



# Análise do efeito de filetes de adesivo na resistência estática de juntas adesivas tubulares

TIAGO ABEL PEREIRA DE ALMEIDA

novembro de 2020

# ANÁLISE DO EFEITO DE FILETES DE ADESIVO NA RESISTÊNCIA ESTÁTICA DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES

Tiago Abel Pereira de Almeida

1150049

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# ANÁLISE DO EFEITO DE FILETES DE ADESIVO NA RESISTÊNCIA ESTÁTICA DE JUNTAS ADESIVAS TUBULARES

Tiago Abel Pereira de Almeida

1150049

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 e coorientação de Mónica Glória Cardoso.

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Luís Carlos Ramos Nunes Pinto Ferreira

Professor Adjunto, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Coorientador**

Mestre Mónica Glória Cardoso

Professor Assistente Convidado, ISEP

## **Arguente**

Doutor Ricardo João Camilo Carbas

Investigador, FEUP



## AGRADECIMENTOS

A todos os familiares e amigos que me ajudaram nesta caminhada que culminou no termino de mais uma etapa académica.

Ao meu orientador Professor Doutor Duarte Salgueiral Gomes Campilho e à coorientadora Mestre Mónica Glória Cardoso, pela disponibilidade, ajuda e apoio na construção desta dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto que proporcionou todos os meios para a realização desta dissertação.

Em especial, à minha esposa, Verónica Gomes, pela sua paciência, ajuda e apoio na concretização de mais um dos nossos objetivos.



## PALAVRAS CHAVE

Adesivo estrutural, Juntas adesivas tubulares, Filete de adesivo, Método de Elementos Finitos, Modelo de Dano Coesivo.

## RESUMO

A procura de otimização na construção de equipamentos e estruturas tem vindo a gerar o surgimento de novos materiais, assim como novos processos de construção e de ligação. As juntas adesivas tubulares (JAT) são uma solução e possibilitam a construção de estruturas de forma mais simples, económica, leve e até resistente. Assim surge a necessidade de estudar várias variáveis que melhorem o desempenho e construção das JAT.

Esta dissertação visa estudar a influência da aplicação de filetes de adesivo, com diferentes ângulos ( $\theta$ ), nas extremidades de ligação das JAT. São também considerados dois comprimentos de sobreposição ( $L_0$ ) de diferentes ( $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm). De forma a abranger uma ampla gama de adesivos foram considerados três adesivos de características diferentes: Araldite® AV138, que se trata de um adesivo epóxico frágil, Araldite® 2015, que também é um adesivo epóxico, mas apresenta uma ductilidade moderada, e SikaForce® 7752, que se trata de um adesivo de poliuretano dúctil. Para o estudo paramétrico numérico foram utilizados modelos de dano coesivo (MDC). Inicialmente, esta técnica foi validada com resultados experimentais obtidos em trabalhos anteriores. O trabalho numérico consistiu numa análise elástica de tensões da camada de adesivo e previsão de resistência, por MDC, em função dos parâmetros geométricos e materiais referidos. Foi também realizado um estudo sobre a variável dano.

Este estudo permitiu analisar a influência das alterações geométricas consoante os diferentes tipos de adesivos, possibilitando a verificação de qual a geometria que melhor se enquadra a cada tipo de adesivo. A conjugação de parâmetros que apresentou uma resistência maior, residiu no Araldite® AV138, com  $\theta=7,5^\circ$  e  $L_0=40$  mm.



## KEYWORDS

Structural adhesive, Tubular adhesive joints, Adhesive fillet, Finite Element Method, Cohesive zone models.

## ABSTRACT

The search for optimization in the construction of equipment and structures has been generating the appearance of new materials, as well as new construction and joining processes. Tubular adhesive joints (TAJ) are a solution and make it possible to build structures in a simpler, more economical, light and even resistant manner. Thus, there is a need to study several variables that improve TAJ performance and construction.

This thesis aims to study the influence of the application of adhesive fillets, with different angles, at the TAJ bonding ends. Two different overlap lengths ( $L_0$ ) are also considered ( $L_0=20$  mm and  $L_0=40$  mm). In order to cover a wide range of adhesives, three adhesives of different characteristics were considered: Araldite® AV138, which is a brittle epoxy adhesive, Araldite® 2015, which is also an epoxy adhesive, but has a moderate ductility and SikaForce® 7752, which it is a ductile polyurethane adhesive. For the numerical parametric study, cohesive zone models (CZM) were used. Initially, this technique was validated with experimental results obtained in previous works. The numerical work consisted of an elastic stress analysis in the adhesive layer and strength prediction, by CZM, according to the referred geometric and material parameters. A study was also conducted on the variable damage.

This study made it possible to analyse the influence of geometric changes depending on the different types of adhesives, enabling the verification of which geometry best fits each type of adhesive. The combination of parameters that showed a higher resistance, resided in Araldite® AV138, with  $\theta=7,5^\circ$  e  $L_0=40$  mm.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
CFRP	<i>Carbon-fibre reinforced polymer</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JAT	Junta adesiva tubular
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica de fratura elástica
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
TFFV	Técnica do fecho da fenda virtual

### Lista de Unidades

GPa	Gigapascal
kN	Quilonewton
kPa	Quilopascal
mm	Milímetro
MPa	Megapascal
N	Newton
s	Segundo
$\mu\text{m}$	Micrómetro

## Lista de Símbolos

$C_f$	Comprimento base do filete
$d_{SE}$	Diâmetro externo do aderente exterior
$d_{SI}$	Diâmetro externo do aderente interior
$E$	Modulo de Young
$G$	Modulo de elasticidade transversal
$G_c$	Tenacidade
$G_{Ic}$	Tenacidade à tração
$G_{IIc}$	Tenacidade ao corte
$L_0$	Comprimento de sobreposição
$L_s$	Comprimento de aderentes
$L_T$	Comprimento total da junta adesiva tubular
$P$	Força aplicada
$P_{máx}$	Força aplicada máxima
$P_{máx}^{Med}$	Força máxima média
$Ra$	Rugosidade
$t_A$	Espessura do adesivo
$t_n^0$	Resistência coesiva normal
$t_s^0$	Resistência coesiva ao corte
$t_{SE}$	Espessura do aderente exterior
$t_{SI}$	Espessura do aderente interior
$t_{SI}$	Espessura do aderente interior
$Z$	Razão de rigidez dos aderentes
$\gamma_f$	Deformação de rotura ao corte
$\Delta P_{máx}$	Aumento percentual força máxima
$\epsilon$	Deformação

---

$\epsilon_f$	Deformação de rotura à tração
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma$	Tensão principal
$\sigma_f$	Tensão de rotura à tração
$\sigma_y$	Tensão de cedência à tração
$\tau_f$	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{xy}$	Tensão de corte
$\tau_y$	Tensão de cedência ao corte
$\delta$	Deslocamento
$\delta_n$	Deslocamento em tração
$\delta_n^0$	Deslocamento de carga máxima em tração
$\delta_s$	Deslocamento em corte
$\delta_s^0$	Deslocamento de carga máxima em corte
$\theta$	Ângulo de filete

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Esquema do processo de colagem no fabrico de um sapato [9] .....	8
Figura 2 - Sistema de ancoragem com bucha química em betão [11] .....	9
Figura 3 - Reparação de corrosão em navios com adesivo [12] .....	10
Figura 4 - Aplicação de adesivos na indústria aeronáutica [13] .....	11
Figura 5 - Tipo de esforços em juntas adesivas [14].....	11
Figura 6 - Modo de rotura de juntas adesivas [17].....	13
Figura 7 - Juntas de topo [6].....	14
Figura 8 - Junta de sobreposição [6].....	14
Figura 9 - Cobre junta [6].....	15
Figura 10 – Diferentes configurações de juntas tubulares [6].....	15
Figura 11 – 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 [34]).....	22
Figura 12 – Modelo coesivo triangular [46, 47].....	23
Figura 13 – Geometria do provete DCB [60] .....	25
Figura 14 – Geometria do provete ENF [60].....	26
Figura 15 – 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) [76].....	28
Figura 16 - Esquema da junta estudada com retificação dos aderentes no bordos da sobreposição [93]	41
Figura 17 – Configuração da geometria do provete [3] .....	47
Figura 18 - Curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) da liga de alumínio AW6082-T651 [100] .....	48
Figura 19 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ do adesivo Araldite® AV138 [3] .....	49
Figura 20 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ do adesivo Araldite® 2015 [3].....	50
Figura 21 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ do adesivo SikaForce® 7752 [3] .....	51
Figura 22 – Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [3] .....	52
Figura 23 – Curvas $P$ - $\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [3] .....	53

Figura 24 – Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [3] .....	53
Figura 25 – Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com $L_0$ para as juntas adesivas com os três adesivos [3].....	54
Figura 26 – JAT modelada no ABAQUS®[3] .....	56
Figura 27 – Distribuição das tensões $\sigma_y$ nas JAT: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752 [3].....	57
Figura 28 – Distribuição das tensões $\tau_{xy}$ nas JAT: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752 [3].....	58
Figura 29 – 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 [3].....	59
Figura 30 – 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 [3] .....	60
Figura 31 – 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] .....	60
Figura 32 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as JAT [3] .....	61
Figura 33 - Geometria de JAT com $L_0=20$ mm .....	62
Figura 34 - Geometria de JAT com $L_0=40$ mm .....	62
Figura 35 - Árvore do <i>software</i> ABAQUS® .....	64
Figura 36 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® da geometria da junta na etapa “Part” .....	65
Figura 37 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® da geometria da junta na etapa “Partition face” .....	65
Figura 38 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® para a definição das propriedades elásticas e plásticas do aderente .....	66
Figura 39 – Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de sobreposição para o adesivo Araldite® 2015 .....	66
Figura 40 - Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de sobreposição para o adesivo Araldite® AV 138 .....	67
Figura 41 - Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de sobreposição para o adesivo SikaForce® 7752 .....	67
Figura 42 - Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de filete para o adesivo Araldite® 2015, Araldite® AV 138 e SikaForce® 7752.....	68
Figura 43 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® da geometria da junta na etapa “Sections” .....	68
Figura 44 – Parâmetros atribuídos no <i>software</i> ABAQUS® da geometria da junta na etapa “Step” .....	69

Figura 45 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® para a etapa “Load” a), parâmetros de encastramento b) e parâmetros de deslocamento c). .....	69
Figura 46 - Representação da malha do <i>software</i> ABAQUS® na etapa “Mesh”. .....	70
Figura 47 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® da ferramenta “Monitor” na etapa “Job”. .....	70
Figura 48 - Representação do <i>software</i> ABAQUS® para a etapa “Visualizations”. .....	71
Figura 49 - Distribuição de tensões $\sigma_y/\tau_{avg}$ nos diversos $\theta$ estudados para o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=20$ mm .....	72
Figura 50 - Distribuição de tensões $\sigma_y/\tau_{avg}$ nos diversos $\theta$ estudados para o adesivo Araldite® AV 138 e $L_0=20$ mm .....	72
Figura 51 - Distribuição de tensões $\sigma_y/\tau_{avg}$ nos diversos $\theta$ estudados para o adesivo SikaForce® 7752 e $L_0=20$ mm .....	73
Figura 52 - Distribuição de tensões $\sigma_y/\tau_{avg}$ nos diversos $\theta$ estudados para o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=40$ mm .....	73
Figura 53 - Distribuição de tensões $\sigma_y/\tau_{avg}$ nos diversos $\theta$ estudados para o adesivo Araldite® AV 138 e $L_0=40$ mm .....	74
Figura 54 - Distribuição de tensões $\sigma_y/\tau_{avg}$ nos diversos $\theta$ estudados para o adesivo SikaForce® 7752 e $L_0=40$ mm .....	74
Figura 55 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ considerando a variação do $\theta$ para Araldite® 2015 e $L_0=20$ mm .....	76
Figura 56 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ considerando a variação do $\theta$ para Araldite® AV138 e $L_0=20$ mm .....	76
Figura 57 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ considerando a variação do $\theta$ para SikaForce® 7752 e $L_0=20$ mm .....	76
Figura 58- Distribuição de tensões $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ considerando a variação do $\theta$ para Araldite® 2015 e $L_0=40$ mm .....	77
Figura 59 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ considerando a variação do $\theta$ para Araldite® AV138 e $L_0=40$ mm .....	77
Figura 60 - Distribuição de tensões $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ considerando a variação do $\theta$ para SikaForce® 7752 e $L_0=40$ mm .....	77
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do $\theta$ , para Araldite® 2015 e $L_0=20$ mm .....	79
Figura 62 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do $\theta$ , para Araldite® AV138 e $L_0=20$ mm .....	79

Figura 63 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do $\theta$ , para SikaForce® 7752 e $L_0=20$ mm .....	79
Figura 64 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do $\theta$ , para Araldite® 2015 e $L_0=40$ mm .....	80
Figura 65 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do $\theta$ , para Araldite® AV138 e $L_0=40$ mm .....	80
Figura 66 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do $\theta$ , para SikaForce® 7752 e $L_0=40$ mm .....	81
Figura 67 - $P_{m\acute{a}x}$ em função do $\theta$ de adesivo, com $L_0=20$ mm, para os adesivos estudados .....	83
Figura 68 - $P_{m\acute{a}x}$ em função do $\theta$ de adesivo, com $L_0=40$ mm, para os adesivos estudados .....	83
Figura 69 – Influência do $L_0$ no valor de $P_{m\acute{a}x}$ para os adesivos estudados .....	83
Figura 70 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função da variação do $\theta$ , para Araldite® 2015 e $L_0=20$ mm. b) SDEG na JAT no momento de $P_{m\acute{a}x}$ para $45^\circ$ .....	84
Figura 71 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função da variação do $\theta$ , para Araldite® AV138 $L_0=20$ mm. b) SDEG na JAT no momento de $P_{m\acute{a}x}$ para $45^\circ$ .....	85
Figura 72 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função da variação do $\theta$ , para SikaForce® 7752 e $L_0=20$ mm. b) SDEG na JAT no momento de $P_{m\acute{a}x}$ para $45^\circ$ .....	85
Figura 73 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função da variação do $\theta$ , para Araldite® 2015 e $L_0=40$ mm. b) SDEG na JAT no momento de $P_{m\acute{a}x}$ para $45^\circ$ .....	86
Figura 74 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função da variação do $\theta$ , para Araldite® AV138 e $L_0=40$ mm. b) SDEG na JAT no momento de $P_{m\acute{a}x}$ para $45^\circ$ .....	86
Figura 75 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em função da variação do $\theta$ , para SikaForce® 7752 e $L_0=40$ mm. b) SDEG na JAT no momento de $P_{m\acute{a}x}$ para $45^\circ$ .....	87

## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Classificação de adesivos estruturais [18] .....	16
Tabela 2 - Adesivos estruturais, classificação química (adaptado de [6]) .....	17
Tabela 3 - <i>Simplified analytical model for adhesive-bonded tubular joints with isotropic and composite adherends subjected to tension</i> [78].....	29
Tabela 4 - <i>Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints</i> [79] .....	30
Tabela 5 - <i>Experimental and numerical investigations on adhesively bonded tubular connections for moulded wooden tubes</i> [80] .....	31
Tabela 6 - <i>Shear directional impact characteristics of adhesively bonded tubular joints</i> [81] .....	31
Tabela 7 - <i>Investigation on fatigue performance of adhesively bonded butt-joints and multiaxial life estimation using stress-based failure models</i> [82].....	32
Tabela 8 - <i>Mechanical behaviour of thick structural adhesives in wind turbine blades under multi-axial loading</i> [83].....	33
Tabela 9 - <i>Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends</i> [84] .....	34
Tabela 10 - <i>Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints</i> [85].....	34
Tabela 11 - <i>Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints</i> [86] .....	35
Tabela 12 - <i>Adhesively bonded steel tubes — Part I: Experimental investigations</i> [87] .....	36
Tabela 13 - <i>Effect of spew fillet on adhesively bonded single lap joints with CFRP and aluminum-alloy immersed in distilled water</i> [88] .....	37
Tabela 14 - <i>Topology optimisation of adhesive joints using non-parametric methods</i> [89].....	37
Tabela 15 - <i>A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends</i> [90] .....	38
Tabela 16 - <i>Investigation of the effect of chamfer size on the behaviour of hybrid joints made by adhesive bonding and riveting</i> [91].....	39
Tabela 17 - <i>Static strength improvement of tubular aluminium adhesive joints by the outer chamfering technique</i> [92] .....	39
Tabela 18 - <i>Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints</i> [93] .....	40
Tabela 19 - <i>The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints</i> [94].....	41

Tabela 20 - <i>Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness</i> [95] .....	42
Tabela 21 - <i>Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures</i> [96].....	43
Tabela 22 - <i>The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive</i> [97] .....	43
Tabela 23 - <i>The Effect of a Hot–Wet Environment on Adhesively Bonded Joints Under a Sustained Load</i> [98] .....	44
Tabela 24 - Designação das cotas dos provetes e respetivos valores (em mm) [3] .....	48
Tabela 25 - Características mecânicas da liga de alumínio AW6082-T651 (adaptado de [3, 99]).....	48
Tabela 26 - Características da adesivo Araldite® AV138 (adaptado de [3]) .....	49
Tabela 27 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [3] .....	49
Tabela 28 - Características do adesivo Araldite® 2015 (adaptado de [3]).....	50
Tabela 29 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [3].....	50
Tabela 30 - Características da adesivo Sikaforce® 7752 (adaptado de [3]) .....	51
Tabela 31 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [3] .....	51
Tabela 32 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138 [3].....	52
Tabela 33 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015 [3] .....	53
Tabela 34 – Valores de $P_{máx}$ [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 [3] .....	54
Tabela 35 – $P_{máx}$ Méd (em N) e aumento percentual do mesmo ( $\Delta P_{máx}$ [%]) em função de $L_0$ para os três adesivos em estudo, para as JAT [3] .....	54
Tabela 36 – Conclusões dos ensaios realizados .....	55
Tabela 37 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [3].....	55
Tabela 38 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [3] .....	55
Tabela 39 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [3].....	55
Tabela 40 - Tabela resumo do efeito das tensões de arrancamento em juntas adesivas (adaptado de [3]) .....	57
Tabela 41 – Valores máximos de $\sigma_y/\tau_{avg}$ para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [3].....	58
Tabela 42 - Análise de resultados obtidos referentes a tensões de arrancamento em juntas adesivas (adaptado [3]) .....	58
Tabela 43 - Tabela resumo do efeito das tensões de corte em juntas adesivas (adaptado de [3]) .....	59
Tabela 44 – Valores máximos de $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ para os três adesivos, para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm [3] .....	59

---

Tabela 45 - Análise de resultados obtidos referentes a tensões de corte em juntas adesivas (adaptado de [3]).....	59
Tabela 46 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de $L_0$ [3].....	60
Tabela 47 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de $L_0$ , e respectiva diferença relativa [3].....	61
Tabela 48 - Vários tipos de filetes de adesivos aplicados e suas características.....	63
Tabela 49 - $\sigma_y/\tau_{avg}$ para os três adesivos em função de $x/L_0$ para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.....	75
Tabela 50 - $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ para os três adesivos em função de $x/L_0$ de adesivo para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.....	78
Tabela 51 - $P_{m\acute{a}x}$ [N] para os três adesivos em função do $\theta$ de adesivo, e respectivo aumento percentual para $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm.....	82



# ÍNDICE

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>3</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização</b> .....	<b>3</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos</b> .....	<b>3</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do relatório</b> .....	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Ligações adesivas</b> .....	<b>7</b>
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas .....	7
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas .....	8
2.1.2.1	Indústria eletrónica.....	8
2.1.2.2	Indústria do calçado.....	8
2.1.2.3	Construção civil.....	9
2.1.2.4	Construção naval .....	9
2.1.2.5	Construção automóvel.....	10
2.1.2.6	Indústria aeronáutica.....	10
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas .....	11
2.1.3.1	Esforço em juntas adesivas .....	11
2.1.3.1.1	Compressão.....	12
2.1.3.1.2	Tração.....	12
2.1.3.1.3	Corte.....	12
2.1.3.1.4	Clivagem e arrancamento .....	12
2.1.3.2	Modo de rotura .....	12
2.1.4	Configurações possíveis de junta .....	13
2.1.4.1.1	Juntas de topo a topo .....	13
2.1.4.1.2	Juntas de sobreposição .....	14
2.1.4.1.3	Cobre junta.....	15

---

2.1.4.1.4	Juntas tubulares .....	15
2.1.5	Adesivos estruturais .....	16
2.1.5.1	Classificação dos adesivos estruturais .....	16
2.1.5.2	Adesivos de epóxido .....	17
2.1.5.3	Adesivos fenólicos.....	18
2.1.5.4	Adesivos de poliimida .....	18
2.1.5.5	Adesivos de poliuretano .....	18
2.1.5.6	Adesivos acrílicos .....	19
<b>2.2</b>	<b>Previsão de resistência de juntas adesivas.....</b>	<b>19</b>
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos .....	20
2.2.2	Mecânica da fratura .....	21
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	22
2.2.3.1	Tipos de leis coesivas .....	23
2.2.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	24
2.2.4	Mecânica do dano .....	26
2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido .....	27
<b>2.3</b>	<b>Juntas adesivas tubulares .....</b>	<b>28</b>
2.3.1	Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração .....	29
2.3.2	Juntas tubulares sujeitas a esforços de corte.....	31
2.3.3	Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga .....	32
2.3.4	Juntas tubulares sujeitas a outros esforços .....	33
<b>2.4</b>	<b>Efeitos geométricos em juntas adesivas .....</b>	<b>33</b>
2.4.1	Comprimento de sobreposição e espessura dos aderentes .....	35
2.4.2	Utilização de filetes de adesivo .....	36
2.4.3	Utilização de chanfros interiores.....	38
2.4.4	Utilização de chanfros exteriores .....	39
2.4.5	Outras alterações geométricas .....	40
2.4.5.1	Retificação nos bordos de sobreposição do aderente.....	40
2.4.5.2	Entalhes no adesivo na zona de sobreposição .....	41

---

2.4.5.3	Rugosidade na superfície do aderente .....	42
2.4.5.4	Espessura do adesivo .....	42
2.4.6	Condições ambientais .....	44
<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO .....</b>	<b>47</b>
<b>3.1</b>	<b>Validação da técnica numérica com dados experimentais .....</b>	<b>47</b>
3.1.1	Descrição da geometria e materiais .....	47
3.1.1.1	Aderentes.....	48
3.1.1.2	Adesivos.....	49
3.1.1.2.1	Araldite® AV138 .....	49
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	50
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	51
3.1.2	Resultados experimentais obtidos .....	52
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	52
3.1.2.2	Araldite® 2015 .....	53
3.1.2.3	SikaForce® 7752.....	53
3.1.3	Comparação de resultados.....	54
3.1.4	MDC triangular .....	55
3.1.4.1	Determinação de propriedades coesivas.....	55
3.1.5	Condições de análise numérica .....	56
3.1.6	Análise de tensões nas juntas .....	56
3.1.6.1	Tensões de arrancamento .....	56
3.1.6.2	Tensões de corte.....	58
3.1.7	Previsão da resistência por MDC.....	59
3.1.8	Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais .....	60
<b>3.2</b>	<b>Estudo numérico.....</b>	<b>62</b>
3.2.1	Geometria da junta .....	62
3.2.2	Materiais considerados .....	64
3.2.3	Criação do modelo numérico 2D.....	64
3.2.3.1	Etapa “Part” .....	65

---

---

3.2.3.2	Etapa “Property” .....	65
3.2.3.2.1	Definição de propriedades dos aderentes .....	65
3.2.3.3	Etapa “Sections” .....	68
3.2.3.4	Etapa “Step” .....	68
3.2.3.5	Etapa “Load” .....	69
3.2.3.6	Etapa “Mesh” .....	70
3.2.3.7	Etapa “Job” .....	70
3.2.3.8	Etapa “Visualization” .....	71
3.2.4	Estudo dos filetes de adesivo .....	71
3.2.4.1	Distribuições de tensões .....	72
3.2.4.1.1	Tensões de arrancamento .....	72
3.2.4.1.1.1	Estudo para $L_0=20$ mm .....	72
3.2.4.1.1.2	Estudo para $L_0=40$ mm .....	73
3.2.4.1.1.3	Comparação entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm .....	74
3.2.4.1.2	Tensões de corte .....	75
3.2.4.1.2.1	Estudo para $L_0=20$ mm .....	75
3.2.4.1.2.2	Estudo para $L_0=40$ mm .....	76
3.2.4.1.2.3	Comparação entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm .....	77
3.2.4.2	Resistência da junta .....	78
3.2.4.2.1	Estudo para $L_0=20$ mm .....	78
3.2.4.2.2	Estudo para $L_0=40$ mm .....	79
3.2.4.2.3	Comparação entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm .....	81
3.2.4.3	Estudo da variável de dano .....	84
3.2.4.3.1	Estudo para $L_0=20$ mm .....	84
3.2.4.3.2	Estudo para $L_0=40$ mm .....	86
4	CONCLUSÕES .....	91
5	REFERÊNCIAS .....	95

# INTRODUÇÃO



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Ano após ano a indústria aeronáutica, automóvel e fabricantes de autocarros tem apostado em adesivos estruturais de forma a otimizarem os seus produtos tanto a nível económico como a nível mecânico.

Usualmente os adesivos são aplicados em painéis poliméricos ou metálicos que beneficiam de áreas consideráveis de adesão, servido por vezes apenas de revestimento ou adereço. No entanto, as indústrias referidas estenderam esta tecnologia para a componente estrutural com o objetivo de unir e construir peças de geometria mais complexa. Um ótimo exemplo é a estrutura interna dos autocarro que é composta por ligações tubulares. Quando são aplicados adesivos nestas ligações é preciso ter em conta que as ligações usufruem de pouca área de contato e estão sujeitas a grandes cargas. Por sua vez, as estruturas ficam mais leves e flexíveis minimizando necessidade de soldadura ou ligações aparafusadas [1].

Uma ferramenta que tem ganho cada vez mais importância nesta área é o Método de Elementos Finitos (MEF). Este método desconstrói uma estrutura complexa em pequenos elementos e estuda a seu comportamento após a aplicação de um determinado carregamento. É possível analisar as forças resultantes, os deslocamentos, as tensões e as deformações originadas pelo comportamento mecânico da estrutura [1].

Desta forma a investigação deste tipo de juntas tem-se tornado relevante e cada vez mais extensa. Com modelos computacionais e analíticos é possível estudar o comportamento de uma junta quando exposta a vários tipos de adversidades e assim otimizar estruturas, métodos de construção e equipamentos [2].

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação tem como principal objetivo estudar JAT sujeitas a esforços de tração impondo algumas variantes geométricas. Estas variantes passam por diferentes ângulos de filete ( $\theta$ ), aplicados nas extremidades da sobreposição, assim como diferentes comprimentos de sobreposição ( $L_0$ ). Para tal são considerados  $\theta$  de 7,5°, 15°, 30°, 45°, 60° e 75°, aplicados em juntas tubulares (JAT) onde o valor de  $L_0$  pode ser considerado 20 mm ou 40 mm. No estudo são também considerados três adesivos diferentes (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752).

O estudo tomará por base a dissertação de Ferreira [3] e envolverá apenas componentes numéricas com recurso a análises paramétricas numéricas. Recorrendo ao modelo de dano coesivo (MDC), por meio do *software* ABAQUS®, serão constituídos modelos que serão testados de forma a simular a tração real com as variáveis já referidas.

Para análise serão submetidas as curvas  $P-\delta$  geradas pelos ensaios e assim observar a distribuição das tensões ao longo da JAT. Serão também tidas em conta as tensões de corte, resistência da junta e o conseqüente  $P_{máx}$  e a variável de dano coesivo. Desta forma será possível observar a influência das alterações geométricas impostas.

### 1.3 Organização do relatório

Este relatório foi dividido em 4 capítulos que possibilitam o leitor se enquadrar, contextualizar, consultar e entender os resultados obtidos.

No primeiro capítulo é possível perceber os objetivos deste estudo assim como a organização do mesmo.

No segundo capítulo é possível entender a envolvente do estudo em causa tomando noções de elementos base. É possível também perceber neste capítulo o que são ligações adesivas e em concreto, ligações adesivas tubulares. Serão também apresentadas algumas noções que permitem perceber o fundamento para a possível previsão da resistência de uma junta. Para finalizar o leitor terá oportunidade de tomar conhecimento das diferentes geometrias que podem influenciar o comportamento de uma junta adesiva.

O terceiro capítulo foca-se na validação dos resultados numéricos com dados experimentais e no estudo paramétrico numérico realizado. Neste último é possível analisar a distribuição das tensões ao longo da JAT, a resistência da junta e o conseqüente  $P_{máx}$ , e a variável de dano coesivo.

Para finalizar o quarto capítulo apresenta as conclusões obtidas e proposta de trabalhos futuros.

# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

É possível ao longo da história da humanidade identificar o uso diverso de materiais adesivos, mas é difícil definir um início para esta prática. Existem evidências arqueológicas e documentais que o ser humano usa materiais com capacidade aderente à milhares de anos reservando-se ao objetivo de tornar os objetos mais resistentes, versáteis, baratos ou simplesmente para propósitos decorativos ou ornamentais [4].

Os primeiros materiais usados eram de origem natural e tinham como base plantas, ossos, peixe e leite. Na altura não seguiam nenhuma base científica, apenas a experiência do dia a dia e o acaso. Com os avanços tecnológicos dos últimos 100 anos a evolução nesta área tem sido mais relevante colocando assim as matérias naturais em segundo plano e introdução de componentes sintéticos como polímeros, produzidos de forma industrial [5].

#### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas possuem numerosas vantagens em relação aos restantes meios de fixação ou de ligação. Estas permitem combinar materiais e superfícies diferentes, assim como espessuras e formas diferentes. São também indicadas para ligações com grandes áreas de contacto que por sua vez permitem uma melhor distribuição de tensões ao contrário, por exemplo, das ligações aparafusadas. Este método pode ainda ser o mais económico poupando no tempo de aplicação e reduzindo nas quantidades necessárias material, o que origina estruturas mais leves. O próprio adesivo por sua vez pode absorver vibrações e funcionar como isolante acústico assim como impermeabilizante para líquidos [6].

Como desvantagens possuem um range de temperatura curto e podem perder propriedades mecânicas quando ultrapassado. A sua aplicação requer superfícies limpas. As juntas são difíceis de inspecionar e de garantir que não possuem defeitos. Por vez são necessários estágios intermédios para a solidificação da junta que podem ser incompatíveis com os materiais adjacentes como por exemplo curas demoradas ou muito rápidas, curas que necessita de altas temperaturas ou de prensagem. Desfazer uma junta é impossível ou desaconselhado, pois prevê-se a destruição dos aderentes. Outra desvantagem é o custo seu fabrico, o qual pode elevado devido aos equipamentos necessários e ao processo requeridos [6].

