

Estudo paramétrico numérico de juntas tubulares com chanfro sujeitas a esforços de tração

JOSÉ EDUARDO SANTOS MAIA DA SILVA
dezembro de 2021

ESTUDO PARAMÉTRICO NUMÉRICO DE JUNTAS TUBULARES COM CHANFRO SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

José Eduardo Santos Maia da Silva

1110540

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO PARAMÉTRICO NUMÉRICO DE JUNTAS TUBULARES COM CHANFRO SUJEITAS A ESFORÇOS DE TRAÇÃO

José Eduardo Santos Maia da Silva

1110540

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

2021

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Jorge Américo de Oliveira Pinto Belinha

Professor Adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Investigador, FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador Professor Doutor Duarte Salgueiro Gomes Campilho pelo apoio e disponibilidade que me prestou ao longo da realização desta dissertação.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP), pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho e por todos os ensinamentos transmitidos ao longo da licenciatura e mestrado.

À minha família e amigos, em especial à minha namorada Nakita Santos, pela motivação e apoio incondicional que fizeram com que fosse possível retomar o curso e concluir a dissertação.

PALAVRAS-CHAVE

Ligações adesivas, Juntas adesivas tubulares, Juntas *scarf*, Método de Elementos finitos, Modelos de dano coesivo.

RESUMO

A utilização de ligações adesivas tem vindo a crescer em diversas indústrias e estas contam com inúmeras aplicações devido à sua enorme potencialidade na ligação de materiais. Estas permitem uma boa adaptação na união de superfícies irregulares e são capazes de unir diferentes materiais sem danificar a sua estrutura. Para além destas vantagens, as ligações adesivas permitem também a redução de peso e aumento da resistência estática das estruturas e, quando sujeitas a cargas cíclicas, apresentam uma boa resistência. A junta tubular com chanfro é uma das muitas configurações de junta possíveis e viáveis para diversas aplicações. Este tipo de ligação apresenta vantagens no que concerne à distribuição de tensões mais uniforme, quando comparada com juntas de sobreposição. Por outro lado, a sua execução é complexa, uma vez que exige a maquinação do chanfro. Existe no mercado uma panóplia de adesivos de diferentes propriedades, desde adesivos resistentes e frágeis como o Araldite® AV138, os de resistência e ductilidade média como o Araldite® 2015 e ainda aqueles de elevada ductilidade e resistência moderada como o Sikaforce® 7752.

Este trabalho teve como objetivo comparar o desempenho à tração dos três adesivos supracitados em juntas tubulares com chanfro (JTC) de alumínio (AW6082-T651), considerando a variação do ângulo de chanfro (α) desde 45° a 3,43°. Primeiramente, através da comparação de ensaios experimentais e análises numéricas de juntas de sobreposição tubulares (JST) com os mesmos adesivos, foi validada a técnica numérica e respetivos parâmetros coesivos. Foi então realizada a análise numérica de modelos de dano coesivo (MDC) nas JTC para analisar as tensões de arrancamento (σ_y) e as tensões de corte (τ_{xy}) na camada de adesivo. Foi também realizada a análise de resistência das juntas, bem como o estudo da energia dissipada para os diferentes adesivos.

Verificou-se que as JTC proporcionam uma distribuição de tensões τ_{xy} bastante uniforme ao longo do comprimento de sobreposição, sendo perceptível um ligeiro aumento nas suas extremidades especialmente nos adesivos de menor ductilidade. Verificou-se também, a partir da distribuição de tensões σ_y , que existem picos mais evidentes nas extremidades do comprimento de sobreposição que vão diminuindo para valores de α menores. A diminuição de α provoca um aumento considerável da resistência das juntas, sendo o adesivo Araldite® AV138 aquele que obteve resistência mais elevada.

KEYWORDS

Adhesive joints, Tubular adhesive joints, Scarf joints, Finite element method, Cohesive zone models.

ABSTRACT

The use of adhesive joints has been growing in several industries and these have numerous applications due to their enormous potential for bonding materials. These allow a good adaptation when joining uneven surfaces and are capable of joining different materials without damaging their structure. In addition to these advantages, adhesive joints also enable the weight reduction and an increase in the static strength of the structures and, when subjected to cyclic loads, they have good strength. The scarf tubular joint is one of many possible and viable joint configurations for various applications. This type of joint has advantages in terms of a more uniform stress distribution when compared to overlap joints. On the other hand, its execution is complex, since it requires the machining of the scarf. There is a range of adhesives on the market with different properties, from strong and fragile brittle such as the Araldite® AV138, those with medium strength and ductility such as the Araldite® 2015 and even those with high ductility and moderate strength such as the Sikaforce® 7752.

