/τ_{avg} para o adesivo Araldite® 2015, que apresenta um comportamento em relação aos defeitos no adesivo de forma bastante similar ao do Araldite® AV138. No entanto, visto que é um adesivo mais dúctil e menos resistente, apresenta um aumento percentual nos picos de tensão superior. Sendo que, para os tamanhos de defeitos por ordem crescente, obtém um aumento de 11%, 33,1% e 68,5% nas tensões de arrancamento máximas na extremidade do adesivo.

Tal como esperado, as juntas com o SikaForce® 7752 (Figura 64 c)) são as que apresentam picos de concentração de tensões mais reduzidos, uma vez que se trata de um adesivo extremamente dúctil. É também, dos três adesivos, aquele que sofre menos alterações na distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} , sendo que apenas apresenta um incremento de 44,3% no pico de tensão registado para a um defeito de 75%. No entanto, enquanto os restantes adesivos sofrem pequenas alterações nos defeitos de 25% e 50%, este adesivo adquire um aumento superior nestas tensões de pico, de 14% e 34%, respetivamente. Isto significa o adesivo SikaForce® 7752 demonstra um aumento aproximadamente constante nos aumentos percentuais dos valores de pico com o aumento da falha.

Os valores de σ_y/τ_{avg} negativos significam que a junta está a sofrer esforços de compressão. Note-se que, no caso dos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, o valor das tensões de compressão no interior do adesivo aumenta com a dimensão do defeito, o que se deve ao facto de a área ligada que vai resistir ao esforço diminuir conforme a dimensão do defeito aumenta. No entanto, no caso do adesivo SikaForce® 7752 este efeito não é reproduzido, resultante de uma rigidez mais reduzida do adesivo.

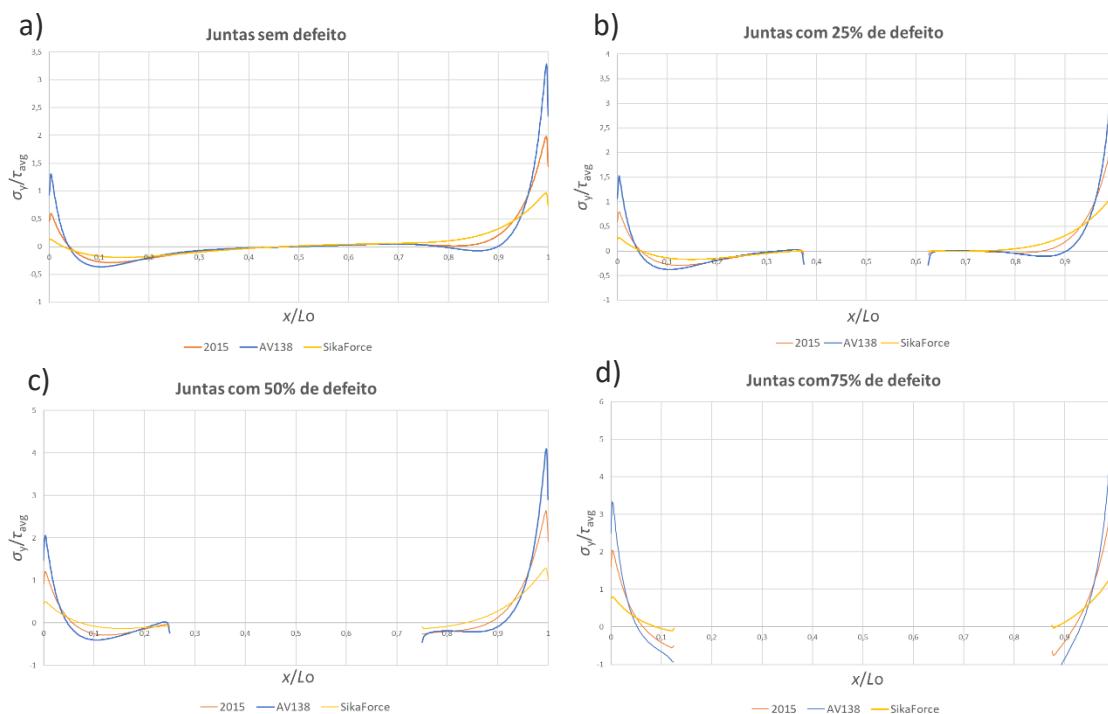


Figura 65 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.

Na Figura 66 é possível observar as tensões de compressão e de tração instaladas no adesivo exterior de uma junta tubular de $L_0=20$ mm com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.

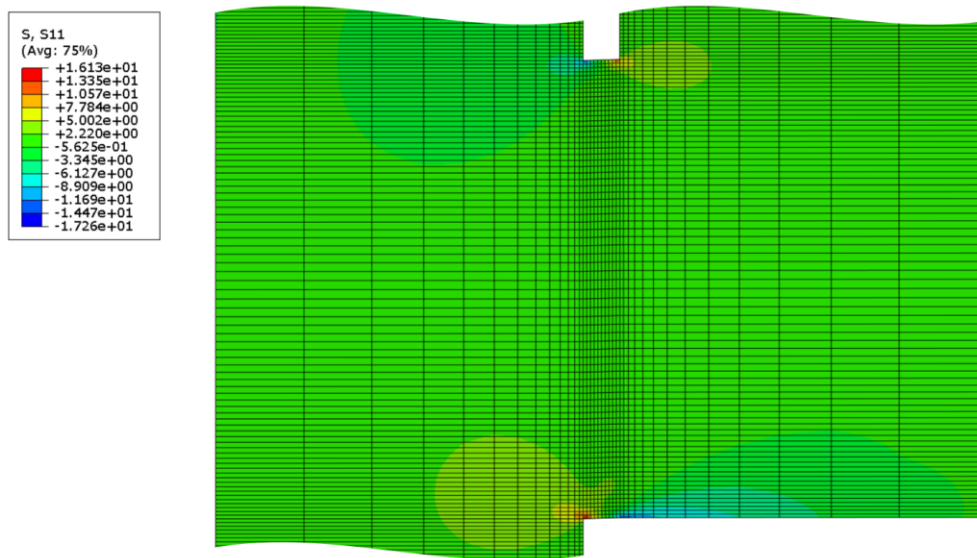


Figura 66 – Representação das tensões de arrancamento num modelo de uma junta tubular de $L_0=20$ mm com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.

A partir das distribuições de tensões σ_y/τ_{avg} , apresentadas nos gráficos da Figura 67, denota-se um aumento significativo das tensões de pico, comparativamente com as demonstradas para juntas tubulares com $L_0=20$ mm. O aumento de L_0 resulta num acréscimo da rigidez da junta adesiva e, como tal, passa a existir uma maior capacidade de absorção da energia imposta pelo carregamento e, conseqüentemente, um aumento das tensões instaladas.

Como foi visto, as juntas de $L_0=20$ mm que usam o adesivo Araldite® AV138 são as que sofrem um incremento de tensões menor para defeitos de 25% e 50% e um dos maiores para o defeito de 75%. Portanto, para juntas com $L_0=40$ mm (Figura 67 a)), as falhas de adesivo de 25% e 50% de L_0 praticamente não causam influência na distribuição de tensões da junta, sendo que ambos os defeitos representam um aumento de menos do que 3% da tensão máxima de arrancamento aplicada. No entanto, para o maior comprimento de falha a situação não se repete sendo que, ao contrário da junta com $L_0=20$ mm, a de $L_0=40$ mm obtém o menor aumento de tensões σ_y de pico dos três adesivos ($\approx 25\%$). Como foi referido anteriormente, devido à sua rigidez, a maior parte das tensões aplicadas no adesivo Araldite® AV138 encontram-se nas extremidades, pelo que o aumento de L_0 para o dobro faz com que o adesivo na extremidade da junta passe de um comprimento de 2,5 mm para 5 mm. Esta diferença é fundamental para não enfraquecer em demasia a rigidez das juntas com adesivos frágeis.

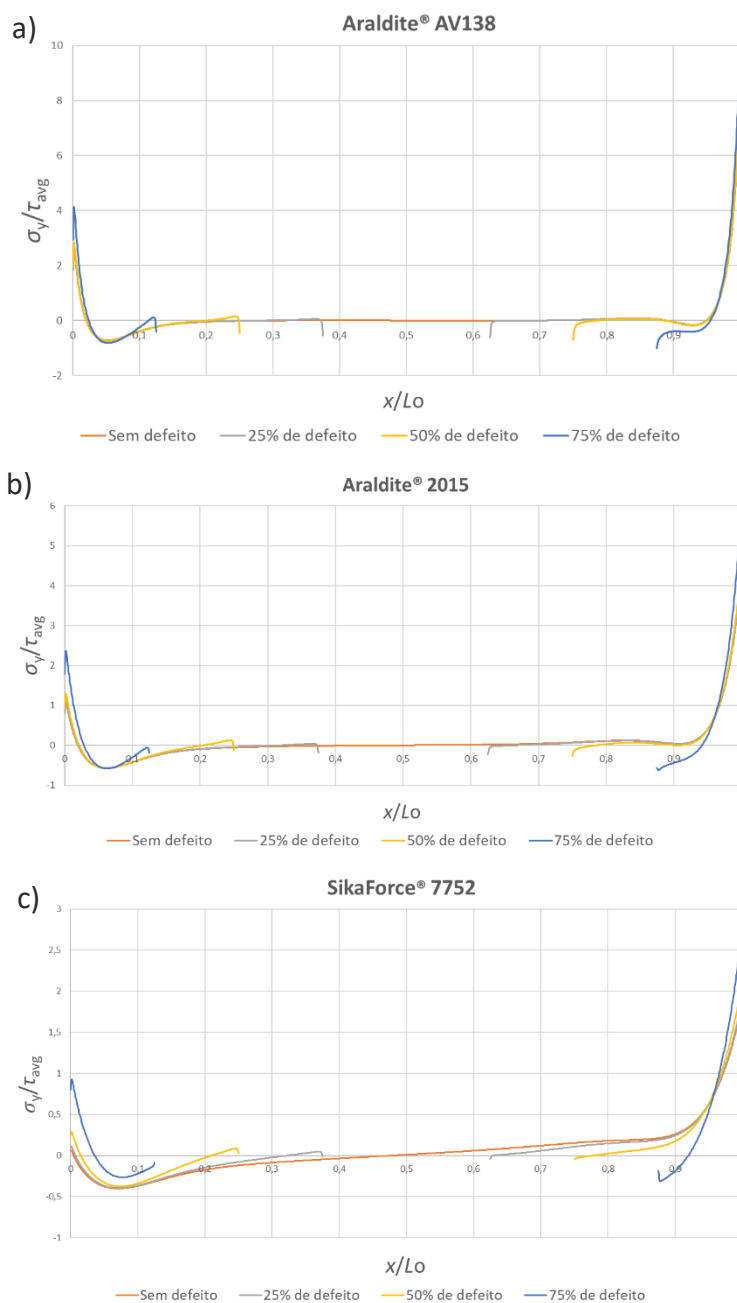


Figura 67 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.

De novo, o adesivo Araldite® 2015 cujas curvas σ_y/τ_{avg} estão representadas na Figura 67 b), apresenta uma reação aos defeitos introduzidos similar ao Araldite® AV138. No entanto, devido à ductilidade mais elevada, a distribuição de tensões para o maior defeito, não sofreu uma redução tão elevada comparativamente com a junta de $L_0=20$ mm. A tensão de pico obteve um aumento de 38,1% comparativamente com a junta sem defeito.

O adesivo SikaForce® 7752, ao contrário do sucedido nos modelos com de $L_o=20$ mm, não demonstra um aumento linear das tensões σ_y de pico conforme o tamanho de falha aumenta. Isto deve-se ao facto de, com o aumento da rigidez da junta adesiva, o defeito de maiores dimensões resultar num aumento no pico de tensões perto dos 50% em relação à junta sem defeito. Na Figura 68 é possível verificar que os picos de tensão no adesivo SikaForce® 7752 são muito inferiores em magnitude comparativamente ao registado para os restantes adesivos, devido ao menor valor de E .

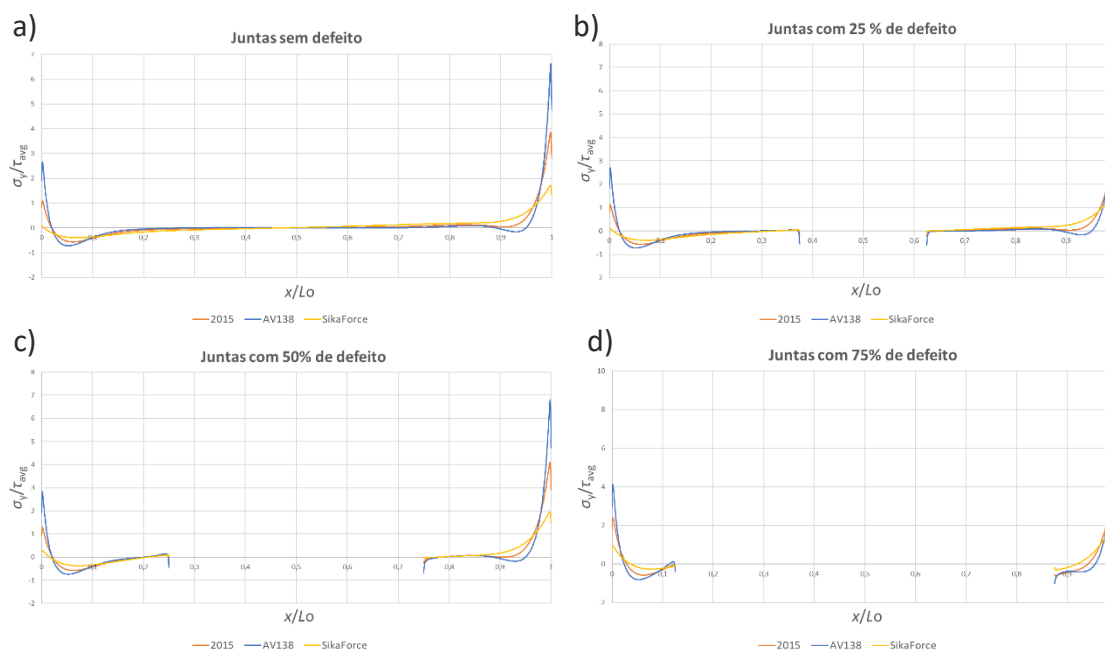


Figura 68 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_o=40$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.

3.2.2.2 Tensões de corte

A distribuição das tensões τ_{xy} , tal como se sucedeu com a distribuição de tensões σ_y , demonstra valores mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição. Na Figura 69 estão representados os gráficos com as curvas τ_{xy}/τ_{avg} de juntas com e sem defeitos para os três adesivos estudados. Desde logo, pode-se observar que, tal como acontece com as tensões σ_y , as tensões τ_{xy} são afetadas pelos defeitos introduzidos nas juntas tubulares. No entanto, excluindo o Araldite® AV138, o resto dos adesivos obtém um aumento percentual superior dos valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} do que de σ_y/τ_{avg} .