## 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

A indústria aeronáutica é o principal motor para o desenvolvimento dos adesivos estruturais devido à necessidade de criar equipamentos mais leves e económicos nas situações mais adversas. No entanto, esta tecnologia sempre esteve presentes nos vários ramos da nossa sociedade.

### 2.1.2.1 Indústria eletrónica

Os adesivos tornaram-se fundamentais na indústria eletrónica sendo utilizados para a montagem e embalamento destes componentes. Na montagem, podem servir de meio de interconexão pois para além de possuírem a característica de adesão, são também condutores elétricos. Os preços de manufaturação reduzem devido ao facto de os adesivos serem mais económicos em relação a ligas metálicas e permitem mais facilmente correções em caso de erro [7].

### 2.1.2.2 Indústria do calçado

A indústria do calçado está intimamente ligada à indústria dos adesivos. Com a evolução do mercado, o calçado é cada vez mais exigente e competitivo a nível tecnológico criando necessidades de materiais mais versáteis e mais fáceis de aplicar [8].

O calçado utiliza uma enorme variedade de materiais que são caracterizados por terem diferentes funções e por vezes é necessário conjugar vários tipos nos mesmo produto. É nesse aspeto que os adesivos apresentam uma das suas maiores vantagens fazendo a junção de aderentes de materiais e tipologias diferentes, como é perçetível na Figura 1 [8].

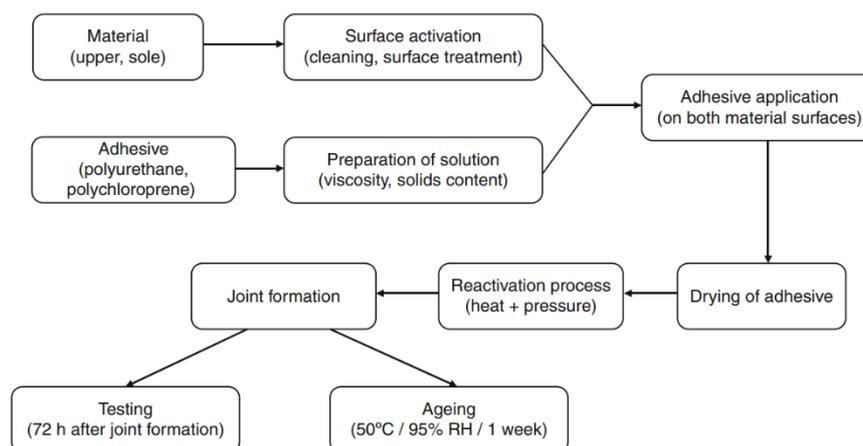


Figura 1 – Esquema do processo de colagem no fabrico de um sapato [9]

O tipo de produto também difere no tipo de necessidade. Sapatos ocasionais são concebidos prevalecendo a estética em detrimento do desempenho mecânico, o que

leva a que tenham uma durabilidade mais baixa. Por outro lado, calçado desportivo é exposto a condições mecânicas e ambientais mais adversas levando a que as ligações adesivas sejam mais resistentes e o produto mais leve [8].

Uma junta adesiva num sapato está sujeita de diferentes tipos de tensões, como por exemplo de corte, tração e compressão, fazendo com que a junta seja levada ao seu extremo a nível mecânico [8].

### 2.1.2.3 Construção civil

Na indústria da construção civil os adesivos tiveram uma grande evolução e fazem agora parte integrante de várias aplicações. Com o surgimento de novos materiais de construção como polímeros, painéis de madeira ou espumas, os meios convencionais de colagem como cimento ou gesso deixaram de ser práticos e indicados, abrindo portas a novos produtos. Facilitando processos e otimizando custos, os adesivos são aplicados desde a componente estrutural à componente estética. Permitem a união de materiais diferentes como betão, metal (Figura 2) e madeira e são ótimos isolantes evitando infiltrações. A versatilidade e durabilidade dos adesivos aplica-se também na restauração de edifícios e monumentos históricos [10].

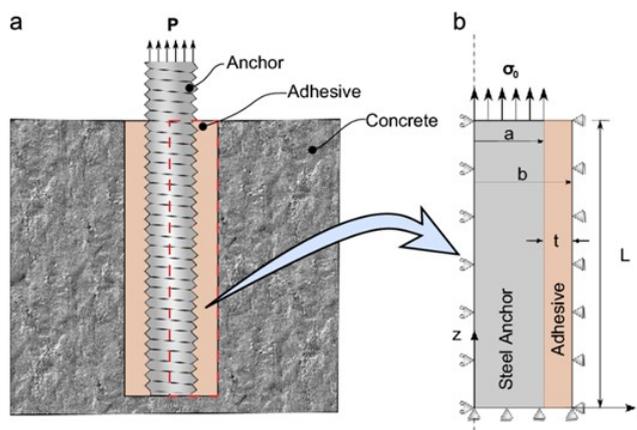


Figura 2 - Sistema de ancoragem com bucha química em betão [11]

### 2.1.2.4 Construção naval

O ambiente marítimo é caracterizado pelas condições agressivas que possui, o que leva a especial atenção no momento da escolha de materiais. Os compósitos, nomeadamente os compósitos reforçados com fibra são de usual aplicação devido à sua resistência à corrosão, à humidade e à temperatura (Figura 3). Estes compostos proporcionam estruturas leves, mas também acrescentam a característica de estanquicidade [9].

A sua gama de aplicação abrange desde pequenas embarcações até plataformas offshore, neste caso em concreto sua aplicação é feita em componente onde o processo de soldadura não é possível devido a questões de segurança [9].

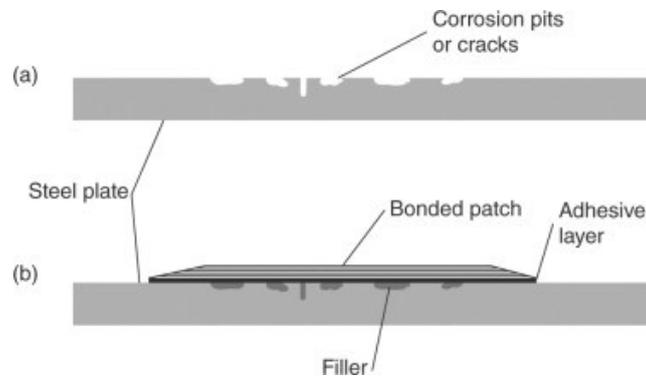


Figura 3 - Reparação de corrosão em navios com adesivo [12]

#### 2.1.2.5 Construção automóvel

A indústria automóvel é das mais usufruídas das ligações adesivas. Estas ligações permitem criar estruturas mais leves e reduzir custos de produção. Ao serem mais leves também melhoram o seu desempenho e permitem poupanças ao utilizador nomeadamente a nível de consumo de combustível. A nível mecânico as estruturas tornaram-se mais resistentes levando a uma otimização da rigidez. Aliado a todas estas características, ainda é possível considerar a ligação de diferentes materiais e a estanquicidade proporcionada pelos adesivos, tornando-os num produto de larga utilização na indústria automóvel [9].

#### 2.1.2.6 Indústria aeronáutica

Recentemente as estruturas metálicas que compõem as aeronaves têm vindo a ser substituídas por compósitos e são cada vez mais empregues adesivos para a união das mesmas como para revestimento e proteção do equipamento [6]. Isto leva a que as estruturas dos aviões se tornem mais leves visto de não necessitarem de tantas ligações aparafusadas. Desta forma as estruturas também se tornam mais flexíveis e preparadas para lidar com ventos quando em voo. Atualmente uma aeronave possui inúmeros componentes que possuem adesivos nas suas estruturas (Figura 4).

Os adesivos são também utilizados na construção das pás de helicópteros onde podem ser ligados diferentes materiais tais como aço inoxidável, plástico e folhas de compósito [1].

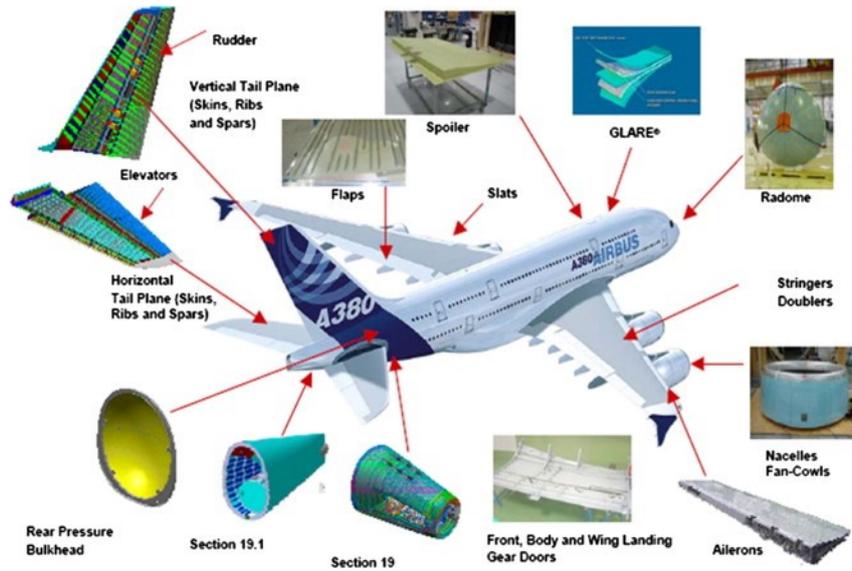


Figura 4 - Aplicação de adesivos na indústria aeronáutica [13]

### 2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

#### 2.1.3.1 Esforço em juntas adesivas

As distribuições de tensões de uma junta são normalmente não uniformes, derivado da existência de tensões pontuais com valores várias vezes acima da tensão média. Esta nuance faz com que o dimensionamento de junta não seja tão linear como eventualmente poderia parecer. Assim, torna-se necessário classificar a junta adesiva em relação a modos de carregamento e esforços a que está sujeita.

Uma junta pode sofrer cinco modos de carregamento: compressão, corte, clivagem e arrancamento [1].

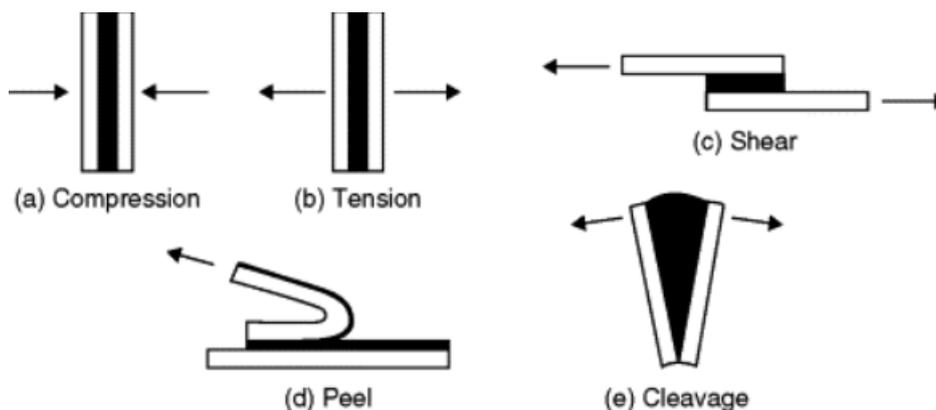


Figura 5 - Tipo de esforços em juntas adesivas [14]

#### 2.1.3.1.1 Compressão

Esforços de compressão resultam de forças atuantes, perpendiculares ao plano aderente e no sentido do mesmo. Este tipo de esforço resulta na compressão do adesivo e esta por sua vez se for uniforme nunca resultará no rompimento da junta [15].

Na realidade uma junta sujeita a compressão pura não necessita de adesivo assumindo que a carga imposta é suficiente e os aderentes se mantenham estáticos [3].

#### 2.1.3.1.2 Tração

Os esforços de tração são a resultante de forças perpendiculares aplicadas ao plano de aderência, proporcionando o afastamento dos aderentes. Trata-se dos esforços que mais exigência provoca nos adesivos pois em casos onde a superfície de união é menor, como é o caso de juntas topo a topo ou em chanfro, gera uma elevada concentração de tensões distribuída por uma pequena área. Estas tensões podem ou não serem uniformes o que aumenta a instabilidade da junta e possível rotura [16].

#### 2.1.3.1.3 Corte

As tensões de corte são resultantes de forças aplicadas no sentido do plano de adesivo, com direções opostas proporcionando a separação dos aderentes. Por norma as juntas que são solicitadas ao corte são mais resistentes. Isto porque toda a área em contacto com o adesivo contribui para a resistência da junta e além disso é mais fácil manter o alinhamento dos aderentes [1].

#### 2.1.3.1.4 Clivagem e arrancamento

As ações de clivagem ou de arrancamento são das mais prejudiciais no que toca ao desempenho de uma junta adesiva. Por definição uma ação de clivagem resulta na aplicação de forças na extremidade de uma junta rígida. Por sua vez uma ação de arrancamento resulta quando aplicado forças numa junta flexível e proporcionando um ângulo de separação em relação aos aderentes resultando em clivagem.

Adesivos que sejam mais frágeis e rígidos tem tendência a ser mais sensíveis a forças de arrancamento. Por sua vez, adesivos mais dúcteis e flexíveis fazem com que a distribuição de tensões seja mais alargada proporcionando uma maior resistência [1].

#### 2.1.3.2 Modo de rotura

Para projetar corretamente uma junta adesiva é necessário avaliar a distribuição do perfil de tensões e assim deduzir os possíveis modos de rotura (Figura 6). Genericamente são agrupados em três tipos: rotura coesiva, rotura adesiva e rotura mista.

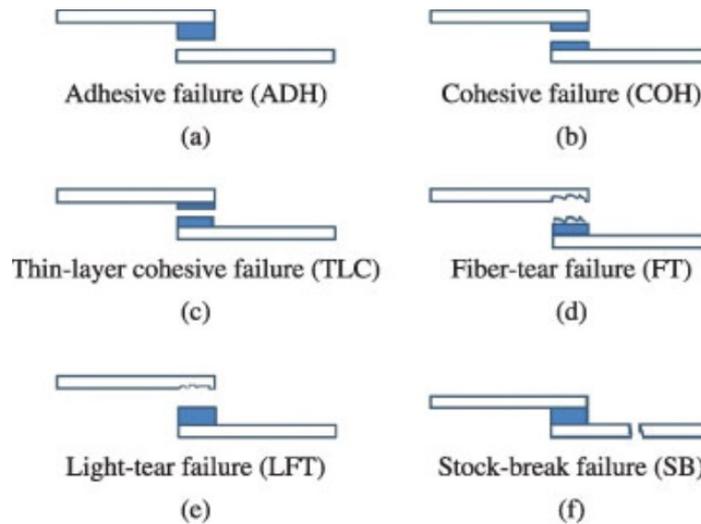


Figura 6 - Modo de rotura de juntas adesivas [17]

A rotura coesiva ocorre quando a tensão aplicada é superior à resistência do próprio material, levando assim ao rompimento do adesivo pelo seu interior. O mesmo princípio pode ser aplicado na rotura do aderente, mas neste caso a resistência do adesivo é superior à do aderente. A rotura adesiva pode ter como origem a má preparação das superfícies. Por vezes pode surgir uma rotura mista que é caracterizada pela conjugação da rotura adesiva e da rotura coesiva.

Assume-se que uma junta adesiva está bem dimensionada quando esta, está prevista para romper pelo aderente [1].

#### 2.1.4 Configurações possíveis de junta

O conceito para uma junta adesiva ideal reside no facto de quando esta é sujeita a carregamentos, o adesivo deverá ser solicitado na direção que mais resiste. Alguns designs de juntas podem ser difíceis de colocar em prática dado a serem dispendiosos, difíceis de fabricar ou mesmo de alinhar os aderentes. Por estes motivos o projetista deve considerar todos estes aspetos na hora da sua conceção [6]. Existem vários tipos de juntas, mas é possível destacar quatro tipos: Juntas de topo a topo, juntas de sobreposição, cobre-juntas e juntas tubulares.

##### 2.1.4.1.1 Juntas de topo a topo

Juntas de topo a topo (Figura 7) são de construção simples e aplicáveis a aderentes finos. No entanto esta configuração não é apropriada para esforço de flexão pois o adesivo fica sujeito a esforços de clivagem. De forma a reforçar esta união é possível redesenhar a extremidade da junta colocando chanfros e sobreposições. Outra possibilidade é

tornar os aderentes mais rígidos na zona da união e mais flexíveis nas extremidades de forma compensar possíveis desalinhamentos provocados pelos carregamentos [6].

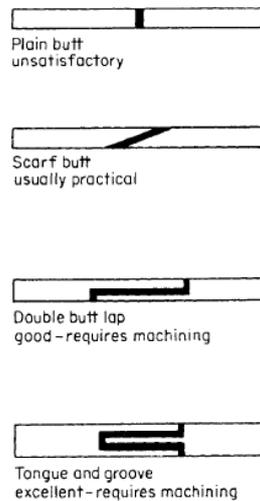


Figura 7 - Juntas de topo [6]

#### 2.1.4.1.2 Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição (Figura 8) são as de mais simples fabrico, e por isso as preferenciais para serem estudadas. No entanto estas juntas não são fáceis de mapear a nível de tensões devido à flexão dos aderentes. Deste modo o adesivo não fica apenas sujeito à tensão de corte, mas também à tração provocando arrancamento na extremidade da junta. De forma a diminuir esse efeito usa-se juntas em degrau ou com chanfro [1].

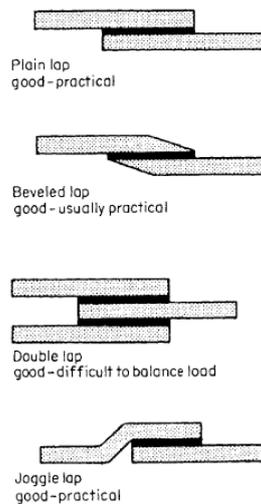


Figura 8 - Junta de sobreposição [6]

### 2.1.4.1.3 Cobre junta

A cobre-junta é uma das formas de manter os carregamentos perpendiculares com o plano do adesivo quando a espessura dos adesivos é demasiado elevada. Este tipo de conexão aumenta a resistência a esforços flexão, com exceção da primeira opção representada na Figura 9 [6].

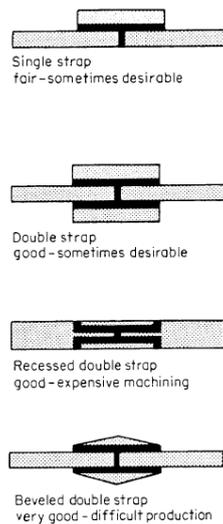


Figura 9 - Cobre junta [6]

### 2.1.4.1.4 Juntas tubulares

As juntas tubulares (Figura 10) surgem da necessidade de ligar tubos e varões. Em comparação com as juntas de topo a topo as deste tipo são bastantes resistentes a esforços de flexão e por proporcionam uma maior área de sobreposição. Infelizmente estas juntas necessitam de trabalhos de extra como por exemplo maquinação [6].

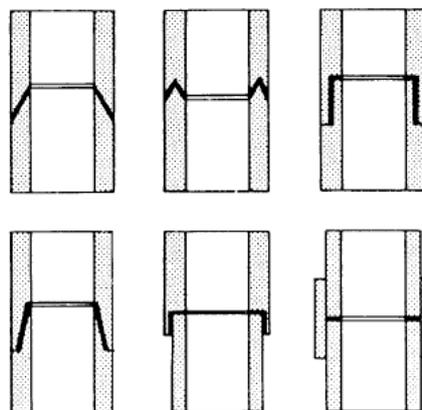


Figura 10 – Diferentes configurações de juntas tubulares [6]

A nível de esforços, este tipo de juntas tem um melhor desempenho a nível de torção e esforço axial. É possível otimizar a junta com o acrescento de chanfros nos aderentes permitindo uma maior área de contacto e uma distribuição de tensões mais uniforme [9].

### 2.1.5 Adesivos estruturais

Segundo a ASTM, o adesivo estrutural é um agente de ligação usado para a transferência de cargas entre aderentes normalmente inserido em componentes estruturais. Desta forma um adesivo estrutural caracteriza-se por ser uma substância com a capacidade de unir materiais através de uma superfície de ligação. Esta capacidade de união advém de ligações químicas estabelecidas entre o adesivo e os aderentes, originadas por exemplo, pela interligação mecânica. Este tipo de conexão caracteriza-se pelo facto do adesivo penetrar em poros e outras irregularidades da superfície resultando em forças de atração entre superfícies [18]. Como parâmetro de resistência mecânica, certos autores consideram que os adesivos estruturais têm uma resistência à tração superior a 10 MPa à temperatura ambiente.

A nível de composição, normalmente tem como base resinas termoendurecíveis que necessitam de uma reticulação química originada por um agente de cura e ou/ adição de calor. Os poliuretanos também podem ser considerados adesivos estruturais embora estejam inseridos na classe dos elastómeros termoendurecíveis resistentes [6].

#### 2.1.5.1 Classificação dos adesivos estruturais

É possível considerar vários parâmetros para a classificação dos adesivos estruturais entre os quais a forma física, a composição química, condições de cura, tipo de aderentes e a aplicação. A Tabela 1 apresenta uma forma simplista de classificar os adesivos.

Tabela 1 - Classificação de adesivos estruturais [18]

Parâmetro de classificação	Exemplos
Forma física	Filme, fita, pó, pasta, líquido
Composição química	Epóxidos, fenólicos, acrílicos, cianoacrilato, uretano
Condições de cura	Estufa, temperatura elevada, radiação (UV ou E.B), anaeróbica, húmida
Tipo de aderentes	Madeira, cerâmica, vidro, metal
Aplicação	Construção, condutiva, junta de ligação ( <i>hemming flange</i> )

É possível detalhar os adesivos, por exemplo, na componente química e assim identificar as várias famílias existentes. Petrie [6] divide os adesivos estruturais em vários tipos como é possível verificar na Tabela 2.

Tabela 2 - Adesivos estruturais, classificação química (adaptado de [6])

<b>Adesivos estruturais</b>	
<b>Epóxidos</b>	Resina epóxida + Agente de cura
	Epóxidos reforçados
	Epóxido - Fenólico
<b>Epóxidos híbridos</b>	Epóxido - Nylon
	Epóxido – Polissulfureto
	Epóxido - Vinil
<b>Resorcinol formaldeído e fenol resorcinol formaldeído</b>	
<b>Melamina formaldeído e ureia formaldeído</b>	
<b>Fenólicos</b>	
	Fenólico - Nitrilo
<b>Fenólicos modificados</b>	Fenólico - Vinil
	Fenólico - Neoprene
<b>Resinas poliaromáticas de alta temperatura</b>	Poliimida
	Bismaleimida
	Polibenzimidazol
<b>Poliésteres</b>	
<b>Poliuretanos</b>	
<b>Resinas anaeróbias</b>	
<b>Acrílicos</b>	Cianoacrílicos
	Acrílicos Modificados

### 2.1.5.2 Adesivos de epóxido

Os adesivos de epóxido são os mais conhecidos pois possuem uma enorme versatilidade. Introduzidos no mercado em 1946, estes adesivos são compatíveis com inúmeros materiais logo estão bem disseminados na indústria aeronáutica e automóvel. Podem ser disponibilizados em monocomponentes ou compostos por uma resina e um endurecedor, normalmente no formato de pasta, filmes ou em estado líquido ou sólido. Podem também ser modificados com adição de outros elementos como poliamida, polisulfido, resinas fenólicas, poliuretano ou nitrilo.

Em termos mecânicos possuem uma excelente resistência à tração e ao corte, no entanto não possuem grande resistência ao arrancamento. A nível de ação de agentes químicos tem uma boa resistência a óleos, humidade e a solventes.

No que diz respeito à cura estes são diferenciados. Os epóxidos monocomponentes curam com calor enquanto os policomponentes podem curar à temperatura ambiente ou com altas temperaturas. Uma das vantagens destes adesivos é não produzirem produtos voláteis durante esta ação [1, 19].

#### *2.1.5.3 Adesivos fenólicos*

São adesivos de baixo custo e com boa resistência a altas temperaturas e a agentes ambientais como por exemplo fungos, água e sais. Apresentam-se normalmente numa solução aquosa, alcoólica ou dissolvidos em acetona, mas também existem sob a forma de pó. A cura é feita em média a 140°C. São destinados a colar madeiras e possuem uma boa resistência mecânica assim como estabilidade dimensional. Como desvantagem possuem pouca resistência a solventes e agentes químicos e também possuem grande fragilidade.

A sua origem advém da condensação de fenol e formaldeído. Podem surgir misturados com nitrilo, formal de polivinilo e neopreno. Estes produtos possuem uma boa resistência ao arrancamento, fadiga, corte e em geral resistência mecânica. As suas propriedades de resistência a agentes químicos também ficam melhoradas como é o caso da adição de polivinilo [1, 19].

#### *2.1.5.4 Adesivos de poliimida*

Desenvolvidos pela NASA, tem como principal vantagem a alta resistência a temperatura elevadas (superior a 200°C). No entanto são de elevado custo e requerem longos ciclos de cura com temperaturas e pressões elevadas. Normalmente apresentam-se como filmes ou líquidos e tem como destino aplicações na indústria aeronáutica e aeroespacial [1, 19].

#### *2.1.5.5 Adesivos de poliuretano*

Estes tipos de adesivos apresentam-se em dois componentes, polioli (ou poliéter-polioli) e um isocianato que depois de juntos e com cura à temperatura ambiente formam um material de boa flexibilidade, com resistência ao corte e ao arrancamento. São muito versáteis pois tem uma boa resistência a temperaturas baixas e uma boa aderência a vários tipos de materiais como polímeros, folhas metálicas e elastómeros. São pouco tolerantes a humidade pois podem curar ou degradar-se. Normalmente destina-se a aplicações de baixa carga e são usados na indústria automóvel, calçado e produtos com destino à criogenia [1, 19].

### 2.1.5.6 Adesivos acrílicos

Dentro deste tipo de adesivos estão incluídos os adesivos anaeróbicos e os adesivos cianoacrilatos. Ambos são líquidos monoméricos, no entanto os adesivos anaeróbicos são possíveis de armazenar ao ar livre pois o endurecimento só acontece pela privação de oxigénio. São resistentes a solventes e apresentam uma resistência mecânica muito variável. Colam todo o tipo de materiais tais como metais, vidro, cerâmica e plásticos termoendurecíveis e normalmente são aplicados em elementos estruturais ou máquinas. Pertencem a uma gama mais económica pois a quantidade deste produto necessária a aplicar por m<sup>2</sup> é reduzida.

Os cianoacrilatos têm uma cura rápida à temperatura ambiente e esta é principalmente influenciada pela humidade relativa existente no meio circundante. Possuem uma boa resistência à tração, mas baixa resistência ao arrancamento. São frágeis e de custo moderadamente elevado. A sua aplicação restringe-se a ambientes pouco severos e quando é necessário uma ligação rápida de executar [1, 19].

## 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

Como é recorrente na história moderna do ser humano a introdução de elementos computacionais leva a uma evolução significativa do objeto de estudo. A introdução de novas técnicas e o aumento da velocidade a nível do processamento de dados resulta na resolução de problemas que antes seriam considerados muito complexos e praticamente impossíveis de resolver.

O estudo das juntas adesivas não é exceção. Com o objetivo de melhorar a eficiência das ligações e ao mesmo tempo torná-las mais leves e económicas foram criadas metodologias de análise e previsão que impulsionaram toda esta área. Estas metodologias podem ser divididas em duas vertentes, métodos analíticos onde as análises são efetuadas de forma fechada e métodos numéricos como é o caso do MEF.

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, possibilitando 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.

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [20], 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 aderentes de compósito ou de

materiais diferentes. O MEF [21] é então a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [22], 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 [23]. 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 eXtendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento contínuo.

### 2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão 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 [20], 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. [24] 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 [25]. 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 [22], 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.

### 2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a  $180^\circ$ . 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, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [1]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [26] 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 [27]. 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 [28] e por Rice [29] 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,  $G_c$  [30], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos aderentes, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na solitação.

### 2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt [31] e Dugdale [32], 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 [33].

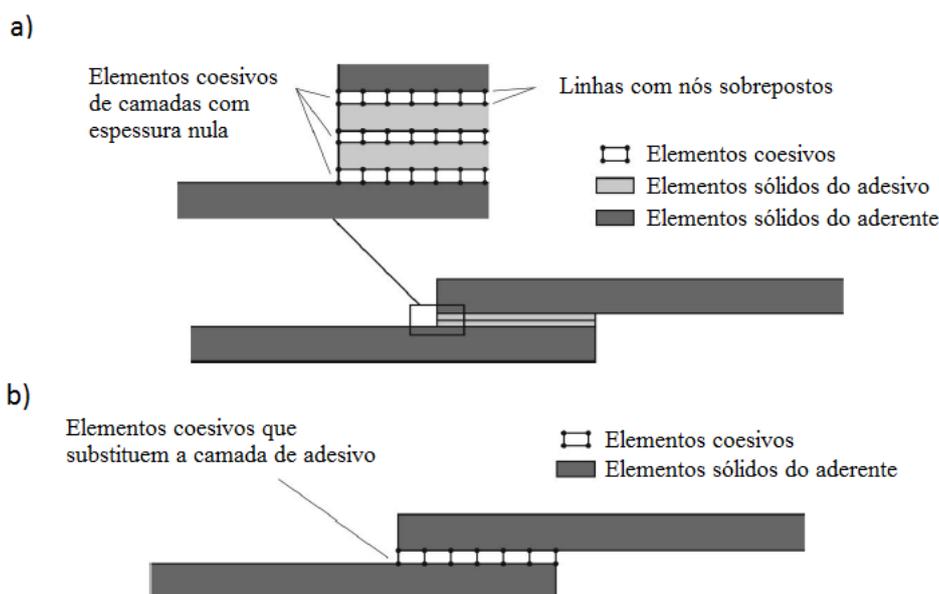


Figura 11 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [34])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [35]. 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 11), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [36], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [37].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós

emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [38]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do ABAQUS®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [39].

### 2.2.3.1 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [40], triangular [41], exponencial [42], polinomial [43] e trapezoidal [37]. 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 [44].

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 [45]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [46] 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 12).

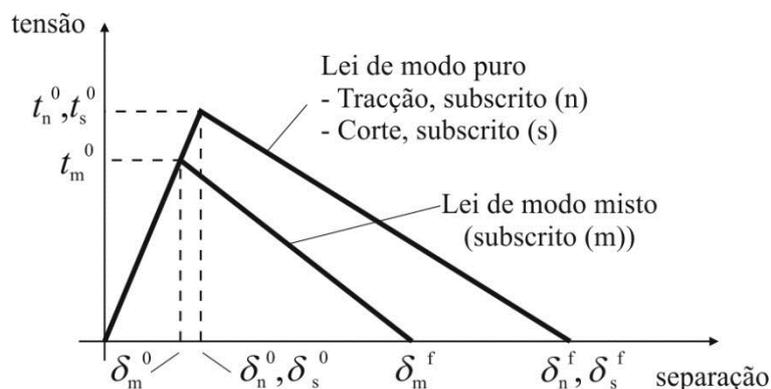


Figura 12 – Modelo coesivo triangular [46, 47]

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 [48].