This study aimed to compare the tensile performance of the three above mentioned adhesives in tubular scarf joints (TSJ) with aluminium (AW6082-T651), considering the variation of the scarf angle (α) from 45° to 3.43° . Firstly, through the comparison of experimental tests and numerical analysis of tubular overlap joints (TOJ) with the same adhesives, the numerical technique and respective cohesive parameters were validated. A numerical analysis by cohesive zone models (CZM) was then performed on the TSJ to analyse peel stresses (σ_y) and shear stresses (τ_{xy}) in the adhesive layer. The joint strength analysis was also carried out, as well as the study of the dissipated energy for the different adhesives and mentioned conditions.

It was found that the TSJ provide a fairly uniform τ_{xy} stress distribution along the overlap length, with a slight increase in its edges being noticeable, especially in less ductility adhesives. It was also verified, from the distribution of σ_y stresses, that there are more evident peaks at the ends of the overlap length that decrease to smaller values of α . The decrease in α causes a considerable increase in the strength of the joints, with the Araldite® AV138 being the one with the highest strength.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

| | |
|------|---|
| 2D | Bidimensional |
| 3D | Tridimensional |
| CET | Coefficiente de expansão térmica |
| DCB | <i>Double-Cantilever Beam</i> |
| EF | Elementos finitos |
| ENF | <i>End-Notched Flexure</i> |
| FRP | Plástico reforçado com fibras |
| ISEP | Instituto Superior de Engenharia do Porto |
| JSS | Junta de sobreposição simples |
| JST | Junta de sobreposição tubular |
| JTC | Junta tubular com chanfro |
| MDC | Modelos de dano coesivo |
| MEF | Método de elementos finitos |
| MEFX | Método de elementos finitos extendido |
| PCI | Placa de circuitos integrados |
| PEEQ | Deformação plástica equivalente |
| SDEG | Extensão de dano no adesivo |
| TAST | <i>Thick Adherend Shear Test</i> |

 Lista de Unidades

| | |
|-----|-----------------|
| ° | Graus |
| °C | Grau Celsius |
| °F | Grau Fahrenheit |
| GPa | Gigapascal |
| kN | Quilonewton |
| kPa | Quilopascal |
| mm | Milímetro |
| MPa | Megapascal |
| N | Newton |

Lista de Símbolos

| | |
|--------------------|---|
| c | Metade do comprimento da junta tubular com chanfro |
| d_{SE} | Diâmetro externo do tubo externo |
| d_{SI} | Diâmetro externo do tubo interno |
| E | Módulo de elasticidade longitudinal/Módulo de Young |
| F_z / N | Força axial |
| G | Módulo de elasticidade transversal |
| G_c | Tenacidade |
| G_I / G_{IC} | Taxa de libertação de energia de tração / Tenacidade à tração |
| G_{II} / G_{IIC} | Taxa de libertação de energia de corte/ Tenacidade ao corte |
| $l_A / L / L_0$ | Comprimento de sobreposição |

| | |
|-------------------|---|
| l_{ASi} | Comprimento do chanfro de adesivo no tubo interior |
| l_{ASo} | Comprimento do chanfro de adesivo no tubo exterior |
| L_s | Comprimento dos substratos |
| l_{si} | Comprimento do tubo interior |
| l_{so} | Comprimento do tubo exterior |
| L_T | Comprimento total da junta tubular |
| N_1 | Força de tensão numa porção infinitesimal no eixo x no aderente 1 |
| N_2 | Força de tensão numa porção infinitesimal no eixo x no aderente 2 |
| P | Força aplicada |
| $P_{máx}$ | Força máxima aplicada |
| $P_{máx}$ | Força máxima aplicada |
| r, x, θ | Coordenadas cilíndricas |
| r_0 | Raio externo do tubo |
| r_i | Raio interno do tubo |
| t_A | Espessura de adesivo |
| t_{n0} | Tensão normal máxima |
| t_{s0} | Tensão de corte máxima |
| t_{Si} | Espessura do tubo interior |
| t_{So} / t_{SE} | Espessura do tubo exterior |
| y_f | Deformação de rotura ao corte |
| α | Ângulo de chanfro na extremidade do substrato |
| α_{Si} | Ângulo de chanfro na extremidade do substrato interior |