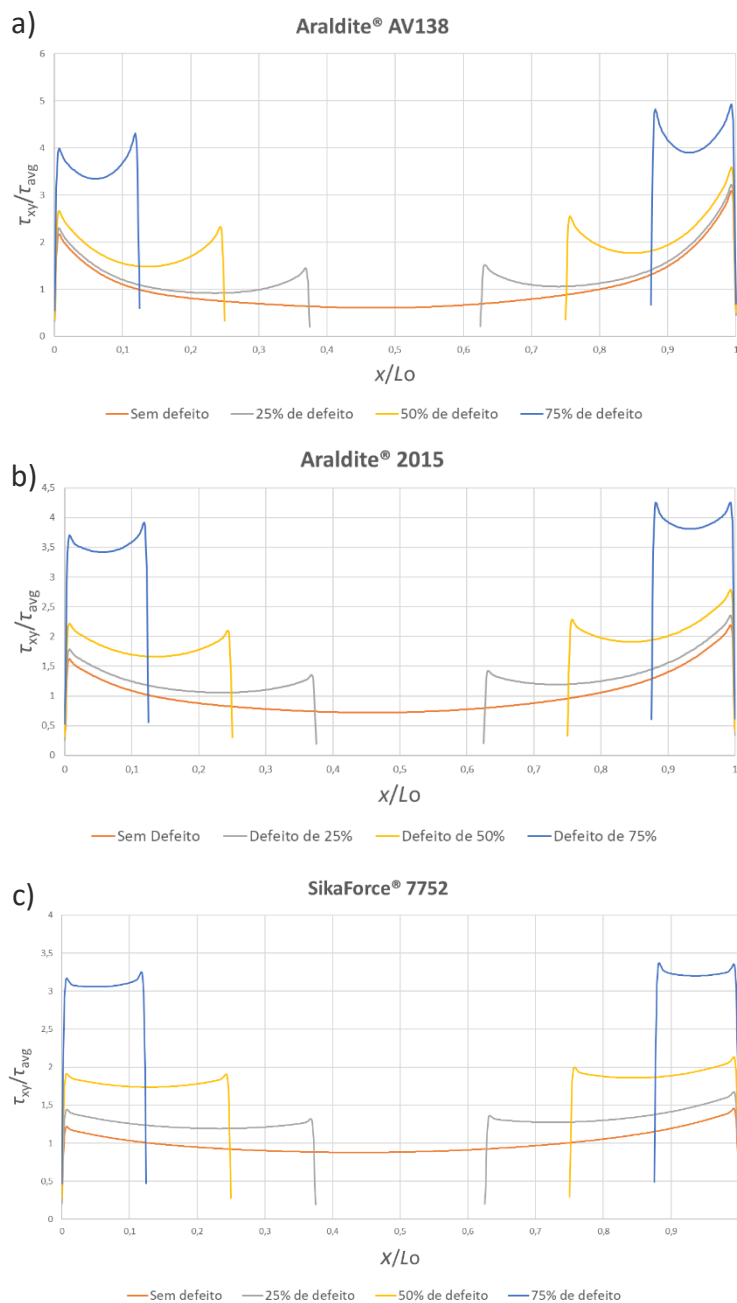


Figura 69 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.

O adesivo que apresenta tensões τ_{xy} mais elevadas é o Araldite® AV138 (Figura 69 a)), sendo que a junta sem defeito apresenta como valor de tensão τ_{xy}/τ_{avg} máximo de 3, enquanto as restantes com 25%, 50% e 75% de defeito alcançam valores de 3,2, 3,6 e 4,9, respetivamente. Isto significa que a junta apenas sofre um aumento percentual das tensões de corte de 4% e 16% para os defeitos menores, e 60% para a falha de maior dimensão. No caso do Araldite® 2015 (Figura 69 b)), o aumento de tensão τ_{xy} é superior sendo que, por ordem crescente do tamanho de defeito, as juntas

apresentam um aumento de 7,5%, 27% e 94% das tensões de pico. Para o adesivo SikaForce® 7752 (Figura 69 c)) esta diferença é ainda mais evidenciada, sendo que os modelos sofrem um aumento da tensão de pico de 0,2 para 25%, 0,68 para 50% e 1,9 para 75% de defeito. Visto que a junta sem defeito obteve uma tensão τ_{xy}/τ_{avg} máxima de 1,46, foi obtida mais do que o dobro no valor da tensão de corte máxima.

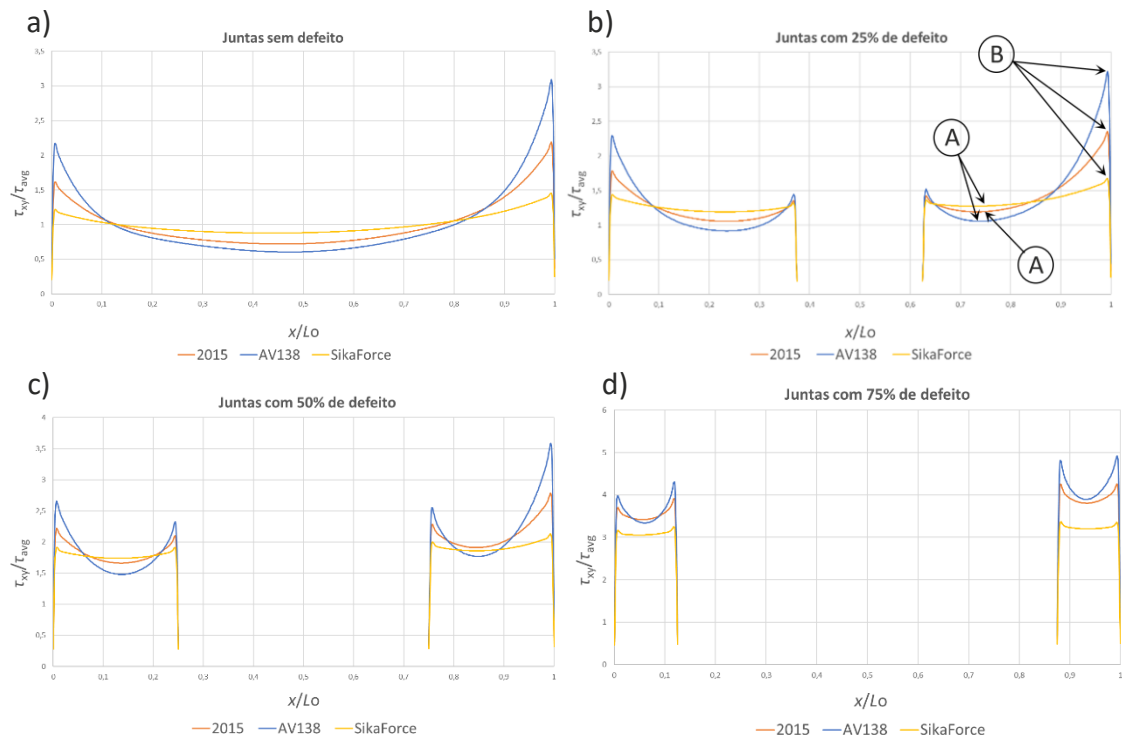


Figura 70 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=20$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.

Tal como foi verificado nas tensões de arrancamento, o adesivo Araldite® AV138 é o que possui gradientes de tensão τ_{xy} mais elevados. Esta diferença é bem visível na Figura 70, onde são comparados os três adesivos para cada tamanho de defeito. Devido à rigidez deste adesivo, as tensões τ_{xy}/τ_{avg} são mais distribuídas pela extremidade do adesivo do que no centro, efeito que não é tao notório em adesivos com maior flexibilidade. Por exemplo, nas juntas de 25% de defeito com $L_0=20$ mm, cujas curvas de tensão τ_{xy}/τ_{avg} estão representadas na Figura 70, a diferença entre os pontos A e B (sendo o primeiro o valor máximo e o segundo o valor mínimo para o adesivo exterior) é para o Araldite® AV138 de 2,1, que representa um decréscimo de tensão τ_{xy} de 67%. Por sua vez, os adesivos mais dúcteis apresentam uma curva menos acentuada: o Araldite® 2015 obtém uma diferença de 49% e o SikaForce® 7752 apenas diminui 24% em relação às extremidades.

Este comportamento deve-se à deformação diferencial de cada um dos substratos ao longo de L_0 , que é nula na extremidade livre de cada aderente e aumenta

progressivamente até à extremidade oposta, que provoca escorregamento localizado nas extremidades da sobreposição. Na região central da sobreposição estes efeitos são anulados, e o aparecimento de tensões τ_{xy} é apenas devido ao esforço de tração aplicado na junta, que provoca o deslizamento em corte dos aderentes. Pode-se verificar que quanto maior é a percentagem de defeito na junta, também maior é o valor de pico das tensões normalizadas (sendo esta variação mínima até às juntas com 50% de defeito). No interior do adesivo este valor aproxima-se cada vez mais do valor na extremidade da junta. Isto acontece devido à diminuição de área colada que tem de resistir ao esforço aplicado, levando a zona interna do adesivo a contribuir mais para a resistência da junta.

A Figura 71 mostra as tensões τ_{xy} instaladas no adesivo exterior de uma junta tubular de $L_0=20$ mm com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.

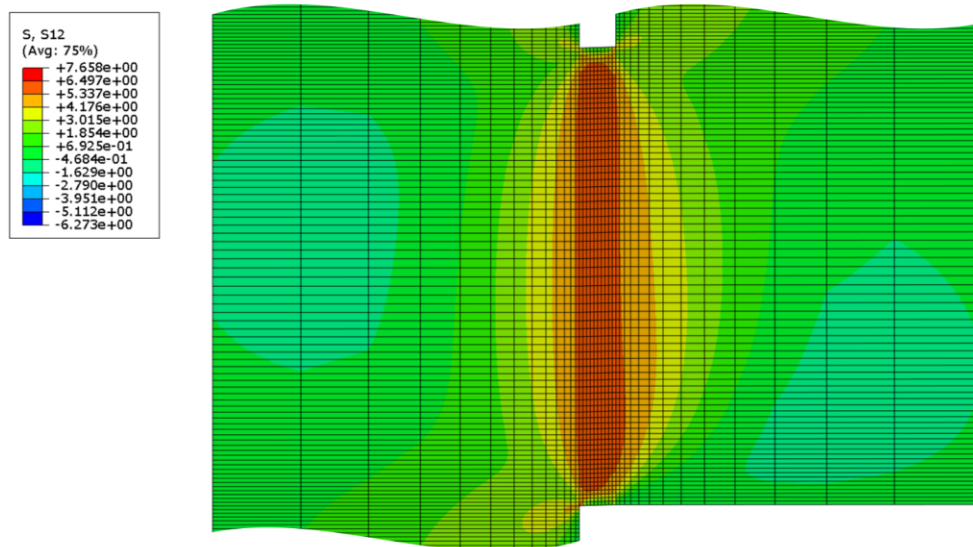


Figura 71 - Representação das tensões de corte num modelo de uma junta tubular de $L_0=20$ mm com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.

Os valores de tensão τ_{xy} aumentam de $L_0=20$ mm para $L_0=40$ mm devido ao gradiente crescente de deformações longitudinais nos aderentes causados pelo aumento da carga suportada pela junta resultante de um aumento da área de colagem.

Nas juntas adesivas em que se empreguem adesivos frágeis a resistência da junta é afetada pelo facto de as tensões τ_{xy} e σ_y não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição. Por sua vez, os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nessas regiões, ao mesmo tempo que a região interna da sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes, o que possibilita um aumento da resistência da junta para valores de L_0 superiores. Sendo assim, é natural que o Araldite® AV138 seja o adesivo que sofre um maior incremento de tensões τ_{xy} máximas e o SikaForce® 7752 por sua vez, o que sofre um menor aumento percentual no pico de tensões.

No caso do Araldite® AV138 (Figura 72 a)) as tensões τ_{xy} de pico praticamente duplicaram com o aumento de L_0 visto que, apesar de uma maior área de contacto, as extremidades do adesivo continuam a suportar a maior parte da carga imposta na junta. No entanto, com o aumento do defeito, a τ_{xy} máxima não apresenta um aumento tão significativo como na junta sem defeito, sendo que para um defeito de 75% apenas adveio um incremento de 45% na tensão de pico.

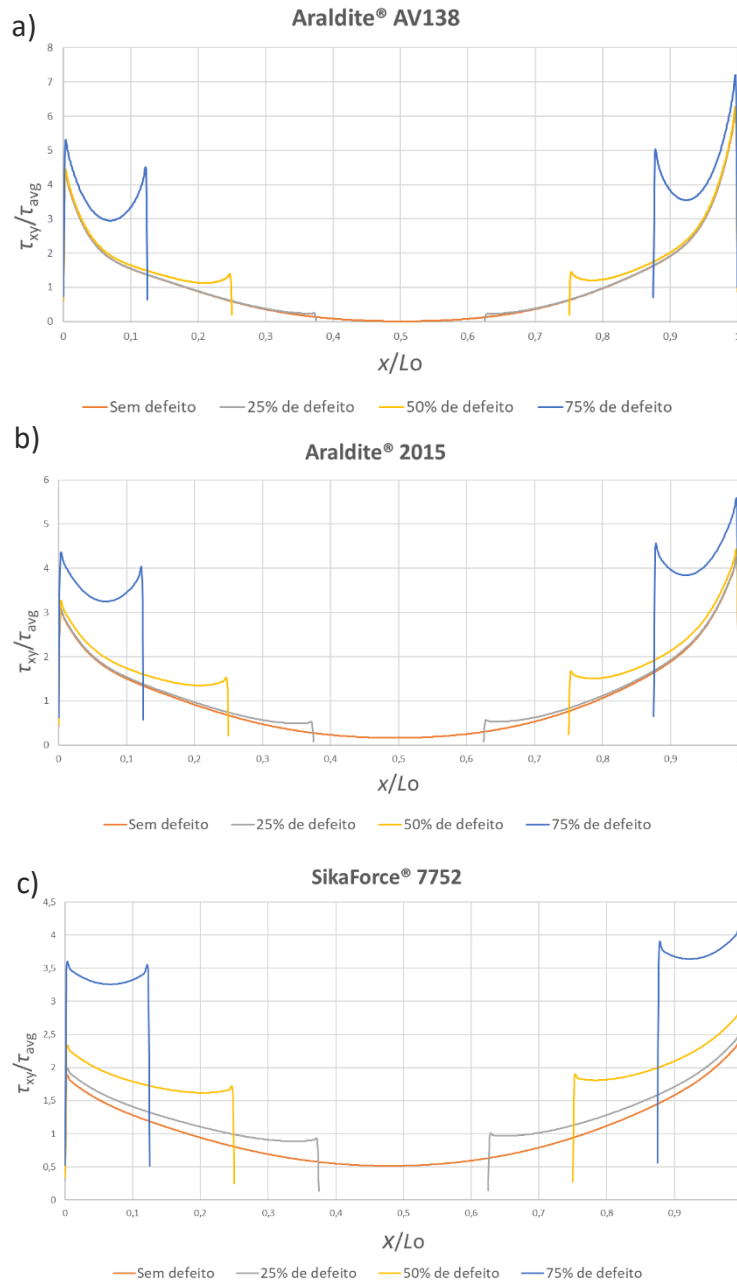


Figura 72 - Distribuição das tensões τ_{xy} / τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, em função das dimensões de defeito, para os três adesivos: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752.