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 [49] e modo II [50].

### 2.2.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

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 [51]. 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. [52], 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, sendo que estes apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. Alguns trabalhos realizados para validar ensaios em modo misto, estimando os MDC em modo puro através de ensaios DCB (*double-cantilever beam*), ENF (*end-notched flexure*) e JSS (Junta de sobreposição simples), alcançando bons resultados [37, 53].

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 a ligação adesiva [54]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos 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 [55]. 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 [56]. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [54], pela diferenciação das curvas  $G_I-\delta_n$  ou  $G_{II}-\delta_s$  (em que  $\delta_n$  é deslocamento em tração e  $\delta_s$  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  $G_{IIc}$ .

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- $J$  [57]. Rice [29], 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 [58]. O ensaio DCB é constituído por dois aderentes 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 [50]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [59], onde está enunciado o método para execução de ensaio. O esquema definido para este ensaio encontra-se representado na Figura 13. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do aderente ( $h$ ), de forma a evitar deformação plástica dos aderentes 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 aderente e  $\sigma_y$  corresponde à tensão de cedência do material do aderente.

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

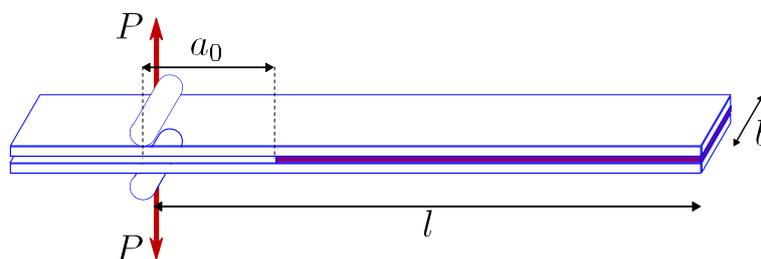


Figura 13 – Geometria do provete DCB [60]

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 14). A sollicitação 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 ( $2L$ ) [61]. 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 [62].

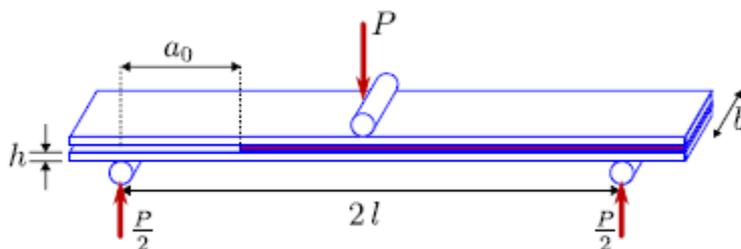


Figura 14 – Geometria do provete ENF [60]

#### 2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [63] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [64] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [33].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [65]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [66] ou do número de ciclos para análises de fadiga [67, 68]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [69].

Hua et al. [70] 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. [71] 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 ( $\nu$ ) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

### 2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  (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 [72]. Belytschko e Black [73], 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 [74]. 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 [75].

Campilho et al. [76] 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 15). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos aderentes ao invés de 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.

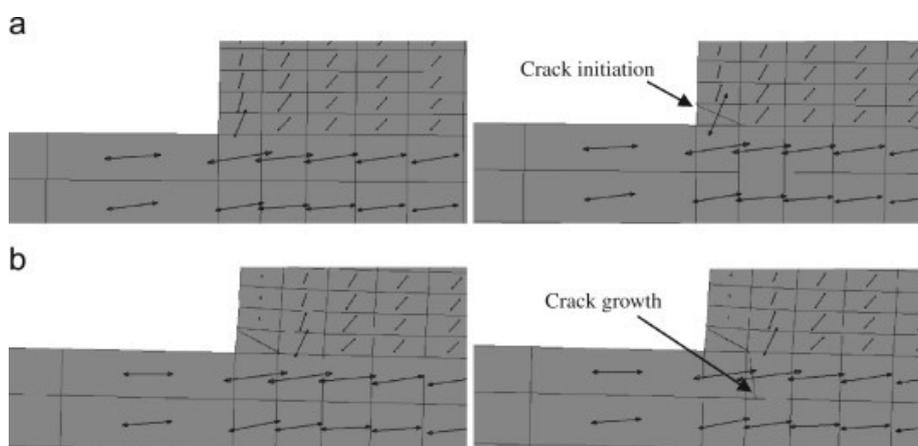


Figura 15 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [76]

### 2.3 Juntas adesivas tubulares

As JAT possuem grande versatilidade o que as sobrepõe a outro tipo de ligações como as ligações soldadas ou parafusadas. Ligações adesivas permitem a união de diferentes tipos de materiais, formatos e resistem a condições adversas proporcionadas pelo meio onde estão inseridas. São usadas em todo o tipo de indústrias como a automóvel, aeronáutica, petróleo e gás [2].

As indústrias ligadas aos transportes usam primordialmente nas estruturas dos seus veículos. Desta forma procuram novos tipos de tecnologias que permitam criar conjuntos mais leves e consequentemente mais económicos tanto a nível de construção como a níveis de consumos de energia [77].

Ao longo do tempo as juntas tubulares foram ganhando importância e assim gerando o interesse da comunidade científica. Surgiram estudos que proporcionam uma exploração no tipo de materiais usados e configurações de juntas. Sabe-se que

diferentes configurações de juntas proporcionam diferentes reações a solicitações mecânicas. Para tal, no momento de projetar a junta adesiva é necessário perceber o seu propósito e funcionamento.

### 2.3.1 Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração

As JAT proporcionam uma boa resistência à tração e compressão desde que não sejam criados esforços de arrancamento originados no desalinhamento dos aderentes, segundo o seu eixo de revolução. É por isso que é importante estabelecer e estudar parâmetros (Tabela 4) que reforcem o otimizem este tipo junta. O tipo de materiais usados (Tabela 3) e novas soluções como as juntas híbridas (Tabela 5) são aspetos estudados que revelam a importância das juntas tubulares sujeitas a esforços tração .

Tabela 3 - *Simplified analytical model for adhesive-bonded tubular joints with isotropic and composite adherends subjected to tension* [78]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Sontipee Aimmanee, Preeda Hongpimolmas, Kitchanon Ruangjirakit (2018)
<b>Título Artigo</b>	<i>Simplified analytical model for adhesive-bonded tubular joints with isotropic and composite adherends subjected to tension</i> [78]

Este artigo tem como principal objetivo desenvolver um método numérico simplificado e abrangente que represente juntas tubular adesivas sujeitas a tensão, com adesivos isotrópicos e sobe cargas axiais. Assim desta forma foram utilizadas suposições de uma junta assimétrica com aderentes e adesivos com comportamento linear elástico. É considerada uma camada fina de adesivo possibilitando considerar apenas as tensões existentes fora do plano adesivo. A avaliação foi realizada utilizando a teoria da elasticidade em conjunto com o método da fragmentação finita. São também estudadas o ângulo das fibras em caso de adesivos compostos. Obteve-se os seguintes resultados:

- Foi criado um modelo de elasticidade para prever tensões nas juntas tubulares, enquanto o método da fragmentação é destinado a avaliação as tensões nos aderentes;
- O novo modelo é genérico e por isso pode englobar aderentes de qualquer espessura e materiais isotrópicos, ortotrópicos ou compostos;
- Os resultados demonstram que as tensões máximas no adesivo são as mais baixas uma vez que a razão da rigidez dos aderentes ( $Z$ ) é igual a 0,5;
- O valor  $Z=0,5$ , pode ser considerado como critério universal para a conceção de uma JAT adesiva;
- O modelo cumpriu o objetivo pois é simples e geralista.

Tabela 4 - *Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints* [79]

<b>Autor/es (Ano)</b>	DR Barbosa, RDSG Campilho, RJB Rocha, LRF Ferreira (2018)
<b>Título Artigo</b>	<i>Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints</i> [79]

Este estudo tem como principal objetivo verificar o resultado de carga axial quando aplicada em juntas tubulares. Assim, para realizar este estudo foi aplicado um método numérico (MDC) em conjunto com resultados experimentais.

Os objetos de estudo foram dois perfis tubulares de uma liga de alumínio, com  $L_0$  diferentes (20 mm e 40 mm), unidos por três adesivos diferentes (Araldite® 2015, Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752). Foram analisadas pelo MEF as tensões de arrancamento e as tensões de corte no adesivo. A evolução do dano também é avaliada por modelos de análise possibilitando desta forma prever a resistência da junta adesiva. Foi também possível realizar uma comparação entre simulações 2D e 3D. As conclusões alcançadas foram:

- Para o  $L_0$  de 20 mm o Araldite® AV138 é o que apresenta a carga máxima mais elevada. Embora o adesivo seja de característica frágil, as tensões de pico não são demasiado elevadas o que faz com que o  $G_{IC}$  e o  $G_{IIC}$  não tenham grande influência na carga máxima. Para o  $L_0$  de 40 mm a carga máxima foi limitada a 15,4% porque devido à sua fragilidade, as tensões estavam a aumentar na fronteira do adesivo;
- Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, apresentam um aumento da carga máxima quando é aumentado  $L_0$ . O aumento foi na ordem de 43,8% e de 50,6%, respetivamente. A razão deve-se à ductilidade do adesivo que permite suportar os picos de tensão gerados. Um aumento de  $L_0$  e ajuda a acomodar uma grande amplitude de danos no adesivo;
- As juntas no qual foi usado Araldite® 2015, verificou-se uma plastificação no interior dos perfis tubulares, tanto na análise de dano como nos ensaios experimentais;
- Os dados experimentais em comparação com os resultados 3D demonstram que a representação tubular 2D, em eixo simétrico, representa o comportamento da junta e assim é possível reduzir os recursos utilizados na computação.

Nos testes experimentais foi possível concluir o seguinte:

- Para  $L_0$  mais reduzidos, adesivos rígidos mas, no entanto, frágeis suportam mais carga;
- Para  $L_0$  mais elevados, adesivos mais dúcteis apresentam melhor performance devido à sua capacidade de plastificação;

- As previsões do modelo numérico foram corretas para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 e em concordância com os dados experimentais;
- Juntas com Sikaforce® 7752 tiveram um desfazendo de 18,4% no valor de carga máxima, comparando os resultados da simulação com o ensaio realizado.

Tabela 5 - *Experimental and numerical investigations on adhesively bonded tubular connections for moulded wooden tubes* [80]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Benjamin Hahna, Tom-Egmont Werner, Peer Hallera (2019)
<b>Título Artigo</b>	<i>Experimental and numerical investigations on adhesively bonded tubular connections for moulded wooden tubes</i> [80]

Autores deste artigo exploraram novos materiais proporcionando construções mais sustentáveis. Para tal proporcionou-se a interação, por meios adesivos, entre madeira moldada e perfis metálicos. Os trabalhos experimentais foram divididos em dois tipos de provetes, perfis tubulares de madeira moldada, de paredes finas, conectados a perfis tubulares de aço por meios adesivos e juntas do tipo pino. Para o estudo são conjugados métodos experimentais com métodos numéricos, no qual se verificaram comparáveis no final do experimento. Os provetes foram expostos tanto a situações de cargas de compressão como de tração, diferenciando também a dimensão da sobreposição das juntas. Assim é possível concluir que:

- A carga suportada pelas juntas é muito próxima da carga sustentada pela secção transversal da madeira na direção das fibras;
- Os resultados obtidos apontam para aumento da resistência à tração se aumentar a espessura da madeira;
- Foi demonstrado uma forte convergência capacidade de carga final com o aumento do comprimento de sobreposição;
- A convergência pode ser reproduzida pelos estudos numéricos considerados.

### 2.3.2 Juntas tubulares sujeitas a esforços de corte

Tabela 6 - *Shear directional impact characteristics of adhesively bonded tubular joints* [81]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Yongha Kim, Youngjae Chun, Seong S. Cheon (2015)
<b>Título Artigo</b>	<i>Shear directional impact characteristics of adhesively bonded tubular joints</i> [81]

Neste artigo, os autores tiveram como objetivo estudar a ação de forças de impacto em JAT. Utilizando simulações computacionais e ensaios experimentais foi possível estudar as tensões de corte geradas por forças de impacto. Foram utilizadas velocidades de 4 m/s e 5 m/s e o impacto foi aplicado numa área compreendida entre os 0,3 mm e os 0,

5 mm, que corresponde a menos de 1/10 da largura de 5 mm das juntas adesivas. Foi possível chegar às seguintes ilações:

- Para a velocidade de 4 m/s foi obtido uma carga máxima de 33,3 kN enquanto para 5 m/s foi obtido 52,8 kN;
- A simulação revelou uma falha interfacial parcial que ocorreu na junta adesiva logo seguida de uma falha coesiva;
- Se a força de aderência fosse superior à força de falha do adesivo, primeiro teria ocorrido uma falha coesiva por vez da falha interfacial;
- As simulações computacionais estão em concordância com os ensaios realizados, tanto a nível quantitativo como a nível qualitativo.

### 2.3.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

Falhas por fadiga são usualmente resultantes de esforços cíclicos. Os adesivos são suscetíveis a estes acontecimentos, no entanto se as condições ambientais, como humidade e temperatura, não forem muito adversas estes apresentam uma boa resistência quando comparados com outro tipo de ligações. A resistência à fadiga pode ser aumentada com a alteração de alguns fatores como rugosidade e materiais dos aderentes, geometria da junta e como já referido anteriormente, as condições ambientais. Vários estudos são realizados neste âmbito como é o caso dado como exemplo na Tabela 7.

Tabela 7 - *Investigation on fatigue performance of adhesively bonded butt-joints and multiaxial life estimation using stress-based failure models [82]*

<b>Autor/es (Ano)</b>	Jun Zhang, Hai-Yu Li, Hui Li, Hong Jia (2020)
<b>Título Artigo</b>	<i>Investigation on fatigue performance of adhesively bonded butt-joints and multiaxial life estimation using stress-based failure models [82]</i>

Este trabalho testa JAT de ligação topo a topo, sujeitas a ciclos de fadiga uniaxial e multiaxial. Embora este artigo não estude em concreto este tipo de juntas, é importante observar os estudos que mais se assemelham ao pretendido. Os autores conseguiram analisar os efeitos de amplitude de tensão equivalente, tensão média equivalente e a frequência de carga nos provetes de teste. Foram utilizados métodos experimentais e métodos analíticos. Em suma conclui-se:

- A amplitude de tensão equivalente, a tensão média equivalente e a frequência de carga tiveram todas, influência na durabilidade da junta;
- A resistência à fadiga diminui com o aumento da amplitude de tensão equivalente;

- Os efeitos da frequência de carga na alteração da resistência da junta adesiva foram mínimos;
- Comparando os resultados obtidos experimentalmente com os resultados do modelo de previsão, conclui-se que o modelo numérico é fiável.

#### 2.3.4 Juntas tubulares sujeitas a outros esforços

Usualmente os estudos realizados concentram-se em testar e observar um fator ou tensão em causa de forma a esmiuçar o efeito do mesmo. Em determinado momento do avanço do conhecimento é necessário cruzar vários parâmetros de forma a aproximar o estudo ao acontecimento real. É possível observar na Tabela 8, um estudo sujeito com aplicação de tensões multi-axiais.

Tabela 8 - *Mechanical behaviour of thick structural adhesives in wind turbine blades under multi-axial loading* [83]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Dimitrios Zarouchas, Rogier Nijssen (2016)
<b>Título Artigo</b>	<i>Mechanical behaviour of thick structural adhesives in wind turbine blades under multi-axial loading</i> [83]

Neste artigo os autores realizaram um estudo como objetivo de observar o efeito e a influência da aplicação de tensões multi-axiais em juntas cilíndricas. Os aderentes são compostos por epóxico e fibra de vidro. O objetivo é transpor os resultados obtidos para a realidade das pás de turbinas eólicas visto que são severamente fustigadas por fadiga multi-axial. Foi utilizado um método experimental para apurar as propriedades elásticas do material, prosseguido por um método numérico e concluiu-se que:

- O adesivo estrutural apresentou um comportamento não linear quando sujeito a tensão de corte, compressão e torção;
- Os resultados de tensão-deformação não sofreram alterações quando imposto a diferentes cargas biaxiais, ao contrário de quando sujeito ao corte e à compressão, resultando em diferentes modos quando for imposto diferentes valores de cargas;
- Os resultados experimentais foram aplicadas com sucesso no modelo de MEF.

#### 2.4 Efeitos geométricos em juntas adesivas

Os efeitos geométricos são relevantes para o um aumento da resistência da junta adesiva. É necessário ter atenção a aplicação da junta e a que esforços estará sujeita pois o fabrico de algumas geometrias podem encarecer a junta e não significa diretamente um bom desempenho.

O artigo de Shang et al. [84], apresenta algumas técnicas de forma aumentar a resistência das juntas adesivas, como referido na Tabela 9. Na Tabela 10 são estudadas juntas de topo a topo com extremidades dos aderentes chanfradas a diferentes ângulos.

Tabela 9 - *Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends* [84]

<b>Autor/es (Ano)</b>	X. Shang, E. A. S. Marques, J. J. M. Machado, R. J. C. Carbas, D. Jiang, L. F. M. da Silva (2020)
<b>Título Artigo</b>	<i>Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends</i> [84]

O autor deste artigo fez algumas considerações de forma a fornecer orientações para conceção de juntas adesivas. As técnicas apresentadas permitem reduzir as concentrações de tensões e aumentar a resistência transversal dos aderentes. São considerados diferentes parâmetros geométricos e a disposição de materiais.

- As juntas topo a topo com aderentes em formato escada e com aderentes chanfrados, apresentam um melhor desempenho para aderentes de espessuras mais elevadas;
- Para as juntas de sobreposição simples o reforço transversal dentro da área colada é o mais efetivo para melhorar a resistência, no entanto é de difícil fabrico;
- Chanfrar o aderente em juntas de sobreposição simples mostra-se uma técnica eficaz e por vezes necessariamente associada ao fabrico dos aderentes;
- O endurecimento superficial, especialmente quando são usados polímeros resistentes, é das técnicas com maior futuro pois podem ser combinadas com técnicas de redução de concentrações de tensões;
- Matrizes de alta tenacidade, integradas com pré-impregnados, resulta em juntas adesivas de alta resistência.

Tabela 10 - *Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints* [85]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Yi-MingJen (2012)
<b>Título Artigo</b>	<i>Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints</i> [85]

O autor deste artigo teve como objetivo estudar a resistência à fadiga de juntas topo a topo diferenciando os ângulos dos aderentes. O estudo foi realizado experimentalmente e com apoio do MEF onde foi possível obter os estados de tensão no interior do adesivo e ao longo da interface do adesivo com o aderente. Os ângulos das juntas variavam nos valores de 0°, 30°, 45°, 60°. O autor chegou às seguintes conclusões:

- A resistência à fadiga aumenta consoante o aumento do ângulo da junta;
- Com o aumento do ângulo dos aderentes a rotura adesiva torna-se coesiva;

- As tensões de arrancamento são as principais forças, juntamente com os estados de tensão no interior do adesivo, que proporcionam a rotura coesiva;
- A tensão de arrancamento simulada MEF ao longo da interface diminui quando o ângulo da junta aumenta fazendo com que rotura passe de adesiva para coesiva.

#### 2.4.1 Comprimento de sobreposição e espessura dos aderentes

O valor de  $L_0$  é um aspeto relevante na resistência da junta visto que, quando maior a área de adesão, maior é a resistência à junta. A Tabela 11 e Tabela 12 apresentam exemplos de trabalhos que focam este efeito no comportamento das JAT.

Tabela 11 - *Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints* [86]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Nicolas P. Lavalette, Otto K. Bergsma, Dimitrios Zarouchas, Rinze Benedictus (2020)
<b>Título Artigo</b>	<i>Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints</i> [86]

Os autores deste artigo pretenderam verificar a influência de diferentes tipos de geometrias em JAT. Entre elas é possível destacar o aumento de  $L_0$ , a existência de chanfros interiores nos aderentes (tubos circulares), mas também realizaram testes com diferentes diâmetros e espessuras de aderentes. Para tal foram realizados ensaios experimentais com provetes de juntas tubulares (aderentes de alumínio e *carbon-fibre reinforced polymer* ou CFRP) de sobreposição simples, permitindo validar os modelos numéricos. Estes por sua vez utilizavam um modelo de zona coesiva. Os autores observaram:

- É possível verificar que com o aumento de  $L_0$  e do diâmetro interior a resistência da junta aumenta significativamente, mas apenas até um certo limite de  $L_0$ ;
- Acima de um certo valor de  $L_0$  camada adesiva entra em rotura mesmo que esta não aconteça em toda a sobreposição;
- A espessuras do aderente e os comprimentos dos chanfros dos aderentes, influência na distribuição uniforme das tensões de corte ao longo de toda a sobreposição. Este acontecimento também influencia diretamente a carga de rotura para comprimentos de sobreposição mais elevados;
- Todos os parâmetros referidos anteriormente têm uma influência significativa no peso da estrutura e devem ser considerados no momento de a projetar;
- A alteração de espessura do adesivo não influencia significativamente no peso da estrutura e não resulta em grandes alterações a nível de aumento de resistência da junta.

Tabela 12 - *Adhesively bonded steel tubes — Part I: Experimental investigations* [87]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Matthias Albiez, Till Vallée, Holger Fricke, Thomas Ummenhofer (2019)
<b>Título Artigo</b>	<i>Adhesively bonded steel tubes — Part I: Experimental investigations</i> [87]

O objetivo desta investigação passou por estudar experimentalmente o efeito de várias alterações geométricas em juntas tubulares tais como: diâmetro da secção circular (de 42 mm a 300 mm), comprimento de sobreposição, desalinhamento axial e angular. Para tal os autores usaram dois adesivos (um epóxido e um poliuretano) perfeitamente caracterizados que serviram para unir secções tubulares de aço S235 e sujeitaram esta juntas a ensaios de tração e corte. Embora este artigo seja direcionado para a área de engenharia civil, este experimento permite retirar conclusões oportunas.

- Os dois adesivos apresentaram um comportamento praticamente linear-elástico no qual o poliuretano apresentou uma resistência à tração de 50 MPa enquanto o epóxido verificou-se uma resistência de 30 MPa, para os ensaios de tração;
- Para os ensaios de corte para aderentes de elevada espessura, o poliuretano apresentou uma resistência de 26 MPa e o epóxido de 21 MPa;
- A capacidade de resistência da junta aumenta com o aumento do comprimento de sobreposição, mas não de forma linear;
- O aumento da espessura do adesivo prejudica a resistência do mesmo;
- Os resultados dos ensaios experimentais demonstram a dificuldade de prever o desempenho das juntas adesivas consoante a sua dimensão. Embora os dois adesivos tenham apresentado diferenças significativas entre si, em ambos os ensaios (tração e corte), os resultados destes são muito semelhantes em configurações com geometrias idênticas;
- A resistência à tração e ao corte não podem ser consideradas como valor fiáveis que comprovem a resistência de uma junta adesiva.

#### 2.4.2 Utilização de filetes de adesivo

Ao constituir filites de adesivo nas juntas é possível redistribuir tensões nas extremidades da sobreposição, aumentando assim a resistência da junta. Esta geometria favorece a redução de tensões de arrancamento e corte na extremidade da junta. Na Tabela 13 e na Tabela 14 é possível observar alguns estudos realizados nesse âmbito.

Tabela 13 - *Effect of spew fillet on adhesively bonded single lap joints with CFRP and aluminum-alloy immersed in distilled water* [88]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Guojun Zheng, Chao Liu, Xiao Han, Weidon Li (2020)
<b>Título Artigo</b>	<i>Effect of spew fillet on adhesively bonded single lap joints with CFRP and aluminum-alloy immersed in distilled water</i> [88]

Este trabalho incidiu no estudo da importância dos filetes de adesivos em juntas de sobreposição simples. Os autores testaram provetes, com e sem filete, no qual os aderentes eram compostos por CFRP e uma liga de alumínio. Antes do ensaio os provetes foram mergulhados em água destilada proporcionando um envelhecimento à junta. O ensaio procedeu-se através de experiências de tração axial. A leitura da distribuição da tensão na interface lateral da camada adesiva foi obtida com tecnologia correlação digital de leitura de imagens. Os autores concluíram:

- Devido ao filete de adesivo o pico de tensão mudou. A tensão de arrancamento e a tensão de corte do adesivo foi reduzida, melhorando o desempenho da junta mesmo depois do envelhecimento em água destilada;
- Ao envelhecer a junta com água destilada ambos os tipos de juntas perderam resistência;
- As juntas ao serem feitas com material heterogêneo, fez com que a tensão de arrancamento e a tensão de corte da camada adesiva sejam assimétricas nos lados dos aderentes.

Tabela 14 - *Topology optimisation of adhesive joints using non-parametric methods* [89]

<b>Autor/es (Ano)</b>	H.Ejaz, A.Mubashar, I.A.Ashcroft, EmadUddin, M.Khan (2018)
<b>Título Artigo</b>	<i>Topology optimisation of adhesive joints using non-parametric methods</i> [89]

Este estudo é focado na utilização de métodos não paramétricos para a otimização de estruturas compostas por juntas adesivas. No entanto os autores usaram juntas com filetes e é interessante ver como se comportam este tipo de juntas por métodos diferentes. Para tal usaram juntas sobreposição simples, junta sobreposição dupla e junta de topo a topo com cobre junta. No final do estudo observou-se:

- Uma redução significativa das tensões na camada adesiva após otimização das juntas pelo método aplicado;
- O filete teve um efeito relevante nas tensões das camadas adesivas, reduzindo-as em todos os tipos de juntas;
- Todos os tipos de juntas otimizaram a sua resistência com a combinação de filetes do adesivo com os chanfros dos aderentes.

### 2.4.3 Utilização de chanfros interiores

A utilização de chanfros exteriores é relevante no atenuar de tensões na camada de adesivo e é possível comprovar consultando o trabalho da Tabela 11 realizado por Lavalette et al. [86]. Na Tabela 15 é possível observar mais um estudo sobre este parâmetro geométrico.

Tabela 15 - *A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends* [90]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Min You, Zhan-Mou, Yan Xiao-Ling Zheng, Hai-Zhou Yu, Zhi Li (2008)
<b>Título Artigo</b>	<i>A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends</i> [90]

Os autores deste estudo pretenderam analisar o efeito de altura do chanfro e também do ângulo, aplicado nos aderentes interiores. Os chanfros são aplicados junto às extremidades de descarga dos adesivos. O estudo visa também entender o efeito de variação do módulo elástico de vários adesivos na distribuição das tensões na junta adesiva. Para tal foi utilizado o MEF elástico-plástico. Todos os resultados foram validados por métodos experimentais, obtendo as seguintes conclusões:

- Na parte intermedia da sobreposição, a existência de chanfro parece diminuir quase todos os picos de tensão., enquanto os chanfros que se situam próximos das extremidades têm uma importância menos relevante nas tensões;
- À medida que o ângulo do chanfro aumenta, as tensões normais e de arrancamento diminuem. Em relação às tensões de corte, tensões equivalentes de Von Mises ( $\sigma_{eqv}$ ) e tensão principal S1, estas diminuem inicialmente, aumentam depois, gradualmente;
- De todos os ângulos e alturas estudadas, a conjugação que apresentou melhor resultado foi o de  $\theta=30^\circ$  e  $h=H$ .

Para o estudo do módulo elástico e usando as condições geométricas mais benéficas para a resistência da junta, ou seja,  $\theta=30^\circ$  e  $h=H$ , verificou-se:

- O adesivo com o módulo de elasticidade mais baixo resultou numa redução de todas as tensões de pico perto das extremidades dos filetes. Os valores de pico de tensões  $\sigma_y$  também foram mais baixos na parte média da sobreposição; A tensões de corte  $\sigma_{xy}$ , primeira tensão principal S1 e  $\sigma_{eqv}$  aumentaram significativamente;
- Considerando um adesivo com um alto módulo de elasticidade, o pico de tensões diminui, transferindo-se dos filetes para o centro da sobreposição o que resulta um aumento da resistência da junta.

#### 2.4.4 Utilização de chanfros exteriores

Os chanfros exteriores proporcionam uma uniformização de distribuição das tensões entre os aderentes e assim resultando num aumento da resistência da junta. É possível observar alguns desses resultados nas Tabela 16 e Tabela 17.

Tabela 16 - *Investigation of the effect of chamfer size on the behaviour of hybrid joints made by adhesive bonding and riveting* [91]

<b>Autor/es (Ano)</b>	P.Golewski, T.Sadowski (2017)
<b>Título Artigo</b>	<i>Investigation of the effect of chamfer size on the behaviour of hybrid joints made by adhesive bonding and riveting</i> [91]

Neste trabalho os autores tinham como objetivo estudar, através de métodos numéricos, o efeito da dimensão do chanfro dos aderentes em juntas puramente adesivas e juntas híbridas. A junta híbrida para além de incluir o adesivo também é considerado uma ligação rebitada. Para o estudo consideraram juntas de sobreposição simples com dez geometrias diferente de chanfro e foi possível concluir o seguinte:

- A dimensão do chanfro não afeta consideravelmente a rigidez inicial das juntas adesivas;
- Comparado uma junta adesiva sem chanfro com uma junta adesiva com um chanfro de comprimento igual a 10 mm, esta última teve um aumento de tensão máxima na ordem dos 32,8%;
- A razão principal para o aumento de resistência por parte de juntas com chanfro deve-se ao facto de as tensões normais serem reduzidas na camada do adesivo até três vezes;
- Juntas rebitadas com chanfros não mostram melhorias no seu desempenho em relação às juntas rebitadas sem chanfro.

Tabela 17 - *Static strength improvement of tubular aluminium adhesive joints by the outer chamfering technique* [92]

<b>Autor/es (Ano)</b>	L.R.F.Ferreira, R.D.S.G.Campilho, D.R.Barbosa, R.J.B.Rocha, F.J.G.Silva (2019)
<b>Título Artigo</b>	<i>Static strength improvement of tubular aluminium adhesive joints by the outer chamfering technique</i> [92]

Os autores deste trabalho pretenderam avaliar numericamente a carga máxima de juntas tubulares, aplicando um chanfro exterior nos tubos, mais propriamente na região de sobreposição. Os aderentes considerados são uma liga de alumínio enquanto os adesivos estudados são Araldite® 2015, Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7752. Na análise foi utilizado o MEF para analisar as tensões de arrancamento e de corte na camada

adesiva. Para prever a carga máxima foram usados modelos de zona coesiva. Retiraram-se as seguintes ilações:

- Comprimentos de sobreposição curtos beneficiam adesivos rígidos mas frágeis uma vez que as tensões se distribuem de forma mais uniforme;
- Comprimentos de sobreposição longos tem melhor resultado no valor de carga máxima com adesivos menos rígidos mas mais dúcteis, pois lidam de forma mais eficiente com os picos de tensão;
- A utilização de chanfros exteriores levou a uma diminuição gradual das tensões de pico e um melhor resultado no valor de carga máxima. Esta melhoria foi limitada pela plastificação dos tubos;
- Para as juntas com chanfros a carga máxima suportada aumentou 3,6% no Araldite® AV138 e 8,6% para o Sikaforce® 7752.