| | |
|--------------------------|---|
| α_{so} | Ângulo de chanfro na extremidade do substrato exterior |
| β | Ângulo de separação |
| γ_f | Deformação de rotura ao corte |
| δ | Deslocamento |
| $\Delta P_{m\acute{a}x}$ | Aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ relativamente a $\alpha=45^\circ$ |
| ΔT | Deferencial de temperatura |
| ϵ_f | Deformação de rotura à tração |
| ν | Coefficiente de Poisson |
| σ_a | Tensão normal |
| σ_f | Tensão de rotura à tração |
| σ_x | Tensão normal na direção x' (S11) |
| σ_y | Tensão normal na direção y / Tensão de cedência à tração |
| $\sigma_{y'}$ | Tensão normal na direção y' (S22) |
| τ_a | Tensão de corte |
| τ_{avg} | Tensão de corte média |
| τ_f | Tensão de rotura ao corte |
| $\tau_{x'y'}$ | Tensão de corte no referencial $x'y'$ (S12) |
| τ_{xy} | Tensão de corte no referencial xy |
| τ_y | Tensão de cedência ao corte |
| ϕ | Ângulos de empilhamento |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1 - Distribuição de tensões em juntas adesivas e aparafusadas/rebitadas [9]..... | 10 |
| Figura 2 - Aplicação de ligações adesivas na fuselagem, asas e cauda do SAAB 340 [9]..... | 12 |
| Figura 3 - Diferentes locais de aplicação de adesivos em veículos modernos: a) adesivos utilizados na união de partes da carroçaria [13]; b) adesivos para ligação vidros e acabamentos externos [14]..... | 13 |
| Figura 4 - a) Reparação de fissuras em betão através da injeção de resina epóxida; b) reforço de vigas e pilares de um edifício com placas de aço [18] | 14 |
| Figura 5 - Esquema das diversas aplicações de adesivos estruturais num barco em polímero reforçado com fibra de vidro [5] | 15 |
| Figura 6 - Utilização de um adesivo para ligar componentes eletrónicos em PCI [21] | 16 |
| Figura 7 - Tipos de esforços em juntas adesivas: (a) compressão, (b) tração, (c) corte, (d) arrancamento e (e) clivagem [24] | 17 |
| Figura 8 - Diferença de distribuição de tensões causada pela não colinearidade de carga aplicada (adaptado de [6]) | 18 |
| Figura 9 - Distribuição de tensões numa junta sujeita a esforços de tração/compressão [25] | 18 |
| Figura 10 - Distribuição de tensões de corte numa JSS sujeita a esforço de tração, segundo o modelo analítico de Volkersen [26] | 19 |
| Figura 11 - Efeito do comprimento e da largura de sobreposição [25]..... | 19 |
| Figura 12 - Distribuição de tensões e ângulos de separação em juntas sujeitas a esforços de a) clivagem b) e arrancamento (adaptado de [25]) | 20 |
| Figura 13 - Tensões de arrancamento numa JSS [26]..... | 20 |
| Figura 14 - Modos de rotura em juntas adesivas [26]..... | 21 |
| Figura 15 - Tipos de juntas mais comuns utilizadas em engenharia (adaptado de [31]) | 22 |
| Figura 16 - Configurações de juntas de sobreposição [24]..... | 23 |
| Figura 17 - Configurações de juntas topo a topo [11] | 24 |