Apesar de se observar esta diferença nos três adesivos note-se que, quanto mais dúctil for o adesivo, menor é o incremento de tensões de pico para valores de L_0 superiores. Assim, o adesivo Araldite® 2015 (Figura 72 b)) não obteve um crescimento de tensões τ_{xy} de pico tão elevado, facto que é ainda mais evidenciado para o SikaForce® 7752 (Figura 72 c)), que apenas obteve um aumento de 67%. Isto explica porque é que o Araldite® 2015 apesar de não deter de propriedades tao boas como o Araldite® AV138, é capaz de aguentar cargas superiores para valores de L_0 maiores.

Nos gráficos da Figura 73 é notória a diferença entre a distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} das juntas para cada um dos três adesivos, sendo que o adesivo mais rígido é o que apresenta variações mais elevadas, enquanto o mais dúctil é o que apresenta menos variações.

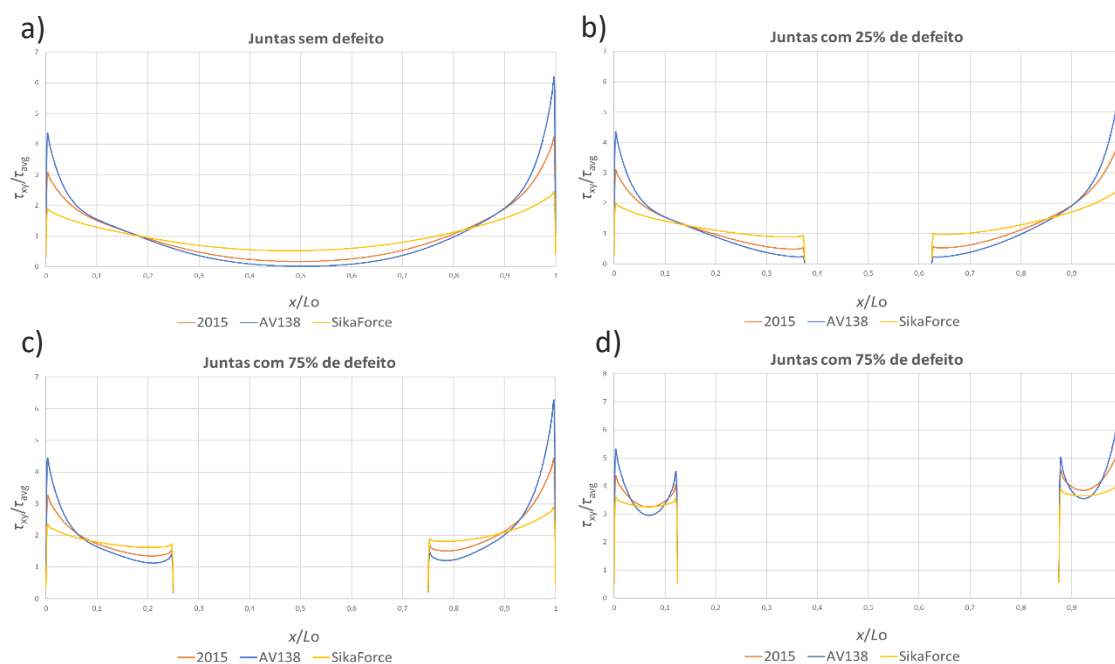


Figura 73 - Distribuição das tensões τ_{xy} / τ_{avg} de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, em função dos três adesivos, para os quatro status de junta estudados: a) Sem defeito; b) 25% de defeito; c) 50% de defeito; d) 75% de defeito.

3.2.3 Estudo da variável de dano

Através do uso da variável SDEG no programa ABAQUS® é possível avaliar a evolução do dano ao longo do adesivo nas juntas tubulares, sendo que é dado o valor da variável de dano em cada instante da simulação. Através deste estudo é possível compreender o fenómeno de degradação do adesivo nas diversas fases do carregamento, graças aos MDC implementados na técnica EF.

A variável SDEG tem um valor de zero no início do dano e um valor de 1 na perda total da resistência do material, ou seja, para valores de zero o adesivo ainda se encontra na sua zona elástica, e para valores entre 0 e 1, o adesivo encontra-se na fase plástica.

Neste estudo apresenta-se a variável de dano SDEG no instante em que as juntas tubulares atingem o valor de $P_{m\acute{a}x}$. Portanto, a variável do dano tem como finalidade avaliar a propagação do dano e explicar as variações de resistência registadas numericamente e experimentalmente.

3.2.3.1 Araldite® AV138

Na Figura 74 estão representados os quatro modelos das juntas tubulares com $L_0=20$ mm estudados, onde é revelada a variável SDEG no momento de $P_{m\acute{a}x}$. A partir de uma análise visual dos modelos é possível perceber que, como era esperado, o dano é iniciado na extremidade do adesivo o que se encontra de acordo com a localização dos picos de tensão σ_y e τ_{xy} anteriormente determinados e discutidos e que, devido à dificuldade de plastificação do Araldite® AV138, apenas ocorre na extremidade exterior no momento de $P_{m\acute{a}x}$. Pode-se também apreender que, com a falha de adesivo e o seu respetivo aumento de tamanho, o número de elementos danificados diminui. Este facto está relacionado com a progressiva diminuição de carga máxima suportada pelas juntas.

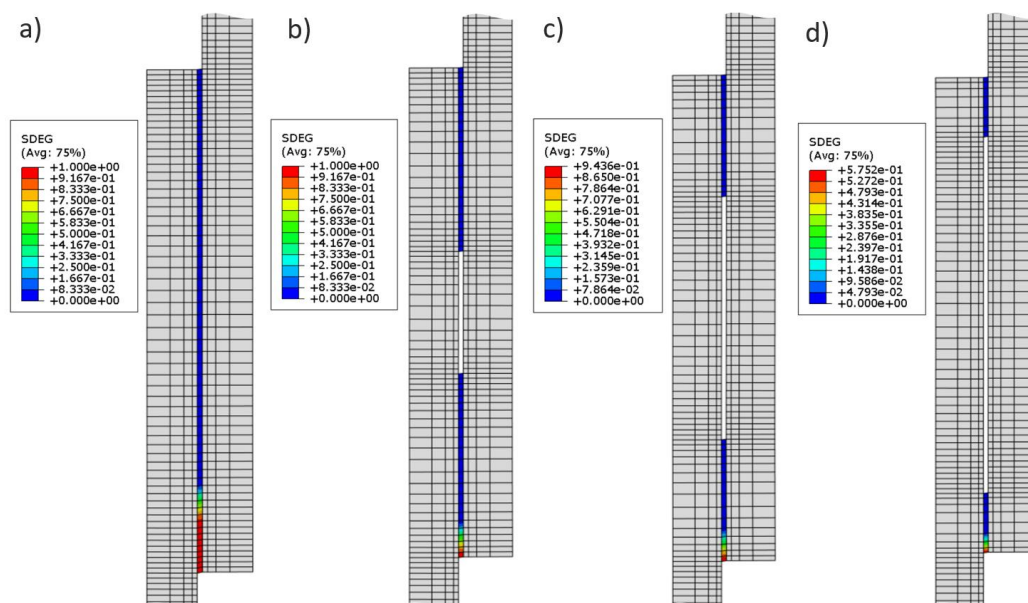


Figura 74 – Representação da variável de dano (SDEG) em modelos numéricos de juntas tubulares no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos com $L_0=20$ mm e a) sem defeito, b) 25%, c) 50% e d) 75% de defeito ligados pelo Araldite® AV138.

Nos graficos da Figura 75 estão representadas as curvas com os valores da variável do dano para juntas com $L_0=20$ mm. Pela sua análise, pode-se concluir que o adesivo Araldite® AV138 tem uma transição abrupta entre estados dos elementos coesivos, ou seja, verifica-se uma transição repentina de elemento não danificado para danificado. Como foi referido, este comportamento está relacionado com o facto de o Araldite® AV138 ser um adesivo rígido e, como tal, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ está apenas associado a uma pequena plastificação na extremidade do adesivo.

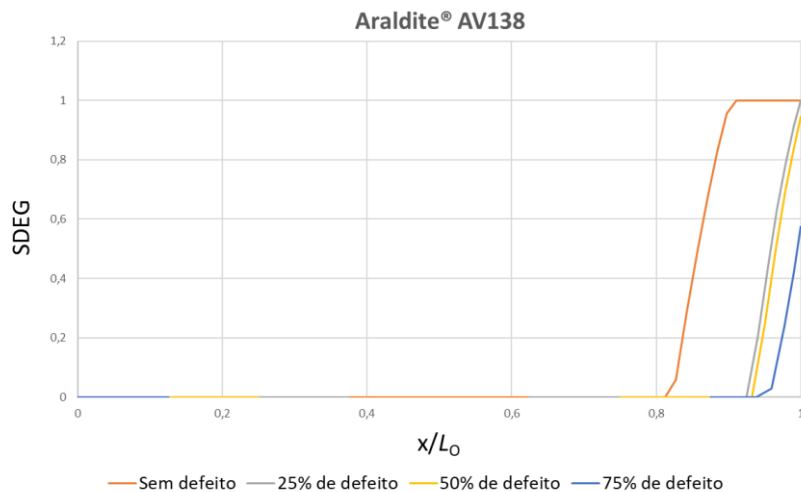


Figura 75 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=20$ mm para o adesivo Araldite® AV138.

O comportamento das juntas adesivas com o Araldite® AV138 mantém-se para $L_0=40$ mm, como se pode ver na Figura 76. No entanto, nos modelos de juntas sem falha e com falha de adesivo de 25% do comprimento de sobreposição, é notório um incremento de elementos danificados na extremidade da junta. Este comportamento é similar ao da junta sem defeito com $L_0=20$ mm, o que significa que a partir de um determinado valor de $P_{m\acute{a}x}$ ocorre a plastificação de um comprimento maior da superfície de sobreposição.

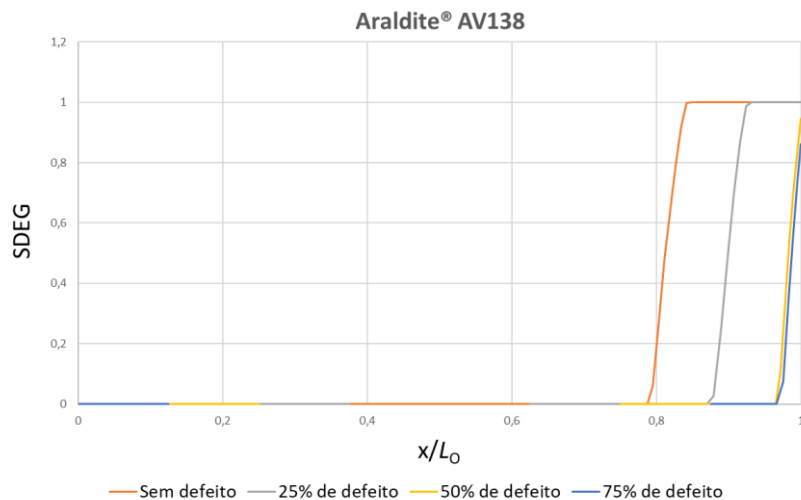


Figura 76 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm para o adesivo Araldite® AV138.

Na Figura 77 está representado um modelo de uma junta tubular sem defeito de $L_0=80$ mm ligada pelo adesivo Araldite® AV138. Através da variável SDEG é possível observar

as várias fases de evolução do dano, sendo que na primeira (representada pelo detalhe com o Nº 1) está representada a junta no instante em que atinge $P_{máx}$, na segunda o exato momento antes da rotura, no limite de plasticidade do adesivo, e, em terceiro, logo após ocorrer a rotura do material.

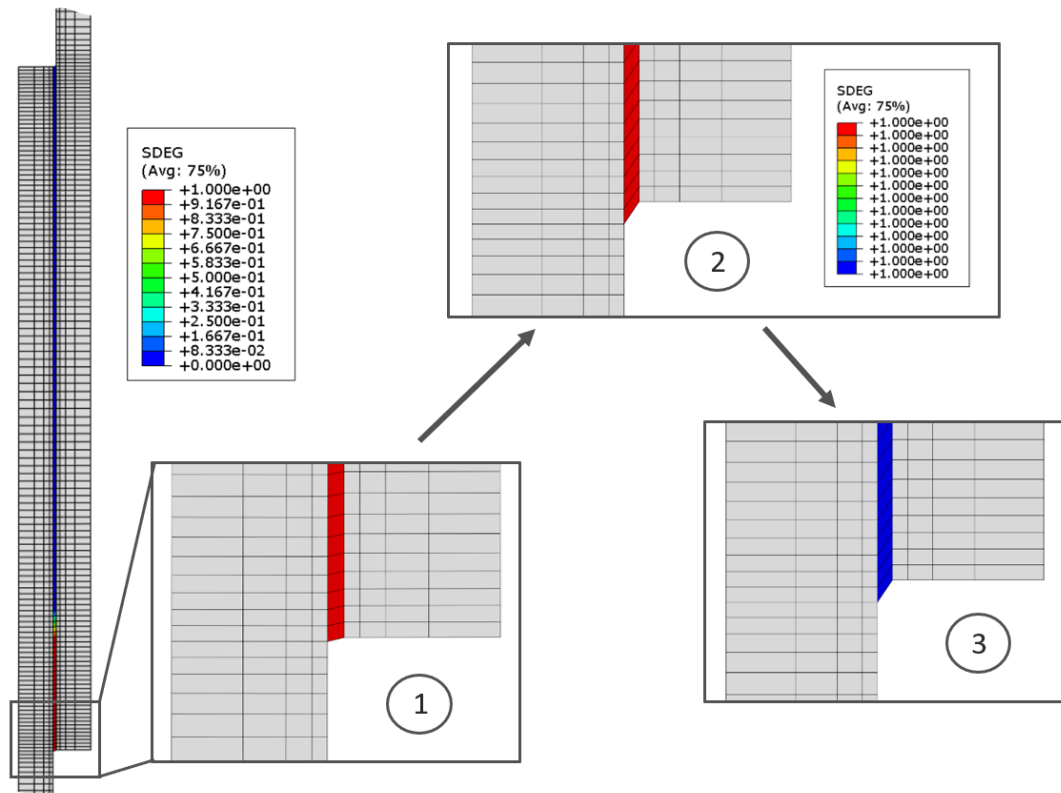


Figura 77 – Representação da evolução do dano através da variável SDEG no adesivo Araldite® AV138 numa junta sem defeito de $L_0=40$ mm

3.2.3.2 Araldite® 2015

A Figura 78 demonstra os quatro modelos de juntas tubulares com $L_0=20$ mm estudadas. As simulações são representativas da progressão do dano no instante em que as juntas atingem $P_{máx}$. A partir da análise das figuras é possível apreender várias diferenças sobre o modo como a variável SDEG varia entre o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015, sendo que neste adesivo não é notória uma mudança tão abrupta entre elementos danificados e os que ainda não sofreram degradação. É também possível perceber que, para além de ambas as extremidades de sobreposição apresentarem dano, o valor de SDEG é menos elevado na extremidade do adesivo Araldite® 2015.