#### 2.4.5 Outras alterações geométricas

##### 2.4.5.1 Retificação nos bordos de sobreposição do aderente

Na Tabela 18 é possível verificar um estudo que envolve a maquinação dos bordos dos aderentes.

Tabela 18 - *Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints* [93]

<b>Autor/es (Ano)</b>	A. M. G. Pinto, N. F. Q. R. Ribeiro, R. D. S. G. Campilho, I. R. Mendes (2014)
<b>Título Artigo</b>	<i>Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints</i> [93]

A fim de melhorar o desempenho das juntas adesivas, este trabalho fez um estudo sobre as JSS ( Figura 16) de forma a verificar se a retificação do aderente nos bordos ( $t_{s1}$ ) tem uma implicação significativa ou não. O valor de  $L_0$  também foi adaptado consoante a dimensão da retificação. As juntas foram estudadas numericamente, por MEF e modelação da zona coesiva e experimentalmente. Assim foi possível obter as seguintes conclusões:

- Os resultados do estudo numérico são coincidentes com o estudo experimental;
- Existe um aumento da tensão máxima suportada com o decréscimo de  $L_0$ , devido à fragilidade do adesivo o que o torna propício a falhar e plastifica muito pouco.;
- A configuração mais eficaz mostrou um aumento da resistência até 21,2%. Deve-se essencialmente à redução de picos de tensão emergentes no local de redução de espessura situado nas extremidades da sobreposição. As distribuições de tensões de corte permanecem praticamente inalteradas;
- O valor de  $t_{s1}$  foi relevante para o aumento da resistência da junta enquanto  $L_0$  não teve grande impacto;

- Para todos os  $L_0$ , o valor de  $t_{s1}=1$  mm obteve melhorias na resistência na ordem dos 5%, enquanto  $t_{s1}=2$  mm teve melhorias a rondar os 20%.

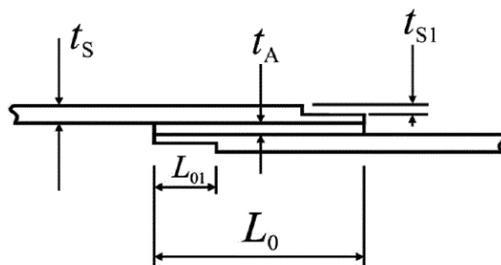


Figura 16 - Esquema da junta estudada com retificação dos aderentes no bordos da sobreposição [93]

#### 2.4.5.2 Entalhes no adesivo na zona de sobreposição

Este tipo de geometria faz diminuir as tensões de arrancamento e conforme a configuração, aumentar a área de adesão. Por vezes o maior entrave passa pela dificuldade de reproduzir este tipo de entalhes numa aplicação real. Na Tabela 19 está referido um estudo sobre este tema.

Tabela 19 - *The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints* [94]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Armin Yousefi Kanani, Xiaonan Hou, JianqiaoYe (2020)
<b>Título Artigo</b>	<i>The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints</i> [94]

O objetivo deste trabalho foi estudar o efeito de entalhes na zona de colagem assim como o efeito de adesivos mistos na resistência de uma junta adesiva. Para tal, os autores desenharam juntas de sobreposição simples sem entalhes (juntas não modificadas) e com entalhes (juntas modificadas). Todo este processo, incluído o desenho das várias juntas e a análise por métodos dos elementos finitos foi realizado no *software* ABAQUS®. Concluiu-se que:

- As juntas com entalhes no adesivo demonstram picos de tensão consideravelmente inferiores em relação às juntas sem entalhes;
- O seccionamento do adesivo na zona de sobreposição permite uma distribuição mais eficiente da tensão entre cada secção resultando em tensões de pico menores nas arestas;
- Juntas modificadas tem maior resistência e suportam uma carga máxima mais elevada;
- Juntas não modificadas rompem mais rapidamente após o início da fenda, isto porque devido à diferença na rigidez dos aderentes existe uma assimetria na distribuição de tensões;

- As juntas modificadas são mais resistentes no momento da rotura porque os entalhes limitam a progressão da fissura e a tensão é distribuída pelas outras secções;
- Os gráficos SDEG (*stiffness degradation*), demonstram que a utilização de entalhes pode não reduzir a distribuição assimétrica das tensões, no entanto esta assimetria pode-se tornar menos relevante à medida que o adesivo possui mais secções no mesmo comprimento de sobreposição.

#### 2.4.5.3 Rugosidade na superfície do aderente

Como já referido, a rugosidade do aderente é importante para proporcionar uma boa aderência. É que se pretende demonstrar no estudo da Tabela 20.

Tabela 20 - *Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness* [95]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Y. Boutar, S. Naïmi, S. Mezlini, R. J. C. Carbas, L. F. M. da Silva, M. Ben Sik Ali (2018)
<b>Título Artigo</b>	<i>Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness</i> [95]

Este trabalho teve como objetivo estudar a influência da rugosidade do aderente no comportamento de uma junta. Adesiva. Para tal foram feitos ensaios com juntas adesivas, sendo o adesivo de poliuretano e com rugosidades (Ra) variáveis entre os 0,6 µm e os 1,5 µm. Outra variável imposta e estudada foi a espessura do adesivo e esta variou entre o 0,3 mm e os 2 mm. No final foi possível retirar as seguintes ilações:

- A combinação entre rugosidade e aumento de espessura do adesivo é benéfica para o aumento da resistência à fadiga;
- Os valores que otimizam a resistência à fadiga são de Ra=0,6 µm e de espessura de adesivo de 1 mm.

#### 2.4.5.4 Espessura do adesivo

O aumento da espessura do adesivo não significa que a resistência da junta irá aumentar, no entanto aumenta diretamente o custo de material da junta. Conferir uma espessura pequena de adesivo também pode ser um processo complicado a nível de fabrico, inviabilizado a produção da junta. Por isso é importante encontrar a espessura ideal do adesivo. Na Tabela 21 e na Tabela 22 é possível verificar alguns resultados de estudos feitos neste campo.

Tabela 21 - *Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures* [96]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Wei Xu, Yueguang Wei (2013)
<b>Título Artigo</b>	<i>Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures</i> [96]

Os autores deste artigo pretendem verificar a influência da espessura do adesivo nas propriedades coesivas e na resistência global em estruturas de ligação metálica. Foi utilizado um modelo de zona coesiva de forma a simular as camadas adesivas com várias espessuras. Criaram também uma abordagem teórica que permitiu determinar os parâmetros coesivos. Os resultados obtidos foram comparados com resultados experimentais já existentes, assim foi possível concluir:

- Os resultados de parâmetros de coesão e da resistência global da junta podem ter alterações devido a fatores como tenacidade e capacidade de rigidez por deformação dos adesivos;
- Os parâmetros de coesão assim como a resistência global da junta são muito dependes da espessura do adesivo;
- A influência da variação da espessura do adesivo é mais notada em adesivo de endurecimentos fraco na gama de adesivos mais frágeis.

Tabela 22 - *The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive* [97]

<b>Autor/es (Ano)</b>	M.D. Banea, L. F. M. da Silva, R. D. S. G. Campilho (2014)
<b>Título Artigo</b>	<i>The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive</i> [97]

Este artigo pretendeu explorar o desempenho de juntas adesivas, variando espessura do adesivo aplicado. Os autores optaram por um adesivo de poliuretano pois a nível de literatura científica é o menos explorado. Para tal, foram fabricadas JSS e juntas *double-cantilever beam* (DCB) para medir a resistência à fratura. O adesivo varia de espessura entre os 0,2 mm e os 2 mm. Obtiveram-se as seguintes conclusões:

- Resistência à fratura aumentou consoante o aumento da espessura;
- A tensão de corte diminui com o aumento da espessura, mas nos adesivos mais frágeis essa tendência é menos evidente;
- O  $G_{Ic}$  aumentou linearmente até 1 mm de espessura e depois dessa faixa o aumento rondou os 20%;
- A espessura de 2 mm pode não ser a espessura ideal para obter  $G_{Ic}$  e, no entanto, também é difícil de fabricar;
- A carga de falha diminui consoante o aumento de espessura do adesivo e com adesivo mais frágeis a tendência é menos pronunciada;

- Nas JSS, a resistência da camada de adesivo diminui ligeiramente até à espessura de 1 mm ao contrário da espessura de 2 mm que chega aos 31%;
- Nas juntas DCB, a falha foi coesiva no meio da camada adesiva enquanto nas JSS ocorre no meio da camada adesiva quando a cada tem menos espessura, quando a espessura aumenta a rotura ocorre próxima da interface.

#### 2.4.6 Condições ambientais

Também já referido, as condições ambientais têm grande influência na resistência da junta. Elevados valores de radiação, temperatura ou humidade levam à degradação da junta adesiva. Na Tabela 23 é possível observar o efeito destes fatores.

Tabela 23 - *The Effect of a Hot–Wet Environment on Adhesively Bonded Joints Under a Sustained Load* [98]

<b>Autor/es (Ano)</b>	Han X., Crocombe A. D., Anwar, S. N. R., Hu P., Li W. D. (2014)
<b>Título Artigo</b>	<i>The Effect of a Hot–Wet Environment on Adhesively Bonded Joints Under a Sustained Load</i> [98]

Este artigo teve como objetivo desenvolver várias técnicas de modelação numérica que permitam simular os efeitos da humidade, temperatura elevada e carga aplicada em juntas aderentes. Os modelos foram criados a par de resultados obtidos experimentalmente no qual suportaram as conclusões obtidas nos ensaios numéricos. A execução foi realizada em ABAQUS® e chegou a resultados satisfatórios, sendo assim possível desenvolver modelos numéricos que permitam envelhecer a junta por humidade.

**DESENVOLVIMENTO**



### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Validação da técnica numérica com dados experimentais

Este capítulo pretende apresentar o estudo experimental e numérico realizado na tese de Ferreira [3], a fim de corroborar o estudo numérico posteriormente executado no capítulo 3.2, e parte integrante desta dissertação. Inicialmente são apresentados os materiais considerados assim como as técnicas utilizadas.

##### 3.1.1 Descrição da geometria e materiais

O provete é composto por dois tubos de diâmetros diferentes em que o de maior diâmetro se sobrepõe ao de menor diâmetro. A união é proporcionada por adesivos previamente designados (Figura 17). A fim de realizar os ensaios pretendidos, foram considerados provetes com aderentes de secção circular oca com as dimensões apresentadas na Tabela 24. O parâmetro estudado foi  $L_0$ , considerando-se os valores de 20 e 40 mm.

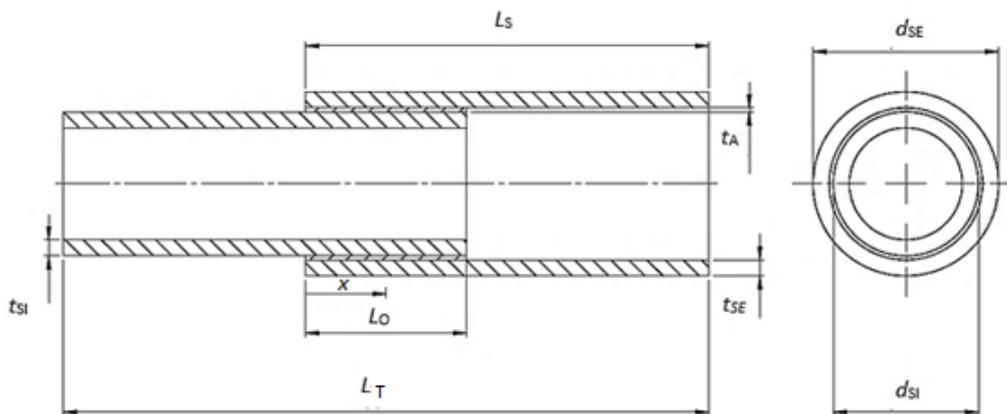


Figura 17 – Configuração da geometria do provete [3]

O estudo é composto por um conjunto de dez provetes para cada tipo de adesivo. Cada conjunto é dividido em dois tipos de com cinco provetes cada. A diferença nestes conjuntos reside no valor de  $L_0$ , que é 20 mm ou 40 mm. Dentro destes conjuntos, as únicas variáveis existentes são  $L_0$  e o comprimento total ( $L_T$ ), que varia consoante  $L_0$  [16].

Tabela 24 - Designação das cotas dos provetes e respectivos valores (em mm) [3]

Designação	Cota [mm]	
Comprimento de sobreposição, $L_0$	20	40
Comprimento dos aderentes, $L_S$	50	60
Comprimento total da JAT, $L_T$	80	80
Diâmetro externo do aderente interior, $d_{SI}$	20,0	20,0
Diâmetro externo do aderente exterior, $d_{SE}$	24,4	24,4
Espessura do aderente interior, $t_{SI}$	2	2
Espessura do aderente exterior, $t_{SE}$	2	2
Espessura do adesivo, $t_A$	0,2	0,2

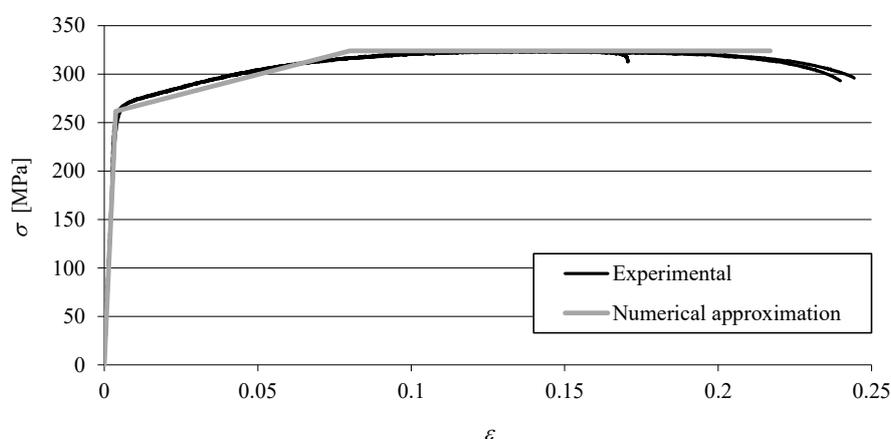
### 3.1.1.1 Aderentes

A liga considerada é a AW6082-T651, uma liga de alumínio que possui boas propriedades mecânicas (Tabela 25) e é amplamente usada em estruturas de forma extrudida ou laminada.

Tabela 25 - Características mecânicas da liga de alumínio AW6082-T651 (adaptado de [3, 99]).

Parâmetro	Valor
Módulo de Young, $E$ [GPa]	70,07±0,83
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	261,67±7,65
Resistência à tração [MPa]	324,00±0,16
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	21,70±4,24%

Para a liga apresentada é possível ver na Figura 18 as curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) dos aderentes de alumínio, que foram obtidas experimentalmente de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [99]. Está representada também a aproximação numérica usada nos modelos MDC.

Figura 18 - Curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) da liga de alumínio AW6082-T651 [100]

### 3.1.1.2 Adesivos

#### 3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 é um adesivo epóxico, bi-componente, apresentando na sua constituição o endurecedor HV 998. É indicado para união de materiais diferentes, apresentando-se na Tabela 26 as suas principais características.

Tabela 26 - Características da adesivo Araldite® AV138 (adaptado de [3])

<b>Características</b>
- Adesivo frágil
- Excelente resistência química e mecânica
- Aplicação manual

Na Figura 19 são apresentadas as curvas  $\sigma$ - $\epsilon$ , resultado de provetes maciços ensaiados à tração. As propriedades mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 27.

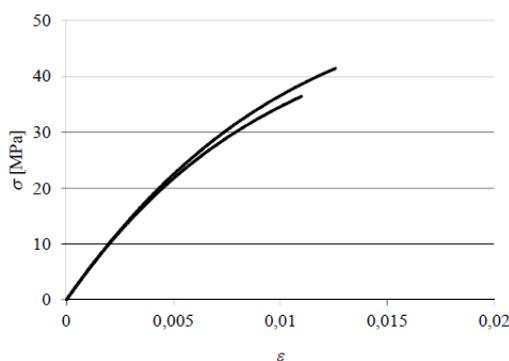


Figura 19 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  do adesivo Araldite® AV138 [3]

Tabela 27 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [3]

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

<sup>a</sup> valores estimados na referência

<sup>b</sup> valor do fabricante

### 3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 é um adesivo epóxico bi- componente. Na Tabela 28 é possível ver as suas principais características.

Tabela 28 - Características do adesivo Araldite® 2015 (adaptado de [3])

Características
- Adesivo dúctil
- Resistência à tração e ao corte inferiores ao Araldite® AV138
- Aplicação com pistola

As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 20. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo encontram-se na Tabela 29.

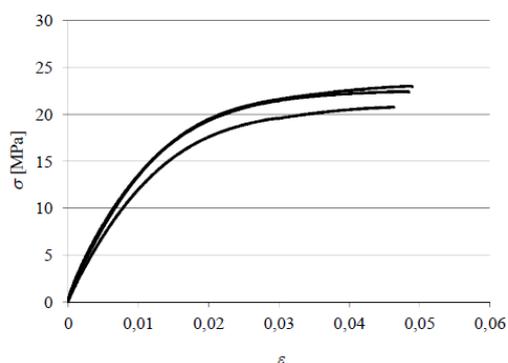


Figura 20 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  do adesivo Araldite® 2015 [3]

Tabela 29 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [3]

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

<sup>a</sup> valor do fabricante

### 3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O Sikaforce® 7752 é um adesivo poliuretano bi-componente de baixa resistência ao corte e à tração.

Tabela 30 - Características da adesivo Sikaforce® 7752 (adaptado de [3])

Características
- Adesivo dúctil
- Resistência à tração e ao corte inferiores ao Araldite® 2015
- Aplicação com pistola

Na Figura 21 estão representadas as curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  do adesivo e na Tabela 31 as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes do adesivo.

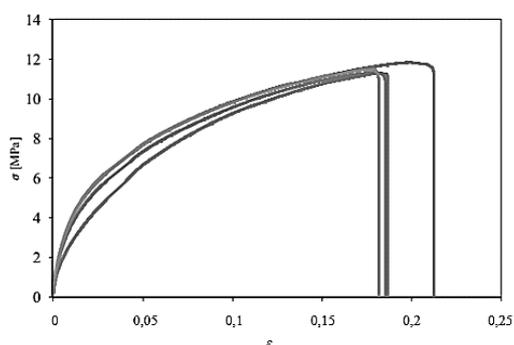


Figura 21 – Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  do adesivo SikaForce® 7752 [3]

Tabela 31 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [3]

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, $E$ [MPa]	493,81 ± 89,6
Coefficiente de Poisson, $\nu^a$	0,33
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	3,24 ± 0,5
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	11,49 ± 0,3
Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%]	19,18 ± 1,4
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	187,75 ± 16,4
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	5,16 ± 1,1
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	10,17 ± 0,6
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	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

<sup>a</sup> valor do fabricante

### 3.1.2 Resultados experimentais obtidos

Após os ensaios, inicialmente são apresentadas as curvas  $P-\delta$ . Estão também considerados valores de  $P_{\text{máx}}$  e de  $P_{\text{máx}} \text{ Méd}$  por cada provete e por cada  $L_0$  diferente. Estes valores são fundamentais para validar os valores obtidos pelas soluções numéricas que serão desenvolvidas posteriormente. Provetes considerados inválidos não são apresentados nos resultados.

#### 3.1.2.1 Araldite® AV138

Os gráficos apresentados na Figura 22 resultam da relação da força e do deslocamento (curvas  $P-\delta$ ). Na Tabela 32 é possível visualizar os valores de  $P_{\text{máx}}$  obtidos. Todos os resultados são apresentados de  $L_0$ .

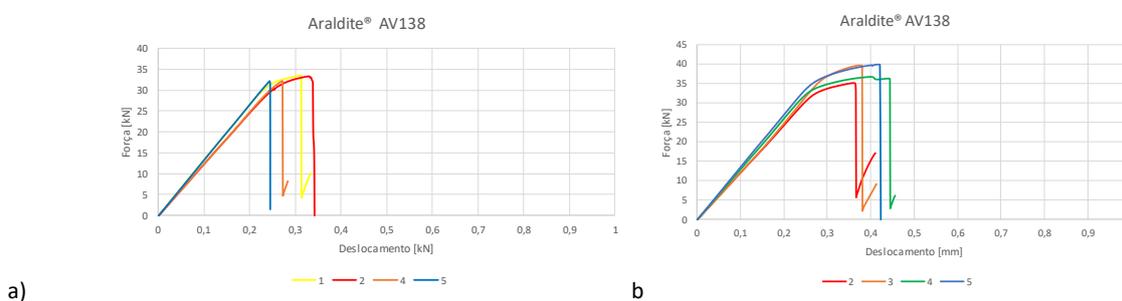


Figura 22 – Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a)  $L_0=20$  mm; b)  $L_0=40$  mm [3]

É possível verificar nos provetes com  $L_0=20$  mm (Figura 22, a)) a plastificação do aderente na amostra 1 e 2, muito provavelmente devido a um excesso de adesivo que se infiltrou no interior do tubo, dado origem a uma área maior de contacto. As restantes amostras têm um comportamento esperado e linear até à rotura.

Para os provetes com  $L_0=40$  mm (Figura 22 b)) verifica-se a plastificação de todas as amostras. As curvas resultantes são coerentes entre si. Foram detetadas pequenas oscilações na rigidez elástica, derivadas da flexibilidade da máquina de ensaios. Na Tabela 32 é possível verificar os valores de  $P_{\text{máx}}$  e de  $P_{\text{máx}} \text{ Méd}$  dos provetes considerados.

Tabela 32 – Valores de  $P_{\text{máx}}$  [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® AV138 [3]

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

### 3.1.2.2 Araldite® 2015

A Figura 23 mostra as curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015. Na Tabela 33 é possível verificar os valores máximos de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos em função de  $L_0$ . As curvas resultantes são coerentes com os resultados esperados e apenas se verificam pequenas oscilações na rigidez elástica, tal como acontecia nos ensaios com o Araldite® AV138.

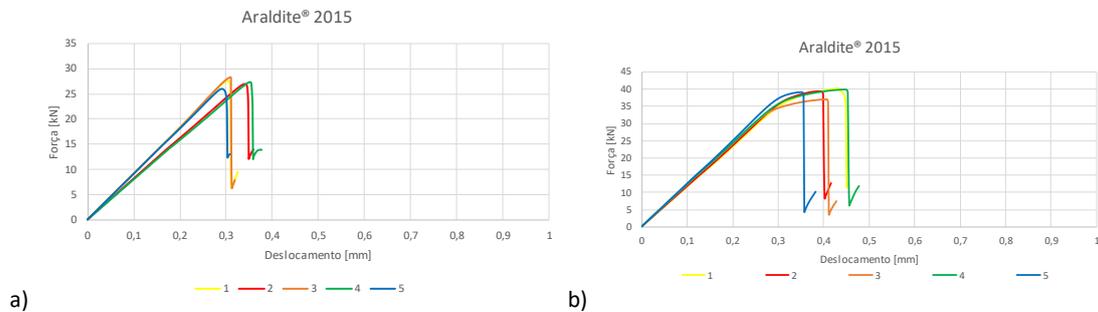


Figura 23 – Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a)  $L_0=20$  mm; b)  $L_0=40$  mm [3]

Tabela 33 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] obtidos experimentalmente para o Araldite® 2015 [3]

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

### 3.1.2.3 SikaForce® 7752

Tal como para o adesivo anterior, são apresentadas as curvas  $P-\delta$  (Figura 24). Na Tabela 34 estão presentes os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 em função de  $L_0$ .

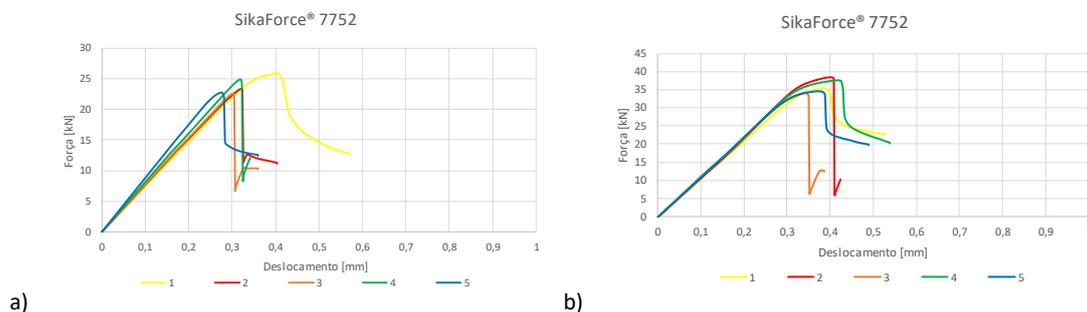


Figura 24 – Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a)  $L_0=20$  mm; b)  $L_0=40$  mm [3]

É possível verificar nos resultados dos provetes com  $L_0=20$  mm (Figura 24, a)) um comportamento consistente em todas as curvas exceto no provete 1. Esta alteração pode

justificar-se com uma deposição incorreta de adesivo na junta, resultando no excesso do mesmo.

Nos provetes com  $L_0=40$  mm (Figura 24, b)) também é verificável a coerência entre curvas com exceção da amostra 3. O motivo pode dever-se a um defeito na junta adesiva. A existência de oscilações na rigidez elástica continua presente pela mesma razão dos adesivos apresentados anteriormente. Na Tabela 34 apresenta-se a comparação entre valores obtidos para diferentes  $L_0$  do adesivo SikaForce®.

Tabela 34 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] obtidos experimentalmente para o SikaForce® 7752 [3]

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

### 3.1.3 Comparação de resultados

Neste tópicó é apresentado um resumo dos resultados obtidos (Tabela 35), juntamente com uma comparação dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  na Figura 25. Para finalizar é apresentado um quadro resumo com as principais ilações retiradas dos ensaios realizados (Tabela 36).

Tabela 35 –  $P_{m\acute{a}x}$  Méd (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 JAT [3]

Adesivo	$L_0=20$ mm	$L_0=40$ 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

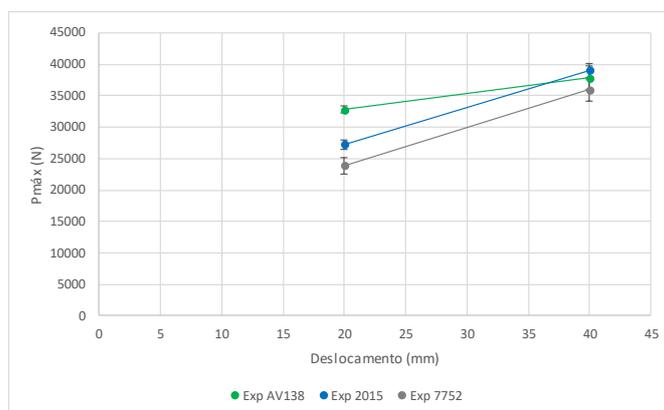


Figura 25 – Variação de  $P_{m\acute{a}x}$  com  $L_0$  para as juntas adesivas com os três adesivos [3]

Tabela 36 – Conclusões dos ensaios realizados

### Conclusões

- a) O Araldite® AV138 é o que apresenta mais resistência para  $L_0=20$  mm (32797,5 N);  
 b) O Araldite® 2015 é o que apresenta mais resistência para  $L_0=40$  mm (39066,8 N);  
 c) O SikaForce® 7752 é o que teve maior aumento percentual na resistência entre  $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm;  
 d) O SikaForce® 7752 é o que apresenta menos resistência;  
 e) Os valores obtidos estão em concordância com a ductilidade dos adesivos, sendo o SikaForce® 7752 mais dúctil e o Araldite® AV138 o menos dúctil.

#### 3.1.4 MDC triangular

Nesta fase pretende-se selecionar e adaptar modelo numérico de forma a que seja possível descrever o comportamento elasto-plástico do adesivo. Para aplicação do MDC (subcapítulo 2.2.3) foi selecionado o modelo triangular, já descrito no subcapítulo 2.2.3.1. Para efetivar a utilização deste modelo será necessário realizar a formulação do modelo e determinar as propriedades coesivas de cada adesivo, tal como é descrito no subcapítulo 2.2.3.2.

##### 3.1.4.1 Determinação de propriedades coesivas

Para a determinação dos parâmetros de cada adesivo, Ferreira [3] sugere alguns estudos já realizados e adaptados a cada adesivo. É importante referir que os métodos para a obtenção destes valores traduzem o comportamento dos adesivos nas condições em que vão ser utilizados. A Tabela 37, Tabela 38 e Tabela 39 apresentam as propriedades coesivas para os diferentes adesivos.

Tabela 37 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® AV138 [3]

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

Tabela 38 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo Araldite® 2015 [3]

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

Tabela 39 – Parâmetros coesivos em tração e corte para o adesivo SikaForce® 7752 [3]

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

### 3.1.5 Condições de análise numérica

Para a análise numérica foi usado o *software* ABAQUS® versão 6.13 (*Dassault Systèmes*). Esta análise é baseada no MEF e permite o uso do módulo integrado de MDC. A análise de MEF é caracterizada pelo uso de elementos axissiméticos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) para a modelação do adesivo (COHAX4R do ABAQUS®). O ABAQUS possui o modelo de dano triangular que se caracteriza pelo facto de requerer poucos parâmetros de simulação e descrever adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivo.

De forma genérica, para o ensaio foram criados os elementos necessários ao ensaio, nomeadamente uma *part* desenhada (Figura 26) com os diferentes valores de  $L_0$ . Após esta constituição é necessário definir as propriedades do material (aderentes e adesivo) e constituir um *assembly*. De seguida é necessário definir as condições fronteira, fixando uma extremidade da junta com um encastramento e na extremidade oposta impor uma carga e assim cada aderente ficará com uma condição distinta. Antes de realizar o ensaio, é necessário definir a *mesh* do conjunto, ou seja, a malha que irá decompor o provete em elementos. Assim já é possível executar os ensaios e obter dados visuais como dados numéricos.