| | |
|--|----|
| Figura 18 - Configurações de juntas em T [24] | 24 |
| Figura 19 - Configurações de juntas de canto [24] | 25 |
| Figura 20 - Configurações de juntas com tira de reforço (adaptado de [32]) | 26 |
| Figura 21 - Junta tubular com as extremidades dos substratos: a) sem a presença de chanfro; b) com a presença de chanfro [9] | 26 |
| Figura 22 - Juntas cilíndricas em tubos (adaptado de [9]) | 26 |
| Figura 23 - Juntas cilíndricas em varões/veios (adaptado de [9]) | 27 |
| Figura 24 - Representação de defeitos que poderão existir numa junta adesiva (adaptado de [9]) | 27 |
| Figura 25 - Efeito de <i>Poisson</i> tridimensional numa JSS [36] | 28 |
| Figura 26 - Modos de rotura [53] | 31 |
| Figura 27 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e aproximação contínua (b) (adaptado de [47]) | 32 |
| Figura 28 - Modelo coesivo triangular [66] | 33 |
| Figura 29 - Geometria da: a) JST; b) JTC [34] | 36 |
| Figura 30 - Elementos infinitesimais em tensão numa JTC [83] | 36 |
| Figura 31 - Modelo de EF da JTC [83] | 37 |
| Figura 32 - Modelo axisimétrico 2D de EF da junta adesiva tubular [78] | 37 |
| Figura 33 - Propriedades à tração do adesivo com diferentes frações volúmicas de partículas de alumínio a temperaturas ambiente distintas: (a) módulo de elasticidade longitudinal (b) tensão de rotura [84] | 38 |
| Figura 34 - Módulo de elasticidade do <i>adesivo epóxico</i> com partículas de alumínio: (a) valores obtidos pela equação de Chamis e Sinclair e (b) função obtida pela nova equação [84] | 39 |
| Figura 35 - Comportamento plástico de dois comprimentos de sobreposição diferentes, L, resultantes do teste de torção estático [80] | 39 |
| Figura 36 - Configuração da junta tubular de sobreposição [87] | 40 |
| Figura 37 - Distribuição de tensões térmicas residuais para vários ângulos de empilhamento (ϕ) ($\Delta T=60^\circ\text{C}$): (a) tensões tangenciais, (b) tensões radiais, (c) tensões axiais, e (d) tensões de corte [87] | 41 |

| | |
|--|----|
| Figura 38 - Configuração da geometria da JST de validação [5] | 45 |
| Figura 39 - Configuração da geometria JTC para análise numérica..... | 46 |
| Figura 40 - Curvas tensão-deformação (σ - ε) da liga de alumínio AW6082-T651 [3] | 46 |
| Figura 41 – Curvas σ - ε dos adesivos (a) Araldite®, (b) AV138, Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752 Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade [92-94] .48 | |
| Figura 42 - MDC triangular [93] | 49 |
| Figura 43 – Diferentes partições existentes no modelo ciado no Abaqus®: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC $\alpha=30^\circ$ | 52 |
| Figura 44 - Desenho 2D no Abaqus® de: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$ | 53 |
| Figura 45 - Definição das propriedades dos materiais e atribuição dos mesmos às respetivas partições.54 | |
| Figura 46 - Definição de incrementos para análise do Abaqus® | 55 |
| Figura 47 – Representação das condições fronteira impostas nos modelos: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$ | 55 |
| Figura 48 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição da: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$ | 56 |
| Figura 49 - Janela de monitoramento da simulação no Abaqus® | 56 |
| Figura 50 - Aspeto da distribuição de tensões após simulação no Abaqus®: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$ | 57 |
| Figura 51 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [5] | 57 |
| Figura 52 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [5] | 58 |
| Figura 53 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [5] | 58 |
| Figura 54 - Variação de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [5]..... | 60 |
| Figura 55 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [5]..... | 61 |

| | |
|---|----|
| Figura 56 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [5]..... | 62 |
| Figura 57 – 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 [5] | 63 |
| Figura 58 – 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 [5]..... | 63 |
| Figura 59 – 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 [5] | 63 |
| Figura 60 - $P_{\text{máx}}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [5]..... | 65 |
| Figura 61 - Exemplo de malha após refinamento e <i>path</i> definido para obtenção das tensões no Abaqus® | 66 |
| Figura 62 - Extração de valores de tensão no Abaqus®..... | 67 |
| Figura 63 - Referenciais da JTC | 67 |
| Figura 64 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$ | 68 |
| Figura 65 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=45^\circ$ | 68 |
| Figura 66 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® AV138..... | 69 |
| Figura 67 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® 2015 | 70 |
| Figura 68 - Distribuição das tensões $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação de α para o adesivo SikaForce® 7752 | 70 |
| Figura 69 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$ | 72 |
| Figura 70 – Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=45^\circ$ | 73 |
| Figura 71 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® AV138..... | 73 |
| Figura 72 - Distribuição das tensões $\tau_{xy}/\tau_{\text{avg}}$ nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® 2015 | 74 |