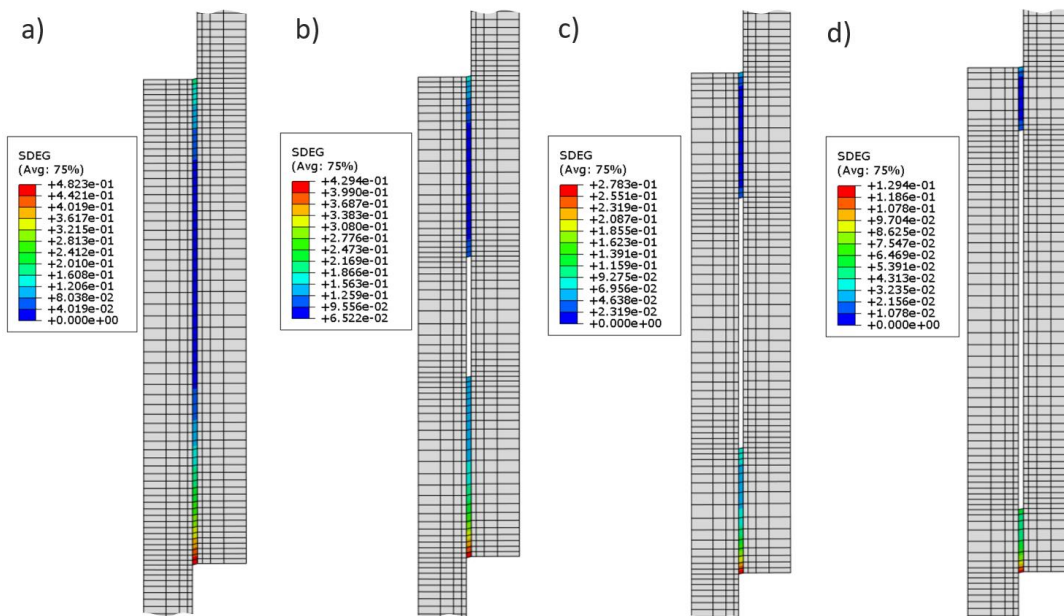


Figura 78 - Representação da variável de dano (SDEG) em modelos numéricos de juntas tubulares no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos com $L_0=20$ mm e a) sem defeito, b) 25%, c) 50% e d) 75% de defeito ligados pelo Araldite® 2015.

Nos gráficos da Figura 79 estão representadas as curvas com os valores da variável do dano para juntas com $L_0=20$ mm. Como foi referido, ambas as extremidades da junta apresentam valores de dano, mesmo que reduzidos quando comparados com os valores obtidos na extremidade exterior. Para alem disso, esta variável cobre uma área maior da junta ao contrário do adesivo Araldite® AV138, que apenas apresentava plastificaao na extremidade.

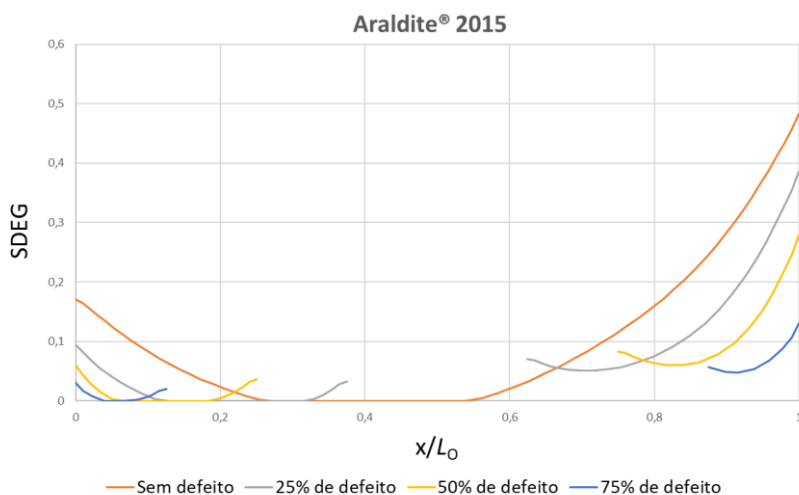


Figura 79 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=20$ mm para o adesivo Araldite® 2015.

Portanto, com o aumento progressivo da ductilidade dos adesivos, a evolução do dano torna-se cada vez mais suave, sendo que este efeito é perceptível na Figura 80, onde se pode observar a evolução do dano no adesivo Araldite® 2015 pela variável SDEG em a) e observar a distribuição de tensões na junta em b).

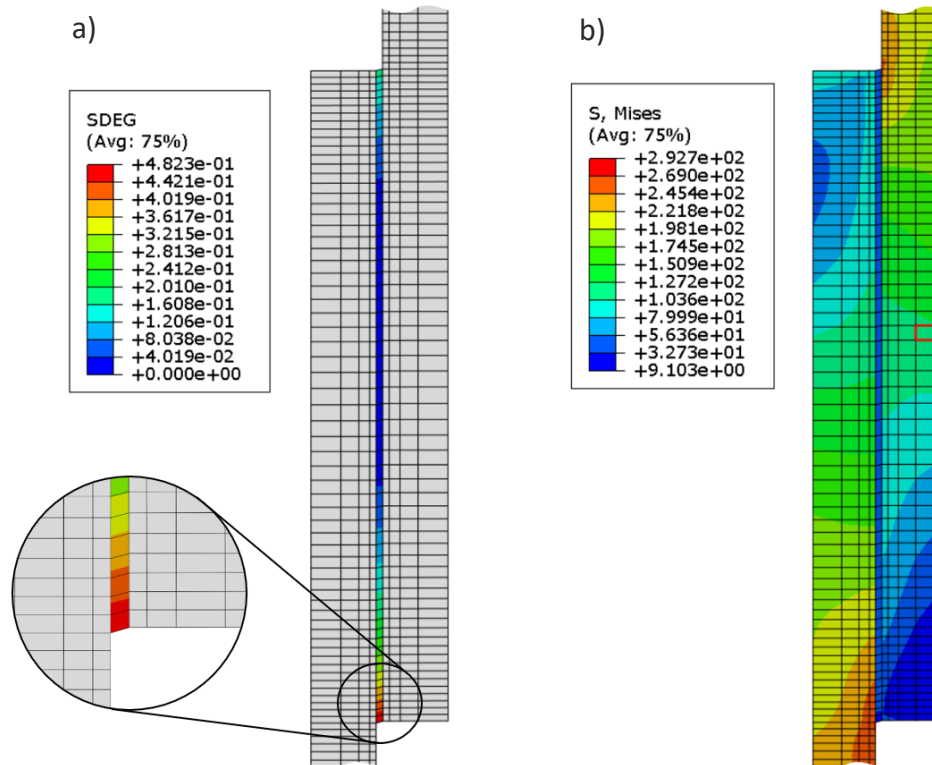


Figura 80 – Modo de falha de uma junta tubular sem defeito ligada pelo adesivo Araldite® 2015, a) pela variável SDEG e b) pela variável S, Mises.

Como já foi possível comprovar, os adesivos dúcteis permitem uma maior extensão de dano, o que se deve traduzir num melhor desempenho da junta e corresponder a valores de $P_{máx}$ superiores, uma vez que uma maior porção do comprimento colado contribui para a resistência da junta. Portanto, o aumento de L_0 para o adesivo Araldite® 2015 devido à sua ductilidade característica promove uma maior extensão de dano, especialmente para o interior da região de colagem, resultante do aumento combinado das tensões de arrancamento e do efeito da deformação diferencial dos aderentes. Isso está relacionado com a degradação provocada pelo estado de tensão quando se atinge o valor de $P_{máx}$, que se reflete em relações $P_{máx}/L_0$ gradualmente menores à medida que L_0 aumenta. Deste modo, os valores de SDEG aumentam com L_0 , sendo que o mesmo acontece com os valores de $P_{máx}$.

As curvas das juntas tubulares sem defeito e com 25% de defeito apresentam um comportamento diferente uma vez que a falha se deu no substrato sendo que, no caso da junta com defeito, a estrição do tubo de alumínio perto da extremidade de sobreposição causou posteriormente a rotura pelo adesivo.

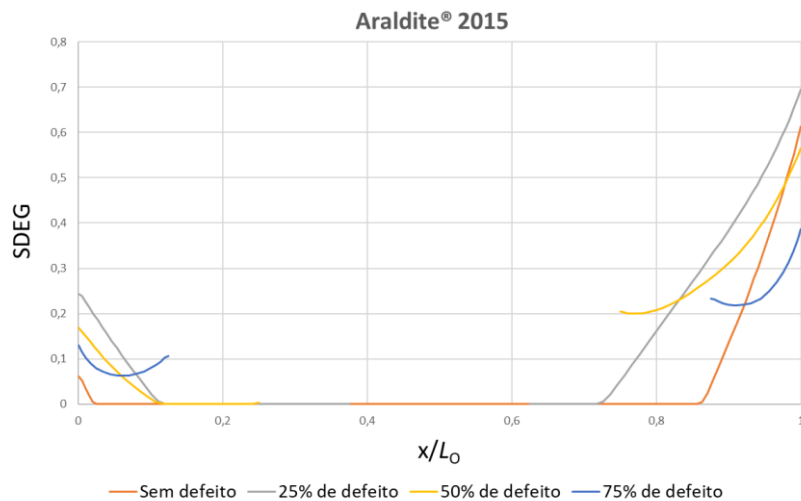


Figura 81 - Estado da variável de dano SDEG no instante de P_{\max} de modelos de juntas com $L_0=40$ mm para o adesivo Araldite® 2015.

Na Figura 82 está representada a evolução do dano numa junta tubular de $L_0=40$ mm com 75% de defeito. Em a) a figura é representativa do instante em que a junta atinge P_{\max} e em b) no instante exatamente antes da rotura pelo adesivo. Para este último, é perceptível o aumento do valor do dano por toda a superfície do adesivo exterior (principalmente nas extremidades) e da deformação plástica que este sofre até à falha.

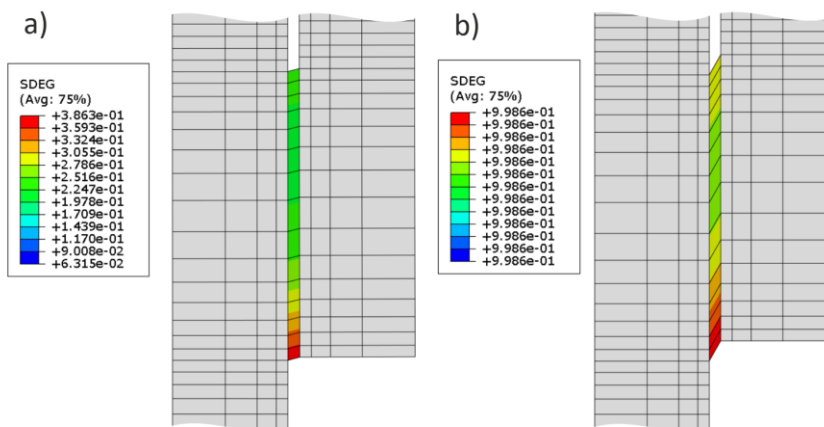


Figura 82 - Representação da evolução do dano através da variável SDEG no adesivo Araldite® 2015 numa junta com 75% de defeito de $L_0=40$ mm.

3.2.3.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 83 estão representados os modelos das juntas tubulares adesivas com $L_0=20$ mm ligadas pelo adesivo SikaForce® 7752.

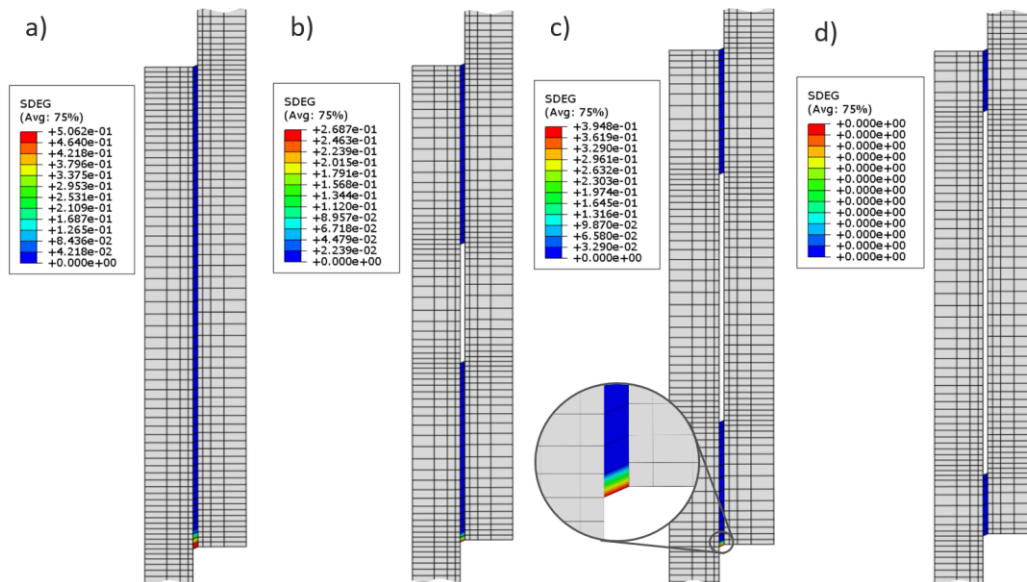


Figura 83 - Representação da variável de dano (SDEG) em modelos numéricos de juntas tubulares no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos com $L_0=20$ mm e a) sem defeito, b) 25%, c) 50% e d) 75% de defeito ligados pelo SikaForce® 7752.

A variável de dano nas juntas não ocorre conforme esperado para um adesivo com ductilidade elevada tal como o SikaForce® 7752 pois, para o instante em que a junta atinge o valor de $P_{m\acute{a}x}$, o dano encontra-se concentrado na extremidade do adesivo. Portanto, o valor de SDEG para os elementos não danificados é de 0 no interior da área de sobreposição, enquanto na extremidade o valor de SDEG apresenta uma subida abrupta. Este efeito é visível no gráfico da Figura 84, que compara os vários tamanhos de defeito em juntas tubulares de $L_0=20$ mm. Todos os modelos apresentam o mesmo comportamento, sendo que a junta sem defeito é a que apresenta o valor de dano superior, e vai diminuindo conforme o comprimento de falha de adesivo vai aumentando na junta. Esta variação está relacionada com o valor de carga máxima suportada por cada junta.