Figura 26 – JAT modelada no ABAQUS®[3]

### 3.1.6 Análise de tensões nas juntas

Neste ponto é possível analisar os resultados obtidos nos ensaios realizados e desta forma comparar tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e de corte ( $\tau_{xy}$ ) das várias configurações de junta. A medição foi efetuada a meio da espessura do adesivo. Todas as tensões serão normalizadas por  $\tau_{avg}$ , que representa a média de valores de  $\tau_{xy}$  na ligação adesiva para cada valor de  $L_0$ .

#### 3.1.6.1 Tensões de arrancamento

A Tabela 40 apresenta um resumo do efeito das tensões de arrancamento em juntas adesivas.

Na Figura 27 e na Tabela 41 são apresentados os resultados dos ensaios realizados. As conclusões são apresentadas na Tabela 42.

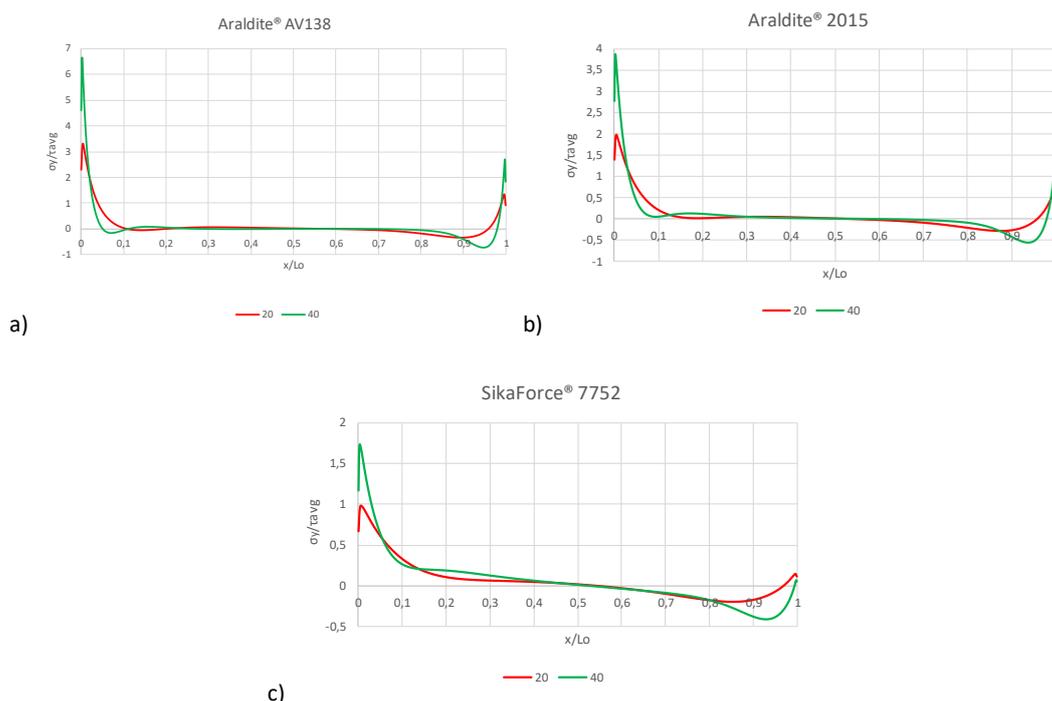


Figura 27 – Distribuição das tensões  $\sigma_y$  nas JAT: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752 [3]

Tabela 40 - Tabela resumo do efeito das tensões de arrancamento em juntas adesivas (adaptado de [3])

- a) Tensões  $\sigma_y$  são de magnitude inferior às tensões  $\tau_x$ , exceto na extremidade do adesivo;
- b) Na região interior do adesivo geram-se tensões de compressão e nas extremidades tensões de tração;
- c) As tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_x$  referidas no ponto b) devem-se à curvatura formada na junta proporcionada pela deformação dos aderentes;
- d) Tensões  $\sigma_y$  diminuem a resistência da junta levando à rotura prematura;
- e) Tensões  $\sigma_y$  são nulas na região central com gradientes crescente ao longo da sobreposição e com o crescimento de  $L_0$ ;
- f) Para valores de  $L_0$  mais elevados, os picos compressivos nas singularidades são mais relevantes e aumentam de intensidade com o aumento de  $L_0$ ;
- g) Por vezes o valor de  $P_{\text{máx}}$  é obtido após iniciação da fenda.

Tabela 41 – Valores máximos de  $\sigma_y/\tau_{avg}$  para os três adesivos, para  $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm [3]

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

Tabela 42 - Análise de resultados obtidos referentes a tensões de arrancamento em juntas adesivas (adaptado [3])

- O Araldite® AV138 é o adesivo que obteve gradientes mais elevados na proximidade de  $x/L_0=0$  e  $x/L_0=1$  ou seja, nas extremidades do adesivo;
- O Araldite® AV138 é o adesivo mais rígido e que apresenta picos maiores de tensão;
- O SikaForce® 7752 é o adesivo menos rígido e que apresenta as distribuições de tensões mais uniformes.

### 3.1.6.2 Tensões de corte

A Figura 28 representa a distribuição das tensões  $\sigma_y$  nas JAT, acompanhado pela Tabela 43 onde é feito o resumo do efeito das tensões de corte. Na Tabela 44 são apresentadas as tensões máximas. As ilações retiradas são apresentadas na Tabela 45.

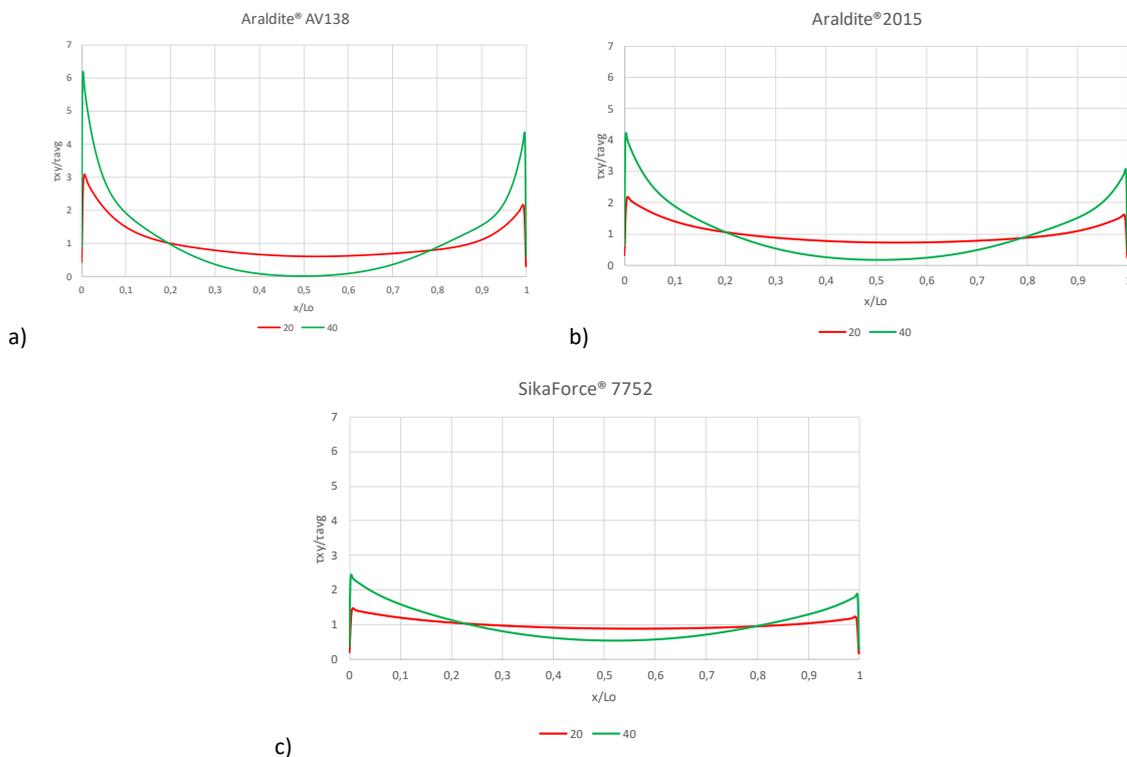
Figura 28 – Distribuição das tensões  $\tau_{xy}$  nas JAT: a) Araldite® AV138; b) Araldite® 2015; c) SikaForce® 7752 [3]

Tabela 43 - Tabela resumo do efeito das tensões de corte em juntas adesivas (adaptado de [3])

- a) As tensões  $\sigma_y$  são nulas na região central com gradiente crescente ao longo da sobreposição e com o crescimento de  $L_0$ ;
- b) Os adesivos dúcteis permitem uma melhor redistribuição das tensões, o que permite aumentar a resistência da junta.

Tabela 44 – Valores máximos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  para os três adesivos, para  $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm [3]

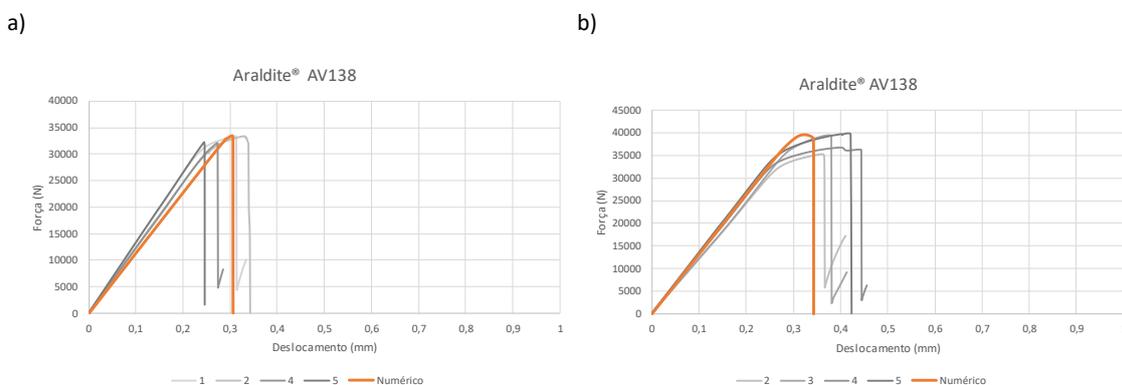
Adesivo	$L_0$ [mm]	
	20	40
Araldite® AV138	3,08	6,19
Araldite® 2015	2,19	4,24
SikaForce® 7752	1,46	2,43

Tabela 45 - Análise de resultados obtidos referentes a tensões de corte em juntas adesivas (adaptado de [3])

- a) O Araldite® AV138 é o adesivo que obteve  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  com o valor mais alto;
- b) O Araldite® AV138 é o adesivo mais frágil e que apresenta picos de maior concentração de tensão nas extremidades;
- c) O SikaForce® 7752 é o adesivo menos resistente e com os valores de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  mais baixos e um  $E$  inferior os restantes adesivos.

### 3.1.7 Previsão da resistência por MDC

Por fim, é necessário fazer o cruzamento dos dados obtidos experimentalmente com as previsões de  $P_{m\acute{a}x}$  pelos MDC. Desta forma será possível validar as propriedades coesivas assim como os resultados obtidos pelas análises numéricas. Após esta verificação será possível avançar para o estudo numérico da presente dissertação. Na Figura 29, Figura 30 e Figura 31 é possível ver as curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas pelo MDC, para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente.

Figura 29 – 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 [3]

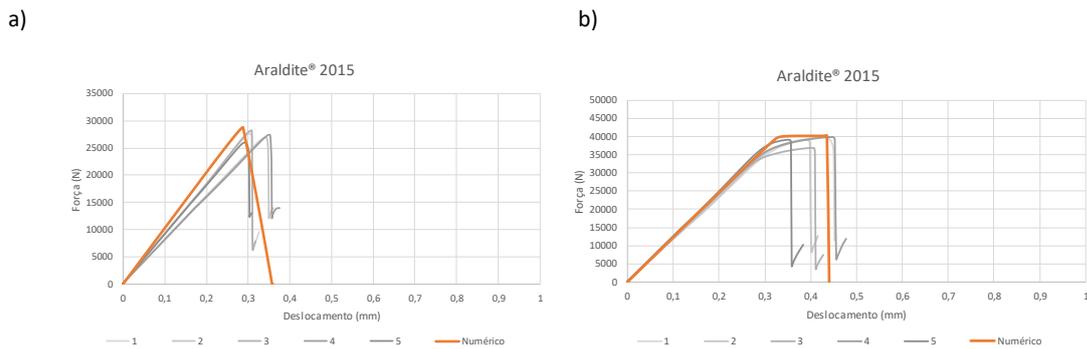


Figura 30 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com a)  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm [3]

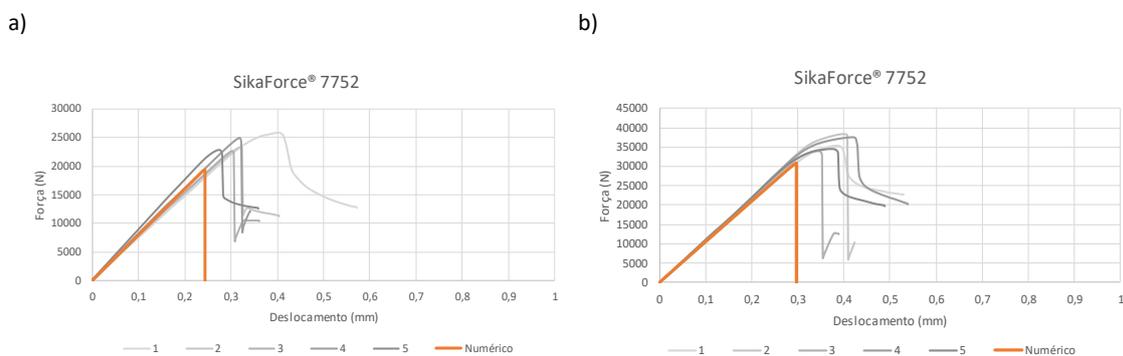


Figura 31 – Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com a)  $L_0=20$  mm e b)  $L_0=40$  mm [3]

No cruzamento de dados a aproximação foi considerada satisfatória para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 29 e Figura 30, respetivamente) No caso do SikaForce® 7752 (Figura 31), os modelos números ficaram aquém de uma relação aceitável, possivelmente por ser um adesivo muito dúctil. Porém, existe uma boa correlação das curvas obtidas experimentalmente para este adesivo. É possível verificar os valores de  $P_{\text{máx}}$  na Tabela 46.

Tabela 46 – Valores de  $P_{\text{máx}}$  [N] obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função de  $L_0$  [3]

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

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

Pretende-se com este capítulo validar os resultados numéricos de  $P_{\text{máx}}$  obtidos pela lei coesiva triangular, comparando-os com os resultados experimentais obtidos no ponto

3.1.3. A Figura 32 apresenta o cruzamento dos valores experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  e as previsões numéricas, considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

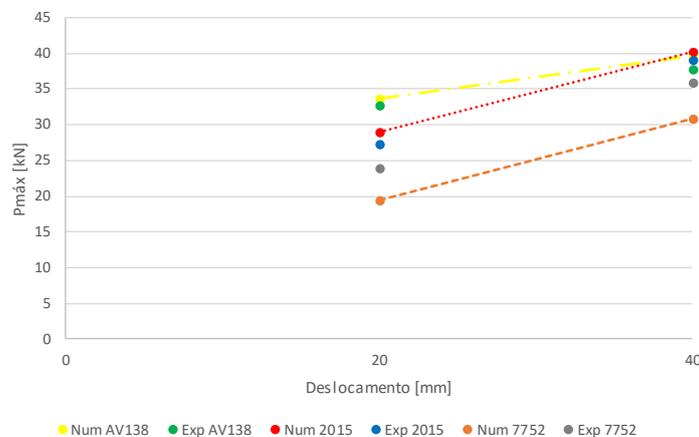


Figura 32 –  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as JAT [3]

A Tabela 47 compara os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos experimentalmente e numericamente para os três adesivos, em função de  $L_0$  [3].

Tabela 47 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  [N] experimentais e numéricos, para os três adesivos em função de  $L_0$ , e respectiva diferença relativa [3]

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

Em geral, os valores apresentados são satisfatórios e podem ser considerados adequados ao proposto. Logo pode-se considerar que valores obtidos como princípio de comparação para os estudos que se seguem.

A nível particular, os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 tem uma variação de resultados entre os 2,4% e os 6,1% tanto para  $L_0=20$  mm como para  $L_0=40$  mm.

Fora deste intervalo encontra-se adesivo SikaForce® 7752, visto que os resultados obtidos variam entre 14,3% e 18,4%. Esta discrepância pode dever-se à utilização de leis coesivas triangulares, que geram valores de gerarem valores de  $P_{m\acute{a}x}$  longe do espectável pois a depreciação da tensão é imediata após a atingida a resistência coesiva. Mesmo assim, existem alguns estudos que mostram que leis coesivas pouco adequadas ainda permitem obter uma aproximação grosseira do seu comportamento desde que os valores da resistência coesiva ( $t_n^0$  e  $t_s^0$ ) e de tenacidade à fratura ( $G_{IC}$  e  $G_{IC}$ ) tenham sido bem estimados.

## 3.2 Estudo numérico

### 3.2.1 Geometria da junta

Os provetes das juntas estudadas são de forma cilíndrica e apenas terão duas variáveis geométricas. A este nível serão avaliados dois comprimentos de sobreposição ( $L_0$ ) distintos e diferentes  $\theta$ . O filete é posicionado no final de cada aderente, considerado a espessura do mesmo. As restantes condições geométricas serão constantes ao longo de todo o processo.

Detalhando, os provetes serão divididos em dois grupos, sendo que um destes grupos possui um  $L_0$  igual a 20 mm (Figura 33) e ou outro um  $L_0$  igual a 40 mm (Figura 34). Todas restantes características estão resumidas na Tabela 24, anteriormente apresentada.

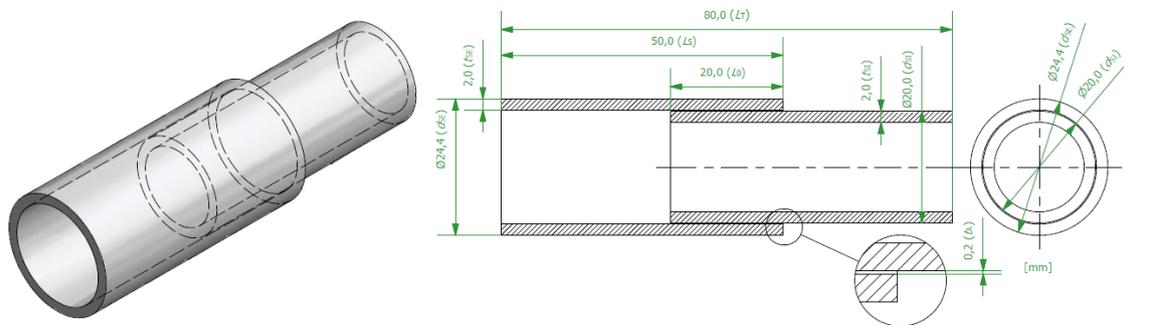


Figura 33 - Geometria de JAT com  $L_0=20$  mm

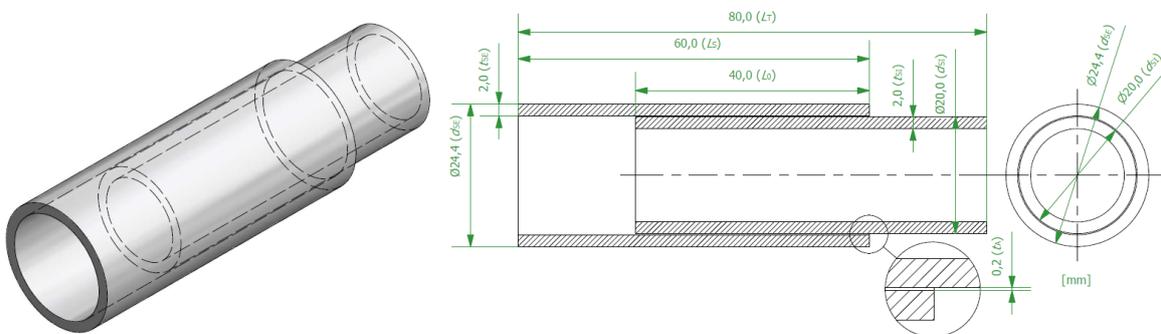


Figura 34 - Geometria de JAT com  $L_0=40$  mm

Em relação aos filetes do adesivo serão estudadas sete alterações de  $\theta$ . Com esta alteração o comprimento do filete é variável, mantendo a altura do mesmo. É importante referir que, com a redução do valor do ângulo imposto e o aumento de  $L_0$ , a área de adesão aumenta. Toda a gama de filetes analisada será aplicada em cada variação de  $L_0$ . Os filetes propostos assim como o seu formato são apresentados na Tabela 48.

Tabela 48 - Vários tipos de filetes de adesivos aplicados e suas características

Ângulo ( $\theta$ )	$C_f$ [mm]	Figura
7,5°	15,2	
15°	7,5	
30°	3,5	
45°	2	
60°	1,2	
75°	0,5	
90°	0	

A espessura de adesivo ( $t_A$ ) permanecerá inalterada mesmo sobre o filete de adesivo. A altura do filete é imutável e sempre igual à espessura do aderente exterior. O ângulo que a face externa do adesivo faz com o aderente interior é variável e desta forma o comprimento de base do filete ( $C_f$ ) diminui com o aumento do  $\theta$ . Como referência é considerado um JAT com ângulo de  $90^\circ$ , ou seja, não possui qualquer tipo de filete.

### 3.2.2 Materiais considerados

Como já referido anteriormente, esta dissertação tomará por base a dissertação de Ferreira [3]. Assim serão considerados os mesmos materiais e as mesmas propriedades. No ponto 3.1.1.1 é possível consultar as propriedades para a liga de alumínio enquanto no ponto 3.1.1.2 é possível observar os valores atribuídos para o Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

### 3.2.3 Criação do modelo numérico 2D

Para a criação e estudo das juntas adesivas foi utilizado o *software* ABAQUS®, versão de 2017. Este *software* é baseado no MEF e possui um módulo integrado de MDC. Desta forma é possível obter o dano e a previsão da resistência dos objetos de estudo.

O processo preparação dos modelos inclui diversas etapas, deste a criação do modelo 2D, passando pela definição dos materiais até à simulação propriamente dita. Como foi referido anteriormente, serão criados dois modelos no qual o comprimento de sobreposição difere. Posteriormente serão criados os filetes de adesivos com os vários ângulos já referidos. A utilização de três adesivos diferentes resulta na criação de um total de 42 modelos. É também importante referir que, para retirar os dados  $P-\delta$  e as distribuições de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , é necessário fazer alterações às propriedades dos adesivos perfazendo mais 42 novos modelos.

O *software* ABAQUS® possui um sistema de organização tipo árvore (Figura 35) que permite ir criando o modelo ao longo de várias etapas.

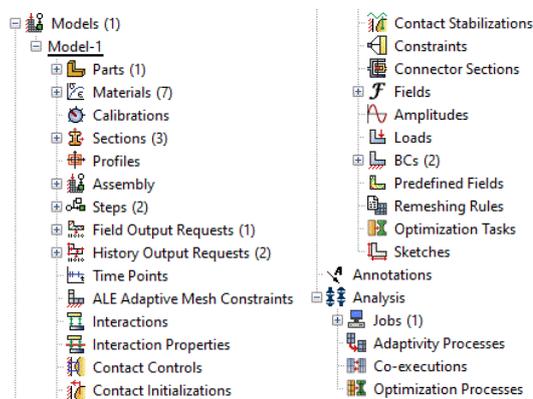


Figura 35 - Árvore do *software* ABAQUS®

### 3.2.3.1 Etapa "Part"

A primeira etapa passa pela criação das linhas gerais do modelo em 2D (Figura 36) de forma que a representação se aproxime da realidade. Nesta fase são definidas as dimensões gerais, tais como foram referidas na Tabela 48, assim como na Figura 33 e na Figura 34.

Após a constituição do esboço 2D é necessário definir as zonas que vão possuir diferentes materiais, nomeadamente o adesivo. Para tal é usada a ferramenta "Partition face" que permite criar partições do modelo e posteriormente definir zonas de materiais (Figura 37).

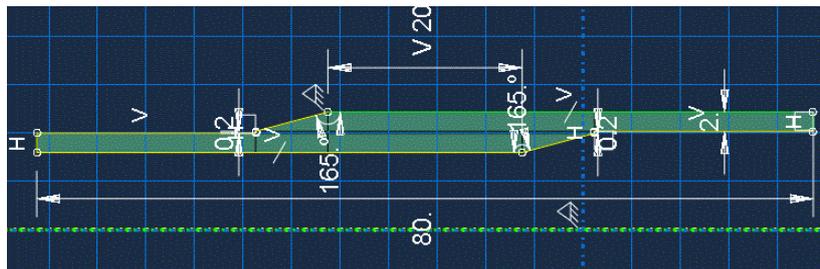


Figura 36 - Representação do software ABAQUS® da geometria da junta na etapa "Part"

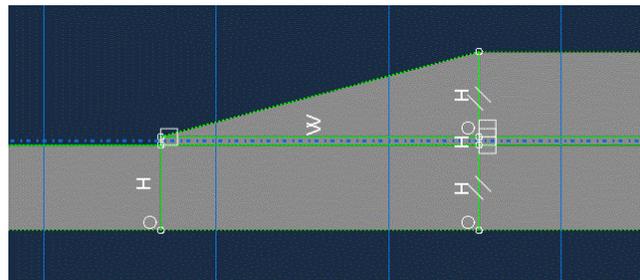


Figura 37 - Representação do software ABAQUS® da geometria da junta na etapa "Partition face"

### 3.2.3.2 Etapa "Property"

Nesta etapa são definidas as propriedades mecânicas de cada material, que deve ser e atribuído a cada partição. É necessário utilizar o comando "Create Material" e definir as propriedades do adesivo da zona de sobreposição, do adesivo do filete e dos aderentes.

#### 3.2.3.2.1 Definição de propriedades dos aderentes

O material dos aderentes, alumínio, é definido como isotrópico. Para além disso, é necessário definir as componentes elástica e plástica como se apresenta na Figura 38.

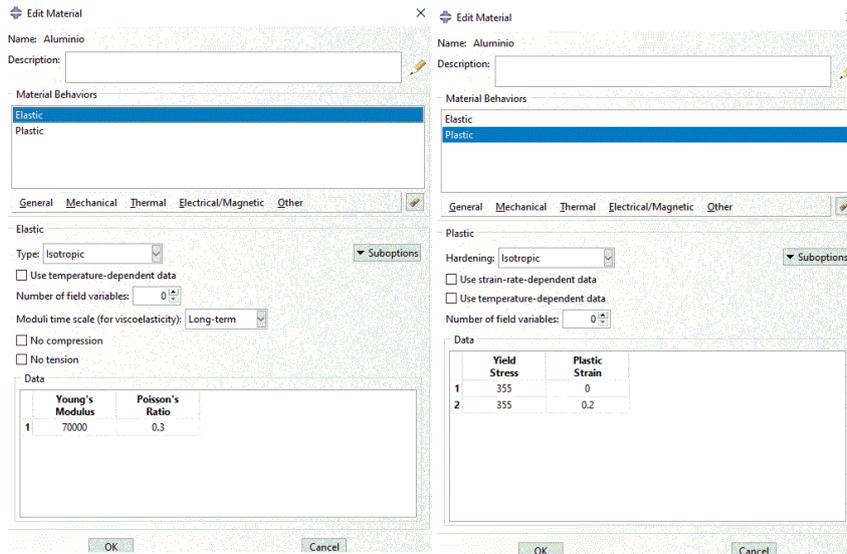


Figura 38 - Representação do *software* ABAQUS® para a definição das propriedades elásticas e plásticas do aderente

Para o adesivo considerado na sobreposição de aderentes atribuíram-se algumas características. Os adesivos a ter em conta são: Araldite® 2015 (Figura 39), Araldite® AV 138 (Figura 40), SikaForce® 7752 (Figura 41).