| | |
|--|----|
| Figura 73 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas JTC em função da variação de α para o adesivo Sikaforce® 7752 | 74 |
| Figura 74 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima ao longo de x/L_0 para o adesivo Araldite® AV138 em juntas com diferentes α | 76 |
| Figura 75 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima ao longo de x/L_0 para o adesivo Araldite® 2015 em juntas com diferentes α | 77 |
| Figura 76 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima ao longo de x/L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752 em juntas com diferentes α | 77 |
| Figura 77 - Curvas P - δ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$... | 79 |
| Figura 78 - Curvas P - δ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação do adesivo para $\alpha=45^\circ$ | 79 |
| Figura 79 - Curvas P - δ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação de α , para o adesivo Araldite® AV138 | 80 |
| Figura 80 - Curvas P - δ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação de α , para o adesivo Araldite® 2015 | 80 |
| Figura 81 - Curvas P - δ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação de α , para o adesivo Sikaforce® 7752 | 81 |
| Figura 82 – Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α , para os três adesivos | 83 |
| Figura 83 - Evolução de $\delta P_{m\acute{a}x}$ em função de α , para os três adesivos | 84 |
| Figura 84 – Visualização gráfica da PEEQ em JTC com $\alpha=3,43^\circ$, com os adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752 | 85 |
| Figura 85 - Visualização gráfica da PEEQ em JTC com $\alpha=45^\circ$ | 86 |
| Figura 86 - Visualização gráfica do SDEG em JTC com $\alpha=45^\circ$, com os adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752 | 86 |
| Figura 87 - Evolução da energia dissipada em função de α , para os três adesivos | 88 |

ÍNDICE DE TABELAS

| | |
|--|-----|
| Tabela 1 - Vantagens e desvantagens na utilização de adesivos (adaptado de [6])..... | 11 |
| Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 [92-94] | 47 |
| Tabela 3 - Parâmetros coesivos em tração e corte para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 [77] [105] [94] | 51 |
| Tabela 4 - $P_{\text{máx}}^{\text{Méd}}$ (em N) e aumento percentual do mesmo ($\Delta P_{\text{máx}}$ [%]) em função de L_0 para os três adesivos em estudo, para as juntas adesivas tubulares [5] | 59 |
| Tabela 5 - Valores máximos de $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ para os três adesivos, em função de α | 71 |
| Tabela 6 - Valores médios de $\sigma_y/\tau_{\text{avg}}$ para os três adesivos, em função de α | 71 |
| Tabela 7 - Valores máximos de $\tau_{xy}/\tau_{\text{avg}}$ para os três adesivos, em função de α | 75 |
| Tabela 8 - Valores de $P_{\text{máx}}$ [kN] para os três adesivos em função de α , e respetivo $\Delta P_{\text{máx}}$ | 82 |
| Tabela 9 - Valores de $\delta P_{\text{máx}}$ [mm] para os três adesivos em função de α , e respetivo $\Delta\delta$ | 84 |
| Tabela 10 - Modos de rotura das JTC dos adesivos em estudo, em função de α | 85 |
| Tabela 11 - Valores de energia dissipada [J] para os três adesivos, em função de α | 87 |
| Tabela 12 - Resumo de considerações mais significativas nas teorias de modelos analíticos de diversos autores [5] | 108 |

ÍNDICE

| | | |
|---------|---|----|
| 1 | INTRODUÇÃO | 3 |
| 1.1 | Contextualização | 3 |
| 1.2 | Objetivos | 4 |
| 1.3 | Estrutura do relatório..... | 4 |
| 2 | REVISÃO BIBLIOGRÁFICA..... | 9 |
| 2.1 | Tipos de ligações existentes | 9 |
| 2.1.1 | Ligações soldadas | 9 |
| 2.1.2 | Ligações aparafusadas e rebitadas..... | 10 |
| 2.1.3 | Ligações adesivas..... | 10 |
| 2.2 | Ligações adesivas | 11 |
| 2.2.1 | Caracterização das juntas adesivas | 11 |
| 2.2.2 | Aplicações comuns das juntas adesivas | 12 |
| 2.2.2.1 | Indústria aeronáutica..... | 12 |
| 2.2.2.2 | Indústria automóvel..... | 13 |
| 2.2.2.3 | Construção civil..... | 13 |
| 2.2.2.4 | Indústria naval | 14 |
| 2.2.2.5 | Indústria eletrónica..... | 15 |
| 2.2.2.6 | Indústria do calçado..... | 16 |
| 2.2.3 | Tipos de esforços em juntas adesivas | 17 |
| 2.2.3.1 | Tração | 17 |