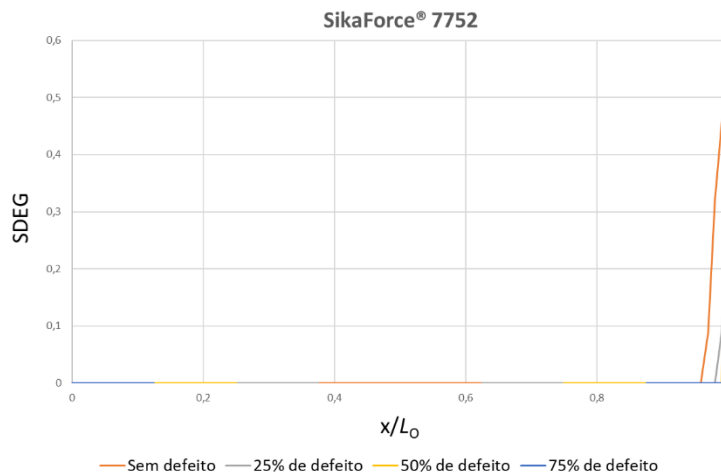


Figura 84 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=20$ mm para o adesivo SikaForce® 7752.

Na Figura 85 está representada distribuição de tensões de uma junta sem defeito com $L_0=20$ mm. A propagação do dano no adesivo é demonstrada através da variável SDEG pelo pormenor da extremidade de ligação. O modelo apresentado encontra-se numa fase mais avançada da simulação, sendo que já passou o valor de $P_{m\acute{a}x}$ e já se encontra perto da rotura.

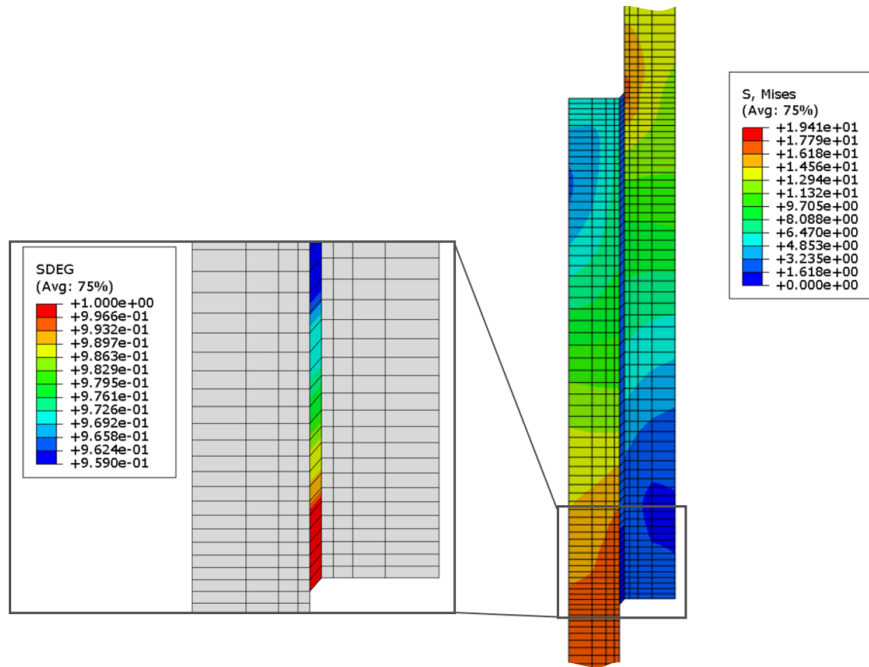


Figura 85 - Modo de rotura de um modelo de uma junta tubular sem defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.

As curvas obtidas para os modelos de juntas com $L_0=40$ mm são similares às obtidas para um comprimento de sobreposição menor, sendo que a única variação registada está relacionada com o valor da variável SDEG que, devido ao aumento da área de ligação, são obtidas juntas com maior resistência. Tal como foi observado anteriormente, para valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores, o valor da variável de dano aumenta.

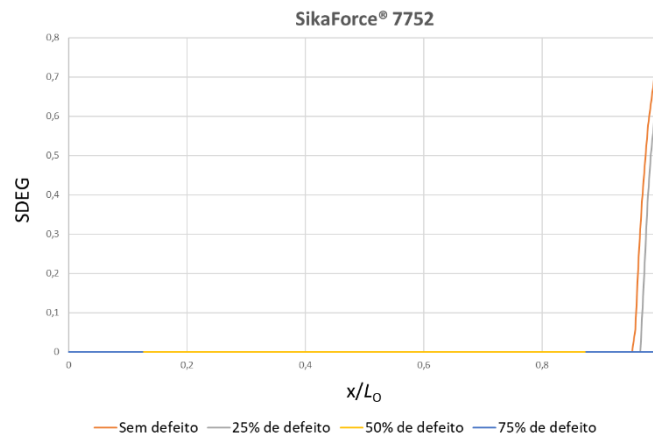


Figura 86 - Estado da variável de dano SDEG no instante de $P_{m\acute{a}x}$ de modelos de juntas com $L_0=40$ mm para o adesivo SikaForce® 7752.

3.2.4 Previsão da resistência

A comparação dos resultados gerados numericamente das curvas $P-\delta$, para os três tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752) em função dos diferentes comprimentos de falha, é concretizada neste capítulo. São também feitas previsões de $P_{\text{máx}}$ pelos MDC, para todas as juntas tubulares adesivas em estudo.

A Figura 87 mostra as curvas $P-\delta$ das juntas tubulares ligadas com o adesivo Araldite® AV138 para ambos comprimentos de sobreposição estudados.

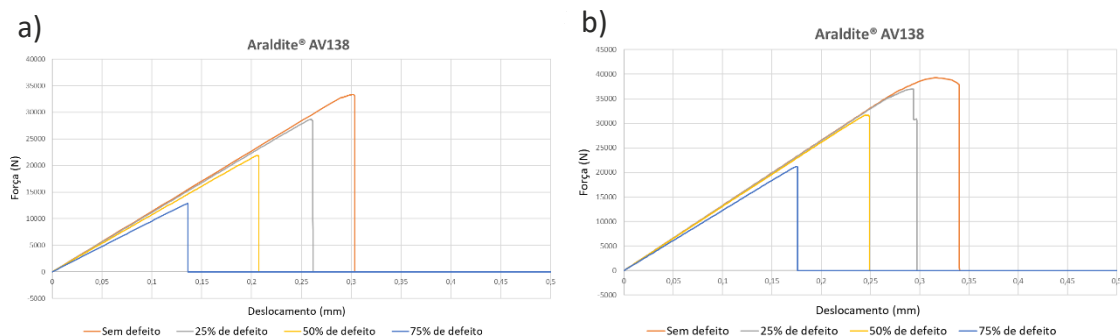


Figura 87 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm.

Na Figura 87 a) é possível observar diferenças significativas nas cargas máximas suportadas pelas juntas adesivas, consoante a dimensão do defeito. As curvas apresentam um comportamento linear até à rutura, e uma descida abrupta a partir deste ponto. Isto indica que as juntas não sofrem deformação após rutura, facto que está relacionado com a utilização de um adesivo frágil. Conclui-se assim que relativamente ao adesivo Araldite® AV138 foi obtida uma aproximação bastante razoável através da lei coesiva triangular, pois este apresenta um comportamento frágil e uma plastificação bastante reduzida. No entanto, na Figura 87 b) é possível observar, ainda que de forma reduzida, a plastificação antes da rutura da junta sem defeito ao atingir valores de carga próximos de 40 kN.

A Figura 88 demonstra os esforços aplicados na junta adesiva de $L_0=40$ mm com uma falha de adesivo de 20 mm (50% de defeito), onde é possível observar a diferença entre: a) uma fase mais inicial do teste em que o esforço aplicado e a maior parte das tensões são absorvidas pelo adesivo exterior, e b) uma fase já perto do ponto de rutura da junta, onde o adesivo exterior se encontra em sobrecarga, e as tensões estão distribuídas por ambas as secções de adesivo, sendo que nesta fase, o interior suporta parte da carga imposta na junta tubular.

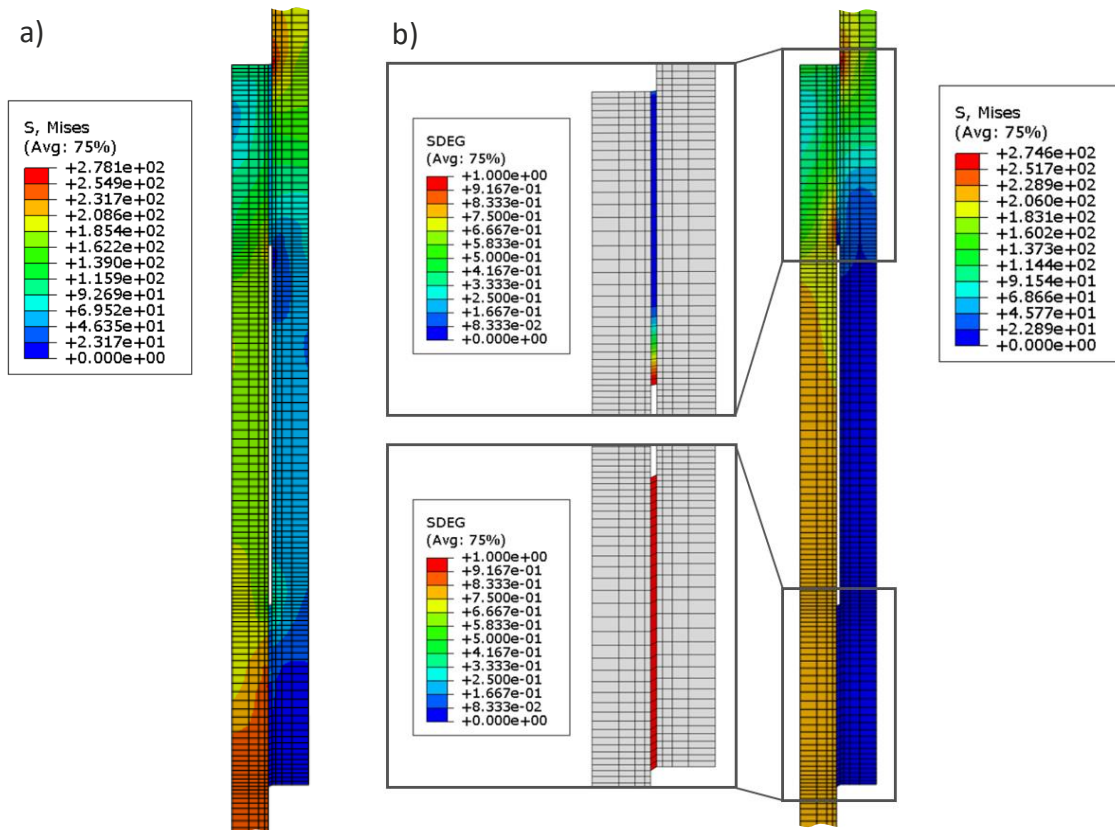


Figura 88 - Modo de rotura de um modelo de uma junta tubular com 50% de defeito ligada com o adesivo Araldite® AV138 em duas fases a) antes e b) depois do adesivo exterior entrar em sobrecarga.

A Figura 89 compara os valores de força máxima (P_{max}) de cada junta para os dois comprimentos de sobreposição. É notório que, para ambos os casos, existe um decréscimo progressivo no valor de P_{max} suportado pela junta, consoante o aumento da dimensão do defeito. Como o Araldite® AV138 se trata de um adesivo rígido, o defeito com menor dimensão (25% do comprimento de sobreposição) não introduz uma diferença muito significativa no comportamento deste adesivo, pois como foi referido no capítulo 3.2.2, a maior parte das tensões estão distribuídas pelas extremidades da área de ligação. Assim sendo, o centro da área ligada, que coincide com a falha de adesivo, não sofre tantos esforços como as extremidades.

Comparando $L_0=20$ e 40 mm, é possível afirmar que as juntas com maior L_0 , apresentam um decréscimo menor na carga suportada conforme vai sendo aumentada a dimensão da falha. Portanto, as juntas com falha de adesivo de 75% com $L_0=20$ mm exibem uma quebra de resistência de cerca de 61%, enquanto as juntas com $L_0=40$ mm apenas sofrem uma queda de 45%. Mesmo assim, o maior defeito diminui para cerca de metade a capacidade de a junta tubular suportar carga.

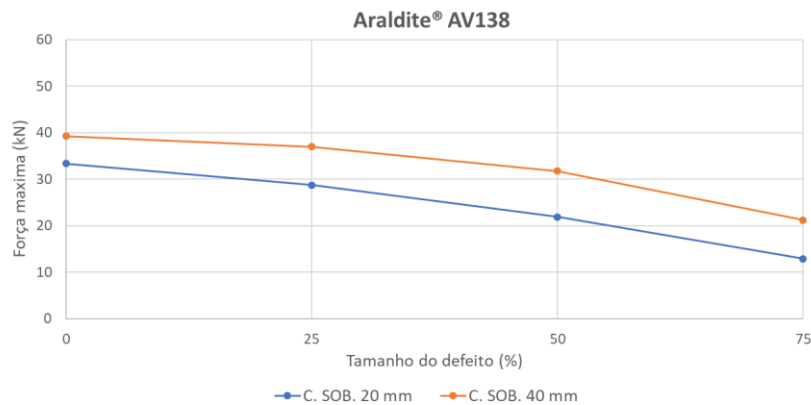


Figura 89 - P_{\max} suportado pelas juntas tubulares com Araldite® AV138, em função da percentagem de defeito, para os dois comprimentos de sobreposição, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

Na Figura 90 são apresentados os gráficos com as curvas $P-\delta$ para os dois comprimentos de sobreposição das juntas ligadas com Araldite® 2015. Ao contrário do adesivo Araldite® AV138, este apresenta deformação após rotura em todos os substratos. Isto deve-se ao facto de, tal como foi descrito anteriormente, se tratar de um adesivo ductil. Enquanto na Figura 90 a) ($L_0=20$ mm) todas as juntas apresentam uma elevação linear, seguidas de rotura pelo adesivo, na Figura 90 b) ($L_0=40$ mm), a junta sem defeito e a com 25% de defeito sofreram rotura pelo substrato. Deste modo, não é possível aferir o valor de δ_{\max} para a juntas sem defeito com $L_0=40$ mm a partir da leitura do gráfico, uma vez que este modelo sofre estirção. Apesar de o mesmo acontecer com o modelo da junta com 25% de defeito, após ocorrer a estirção do alumínio, o adesivo sofre rotura devido a deformações do substrato na extremidade da área ligada. Na Figura 91 é possível observar a propagação das tensões instaladas no substrato e no adesivo, no instante anterior à falha da junta tubular, onde é possível perceber o estiramento sofrido pelo substrato, que resulta posteriormente na rotura antecipada do adesivo.

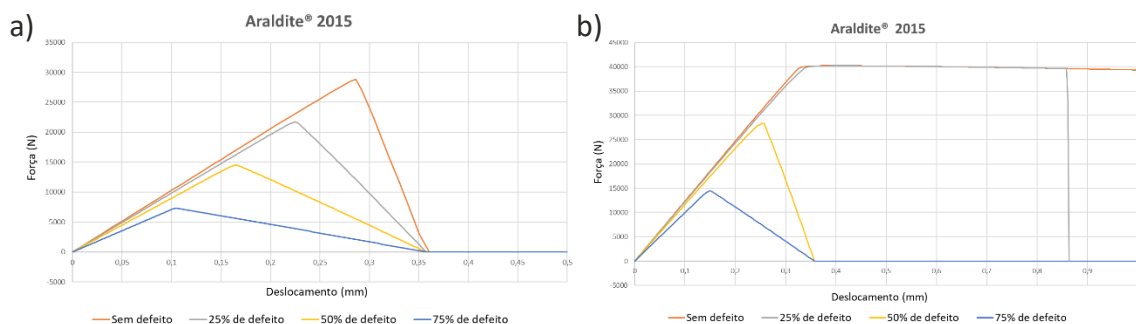


Figura 90 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=40$ mm.