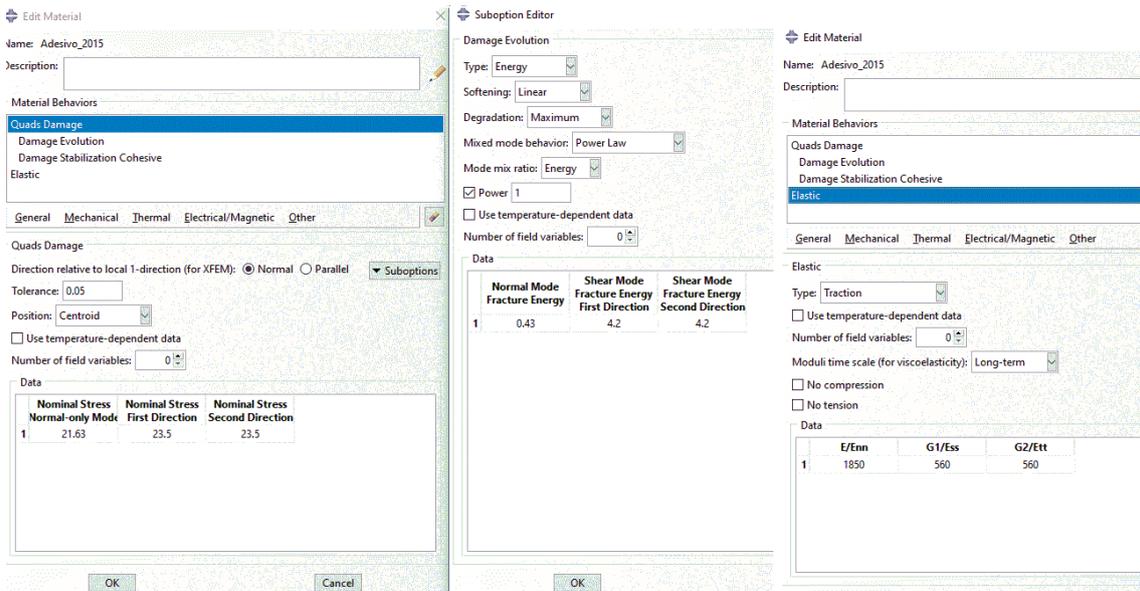


Figura 39 – Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de sobreposição para o adesivo Araldite® 2015

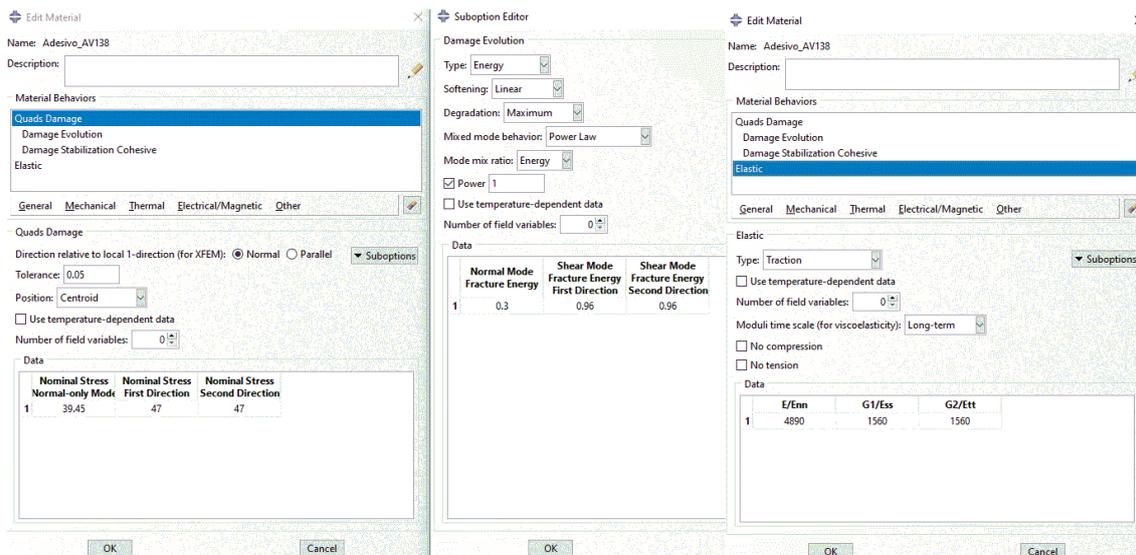


Figura 40 - Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de sobreposição para o adesivo Araldite® AV 138

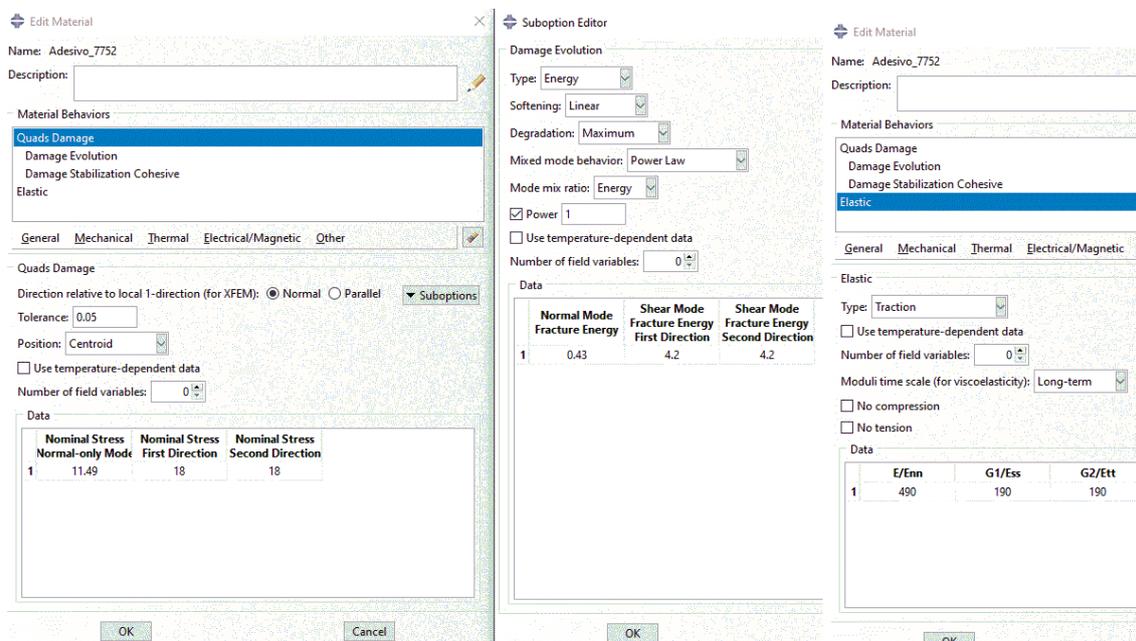


Figura 41 - Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de sobreposição para o adesivo SikaForce® 7752

Para o filete de adesivo são consideradas diferentes propriedades, como é possível verificar na Figura 42. Para a obtenção das curvas de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , as propriedades do adesivo alocado à sobreposição são alteradas e colocadas iguais às propriedades consideradas para o filete de adesivo e já referidas anteriormente.

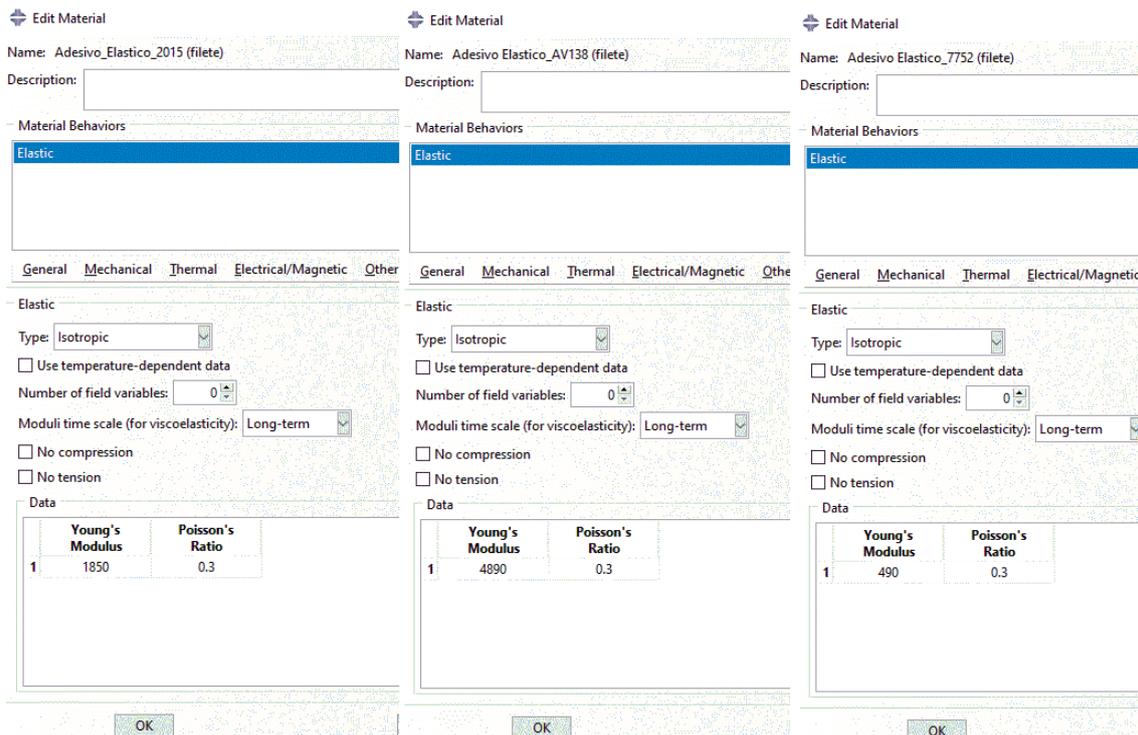


Figura 42 - Propriedades atribuídas ao adesivo na zona de filete para o adesivo Araldite® 2015, Araldite® AV 138 e SikaForce® 7752

### 3.2.3.3 Etapa "Sections"

Neste passo são definidas as diferentes zonas a considerar e desta forma selecionar no modelo os tipos de materiais (Figura 43).

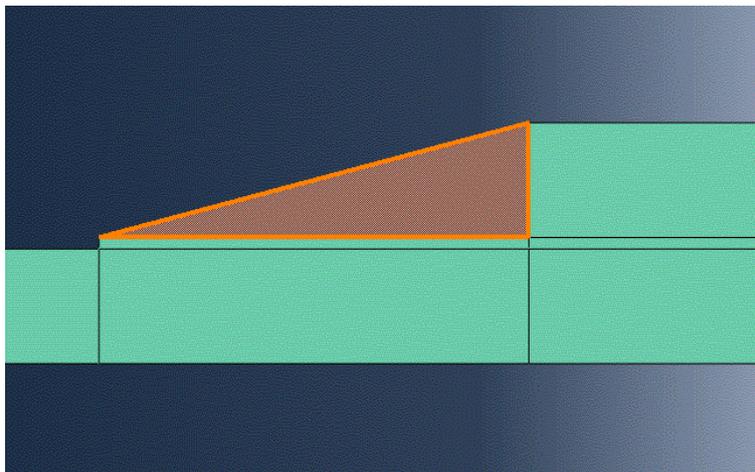


Figura 43 - Representação do software ABAQUS® da geometria da junta na etapa "Sections"

### 3.2.3.4 Etapa "Step"

Nesta etapa são definidos os parâmetros que regem a computação do modelo. Para tal é definido um número máximo de incrementos. É também necessário definir o tamanho

do incremento para que o *software* não gere problemas na zona de propagação do dano. O limite máximo de incrementos deve ser definido de forma a que o processo de computação do modelo não seja interrompido antes do momento pretendido, como é possível ver na Figura 44.

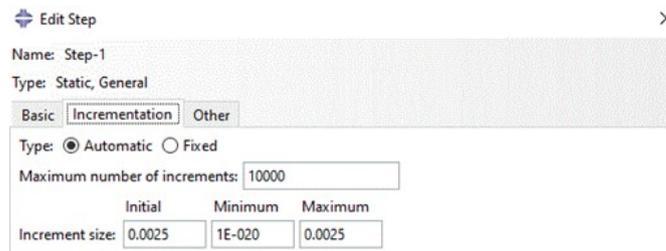


Figura 44 – Parâmetros atribuídos no *software* ABAQUS® da geometria da junta na etapa “Step”

### 3.2.3.5 Etapa “Load”

No módulo “Load” são definidas as condições fronteira do modelo. Numa das extremidades foi aplicado um encastramento de um dos aderentes, bloqueando a JAT na direção longitudinal e também transversal. Na extremidade oposta foi aplicado um deslocamento na direção longitudinal. Na Figura 45 é possível observar as restrições impostas ao modelo assim como os parâmetros selecionados.

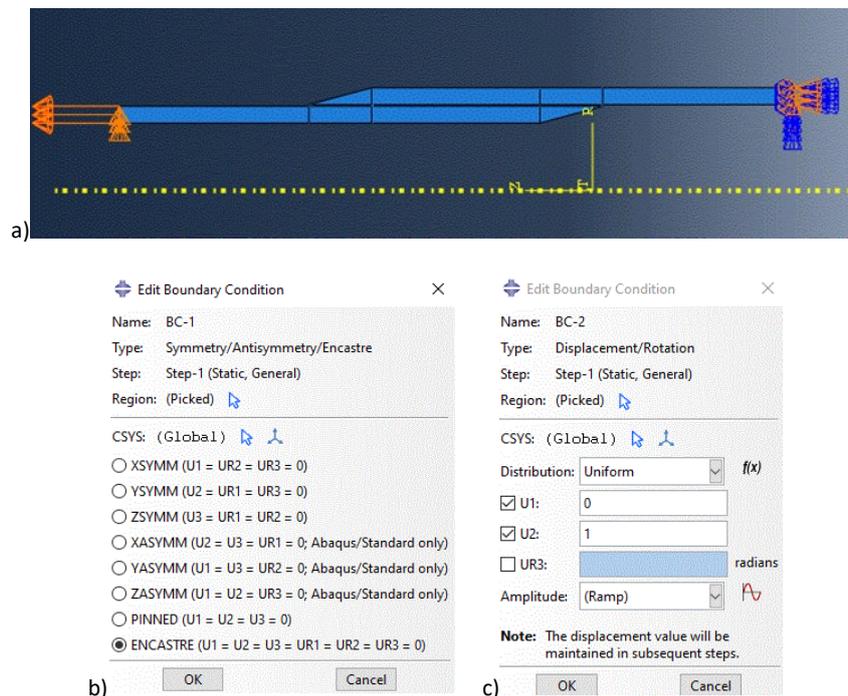


Figura 45 - Representação do *software* ABAQUS® para a etapa “Load” a), parâmetros de encastramento b) e parâmetros de deslocamento c).

### 3.2.3.6 Etapa “Mesh”

No separador “Mesh” é feito o fracionamento do modelo, gerando elementos menores e de cálculo mais simples. O tamanho dos elementos deve ser definido consoante a geometria da zona a estudar e o material existente. Zonas de maiores concentrações de tensões deverão ter uma malha mais refinada e apurada. No caso dos provetes em estudo, o maior refinamento deve acontecer na zona do adesivo.

Como é possível observar na Figura 46, o refinamento da malha foi atribuído consoante a geometria e o material estudado. Foi também aplicado o *bias ratio*, que é um comando que permite atribuir um rácio crescente de elementos ao longo de uma aresta. É muito importante não sobrecarregar o modelo com elementos muito pequenos em zonas onde não é necessário pois, no momento do processamento, esta informação extra consome muitos recursos.

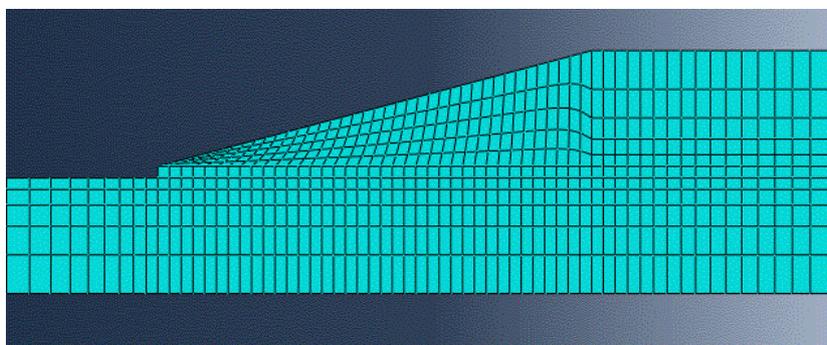


Figura 46 - Representação da malha do software ABAQUS® na etapa “Mesh”.

### 3.2.3.7 Etapa “Job”

Na etapa “Job” é onde se dá o início ao processamento do modelo numérico que conduz à apresentação dos resultados. Este passo por vezes pode ser moroso e consome muitos recursos a nível de *hardware*, pelo que é importante criar modelos leves e simples e com malhas de elementos apropriados.

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	450	1	0	1	1	0.990887	0.990887	0.0025
1	451	1	0	1	1	0.993387	0.993387	0.0025
1	452	1	0	1	1	0.995887	0.995887	0.0025
1	453	1	0	1	1	0.998387	0.998387	0.0025
1	454	1	0	1	1	1	1	0.00161296

Log Errors Warnings Output Data File Message File Status File

Completed: Abaqus/Standard  
Completed: Sat Jun 08 10:32:54 2019

Search Text  
Text to find:   Match case

Figura 47 - Representação do software ABAQUS® da ferramenta “Monitor” na etapa “Job”.

Com a ferramenta “*Monitor*” é possível acompanhar a evolução do estado de processamento e a evolução da incrementação (Figura 47). É importante que o utilizador tenha conhecimento do processamento para não prolongar simulações desnecessárias que à partida não terão resultados satisfatórios.

### 3.2.3.8 Etapa “*Visualization*”

Por último, a etapa “*Visualization*” permite ao utilizador obter resultados visuais dos diferentes parâmetros pretendidos. Depois da simulação terminada é possível, através do comando “*output*”, obter dados numérico e convertíveis em formato *Excel*. Na Figura 48 é possível observar o padrão de cores associado à intensidade do parâmetro Tensões de Von Mises.

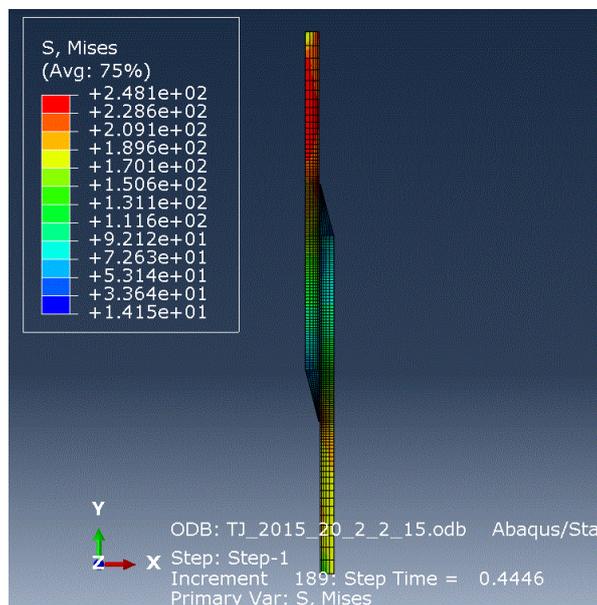


Figura 48 - Representação do software ABAQUS® para a etapa “*Visualizations*”.

### 3.2.4 Estudo dos filetes de adesivo

Neste subcapítulo serão apresentados os dados obtidos das simulações realizadas. De início serão consideradas as tensões de arrancamento para ambos  $L_0$ , seguindo-se a análise das tensões de corte. Será também analisada, a resistência máxima de cada junta. Por fim será analisada a variável de dano na cama de adesivo.

É espectável que a existência de um filete de adesivo nas extremidades de  $L_0$  reduza as tensões de pico geradas, proporcionando um aumento da resistência da junta. Com a diminuição do ângulo de filete, a área de adesão aumenta, beneficiando a resistência da JAT.

### 3.2.4.1 Distribuições de tensões

#### 3.2.4.1.1 Tensões de arrancamento

Nesta fase são apresentados os resultados obtidos para as tensões  $\sigma_y$  para ambos os  $L_0$  estudados. No final são comparados todos os resultados obtidos na Tabela 49. As ações dos esforços de arrancamento são de evitar visto que geram tensões prejudiciais à resistência de uma junta adesiva. A razão principal por este tipo de esforço ser tão prejudicial a uma junta está relacionada com as tensões geradas estarem concentradas numa área muito reduzida. Para análise, será necessária a normalização da distância  $x$ . Assim, será possível observar valores de  $\sigma_y/\tau_{avg}$ .

##### 3.2.4.1.1.1 Estudo para $L_0=20$ mm

Neste subcapítulo são apresentados os resultados a nível das tensões de arrancamento, para as JAT com  $L_0=20$  mm, e para os diferentes adesivos assim como diferentes filetes.

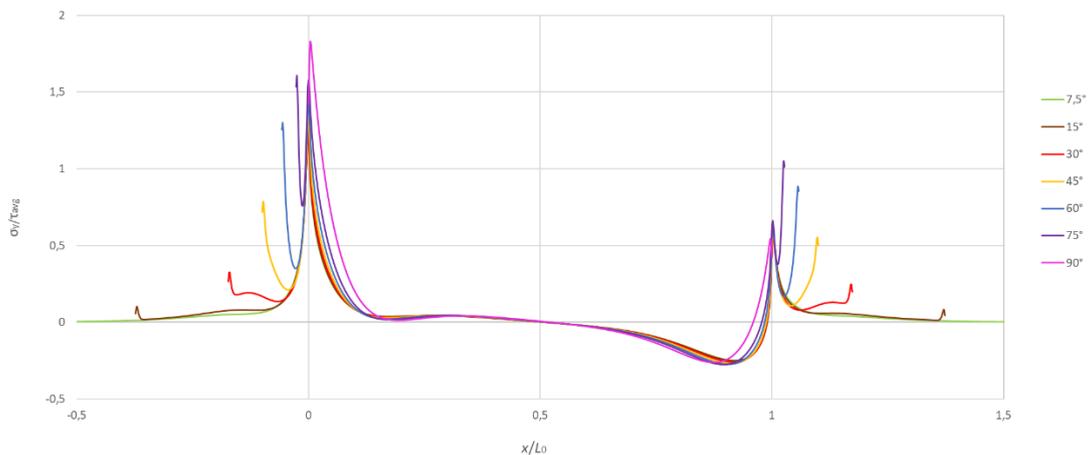


Figura 49 - Distribuição de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$  nos diversos  $\theta$  estudados para o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=20$  mm

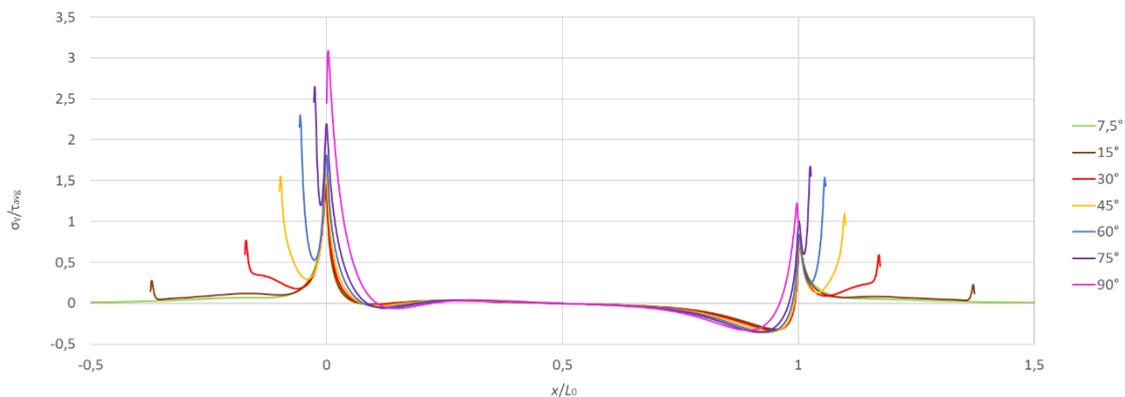


Figura 50 - Distribuição de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$  nos diversos  $\theta$  estudados para o adesivo Araldite® AV 138 e  $L_0=20$  mm

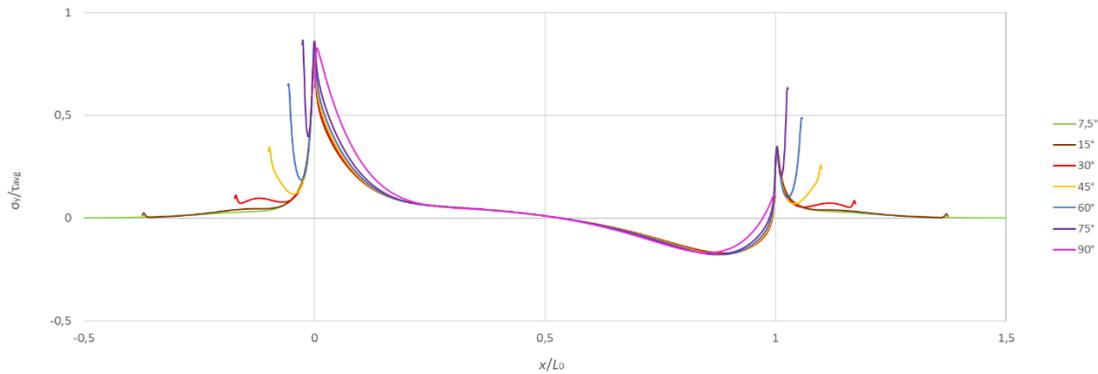


Figura 51 - Distribuição de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$  nos diversos  $\theta$  estudados para o adesivo SikaForce® 7752 e  $L_0=20$  mm

Após análise dos gráficos apresentados (Figura 49, Figura 50 e Figura 51) é possível verificar a existência um pico de tensão nas extremidades da distância normalizada, ou seja, onde  $x/L_0=0$  e  $x/L_0=1$ . É também possível observar picos de tensão fora desta distância, ou seja, nas extremidades dos filetes. O único caso fora deste acontecimento, logicamente é o provete sem filete representado pelo ângulo de  $90^\circ$ .

Verifica-se também que as tensões  $\sigma_y$  diminuem ao longo comprimento normalizado, isto deve-se à rigidez do adesivo que é inferior à do aderente (alumínio).

Em todos os casos é possível verificar que as tensões de pico vão baixando consoante o  $\theta$  vai aumentando. O aumento de área de adesão permite diminuir a intensidade das tensões de pico. De todos os adesivos, o Araldite® AV 138 é o que apresenta maior variação de tensão de pico entre filetes, devido essencialmente ao facto de o adesivo possuir o Módulo de Young mais alto.

#### 3.2.4.1.1.2 Estudo para $L_0=40$ mm

Neste subcapítulo são apresentados os resultados a nível das tensões de arrancamento, para as JAT com  $L_0=40$  mm, e para os diferentes adesivos assim como diferentes filetes.

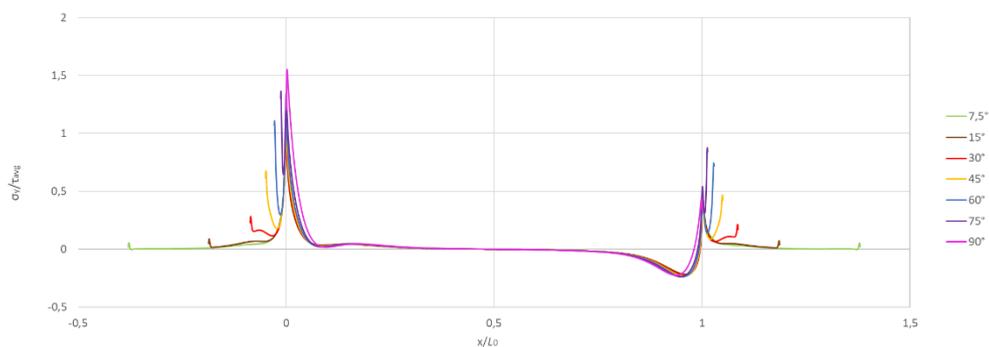


Figura 52 - Distribuição de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$  nos diversos  $\theta$  estudados para o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=40$  mm

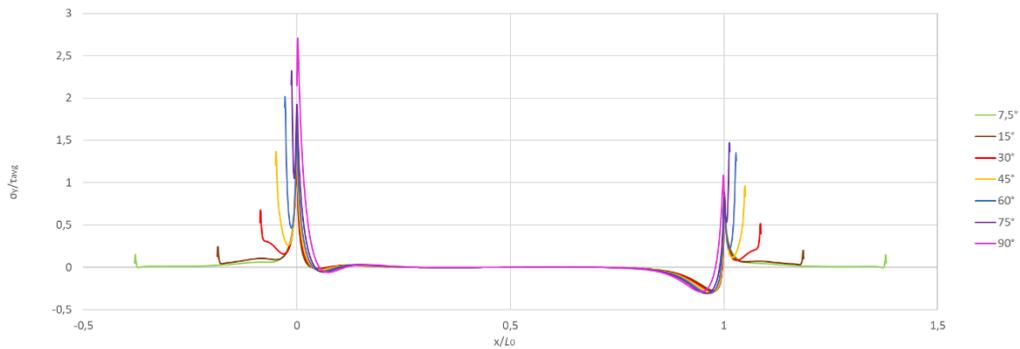


Figura 53 - Distribuição de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$  nos diversos  $\theta$  estudados para o adesivo Araldite® AV 138 e  $L_0=40$  mm

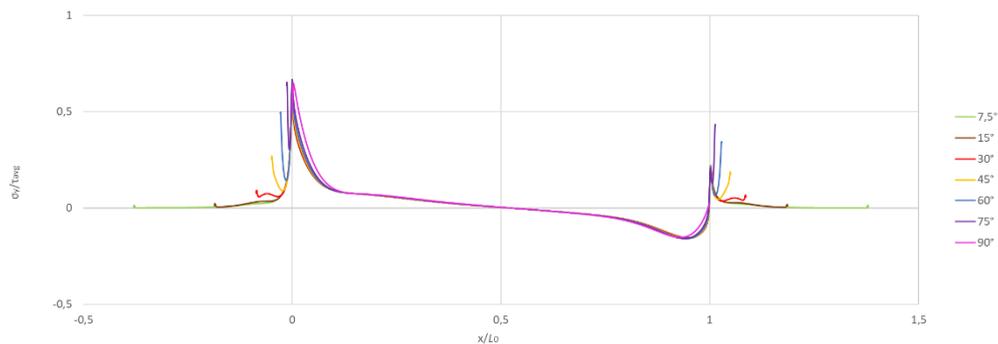


Figura 54 - Distribuição de tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$  nos diversos  $\theta$  estudados para o adesivo SikaForce® 7752 e  $L_0=40$  mm

Utilizando um  $L_0=40$  mm (Figura 52, Figura 53 e Figura 54), as variações dos resultados entre os adesivos e  $\theta$  são muito semelhantes quando imposto um  $L_0=20$  mm. Aparentemente verifica-se uma redução do valor de tensão de pico em todos adesivos, mas o comportamento da curva é igual ao  $L_0$  anteriormente estudado.

#### 3.2.4.1.1.3 Comparação entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Neste subcapítulo encontra-se a comparação entre os vários parâmetros estudados anteriormente. Na Tabela 49, através do parâmetro  $\Delta\sigma_y/\tau_{avg \text{ máx}}$ , é possível observar a influência do  $\theta$  na redução das tensões de arrancamento ao longo da sua variação.

É possível verificar que as análises numéricas com filete obtiveram melhores resultados do que sem filete e para todos os adesivos em causa, atingindo reduções na ordem dos 131% (Araldite® AV 138,  $\theta=7,5^\circ$ ). Este efeito é mais notório para adesivos mais rígidos e menos flagrante para adesivos mais dúcteis. Existe também uma redução da concentração de tensões com o aumento de  $L_0$  mas não muito significativa. Ensaio com  $L_0$  maior possuem uma redução da concentração de tensões sendo mais notória em adesivos mais rígidos. É possível observar que o SikaForce® 7752 não teve grande variação dos valores com a alteração dos filetes de adesivo ou mesmo com a inexistência dos mesmos. A mais notória redução dos valores de  $\sigma_y/\tau_{avg \text{ máx}}$  com a variação do filete situa-se novamente no Araldite® AV 138.

Tabela 49 -  $\sigma_y/\tau_{avg}$  para os três adesivos em função de  $x/L_0$  para  $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm

Adesivo	$L_0$ [mm]	Ângulo de filete ( $\theta$ )						
		7,5°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Araldite® 2015	20	1,21	1,22	1,26	1,32	1,42	1,61	1,83
	$\Delta\sigma_y/\tau_{avg}$ máx	-51,2%	-50,0%	-45,2%	-38,6%	-28,9%	-13,7%	0
	40	1,03	1,04	1,07	1,12	1,21	1,36	1,55
	$\Delta\sigma_y/\tau_{avg}$ máx	-50,5%	-49,0%	-44,9%	-38,4%	-28,1%	-14,0%	0
	20 vs 40	-17,5%	-17,3%	-17,8%	-17,9%	-17,4%	-18,4%	-18,1%
Araldite® AV 138	20	1,34	1,37	1,45	1,58	2,3	2,65	3,09
	$\Delta\sigma_y/\tau_{avg}$ máx	-130,6%	-125,5%	-113,1%	-95,6%	-34,3%	-16,6%	0
	40	1,18	1,21	1,27	1,39	2,02	2,32	2,71
	$\Delta\sigma_y/\tau_{avg}$ máx	-129,7%	-124,0%	-113,4%	-95,0%	-34,2%	-16,8%	0
	20 vs 40	-13,6%	-13,2%	-14,2%	-13,7%	-13,9%	-14,2%	-14,0%
SikaForce® 7752	20	0,78	0,78	0,79	0,81	0,83	0,87	0,83
	$\Delta\sigma_y/\tau_{avg}$ máx	-6,4%	-6,4%	-5,1%	-2,5%	0,0%	4,6%	0
	40	0,61	0,61	0,61	0,63	0,64	0,67	0,65
	$\Delta\sigma_y/\tau_{avg}$ máx	-6,6%	-6,6%	-6,6%	-3,2%	-1,6%	3,0%	0
	20 vs 40	-27,9%	-27,9%	-29,5%	-28,6%	-29,7%	-29,9%	-27,7%

### 3.2.4.1.2 Tensões de corte

A distribuição das tensões  $\tau_{xy}$  são estudadas ao longo deste capítulo e são resumidas na Tabela 50 onde é possível observar valores máximos e mínimos de  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$ . Normalmente este tipo de tensões são geradas em JAT pelo deslizamento dos aderentes, o que o aumento da área de sobreposição, gerada pelo filete beneficiará a resistência da junta.