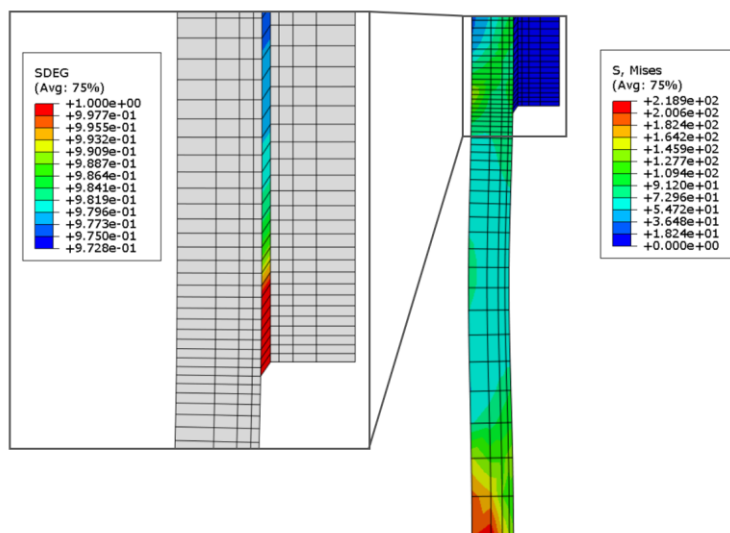


Figura 91 – Modo de propagação do dano num modelo de uma junta tubular com 25% de defeito ligada com o adesivo Araldite® 2015.

Como o adesivo Araldite® 2015 apresenta uma distribuição de tensões de uma forma mais distribuída por toda a área de ligação, é normal que a diminuição da resistência da junta com o aumento do defeito seja feita de forma mais linear do que no caso do Araldite® AV138. Na Figura 92 é possível observar a diferença entre as juntas com L_0 de 20mm e 40mm. Nas juntas com $L_0=20$ mm existe um decréscimo da carga suportada de cerca de 25% entre cada dimensão de falha. Visto que toda a área ligada contribui para a resistência da junta, a junta sem defeito aguenta uma força máxima de aproximadamente 29 kN, enquanto a junta tubular com falha de adesivo de 15 mm (75% de defeito) apenas aguenta perto de 7 kN, que consiste numa diminuição de sensivelmente 75% do P_{max} . No caso das juntas com $L_0=40$ mm, os valores de P_{max} sofrem uma redução similar, com a particularidade de não passarem dos 40 kN no caso das juntas sem defeito, e com 25% de defeito. Isto deve-se ao facto de o alumínio apresentar uma tensão de cedência relativamente baixa comparativamente com outros tipos de ligas metálicas.

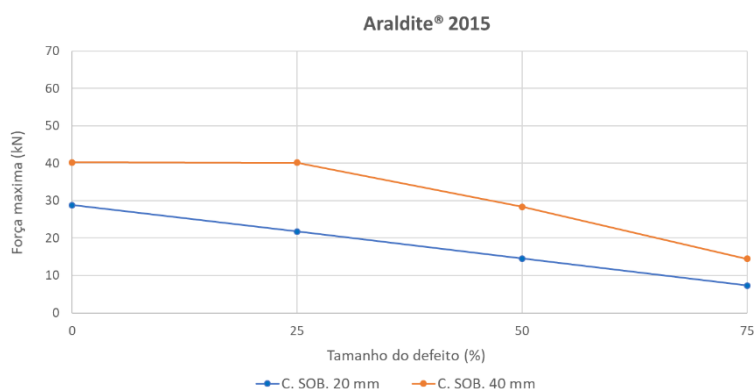


Figura 92 - P_{max} suportado pelas juntas tubulares com Araldite® 2015, em função da percentagem de defeito, para os dois comprimentos de sobreposição, $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.

Na Figura 93 estão representadas as curvas $P-\delta$ obtidas a partir de modelos numéricos de juntas tubulares, ligadas com o adesivo SikaForce® 7752. Estas juntas, tal como com o adesivo Araldite® AV138, não apresentam deformação após rotura, e apresentam uma descida abrupta após a rotura pelo adesivo. No entanto, até à rotura, o comportamento das curvas $P-\delta$ é ligeiramente diferente consoante a dimensão do defeito da junta. Apesar de todas apresentarem um comportamento linear, a resistência da junta prova ser cada vez menor com o aumento da falha de adesivo.

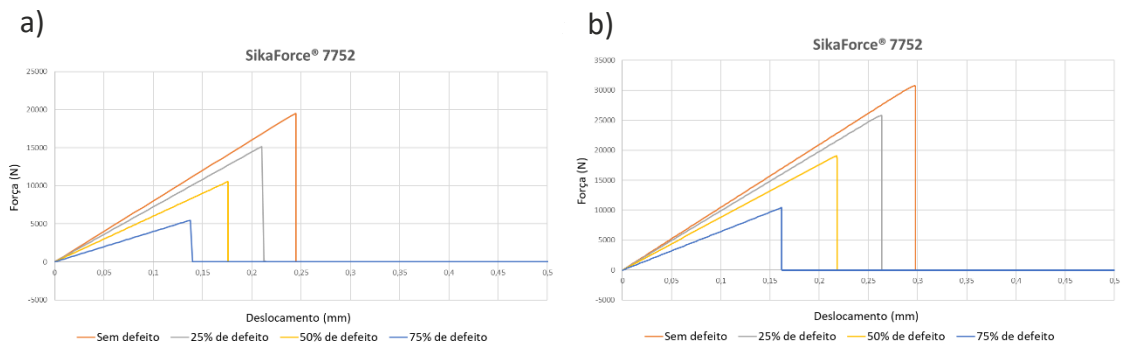


Figura 93 - Curvas $P-\delta$ obtidas numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com a) $L_0=20$ mm e b) $L_0=20$ mm.

A Figura 85 mostra o modo de rotura de um modelo de uma junta tubular sem defeito com $L_0=20$ mm.

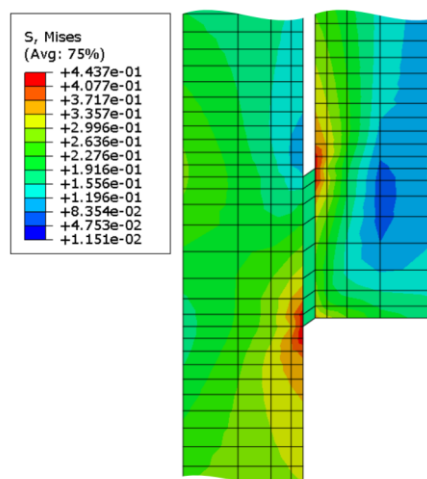


Figura 94 - Modo de rotura de um modelo de uma junta tubular com 75% de defeito ligada com o adesivo SikaForce® 7752.

Este, tal como foi previsto, demonstrou ser o adesivo com menor resistência mecânica. Na Figura 95 é possível observar o gráfico que compara os valores de P_{\max} do adesivo SikaForce® 7752, para os dois L_0 estudados. Sendo este adesivo, o que apresenta uma distribuição de tensões mais uniforme por toda a área de ligação, é natural que seja o

adesivo que mais sofre com os defeitos introduzidos nos modelos numéricos. As juntas adesivas sem defeito suportam uma força máxima de aproximadamente 19,4 kN e 30,8 kN para os comprimentos de sobreposição de 20 mm e 40 mm, respetivamente. Com o aumento do comprimento da falha de adesivo, é observada uma progressão negativa na resistência da junta sendo que, quanto maior o defeito, menor é o P_{\max} suportado. Com 75% de defeito a junta apenas suporta 5,5 kN e 10,4 kN para $L_o=20$ mm e $L_o=40$ mm, respetivamente. Isto corresponde a um decréscimo de cerca de 72% e 66% da carga máxima suportada, o que demonstra que, quanto maior for o comprimento de sobreposição, melhor reagem as juntas adesivas tubulares a estes tipos de defeitos.

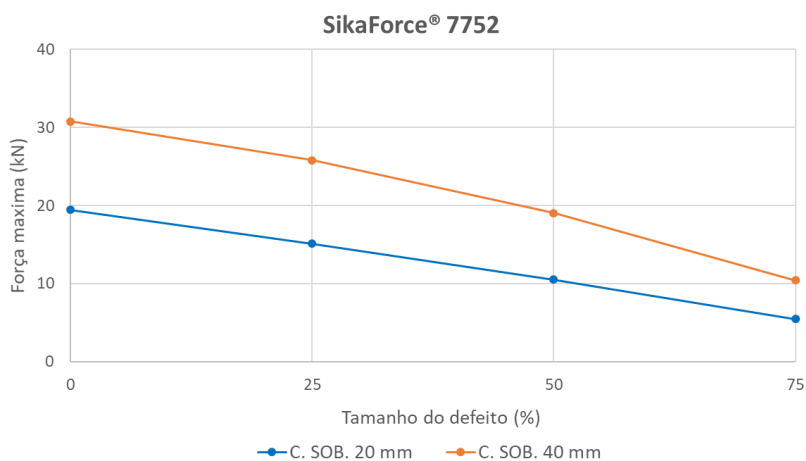


Figura 95 - P_{\max} suportado pelas juntas tubulares com SikaForce® 7752, em função da percentagem de defeito, para os dois comprimentos de sobreposição, $L_o=20$ mm e $L_o=40$ mm.

Na Figura 96 é possível comparar os valores de P_{\max} dos três adesivos de juntas tubulares com um comprimento de sobreposição de 20 mm. Neste gráfico é bem visível quais os adesivos que são mais prejudicados pelos defeitos estudados. Como referido anteriormente, o facto do Araldite® AV138 apresentar um modulo de elasticidade superior aos restantes tem influência na distribuição das tensões apresentada e conseqüentemente, na resistência da junta. Isto faz com que as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 apresentem picos de tensões mais elevados, enquanto juntas que usem o adesivo Sikaforce® 7752 apresente uma distribuição de tensões mais uniforme. Como tal, o Araldite® AV138, devido a propriedades mecânicas superiores, mantém-se sempre o adesivo mais resistente sendo que apenas sofre rotura quando a resistência limite é atingida nas extremidades da zona colada. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis como o Araldite® 2015 permitem uma plastificação nas extremidades de sobreposição, ao mesmo tempo que o interior da zona colada contribui para aumentar a resistência da junta o que, como é possível perceber no gráfico da Figura 96 resulta numa diferença mais significativa no valor de P_{\max} quanto maior for o valor de L_o . Sendo assim, o Araldite® AV138 é quem sofre uma

menor diminuição do P_{\max} , aproximadamente 61,4% para a maior falha de adesivo, enquanto o Araldite® 2015 é o adesivo mais prejudicado, perde 74,6% da capacidade de carga. Por sua vez, o Sikaforce® 7752, sendo também um adesivo dúctil, perde 71,8% da capacidade de carga.

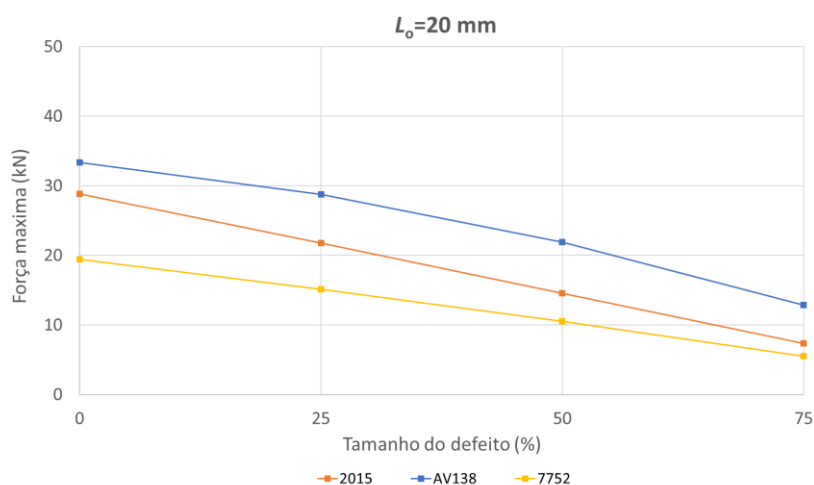


Figura 96 - P_{\max} suportado pelas juntas tubulares com um comprimento de sobreposição (L_0) de 20 mm, em função da percentagem de defeito, para os três adesivos estudados: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

Na Figura 97 é feita a mesma comparação que na figura anterior, só que neste caso para um comprimento de sobreposição de 40 mm. O valor de P_{\max} de cada adesivo varia de forma diferente com o comprimento de sobreposição, e é possível observar que o Araldite® 2015 apresenta uma diminuição percentual da carga máxima suportada bastante superior ao observado para o adesivo Araldite® AV138. Isto deve-se também ao facto de o adesivo Araldite® 2015, para um valor de L_0 superior, suportar cargas mais elevadas do que os restantes adesivos. De facto, apesar de este adesivo conter algumas propriedades mecânicas inferiores às do adesivo Araldite® AV138, possui propriedades de tenacidade que o definem como sendo um adesivo dúctil e que o tornam capaz de suportar cargas mais elevadas para valores de L_0 superiores. Assim, um adesivo que apresente uma resistência menor mas que no entanto, seja mais dúctil, como é o caso do Araldite® 2015, apesar de atingir mais rapidamente a cedência nas extremidades da camada de adesivo, também permite a plastificação destas zonas, o que faz com que a tensão de corte média seja superior à de um adesivo frágil. No caso do Araldite® AV138, mal a resistência do adesivo é atingida nas extremidades da camada adesiva, a junta chega à carga limite. Tendo em consideração o que foi referido anteriormente, o Araldite® AV138 apresenta diminuições de P_{\max} em função dos defeitos baixas comparativamente aos restantes adesivos, cerca de 6%, 19% e 46% para os tamanhos de falha de 25%, 50% e 75%, respetivamente. Defeitos pequenos praticamente não têm influência no P_{\max} da junta, e mesmo para o maior tamanho de defeito a capacidade de aguentar carga mantém-se

superior a 21 kN. Os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 por outro lado, apresentam diminuições de $P_{\text{máx}}$ de 64% e 66%, respectivamente.

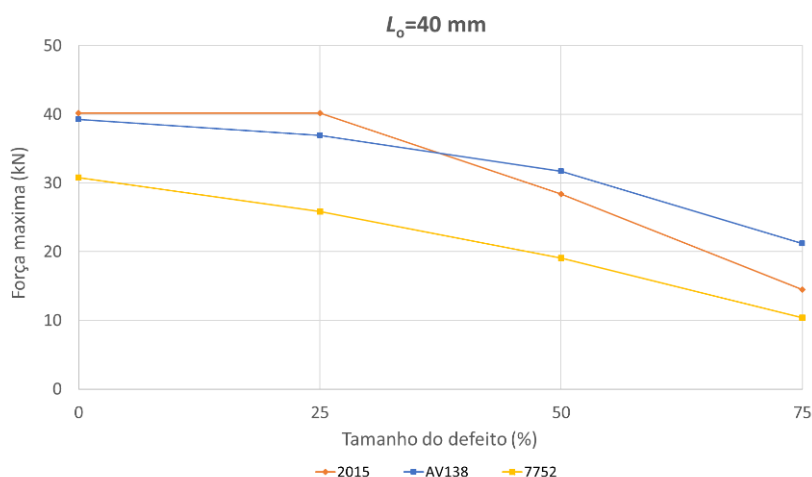


Figura 97 - $P_{\text{máx}}$ suportado pelas juntas tubulares com um comprimento de sobreposição (L_0) de 40 mm, em função da percentagem de defeito, para os três adesivos estudados: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

3.2.5 Previsão da energia dissipada

Uma boa adesão está associada a uma energia de dissipação (U) elevada durante a fratura na extremidade livre do adesivo. Quanto maior for a capacidade de um adesivo dissipar energia mais difícil é a sua remoção e mais resistente será a ligação [3]. As tensões aplicadas a juntas que contêm aderentes rugosos, são potencialmente menos concentradas nas superfícies e são mais amplamente distribuídas por todo L_0 , permitindo um valor mais elevado de energia dissipada e aumentar os níveis de adesão. Note-se que as áreas de maior dissipação de energia estão nas extremidades da ligação adesiva, onde as tensões τ_{xy} e σ_y são máximas.

O gráfico representado na Figura 98 compara a energia dissipada por cada junta ligada pelo adesivo Araldite® AV138 para $L_0=20$ mm e 40 mm. A partir deste gráfico pode-se concluir que o valor da energia dissipada está diretamente relacionado com a capacidade de carga da junta, sendo que a junta com mais energia dissipada é a de $L_0=40$ mm sem defeito (7,47 kN.mm). Visto isto, com o aumento do tamanho de defeito, os valores de energia dissipada diminuem de forma linear. Para cada acréscimo de 25% de falha de adesivo, a energia dissipada diminui também aproximadamente 25%. No entanto, juntas com $L_0=20$ mm não apresentam uma diminuição igualmente constante, ou seja, quanto maior é o tamanho do defeito maior é o decréscimo percentual de U . O modelo da junta tubular sem defeito alcançou uma energia de dissipação de 5,07 kN.mm, enquanto a junta com o maior defeito (75%) alcançou apenas 873 N.mm, o que representa apenas 17% de uma junta ideal. Isto significa que, com o dobro de L_0 , a junta sem defeito praticamente duplica o valor de U , diferença que se faz notar ainda mais com o aumento da falha pois, com defeito de

75%, o valor de U passa de 0,87 para 1,87 kN.mm entre $L_0=20$ e 40 mm, respetivamente.

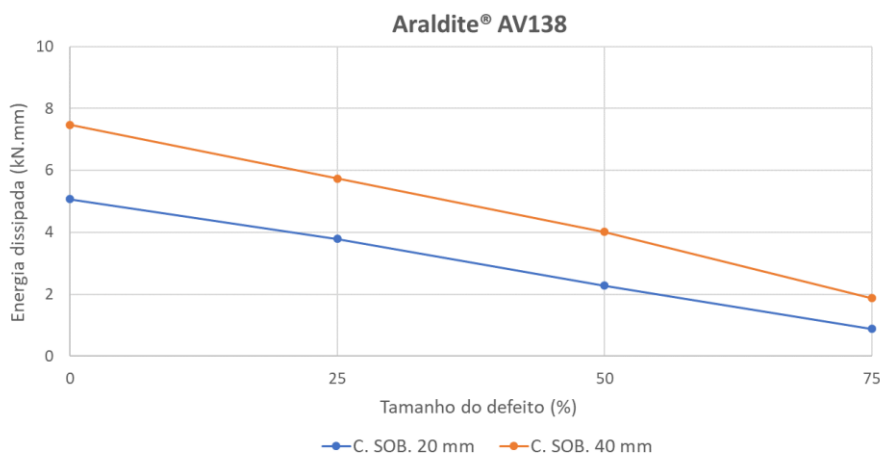


Figura 98 - Energia dissipada das juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 em função da percentagem de defeito para cada L_0 .

A Figura 99 compara a energia dissipada (U), de modo similar ao gráfico anterior, para as juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015. Como é possível perceber pelo gráfico, este apresenta uma curva irregular para as juntas sem e com 25% de defeito com $L_0=40$ mm. Esta diferença deve-se ao facto estes dois modelos originarem estrição no substrato de alumínio, devido à carga elevada que o adesivo é capaz de suportar. Como tal, as curvas $P-\delta$ obtidas para estes modelos (representadas na Figura 90) não caem para zero, alterando os valores de energia dissipada obtidos relativamente às juntas nas quais não ocorre plastificação. Posto isto, as juntas tubulares com 50% e 75% de defeito apresentam valores de U de 5,28 kN.mm e 2,65 kN.mm, respetivamente.

No caso das juntas com $L_0=20$ mm, apesar de os valores de energia dissipada serem ligeiramente mais elevados, estas obtiveram um comportamento em função da falha bastante similar ao do adesivo Araldite® AV138. O único resultado que se diferencia mais é o do modelo de junta com 75% de defeito visto que, no caso do adesivo mais dúctil, o valor de U é de 1,33 kN.mm, significativamente mais alto do que no adesivo mais frágil.

Logo, pode-se concluir que, geralmente, um adesivo mais dúctil obtém valores de dissipação de energia mais elevados do que um adesivo mais rígido, assumindo que os dois adesivos suportam tensões semelhantes. Isto deve-se ao facto de as juntas ligadas com adesivos mais dúcteis obterem maiores valores de δ do que no caso de juntas com adesivos frágeis, e desta forma dissiparem mais energia na rotura plástica do que no caso de um adesivo com valor de E superior.

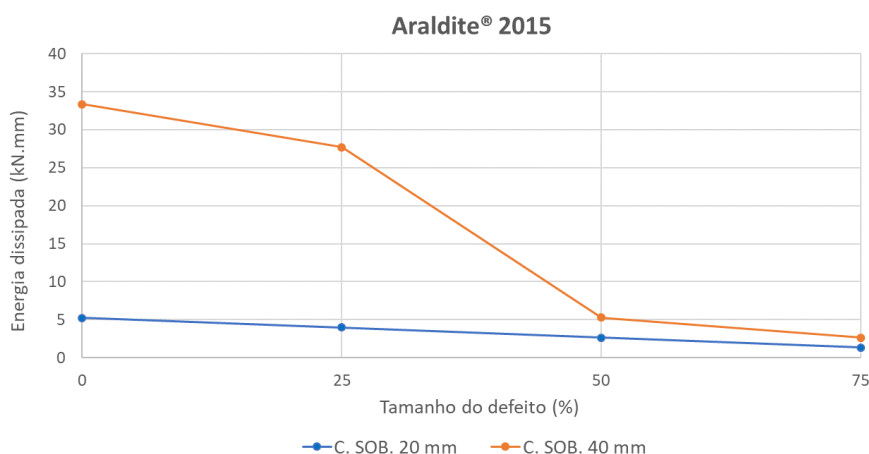


Figura 99 - Energia dissipada das juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função da percentagem de defeito para cada L_0 .

O adesivo SikaForce® 7752, apesar de ser o mais dúctil, foi dos três adesivos o que apresentou valores de energia dissipada inferiores. Este facto resulta de suportar valores de P_{max} muito inferiores aos outros dois adesivos.

Na Figura 100 é possível observar que o valor de U para a junta adesiva com $L_0=20$ mm sem defeito é 2,3 kN.mm sendo que, para as falhas de adesivo de 25% e 50%, existe uma diminuição percentual de U de aproximadamente 30%. No caso da junta tubular com defeito de 75% o valor de U é 383,7 N.mm, que representa sensivelmente 17% da energia total dissipada por uma junta ideal. A junta sem defeito com $L_0=40$ mm obteve um valor de U de 4,6 kN.mm, praticamente o dobro do valor obtido para $L_0=20$ mm. De notar que as juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 obtêm sempre um aumento percentual superior a 100% com o aumento de L_0 . Os valores de U obtidos para o tamanho de defeito por ordem crescente são 3,41, 2,07 e 0,83 kN.mm.

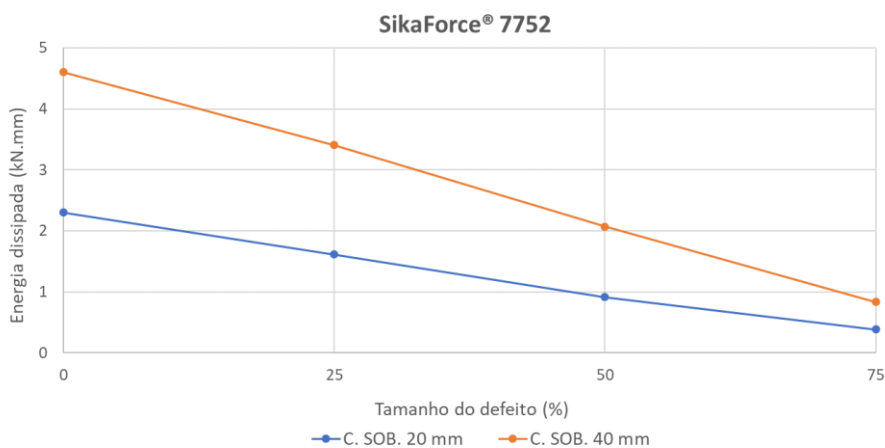


Figura 100 - Energia dissipada das juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 em função da percentagem de defeito para cada L_0 .

O gráfico representado na Figura 101 compara os três adesivos estudados nos modelos de juntas com $L_0=20$ mm. Tal como foi referido anteriormente para o adesivo Araldite® 2015, apesar de este suportar cargas inferiores ao Araldite® AV138, devido à sua ductilidade é o que apresenta valores de U mais elevados. Quanto mais elevado for o comprimento de falha de adesivo, maior é esta diferença, visto que para o maior tamanho de defeito o adesivo mais rígido obtém uma diminuição de U de 82%, enquanto o mais dúctil obteve um valor de aproximadamente 74%. As juntas ligadas através do adesivo SikaForce® 7752 são as que dissipam menos energia, sendo que os valores de U para estes modelos correspondem apenas a cerca de 45% dos valores obtidos através das juntas ligadas por adesivos com maior resistência mecânica.

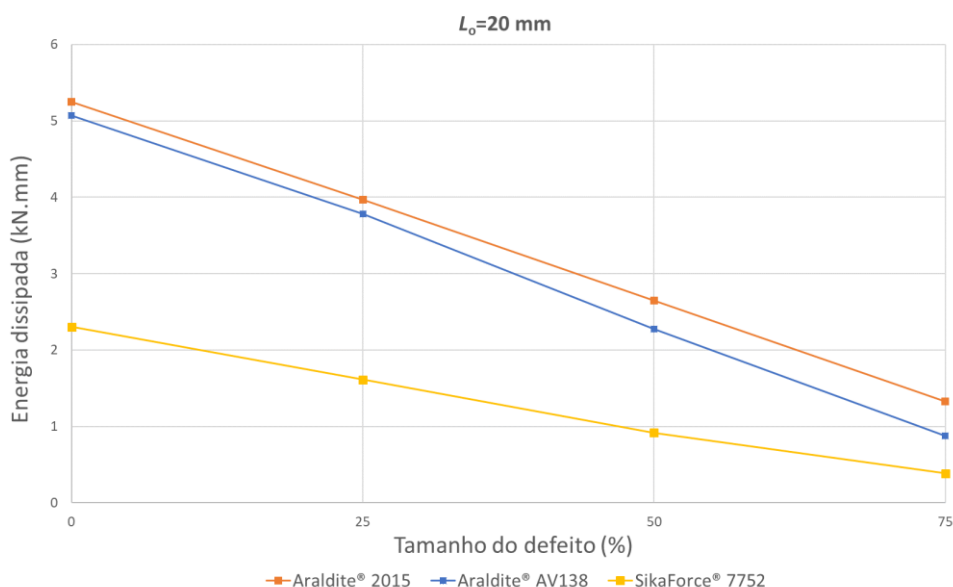


Figura 101 - Energia dissipada das juntas tubulares de $L_0=20$ mm para cada tamanho de defeito, consoante o adesivo usado.

A Figura 102 permite fazer uma comparação similar ao do gráfico anterior, e é possível observar que as diferenças percentuais dos valores de U entre os adesivos Araldite® AV138 e 2015 são maiores nas juntas com maior comprimento de sobreposição. A mesma situação é evidenciada para as juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 sendo que, comparando com o adesivo Araldite® AV138, apresenta uma diminuição de 2,87 kN.mm para a junta sem defeito e de 2,34, 1,94 e 1,04 kN.mm para os restantes defeitos por ordem crescente. Obviamente esta diferença é ainda maior quando comparada com o adesivo Araldite® 2015, sendo que para a junta tubular com o defeito de maior dimensão (75%) a diferença é de 1,82 kN.mm, o que representa aproximadamente 31% da energia dissipada pela junta com Araldite® 2015.

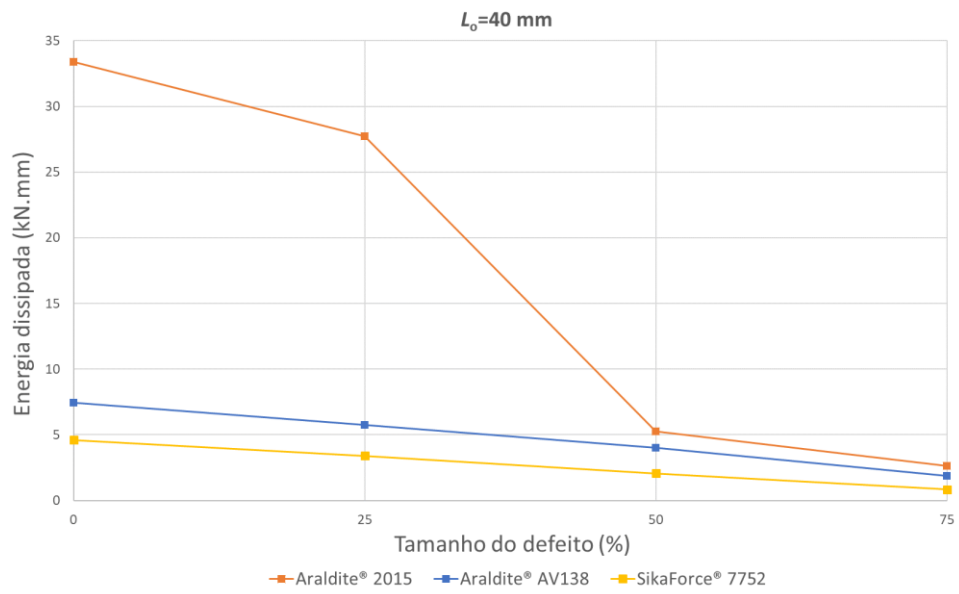


Figura 102 - Energia dissipada das juntas tubulares de $L_0=40\text{ mm}$ para cada tamanho de defeito, consoante o adesivo usado.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Este trabalho teve como principais objetivos realizar uma avaliação comparativa de três adesivos estruturais com características distintas que fossem representativos de toda a gama de adesivos usados atualmente na indústria e particularmente em ligações de juntas tubulares, e realizar uma análise detalhada das tensões, da variável de dano e da resistência por modelação de MDC de juntas tubulares analisadas no programa ABAQUS® com defeitos na área de ligação, tentando assim perceber que influência ou consequências provem de falhas de adesivo no comportamento da junta tubular de sobreposição simples submetida a esforços de tração.