#### 3.2.4.1.2.1 Estudo para $L_0=20$ mm

Neste subcapítulo são apresentados os resultados a nível das tensões, para as JAT com  $L_0=20$  mm, e para os diferentes adesivos assim como diferentes filetes.

O comportamento demonstrado na Figura 55, na Figura 56 e na Figura 57 é muito semelhante ao comportamento visto nas curvas de tensão  $\sigma_y$ . Existe um pico de tensão onde  $x/L_0=0$  e  $x/L_0=1$ , suavizando na sobreposição. Verifica-se também uma redução do valor tensão de pico  $\tau_{xy}$  consoante o aumento do  $\theta$ , como já referido, deve-se ao aumento da zona de aderência gerada pela redução de  $\theta$ .

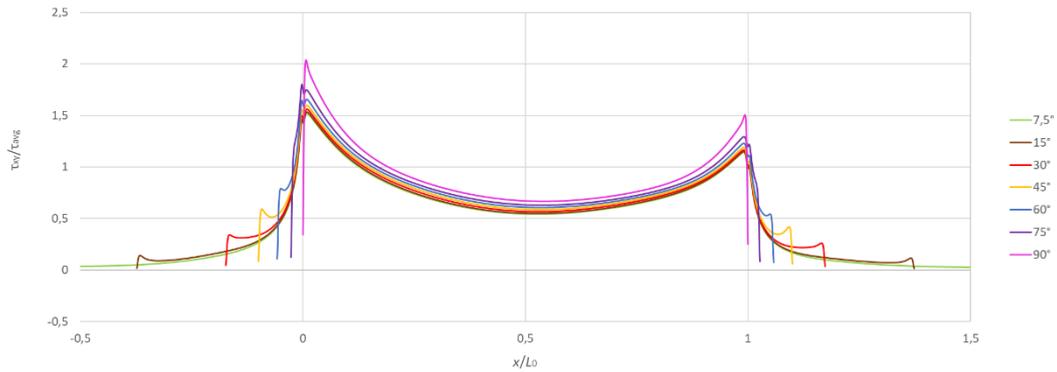


Figura 55 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  considerando a variação do  $\theta$  para Araldite® 2015 e  $L_0=20$  mm

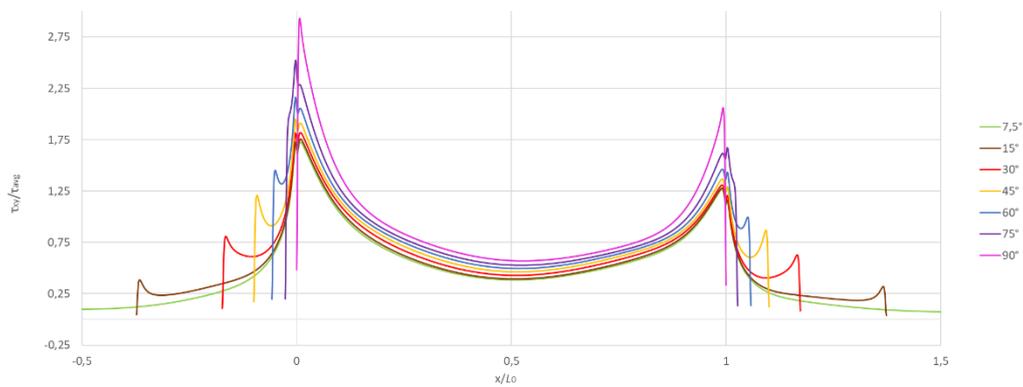


Figura 56 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  considerando a variação do  $\theta$  para Araldite® AV138 e  $L_0=20$  mm

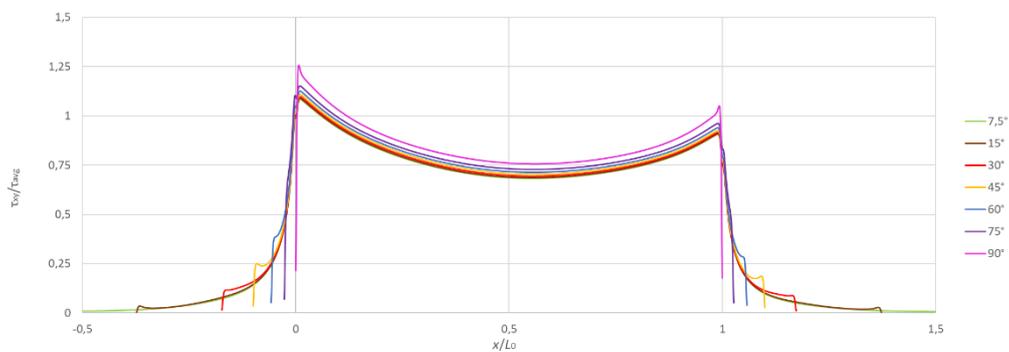


Figura 57 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  considerando a variação do  $\theta$  para SikaForce® 7752 e  $L_0=20$  mm

### 3.2.4.1.2.2 Estudo para $L_0=40$ mm

Neste subcapítulo são apresentados os resultados a nível das tensões, para as JAT com  $L_0=20$  mm, e para os diferentes adesivos assim como diferentes filetes.

Como era expectável, os gráficos para as tensões de corte com um  $L_0=40$  mm (Figura 58, Figura 59 e Figura 60) apresentam um comportamento muito idêntico para o gráfico com  $L_0=20$  mm. É possível observar que o valor da tensão de pico reduz para todos os

adesivos devido ao aumento da área de adesão e conseqüentemente proporciona uma melhor distribuição das tensões.

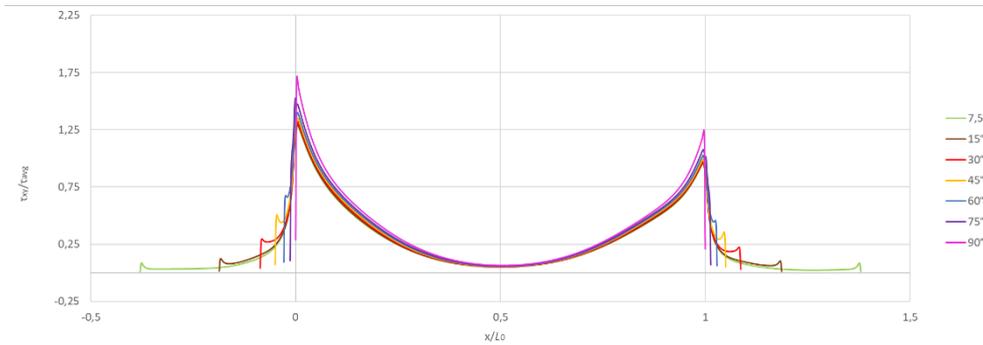


Figura 58- Distribuição de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  considerando a variação do  $\theta$  para Araldite® 2015 e  $L_0=40$  mm

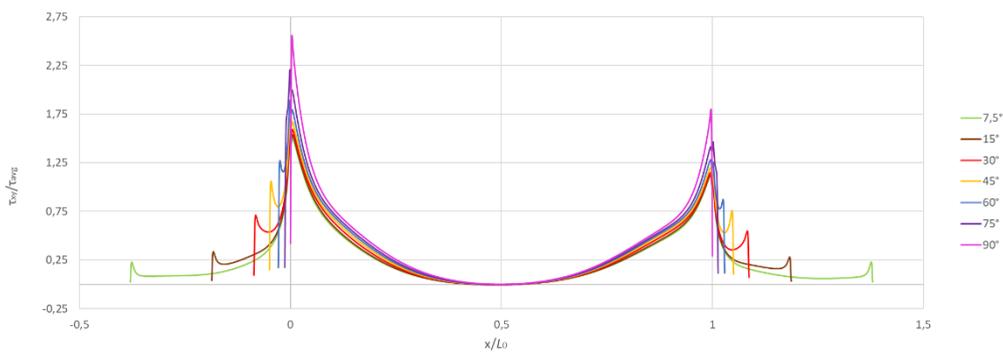


Figura 59 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  considerando a variação do  $\theta$  para Araldite® AV138 e  $L_0=40$  mm

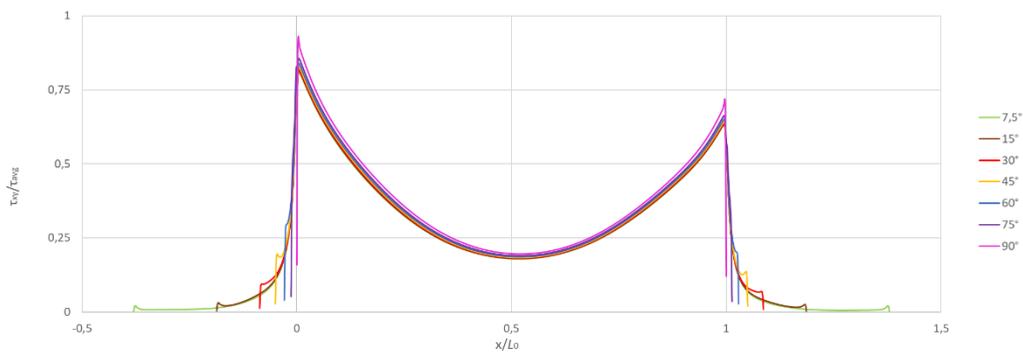


Figura 60 - Distribuição de tensões  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  considerando a variação do  $\theta$  para SikaForce® 7752 e  $L_0=40$  mm

### 3.2.4.1.2.3 Comparação entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Em análise, os adesivos de maior rigidez apresentam diferenças mais significativas com a diminuição do  $\theta$ , enquanto em adesivos menos rígidos essa diferença não é tao significativa. O aumento de  $L_0$  reduz as tensões geradas e com mais significado em adesivos mais rígidos.

Tabela 50 -  $\tau_{xy}/\tau_{avg}$  para os três adesivos em função de  $x/L_0$  de adesivo para  $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm

Adesivo	$L_0$ [mm]	Ângulo de filete ( $\theta$ )						
		7,5°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Araldite® 2015	20	1,52	1,53	1,56	1,6	1,66	1,8	2,04
	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{avg}$ máx	-34,21%	-33,33%	-30,77%	-27,50%	-22,89%	-13,33%	0
	40	1,29	1,3	1,32	1,35	1,4	1,53	1,73
	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{avg}$ máx	-34,11%	-33,08%	-31,06%	-28,15%	-23,57%	-13,07%	0
	20 vs 40	-17,83%	-17,69%	-18,18%	-18,52%	-18,57%	-17,65%	-17,92%
Araldite® AV 138	20	1,73	1,76	1,82	1,95	2,16	2,52	2,93
	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{avg}$ máx	-69,36%	-66,48%	-60,99%	-50,26%	-35,65%	-16,27%	0
	40	1,52	1,54	1,59	1,71	1,89	2,21	2,56
	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{avg}$ máx	-68,42%	-66,23%	-61,01%	-49,71%	-35,45%	-15,84%	0
	20 vs 40	-13,82%	-14,29%	-14,47%	-14,04%	-14,29%	-14,03%	-14,45%
SikaForce® 7752	20	1,08	1,09	1,1	1,11	1,13	1,15	1,26
	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{avg}$ máx	-16,67%	-15,60%	-14,55%	-13,51%	-11,50%	-9,57%	0
	40	0,81	0,82	0,82	0,83	0,84	0,86	0,93
	$\Delta\tau_{xy}/\tau_{avg}$ máx	-14,81%	-13,41%	-13,41%	-12,05%	-10,71%	-8,14%	0
	20 vs 40	-33,33%	-32,93%	-34,15%	-33,73%	-34,52%	-33,72%	-35,48%

### 3.2.4.2 Resistência da junta

Será possível ao longo deste subcapítulo verificar uma comparação entre força e deslocamento analisando as curvas  $P-\delta$  obtidas por MDC. No final, pela Tabela 51, será possível observar qual das juntas suporta mais carga e o crescimento percentual da resistência com adição de filetes de adesivo. Observando os resultados anteriores, será espectável que a JAT que apresente mais resistência será a de  $\theta=7,5^\circ$ .

#### 3.2.4.2.1 Estudo para $L_0=20$ mm

Numa fase inicial é possível verificar que os adesivos Araldite® 2015 (Figura 61) e Araldite® AV138 (Figura 62) são os que apresentam uma maior resistência e com valores muito próximos. Os gráficos apresentam um comportamento semelhante, embora seja importante referir que, para o Araldite® AV138 existiu a plastificação do aderente nos  $\theta$  de 7,5°, 15° e 30°. Para o adesivo SikaForce® 7752 (Figura 63) é possível observar um comportamento linear até à sua rotura. Este adesivo é o que apresenta resultados mais baixos de  $P_{máx}$ .

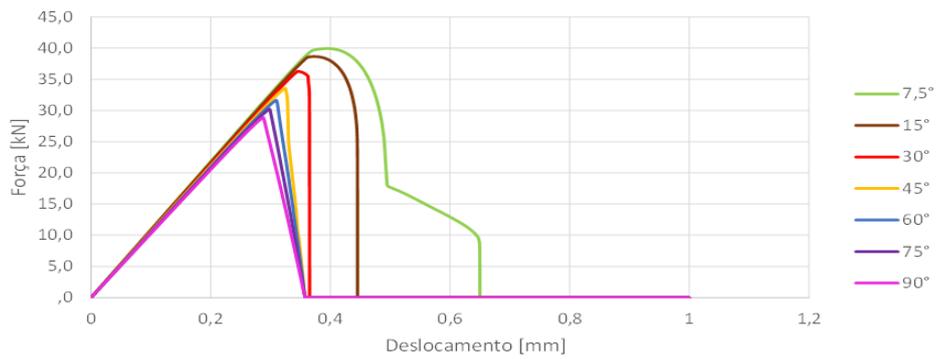


Figura 61 - Curvas  $P-\delta$  obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® 2015 e  $L_0=20$  mm

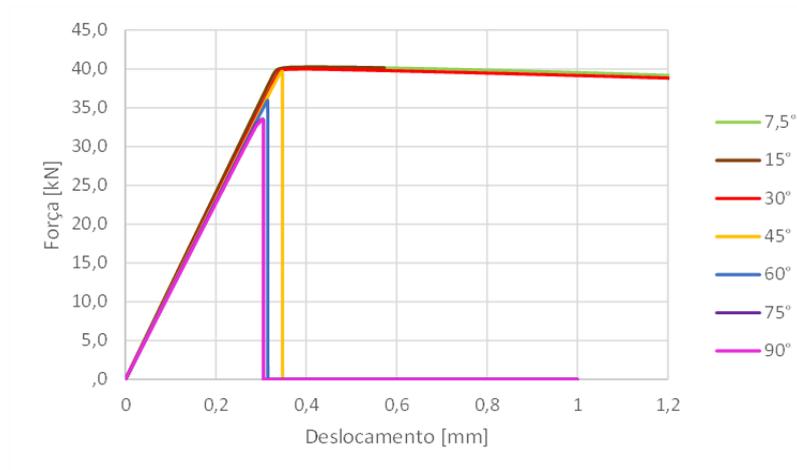


Figura 62 - Curvas  $P-\delta$  obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® AV138 e  $L_0=20$  mm

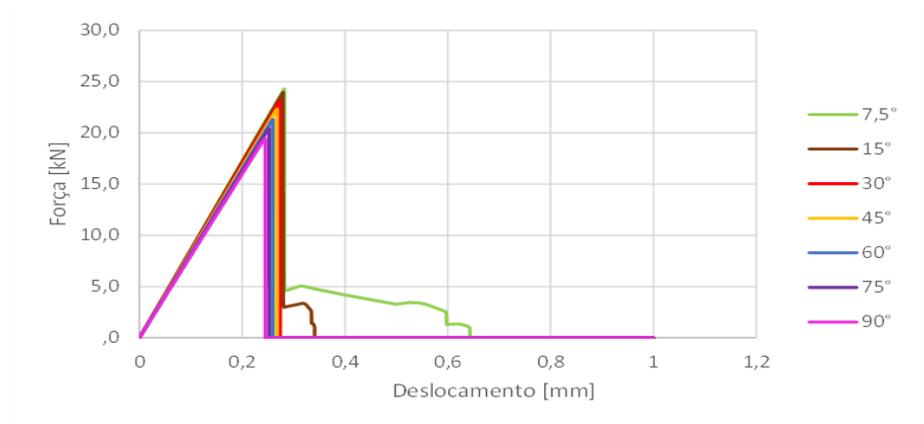


Figura 63 - Curvas  $P-\delta$  obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do  $\theta$ , para SikaForce® 7752 e  $L_0=20$  mm

### 3.2.4.2.2 Estudo para $L_0=40$ mm

Tal como para  $L_0=20$  mm, é possível verificar que as juntas com os adesivos Araldite® 2015 (Figura 64) e Araldite® AV138 (Figura 65) são as que apresentam uma maior resistência e com valores muito próximos. Com  $L_0=40$  mm o gráfico do Araldite® 2015

demonstra uma plastificação do aderente de em todos os  $\theta$ . Para o Araldite® AV138 manteve-se a plastificação do aderente nos  $\theta$  de 7,5°, 15° e 30°, sendo que o adesivo rompe num certo momento no ângulo de 30°. Para o adesivo SikaForce® 7752 (Figura 66) é possível observar um comportamento linear até à sua rotura e mais uma vez é o que apresenta resultados mais baixos de  $P_{m\acute{a}x}$ .

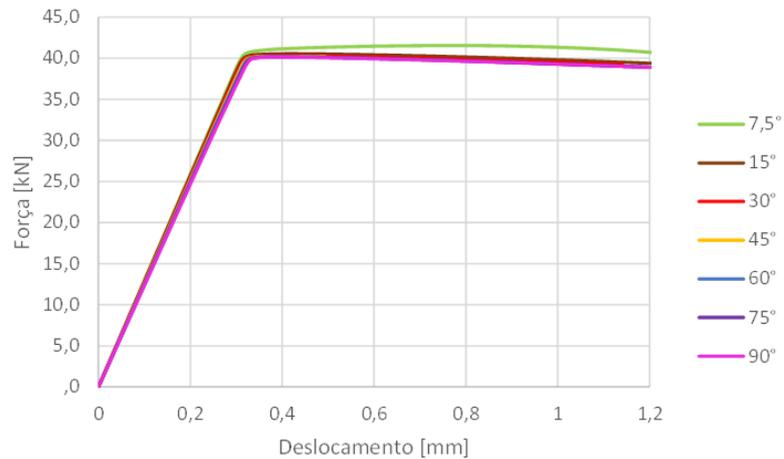


Figura 64 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® 2015 e  $L_0=40$  mm

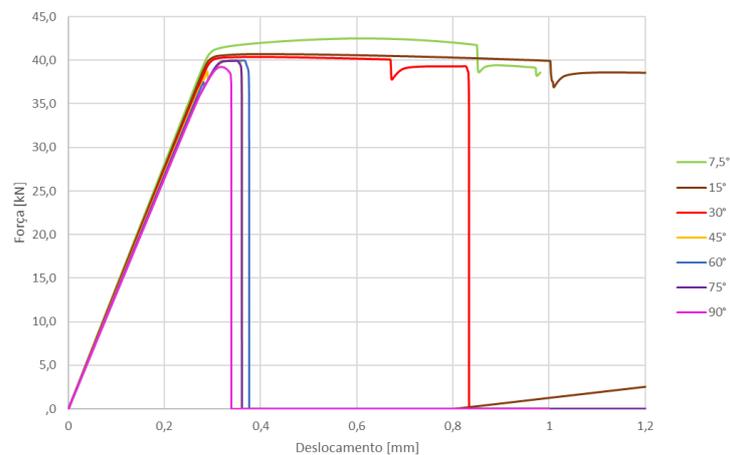


Figura 65 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® AV138 e  $L_0=40$  mm

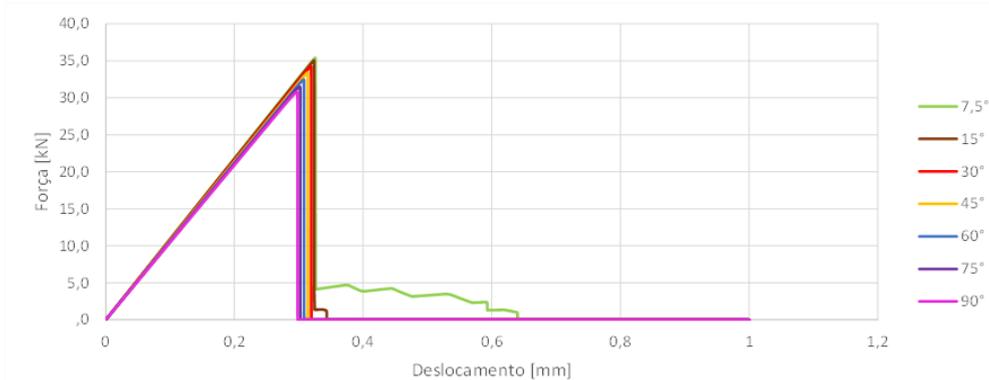


Figura 66 - Curvas  $P$ - $\delta$  obtidas por MDC no ABAQUS® em função da variação do  $\theta$ , para SikaForce® 7752 e  $L_0=40$  mm

### 3.2.4.2.3 Comparação entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm

Na Tabela 51 é possível observar o efeito do  $\theta$  no valor de  $P_{m\acute{a}x}$  suportado por cada adesivo, comparando com o  $P_{m\acute{a}x}$  do  $\theta=90^\circ$ . É também feita a comparação entre cada  $L_0$ , para cada ângulo dentro de cada adesivo.

Como foi possível constatar anteriormente, as juntas com Araldite® 2015 e com Araldite® AV138 são as que maior resistência apresentam. Para as JAT com Araldite® 2015 e  $L_0=20$ , o  $\theta$  é uma variável relevante visto que  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta gradualmente com a redução do  $\theta$ , apresentando um aumento de 27,7% comprando a JAT com o maior filete (7,5°) com a JAT sem filete (90°). O mesmo não acontece com a JAT com  $L_0=40$  mm, visto que no máximo apresenta um aumento de 3,4%. Assim a existência de filete para  $L_0=40$  mm não é relevante para o aumento da sua resistência. Comparando entre  $L_0$ , o  $L_0=40$  mm é o que apresenta o maior valor de  $P_{m\acute{a}x}$  para todos os  $\theta$ . O mais relevante é na JAT que não possui filete (90°) onde o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  chega aos 28%.

Considerando as JAT com Araldite® AV 138 e  $L_0=20$ , o  $\theta$  é uma geometria com alguma importância visto que  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta gradualmente com a redução do ângulo, mas não com tanto peso como no Araldite® 2015. O valor mais alto de  $P_{m\acute{a}x}$  situa-se no ângulo de 7,5° e apresenta uma melhoria de 16,9%. Tal como o Araldite® 2015 com  $L_0=40$  os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  não sofrem grande alteração de ângulo para ângulo. Apresenta uma melhoria de apenas de 7,7% no  $\theta=7,5^\circ$ . Avaliando a influência de  $L_0$  é possível verificar que entre o  $\theta$  de 7,5° e de 45° ela não existe visto que a melhoria no valor de  $P_{m\acute{a}x}$  situa-se entre os 5,3% e 0,6%. Quando se considera entre o  $\theta$  de 60° e os 90° a importância de  $L_0$  sobressai-se atingindo um valor de melhoramento a rondar os 16% no  $\theta=75^\circ$  para  $L_0=40$  mm.

Por último, o SikaForce® 7752 é o adesivo que apresenta os valores mais regulares entre os  $L_0$  considerados e ao longo do  $\theta$ . Para  $L_0=20$  mm, o ângulo de 7,5°, mais uma vez, é o que apresenta o maior aumento de resistência da JAT (19,9%). O mesmo se sucede no  $L_0=40$  mm onde o ângulo referido atinge um melhoramento de 13,1%. Comparando os

dois valores de  $L_0$  é possível constatar que  $L_0=40$  mm apresenta um aumento muito semelhante entre  $\theta$  e atingindo valores a variar entre os 31,4% e os 36,8%.

Tabela 51 -  $P_{\text{máx}}$  [N] para os três adesivos em função do  $\theta$  de adesivo, e respetivo aumento percentual para  $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm

Adesivo	$L_0$ [mm]	Ângulo de filete ( $\theta$ )						
		7,5°	15°	30°	45°	60°	75°	90°
Araldite® 2015	20	39953	38664	36291	33583	31664	30234	28888
	$\Delta P_{\text{máx}}$	27,7%	25,3%	20,4%	14,0%	8,8%	4,5%	0
	40	41546	40557	40326	40240	40189	40164	40137
	$\Delta P_{\text{máx}}$	3,4%	1,0%	0,5%	0,3%	0,1%	0,1%	0
	20 vs 40	3,8%	4,7%	10,0%	16,5%	21,2%	24,7%	28,0%
Araldite® AV 138	20	40247	40249	39990	39716	35980	33553	33460
	$\Delta P_{\text{máx}}$	16,9%	16,9%	16,3%	15,8%	7,0%	0,3%	0
	40	42508	40709	40384	39947	39953	39946	39237
	$\Delta P_{\text{máx}}$	7,7%	3,6%	2,8%	1,8%	1,8%	1,8%	0
	20 vs 40	5,3%	1,1%	1,0%	0,6%	9,9%	16,0%	14,7%
SikaForce® 7752	20	24288	23952	23145	22309	21317	20427	19462
	$\Delta P_{\text{máx}}$	19,9%	18,7%	15,9%	12,8%	8,7%	4,7%	0
	40	35394	35038	34270	33409	32461	31483	30775
	$\Delta P_{\text{máx}}$	13,1%	12,2%	10,2%	7,9%	5,2%	2,2%	0
	20 vs 40	31,4%	31,6%	32,5%	33,2%	34,3%	35,1%	36,8%

Na Figura 67 e Figura 68 é possível observar a comparação entre adesivos para  $L_0=20$  mm e para  $L_0=40$  mm, respetivamente. Considerando  $L_0=20$  mm (Figura 67), é possível observar que o Araldite® AV 138 é o que apresenta o valor mais elevado de  $P_{\text{máx}}$  para todos os  $\theta$ . Aliás, o valor é constante entre os  $\theta$  de 7,5° e de 45°. JAT com SikaForce® 7752 são as que apresentam um valor de  $P_{\text{máx}}$  mais baixo. Considerando  $L_0=40$  mm (Figura 68), e como já foi constatado anteriormente, as JAT com os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV 138 mantêm valores muito próximos ao longo da variação do  $\theta$ . As JAT com SikaForce® 7752 reduzem gradualmente a sua resistência com o aumento do  $\theta$ , mas sempre com valores gerais mais baixos do que os adesivos referidos anteriormente.

Na Figura 69 é possível comparar, dentro do mesmo adesivo, o comportamento de  $P_{\text{máx}}$  para ambos os valores de  $L_0$  estudados.

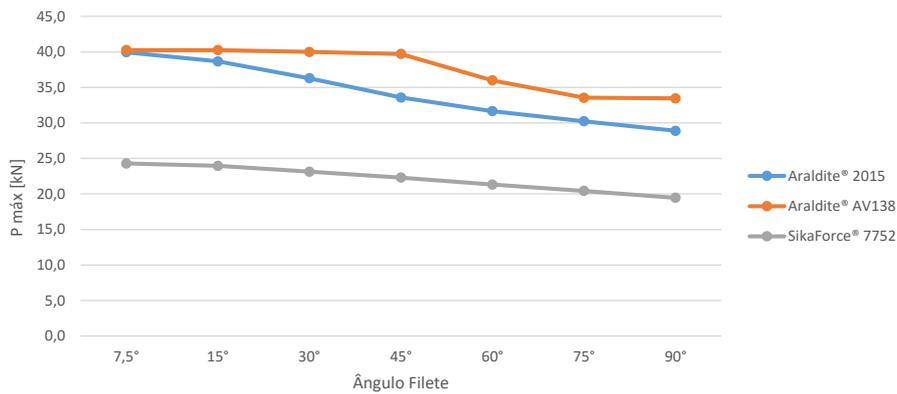


Figura 67 -  $P_{máx}$  em função do  $\theta$  de adesivo, com  $L_0=20$  mm, para os adesivos estudados

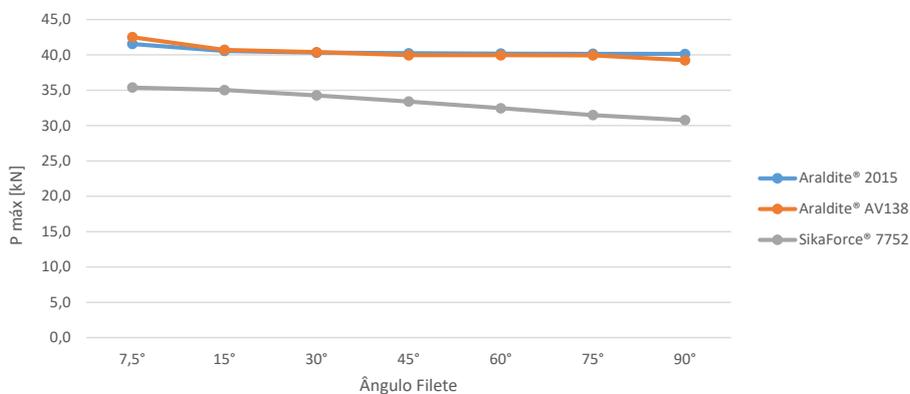


Figura 68 -  $P_{máx}$  em função do  $\theta$  de adesivo, com  $L_0=40$  mm, para os adesivos estudados

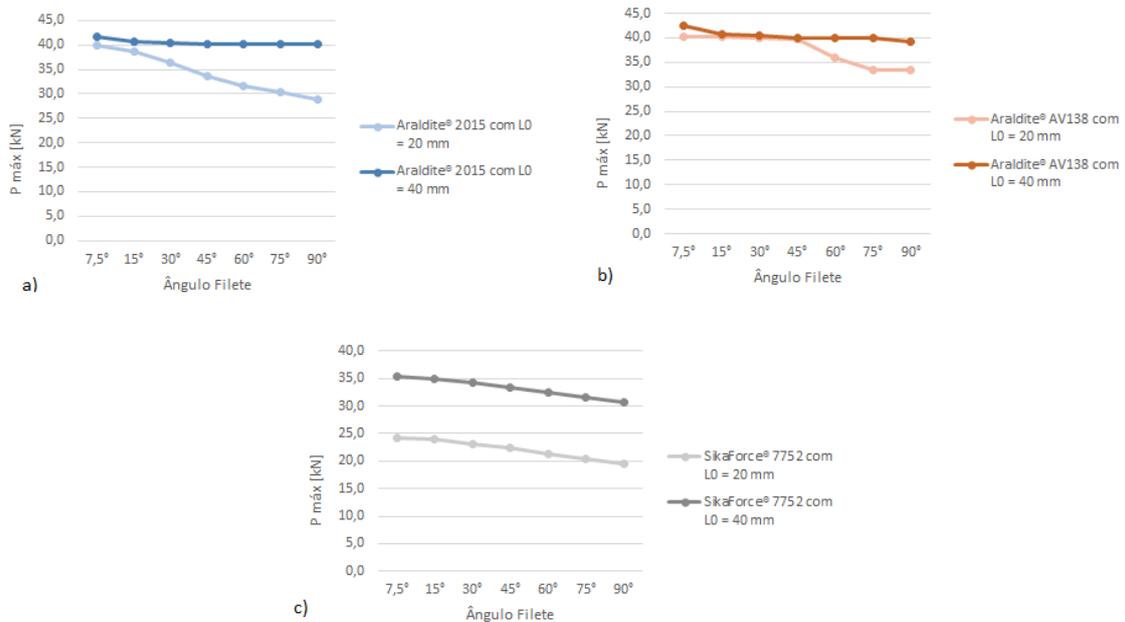


Figura 69 – Influência do  $L_0$  no valor de  $P_{máx}$  para os adesivos estudados

Como é possível observar na Figura 69, as JAT com  $L_0=40$  mm apresentam uma resistência maior. No entanto, quando se consideram os adesivos Araldite® AV 138 e Araldite® 2015 é possível verificar que a existência de um  $\theta=7,5^\circ$  onde  $L_0=20$  mm, proporciona uma resistência equivalente quando  $L_0=40$  mm e sem filete de adesivo. Para  $L_0=40$  mm a resistência da junta mantêm-se com ao longo da variação do  $\theta$ .