Numa primeira fase, foi realizada a validação dos dados numéricos a partir dos experimentais. Para tal, obtiveram-se as curvas $P-\delta$ das juntas tubulares produzidas em alumínio com dois L_0 diferentes realizados por Ferreira [86], onde foram determinadas as propriedades coesivas de cada adesivo. Desta forma, foi possível obter as distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} para todas as alterações efetuadas nas juntas adesivas tubulares, assim como as curvas $P-\delta$ que traduzem a evolução da resistência das mesmas, e estudar as consequências que diferentes tamanhos de falha de adesivo se fazem sentir em juntas tubulares de sobreposição simples.

Foi, portanto, concluído que quanto maior é a dimensão do defeito, maiores são as tensões aplicadas nas extremidades das juntas. No entanto, para adesivos mais rígidos, o aumento da tensão máxima de arrancamento (σ_y) nas extremidades da junta é menor, principalmente para as falhas de adesivo de menores dimensões. Para falhas de adesivo iguais ou superiores a 75% do comprimento de sobreposição, já se pode observar um aumento mais significativo. Esta diferença mais acentuada significa que a falha de adesivo está a atingir uma área onde existe concentração de tensões, que para um adesivo frágil é fundamentalmente nas extremidades, sendo que o centro da área de sobreposição praticamente não contribui para a resistência da junta. Esta diferença elevada na distribuição de tensões entre 50% e 75% de defeito é gradualmente menor para adesivos com mais ductilidade, sendo que o adesivo SikaForce® 7752 chega a demonstrar um aumento percentual constante na distribuição de tensões σ_y de pico consoante o aumento do tamanho de falha.

A distribuição das tensões de corte (τ_{xy}) tal como se sucedeu com a distribuição tensões σ_y , demonstra valores mais reduzidos na região interior do adesivo, atingindo o máximo nas extremidades da sobreposição, aspeto mais evidente quando são analisados adesivos mais rígidos, e menos evidenciado em adesivos com maior

tenacidade. Esta diferença é gradualmente inferior consoante o aumento da falha de adesivo.

A partir da distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} e τ_{xy}/τ_{avg} denota-se um aumento significativo das tensões de pico de juntas tubulares com $L_0=40$ mm, comparativamente com os modelos de juntas tubulares com $L_0=20$ mm. O aumento de L_0 provoca um acréscimo da rigidez da junta adesiva e, como tal, passa a existir uma maior capacidade de absorção da energia imposta pelo carregamento que resulta num aumento das tensões instaladas.

A resistência de uma junta tubular que empregue um adesivo frágil é afetada pelo facto de as tensões τ_{xy} e σ_y não permitirem plastificação nas extremidades da sobreposição. Por sua vez, os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição de tensões nessas regiões, ou seja, a região interna da sobreposição tem uma contribuição gradualmente superior quando colocada sob cargas crescentes, o que possibilita um aumento da resistência da junta para valores de L_0 superiores.

É possível observar diferenças significativas nas cargas máximas suportadas pelas juntas adesivas, consoante a dimensão do defeito. Um adesivo rígido sofre uma diminuição do P_{max} menor, para a maior falha de adesivo, comparativamente com adesivos mais dúcteis, que são mais prejudicados. No entanto, para L_0 superiores, o valor de $P_{máx}$ de cada adesivo varia de forma diferente. É possível observar que o Araldite® 2015 apresenta uma diminuição percentual da carga máxima suportada bastante superior ao observado para o adesivo Araldite® AV138. Isto deve-se também ao facto de o adesivo Araldite® 2015, para um L_0 maior, suportar cargas mais elevadas do que os restantes adesivos pois, apesar de conter algumas propriedades mecânicas inferiores, este possui propriedades de tenacidade que o definem como sendo um adesivo dúctil e que o tornam capaz de suportar cargas mais elevadas para valores de L_0 superiores. Em função dos comportamentos descritos, foi possível compreender em maior detalhe a variação de $P_{máx}$ consoante os diferentes defeitos que possam existir numa junta tubular adesiva.

Foi possível observar, através do estudo realizado, que o dano é iniciado na extremidade do adesivo, que coincide com a localização dos picos de tensão σ_y e τ_{xy} . A falha de adesivo no centro do comprimento de sobreposição resulta na diminuição da carga máxima suportada pela junta, que resulta na diminuição do número de elementos danificados. Ou seja, para valores de $P_{máx}$ superiores, o valor da variável de dano aumenta.

Adesivos rígidos obtêm uma transição abrupta entre os estados dos elementos coesivos, ou seja, verifica-se uma transição repentina de elemento não danificado para danificado, pois um adesivo frágil apenas permite a plastificação da extremidade, seguindo-se rapidamente a rotura. Por outro lado, num adesivo dúctil a evolução do dano é distribuída de forma mais suave, sendo que a mudança entre elementos

danificados e os que ainda não sofreram degradação não ocorre de forma tão abrupta. Ou seja, os adesivos dúcteis permitem uma maior extensão de dano, uma vez que grande parte do comprimento de sobreposição contribui para a resistência da junta e ambas as extremidades de sobreposição apresentam dano, o que se traduz num valor da variável SDEG menos elevado na extremidade do adesivo que normalmente obtêm valores de σ_y e τ_{xy} mais elevados. No entanto, para o caso do adesivo SikaForce® 7752 este efeito não ficou demonstrado, maioritariamente devido à capacidade mecânica reduzida da junta adesiva.

A quantidade de energia dissipada (U) por uma junta tubular durante um esforço de tração está relacionada com a resistência da adesão entre os substratos e o adesivo. Uma boa adesão está associada a uma energia de dissipação elevada durante a fratura na extremidade livre do adesivo, e as áreas de maior dissipação de energia encontram-se nas extremidades da ligação adesiva, onde as tensões τ_{xy} e σ_y são máximas. Através deste estudo, foi concluído que, geralmente, um adesivo mais dúctil obtém valores de dissipação de energia mais elevados do que um adesivo mais rígido, assumindo que os dois adesivos suportam tensões semelhantes. Isto deve-se ao facto de as juntas ligadas com adesivos mais dúcteis obterem maiores valores de δ do que no caso de juntas com adesivos frágeis, e desta forma dissiparem mais energia na rotura plástica do que no caso de um adesivo com valor de E superior.

Como sugestão para trabalhos futuros, fica a possibilidade de estudar a influência de defeitos em diferentes configurações de juntas, que resultem em diferentes distribuições de tensões, e o estudo da influência destes defeitos com outros tipos de solicitações, como por exemplo esforços de torção. Seria ainda interessante tentar reproduzir as juntas estudadas com os vários defeitos de forma experimental, e observar a veracidade dos resultados numéricos obtidos, adquirindo assim informação sobre a melhor forma de modelar os diferentes adesivos estudados.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amsterdão, Holanda: Elsevier.
2. Esteves, J.L.S. *Ligações adesivas na indústria metalomecânica*. in *Proceedings CLME'2008-5º Congresso Luso-Moçambicano de Engenharia, IICEM-2º Congresso de Engenharia de Moçambique*. 2008.
3. da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media.
4. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
5. da Fonseca, C.S., *Efeito do adesivo e do comprimento de sobreposição em juntas coladas*. 2015, Tese de Mestrado. Centro Federal de Educação Tecnológica Celso Suckow da Fonseca. p. 36.
6. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Boston, Mass. ; London: Irwin/McGraw-Hill, 2000.
7. DeVries, K. and D.O. Adams, *The mechanics of adhesion 2002*, Amsterdam the Netherlands: Elsevier science B.V. 193-234.
8. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
9. Pinto, A.M.G., *Tese de Douturamento. Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Universidade do Porto, Departamento de Engenharia Mecânica.
10. Landrock, A.H. and S. Ebnesajjad, *Adhesives technology handbook*. 2008: William Andrew.
11. da Silva, L.F., et al., *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Weinheim, Germany: John Wiley & Sons.
12. Xu, W. and Y. Wei, *Strength analysis of metallic bonded joints containing defects*. *Computational Materials Science*, 2012. **53**(1): p. 444-450.
13. Heslehurst, R., *Observations in the structural response of adhesive bondline defects*. *International journal of adhesion and adhesives*, 1999. **19**(2-3): p. 133-154.
14. Yang, S., L. Gu, and R.F. Gibson, *Nondestructive detection of weak joints in adhesively bonded composite structures*. *Composite structures*, 2001. **51**(1): p. 63-71.
15. Tserpes, K. and G. Labeas, *Experimental and theoretical investigation of the influence of imperfect bonding on the strength of NCF double-lap shears joints*. *Composite Structures*, 2010. **92**: p. 1673-1682.

16. Wang, T.T., F. Ryan, and H. Schonhorn, *Effect of bonding defects on shear strength in tension of lap joints having brittle adhesives*. Journal of Applied Polymer Science, 1972. **16**(8): p. 1901-1909.
17. Engerer, J. and E. Sancaktar, *The effects of partial bonding in load carrying capacity of single lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 373-379.
18. Goh, J., et al., *Effects of bondline flaws on the damage tolerance of composite scarf joints*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2013. **55**: p. 110-119.
19. Lubkin, J. and E. Reissner, *Stress distributions and design data for adhesive lap joints between circular tubes*. 1955, New York American Society of Mechanical Engineers.
20. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
21. Terekhova, L. and I. Skoryi, *Stresses in bonded joints of thin cylindrical shells*. Strength of Materials, 1972. **4**(10): p. 1271-1274.
22. Kukovyakin, V. and I. Skoryi, *Estimated Strenght of bonded cylindrical joints*. Russian engineering Journal-USSR, 1972. **52**(4): p. 40-+.
23. Alwar, R. and Y. Nagaraja, *Viscoelastic analysis of an adhesive tubular joint*. The Journal of Adhesion, 1976. **8**(1): p. 79-92.
24. Apalak, M.K., R. Gunes, and S. Eroglu, *Thermal residual stresses in an adhesively bonded functionally graded tubular single lap joint*. International journal of adhesion and adhesives, 2007. **27**(1): p. 26-48.
25. Deb, A., et al., *An experimental and analytical study of the mechanical behaviour of adhesively bonded joints for variable extension rates and temperatures*. International journal of adhesion and adhesives, 2008. **28**(1-2): p. 1-15.
26. Nemes, O. and F. Lachaud, *Modeling of cylindrical adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **23**(10-11): p. 1383-1393.
27. 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.
28. 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.
29. Hipol, P.J., *Analysis and optimization of a tubular lap joint subjected to torsion*. Journal of composite materials, 1984. **18**(4): p. 298-311.
30. Hosseinzadeh, R. and F. Taheri, *Non-linear investigation of overlap length effect on torsional capacity of tubular adhesively bonded joints*. Composite Structures, 2009. **91**(2): p. 186-195.
31. 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.
32. Sekercioglu, T., *The investigations of adhesively bonded joints behaviour under dynamic loading*. 2001, Ph. D. Thesis, Pamukkale University, Denizli, Turkey, 2001.

33. Sekercioglu, T., *Strength based reliability of adhesively bonded tubular lap joints*. *Materials & design*, 2007. **28**(6): p. 1914-1918.
34. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. *Luftfahrtforschung* 15, 1938: p. 41-47.
35. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
36. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1984. **4**(2): p. 65-78.
37. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, 2012. **72**(7): p. 788-791.
38. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007. **26**(2): p. 183-201.
39. Barenblatt, G.I., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks*. *Journal of Applied Mathematics and Mechanics*, 1959. **23**(3): p. 622-636.
40. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960. **8**(2): p. 100-104.
41. 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.
42. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
43. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
44. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
45. 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: Berlin Heidelberg. p. 1-93.
46. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. *International Journal of Fracture*, 2001. **110**(2): p. 175-187.
47. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012. **26**(7): p. 939-953.
48. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. *International Journal of Fracture*, 1996. **77**(2): p. 111-140.
49. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational*

- issues*. International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
50. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
 51. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
 52. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
 53. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
 54. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
 55. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
 56. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. 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.
 57. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10–11): p. 2224-2230.
 58. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
 59. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
 60. Jung Lee, M., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
 61. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
 62. Pandya, K.C. and J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
 63. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
 64. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.

65. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
66. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
67. Stigh, U., et al., *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
68. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
69. Gustafson, P.A. and A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
70. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13-14): p. 2065-2077.
71. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
72. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
73. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
74. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
75. 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.
76. Wahab, M.M.A., et al., *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.
77. Imanaka, M., et al., *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.
78. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
79. Hua, Y., et al., *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.
80. 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.
81. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Singapore: Wiley.

82. 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.
83. 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.
84. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
85. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
86. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2017, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
87. Campilho, R.D., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
88. Moreira, R.D.F., *Estudo de reparações adesivas pela técnica de remendo embebido com reforços exteriores para aumento da resistência*. 2013, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
89. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
90. Campilho, R.D., et al., *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.
91. 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.
92. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
93. Fernandes, T.A., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
94. Chen, X., *Numerical Study of Stable Tearing Crack Growth Events Using the Cohesive Zone Model Approach*. Elsevier science b.v. Amsterdam, 2013.
95. Jousset, P. and M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
96. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
97. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
98. Pocius, A.V., *“Adhesion and Adhesives Technology, An introduction, 2nd Edition*. 2002, Munique: Hanser.

99. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
100. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
101. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
102. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
103. De Moura, M., et al., *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.
104. Marques, E. and L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
105. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
106. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
107. Taib, A.A., et al., *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.
108. 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.
109. 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.
110. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2012, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto. p. 195.
111. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009, Tese de Douturamento. Universidade do Porto (Portugal).
112. Reis, P., F. Antunes, and J. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Elsevier science b.v. Composite structures 2005. **67**(1): p. 125-133.
113. 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.
114. 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.
115. 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.

116. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1999. **19**(2–3): p. 91-105.
117. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. 2016, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
118. Campilho, R., et al., *Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2008. **22**(13): p. 1565-1591.
119. Vallée, T., J.R. Correia, and T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles part I: Experimental and numerical investigations*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1903-1914.
120. Shishesaz, M. and N. Bavi, *Shear stress distribution in adhesive layers of a double-lap joint with void or bond separation*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2013. **27**(11): p. 1197-1225.
121. Yang, Q. and B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. International Journal of Fracture, 2005. **133**(2): p. 107-137.