Considerando o adesivo SikaForce® 7752 este por sua vez tem um aumento de cerca de 30% de resistência comparando as JAT com  $L_0=20$  mm e  $L_0=40$  mm. Em relação aos filetes, a resistência da junta aumenta gradualmente com a redução do  $\theta$ , representando um aumento de cerca de 14% em ambos os  $L_0$ .

### 3.2.4.3 Estudo da variável de dano

Neste capítulo pretende-se estudar a variável de dano denominada no *software* ABAQUS® por SDEG. Através dos resultados das curva  $P-\delta$ , é possível obter o incremento onde se situa o  $P_{m\acute{a}x}$ . Nesse incremento é possível observar a evolução do dano ao longo do adesivo entre os aderentes. O SDEG é situado entre valores de 0 e 1, onde 0 representa a ausência de dano e 1 a existência do mesmo. Entre esses valores o adesivo encontra-se em fase de degradação. A distância é normalizada onde o 0 é o início da sobreposição sem filete e 1 é fim da mesma sem contabilizar o filete.

#### 3.2.4.3.1 Estudo para $L_0=20$ mm

Considerando um  $L_0=20$  mm, é possível observar na Figura 70, Figura 71 e Figura 72 os resultados obtidos para os diferentes adesivos. Quando considerado o adesivo Araldite® 2015 (Figura 70) é possível observar que resultados são coerentes entre os diferentes filetes. É possível observar quatro picos de dano. Estes picos situam-se no inicio e no fim de cada filete. Na Figura 70 b) é possível observar que os pontos mais afetados pelo dano são as extremidades do filete. Em  $x/L_0=1$  o dano é relativamente menor provavelmente atenuado pela junta, visto que o deslocamento imposto se encontra na extremidade oposta da JAT. Sendo este adesivo de ductilidade moderada o dano revela-se nas extremidades mais sensíveis, onde existe ligação de diferentes materiais.

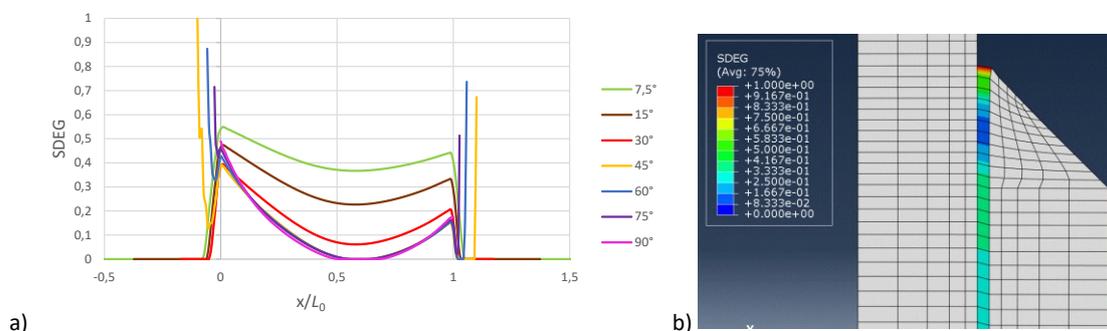


Figura 70 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® 2015 e  $L_0=20$  mm. b) SDEG na JAT no momento de  $P_{m\acute{a}x}$  para  $45^\circ$ .

Em relação ao Araldite® AV138 (Figura 71), o gráfico resultante não é coerente entre os resultados obtidos para cada filete. No entanto é possível verificar uma tendência que resulta na existência de dano no início do filete, diminuindo ao longo do mesmo. Também é notório a ausência de curva em alguns gráficos no nomeadamente onde o  $\theta$  é 7,5°, 15° e 30°. Ao verificar os resultados numéricos é possível observar que a ausência de valores e deve-se ao facto de  $P_{m\acute{a}x}$  surgir antes de qualquer existência de dano. O refinamento adequado da malha poderá resolver esta questão tornando os resultados mais precisos. Na Figura 71 b) é possível verificar a propagação do dano ao longo do adesivo, sendo um adesivo frágil e rígido, a falha propaga-se de forma contínua até ao final da sobreposição.

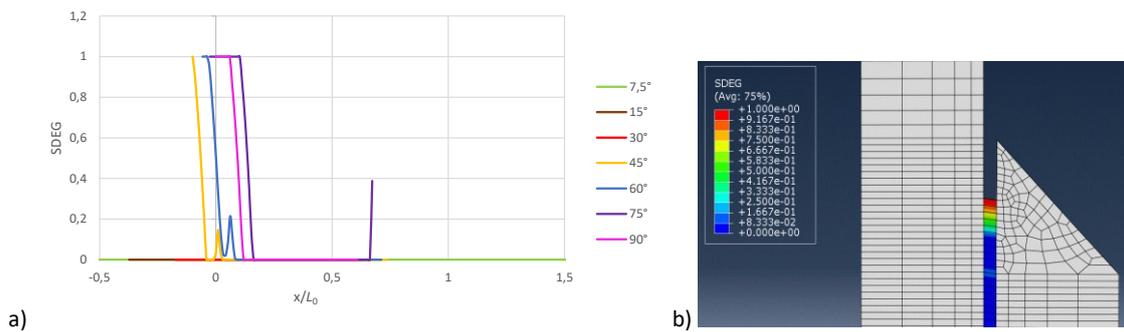


Figura 71 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® AV138  $L_0=20$  mm. b) SDEG na JAT no momento de  $P_{m\acute{a}x}$  para 45°.

Em relação ao SikaForce® 7752 todos os filetes surgem com representação gráfica e com resultados muito semelhantes. O  $\theta$  de maiores dimensões ( $> 45^\circ$ ), apresentam dano no início do filete e onde  $x/L_0=0$  ou  $x/L_0=1$ . Visto este adesivo ser mais dúctil que o adesivo Araldite® 2015, é mais notório o surgimento de pontos de dano como é possível observar na Figura 72 b). Nos filetes de menor  $\theta$ , esta configuração já não é tão evidente e começa a surgir pontos de dano no apenas no início do filete.

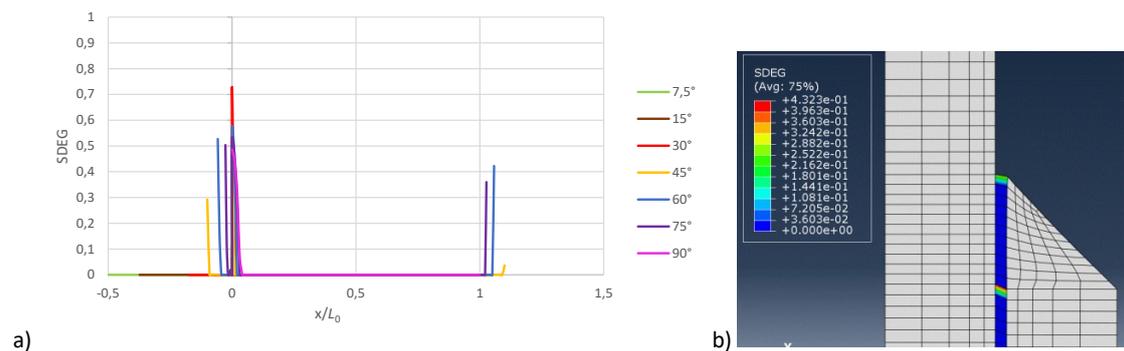


Figura 72 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função da variação do  $\theta$ , para SikaForce® 7752 e  $L_0=20$  mm. b) SDEG na JAT no momento de  $P_{m\acute{a}x}$  para 45°.

### 3.2.4.3.2 Estudo para $L_0=40$ mm

Neste subcapítulo é apresentados os resultados a nível da variável de dano (Figura 73, Figura 74 e Figura 75), para as JAT com  $L_0=40$  mm, e para os diferentes adesivos assim como diferentes filetes.

Observado as Figura 73, Figura 74 e a Figura 75 que refletem os resultados obtidos para  $L_0=40$  mm, é possível observar que são muito coerentes com o comportamento da JAT quando imposto uma sobreposição  $L_0=20$  mm. É possível identificar que os valores de SDEG são semelhantes entre adesivos assim como as zonas onde surgem os seus picos quando em comparação com dano onde  $L_0=20$  mm. A diferença mais notória será onde no  $x/L_0=1$ , visto que em todos os adesivos e houve uma redução significativa de dano, a dever-se essencialmente ao aumento de  $L_0$  e um conseqüente aumento área para distribuição de tenções. O mais notório é o adesivo Araldite® 2015 como é possível observar na Figura 73 a).

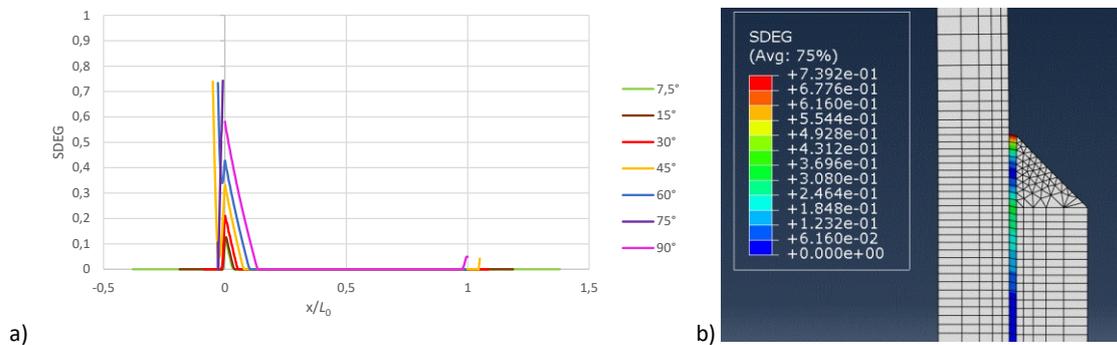


Figura 73 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® 2015 e  $L_0=40$  mm. b) SDEG na JAT no momento de  $P_{m\acute{a}x}$  para 45°.

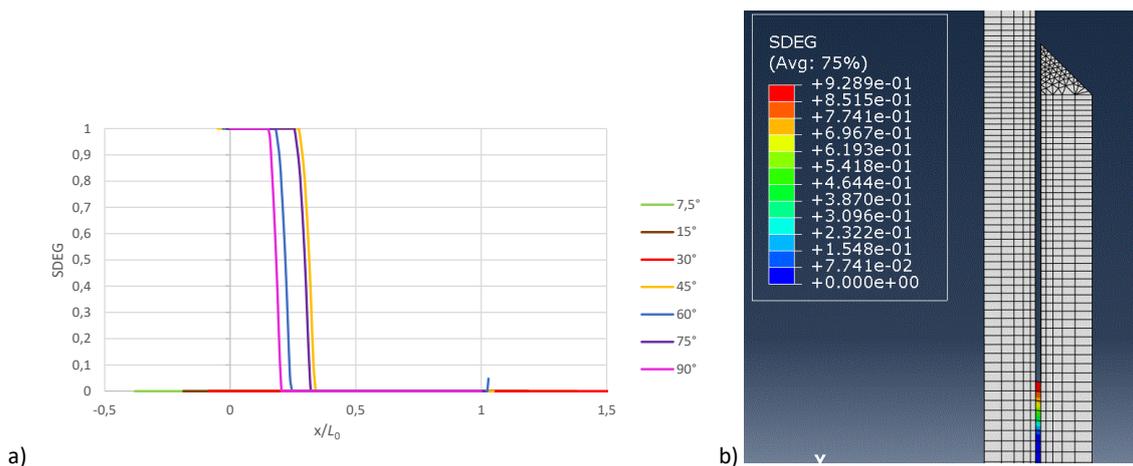


Figura 74 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em função da variação do  $\theta$ , para Araldite® AV138 e  $L_0=40$  mm. b) SDEG na JAT no momento de  $P_{m\acute{a}x}$  para 45°.

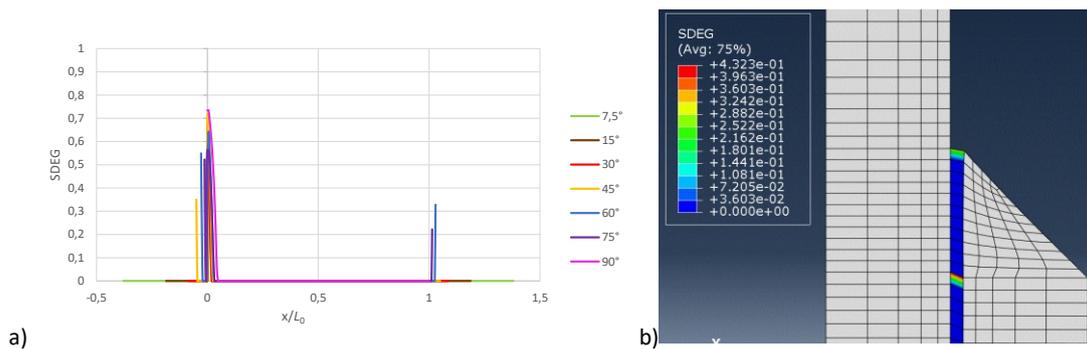


Figura 75 – a) Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{máx}$  em função da variação do  $\theta$ , para SikaForce® 7752 e  $L_0=40$  mm. b) SDEG na JAT no momento de  $P_{máx}$  para  $45^\circ$ .



# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

Esta dissertação tem como principal objetivo estudar a influência de alterações geométricas na resistência de uma JAT. São aplicados filetes de adesivo nas extremidades da ligação, em conjunto com  $L_0$  de 20 mm e 40 mm. São estudados três adesivos diferentes (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752). Para a realização do estudo são considerados MDC que permitem à posteriori fazer uma análise das tensões na camada de adesivo, uma previsão da resistência da JAT e observar a variável de dano.

Observando os resultados obtidos para as tensões de arrancamento é assim possível concluir que o Araldite® AV 138 é o adesivo que apresenta os valores mais elevados a este nível, o que se deverá ao facto de possuir maior rigidez. Nos pontos  $x/L_0=0$  e  $x/L_0=1$  é onde se concentram as tensões mais elevadas. Com o aumento de  $L_0$  o mesmo se regista, ou seja, o valor mais alto é referente ao Araldite® AV 138. No entanto é neste adesivo onde as alterações estudadas têm mais significado. A adição de filetes de adesivo ou o aumento de  $L_0$  são alterações geométricas mais vantajosas para adesivos que sejam rígidos e frágeis. Estas alterações permite o aumento da extensão da sobreposição e assim a distribuição mais uniforme de tensões. Para adesivos mais dúcteis como é o caso de Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, estas alterações tornam-se quase irrelevantes seja entre filetes de adesivos, ou seja, em diferentes comprimentos de  $L_0$  (20 mm ou 40 mm).

As tensões de corte mostram um comportamento muito similar às tensões de arrancamento. Prevalece a existência de dois picos de tensão situados nas extremidades do filete sendo mais proeminentes onde  $x/L_0=0$  e  $x/L_0=1$ . Mais uma vez o valor mais elevado é apresentado pelo Araldite® AV 138. Tal como aconteceu com as tensões  $\sigma_y/\tau_{avg}$ , as alterações geométricas têm um peso mais significativo no adesivo Araldite® AV 138, sendo este o que mais beneficia com aumento de  $L_0$  e com o aumento do tamanho do filete. O facto deste acontecimento resulta das mesmas razões apresentadas anteriormente.

A nível de resistência, as JAT com Araldite® AV 138 e com Araldite® 2015 são os que suportam o  $P_{m\acute{a}x}$  mais elevado tanto para  $L_0=20$  mm como  $L_0=40$  mm. Ainda nestes adesivos é possível referir que a adição do filete de adesivo é mais relevante nas juntas com  $L_0=20$  mm. Quando  $L_0=40$  mm a existência de filete deixa de ser relevante pois proporciona apenas um aumento de  $P_{m\acute{a}x}$  no máximo de 7,2% (no Araldite® AV 138 com  $\theta=7,5^\circ$ ) em relação à JAT sem filete. Por outro lado, o aumento de  $L_0$  já se traduz num aumento de resistência na casa dos 28% para Araldite® 2015 e de 14,7% para Araldite®

AV 138. Ainda no campo da resistência e considerando o adesivo SikaForce® 7752, a aplicação de filete, tanto para  $L_0=20$  mm como  $L_0=40$  mm, apresenta um aumento gradual, de ângulo para ângulo, atingindo o seu máximo  $\theta=7,5^\circ$ . Nestes ensaios será mais relevante enfatizar os resultados quando se compara os  $L_0$ , pois o  $L_0=40$  mm representa um aumento a rondar os 30% na resistência da JAT.

Considerando o estudo da variável de dano é possível verificar que os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentam dano no início de cada filete, o que deve se ao facto de serem adesivos dúcteis. Estes adesivos não apresentam rotura do adesivo no instante de  $P_{máx}$ . O Araldite® AV 138, sendo este um adesivo frágil mas de elevada resistência, apresenta no instante de  $P_{máx}$  o início da rotura do adesivo, pela extremidade do filete e propagando rapidamente até ao final da junta. Quando se compara os diferentes  $L_0$ , constata-se que o posicionamento dos picos de SDEG mantém-se assim como o valor. A alteração mais relevante é o facto de quando  $L_0=40$  mm os picos de SDEG em  $x/L_0=1$  são minimizados e quase anulados. Isto deve-se à redistribuição de tensões proporcionada pelo aumento da área de adesão.

Em suma, a colocação de filete na extremidade de  $L_0$  é benéfica para o aumento de resistência da JAT, pois permite uma distribuição mais uniforme de tensões. No entanto, para  $L_0$  elevados o filete perde a sua importância pois a resistência da junta é fornecida pelo aumento da área de sobreposição. A variação de  $\theta$  tem pouca influência na resistência. Para o adesivo SikaForce® 7752, o mais dúctil, é o aumento de  $L_0$  que têm mais significado no aumento de resistência. Um filete de baixo  $\theta$  pode ser difícil de produzir, assim como um com longo  $L_0$  e sem defeitos. Por isso é necessário encontrar um equilíbrio entre o  $\theta$  e o comprimento  $L_0$  e ainda considerar os seus métodos de produção assim como os custos dos mesmos.

Para trabalhos futuros apresentam-se as seguintes necessidades:

- Estudo de equilíbrio entre resistência da JAT e custo de fabrico de junta;
- Estudo da incorporação de filetes em outro tipo de geometrias em JAT e efeito na resistência;
- Estudo da aplicação de diferentes tipos adesivos em diferente zona da JAT, nomeadamente no filete de adesivo para averiguar possíveis aumentos de resistência.

# REFERÊNCIAS



## 5 REFERÊNCIAS

1. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto, Portugal: Publindústria.
2. Esmaeel, R.A. e F. Taheri, *Influence of adherend's delamination on the response of single lap and socket tubular adhesively bonded joints subjected to torsion*. *Composite Structures*, 2011. **93**(7): p. 1765-1774.
3. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. 2018, Tese de Mestrado. Instituto de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
4. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Cambridge, Inglaterra: Woodhead Publishing Limited.
5. Harris, J. e R. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International journal of adhesion and adhesives*, 1984. **4**(2): p. 65-78.
6. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova York, Estados Unidos da America: The McGraw-Hill Companies.
7. Licari, J.J. e D.W. Swanson, *Adhesives technology for electronic applications: materials, processing, reliability*. 2011, Nova York, Estados Unidos da America: William Andrew.
8. Paiva, R.M., E.A. Marques, L.F. da Silva, C.A. Antonio, e F. Arán-Ais, *Adhesives in the footwear industry*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2016. **230**(2): p. 357-374.
9. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlin, Alemanha: Springer Science & Business Media.
10. Vasconcelos Loureiro, A.M., S. Borschiver, e P.L.d.A. Coutinho, *Tendências Tecnológicas de Adesivos e Selantes aplicados na Construção Civil*. *Journal of technology management & innovation*, 2009. **4**: p. 115-129.
11. Upadhyaya, P. e S. Kumar, *Pull-out capacity of adhesive anchors: An analytical solution*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015. **60**: p. 54-62.
12. Weitzenböck, J.R., *1 - Introduction to using adhesives in marine and offshore engineering*, in *Adhesives in Marine Engineering*, J.R. Weitzenböck, Editor. 2012, Woodhead Publishing: Cambridge, Reino Unido. p. 1-16.
13. Katsiropoulos, C.V., A.N. Chamos, K.I. Tserpes, e S.G. Pantelakis, *Fracture toughness and shear behavior of composite bonded joints based on a novel aerospace adhesive*. *Composites Part B: Engineering*, 2012. **43**(2): p. 240-248.
14. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2014, Nova York, Estados Unidos da America: William Andrew.
15. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.

16. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
17. Quini, J.G. e G. Marinucci, *Polyurethane structural adhesives applied in automotive composite joints*. *Materials Research*, 2012. **15**(3): p. 434-439.
18. Hartshorn, S.R., *Structural adhesives: chemistry and technology*. 2012, Berlin, Alemanha: Springer Science & Business Media.
19. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Moraes, e A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2011, Porto, Portugal: Publindustria.
20. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonguerschnitten*. *Luftfahrtforschung* 15, 1938: p. 41-47.
21. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 1974. **9**(3): p. 185-196.
22. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1984. **4**(2): p. 65-78.
23. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. *Composites Science and Technology*, 2012. **72**(7): p. 788-791.
24. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, Londres, Inglaterra: Chapman & Hall.
25. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, 2007. **26**(2): p. 183-201.
26. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
27. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1959. **49**(2): p. 199-204.
28. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1968. **16**(5): p. 337-342.
29. 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.
30. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1991. **11**(4): p. 221-227.
31. 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.
32. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 1960. **8**(2): p. 100-104.
33. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004. **18**(1): p. 39-53.

34. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011, Berlin, Alemanha: Springer.
35. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, e S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2010. **47**(18–19): p. 2445-2458.
36. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
37. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
38. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. *International Journal of Fracture*, 2001. **110**(2): p. 175-187.
39. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2012. **26**(7): p. 939-953.
40. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. *International Journal of Fracture*, 1996. **77**(2): p. 111-140.
41. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
42. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. *International Journal of Solids and Structures*, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
43. 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.
44. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. *The Journal of Adhesion*, 2009. **85**(6): p. 351-376.
45. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. *International Journal of Fracture*, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
46. de Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques, e P. De Castro, *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.
47. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e 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.
48. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e 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.
49. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e 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.
50. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e 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.
51. Carlberger, T. e 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.
52. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
53. Zhu, Y., K.M. Liechti, e 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.
54. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
55. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
56. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
57. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *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.
58. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *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.
59. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
60. Gustafson, P.A. e 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.
61. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13–14): p. 2065-2077.
62. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, e 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.
63. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1–4): p. 547-555.
64. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, e I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.

65. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001, Berlin, Alemanha: Springer Berlin Heidelberg.
66. Raghavan, P. e S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. *Mechanics of Materials*, 2005. **37**(9): p. 955-979.
67. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, e S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2001. **15**(7): p. 763-781.
68. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, e M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2003. **17**(7): p. 981-994.
69. Shenoy, V., I.A. Ashcroft, G.W. Critchlow, e A.D. Crocombe, *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
70. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2008. **28**(6): p. 302-313.
71. Chen, Z., R.D. Adams, e L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
72. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Nova York, Estados Unidos da America: Wiley.
73. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **45**(5): p. 601-620.
74. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, 1999. **46**(1): p. 131-150.
75. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013, Vélizy-Villacoublay, França: Dassault Systèmes.
76. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. *Computational Materials Science*, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
77. Eusébio, S.M.L. e R.D.S.G. Campilho, *Modelling of tubular adhesively-bonded joints by the Extended Finite Element Method*. *Procedia Manufacturing*, 2019. **41**: p. 484-491.
78. Aimmanee, S., P. Hongpimolmas, e K. Ruangjirakit, *Simplified analytical model for adhesive-bonded tubular joints with isotropic and composite adherends subjected to tension*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2018. **86**: p. 59-72.
79. Barbosa, D.R., R. Campilho, R.J.B. Rocha, e L.R.F. Ferreira, *Experimental and numerical assessment of tensile loaded tubular adhesive joints*. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, 2018. **233**(3): p. 452-464.

80. Hahn, B., T.-E. Werner, e P. Haller, *Experimental and numerical investigations on adhesively bonded tubular connections for moulded wooden tubes*. Construction and Building Materials, 2019. **229**: p. 116829.
81. Kim, Y., Y. Chun, e S.S. Cheon, *Shear directional impact characteristics of adhesively bonded tubular joints*. Advanced Composite Materials, 2015. **24**(3): p. 287-295.
82. Zhang, J., H.-Y. Li, H. Li, e H. Jia, *Investigation on fatigue performance of adhesively bonded butt-joints and multi-axial life estimation using stress-based failure models*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2020. **107**: p. 102498.
83. Zarouchas, D. e R. Nijssen, *Mechanical behaviour of thick structural adhesives in wind turbine blades under multi-axial loading*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2016. **30**(13): p. 1413-1429.
84. Shang, X., E.A.S. Marques, J.J.M. Machado, R.J.C. Carbas, D. Jiang, e L.F.M. da Silva, *Review on techniques to improve the strength of adhesive joints with composite adherends*. Composites Part B: Engineering, 2019. **177**: p. 107363.
85. Jen, Y.-M., *Fatigue life evaluation of adhesively bonded scarf joints*. International Journal of Fatigue, 2012. **36**(1): p. 30-39.
86. Lavalette, N.P., O.K. Bergsma, D. Zarouchas, e R. Benedictus, *Influence of geometrical parameters on the strength of Hybrid CFRP-aluminium tubular adhesive joints*. Composite Structures, 2020. **240**: p. 112077.
87. Albiez, M., T. Vallée, H. Fricke, e T. Ummenhofer, *Adhesively bonded steel tubes — Part I: Experimental investigations*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2019. **90**: p. 199-210.
88. Zheng, G., C. Liu, X. Han, e W. Li, *Effect of spew fillet on adhesively bonded single lap joints with CFRP and aluminum-alloy immersed in distilled water*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2020. **99**: p. 102590.
89. Ejaz, H., A. Mubashar, I.A. Ashcroft, E. Uddin, e M. Khan, *Topology optimisation of adhesive joints using non-parametric methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **81**: p. 1-10.
90. You, M., Z.-M. Yan, X.-L. Zheng, H.-Z. Yu, e Z. Li, *A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(1): p. 71-76.
91. Golewski, P. e T. Sadowski, *Investigation of the effect of chamfer size on the behaviour of hybrid joints made by adhesive bonding and riveting*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**: p. 174-182.
92. Ferreira, L.R.F., R.D.S.G. Campilho, D.R. Barbosa, R.J.B. Rocha, e F.J.G. Silva, *Static strength improvement of tubular aluminium adhesive joints by the outer chamfering technique*. Procedia Manufacturing, 2019. **38**: p. 629-636.
93. Pinto, A.M.G., N.F.Q.R. Ribeiro, R.D.S.G. Campilho, e I.R. Mendes, *Effect of Adherend Recessing on the Tensile Strength of Single Lap Joints*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(8): p. 649-666.
94. Kanani, A.Y., X. Hou, e J. Ye, *The influence of notching and mixed-adhesives at the bonding area on the strength and stress distribution of dissimilar single-lap joints*. Composite Structures, 2020. **241**: p. 112136.

95. Boutar, Y., S. Naïmi, S. Mezlini, R.J.C. Carbas, L.F.M. da Silva, e M. Ben Sik Ali, *Fatigue resistance of an aluminium one-component polyurethane adhesive joint for the automotive industry: Effect of surface roughness and adhesive thickness*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2018. **83**: p. 143-152.
96. Xu, W. e Y. Wei, *Influence of adhesive thickness on local interface fracture and overall strength of metallic adhesive bonding structures*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **40**: p. 158-167.
97. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, e R.D.S.G. Campilho, *The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(5): p. 331-346.
98. Han, X., A.D. Crocombe, S.N.R. Anwar, P. Hu, e W.D. Li, *The Effect of a Hot–Wet Environment on Adhesively Bonded Joints Under a Sustained Load*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(5-6): p. 420-436.
99. Campilho, R.D., M.D. Banea, A.M. Pinto, L.F. da Silva, e A. De Jesus, *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
100. Nunes, S.L.S., R.D.S.G. Campilho, F.J.G. da Silva, C.C.R.G. de Sousa, T.A.B. Fernandes, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Comparative Failure Assessment of Single and Double Lap Joints with Varying Adhesive Systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.