| | | |
|---------|--|----|
| 2.2.3.2 | Compressão | 18 |
| 2.2.3.3 | Corte | 19 |
| 2.2.3.4 | Clivagem e arrancamento | 20 |
| 2.2.4 | Modos de rotura em juntas adesivas | 21 |
| 2.2.4.1 | Rotura adesiva | 21 |
| 2.2.4.2 | Rotura coesiva | 21 |
| 2.2.4.3 | Rotura pelo substrato | 22 |
| 2.2.4.4 | Rotura mista | 22 |
| 2.2.5 | Configurações possíveis de junta | 22 |
| 2.2.5.1 | Juntas de sobreposição | 23 |
| 2.2.5.2 | Juntas topo a topo – Butt joint | 23 |
| 2.2.5.3 | Juntas em T | 24 |
| 2.2.5.4 | Juntas de canto | 25 |
| 2.2.5.5 | Juntas com tira | 25 |
| 2.2.5.6 | Juntas cilíndricas | 26 |
| 2.2.6 | Juntas adesivas com defeitos | 27 |
| 2.3 | Previsão de resistência de juntas adesivas | 28 |
| 2.3.1 | Modelos analíticos | 28 |
| 2.3.2 | Métodos numéricos | 29 |
| 2.3.2.1 | Mecânica dos meios contínuos | 30 |
| 2.3.2.2 | Mecânica da fratura | 30 |
| 2.3.2.3 | Modelos de dano coesivo | 32 |
| 2.3.2.4 | Mecânica do dano | 34 |
| 2.3.2.5 | Método de Elementos Finitos Extendido | 34 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 2.4 | Juntas adesivas tubulares | 35 |
| 2.4.1 | Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração..... | 36 |
| 2.4.2 | Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção..... | 39 |
| 2.4.3 | Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga | 41 |
| 3 | DESENVOLVIMENTO | 45 |
| 3.1 | Metodologia..... | 45 |
| 3.1.1 | Geometrias | 45 |
| 3.1.1.1 | Geometria da validação experimental..... | 45 |
| 3.1.1.2 | Geometria do trabalho numérico | 46 |
| 3.1.2 | Materiais | 46 |
| 3.1.2.1 | Substratos | 46 |
| 3.1.2.2 | Adesivos..... | 46 |
| 3.1.2.2.1 | Araldite® AV138 | 47 |
| 3.1.2.2.2 | Araldite® 2015..... | 47 |
| 3.1.2.2.3 | Sikaforce® 7752..... | 47 |
| 3.1.3 | Modelo de dano coesivo triangular..... | 48 |
| 3.1.4 | Determinação das propriedades coesivas..... | 50 |
| 3.1.4.1.1 | Araldite® AV138 | 50 |
| 3.1.4.1.2 | Araldite® 2015..... | 50 |
| 3.1.4.1.3 | SikaForce® 7752 | 51 |
| 3.1.5 | Condições de análise numérica..... | 51 |
| 3.1.5.1 | 1º Passo – Part | 52 |
| 3.1.5.2 | 2º Passo – Property..... | 53 |

| | | |
|-----------|---|----|
| 3.1.5.3 | 3º Passo – Assembly | 54 |
| 3.1.5.4 | 4º Passo – Step | 54 |
| 3.1.5.5 | 5º Passo – Load | 55 |
| 3.1.5.6 | 6º Passo – Mesh..... | 55 |
| 3.1.5.7 | 7º Passo – Job | 56 |
| 3.1.5.8 | 8º Passo – Visualization | 56 |
| 3.2 | Validação experimental..... | 57 |
| 3.2.1 | Resultados experimentais obtidos | 57 |
| 3.2.1.1.1 | Araldite® AV138 | 57 |
| 3.2.1.1.2 | Araldite® 2015..... | 58 |
| 3.2.1.1.3 | SikaForce® 7752 | 58 |
| 3.2.2 | Comparação de resultados..... | 59 |
| 3.2.3 | Análise de tensões nas juntas | 60 |
| 3.2.3.1 | Tensões de arrancamento | 60 |
| 3.2.3.2 | Tensões de corte..... | 61 |
| 3.2.4 | Previsão da resistência por MDC..... | 62 |
| 3.2.5 | Discussão dos resultados obtidos..... | 64 |
| 3.2.6 | Validação dos resultados obtidos pelo MDC a partir dos resultados experimentais | 64 |
| 3.3 | Trabalho numérico | 65 |
| 3.3.1 | Análise de tensões na junta..... | 66 |
| 3.3.1.1 | Tensões de arrancamento | 68 |
| 3.3.1.2 | Tensões de corte..... | 72 |
| 3.3.2 | Estudo da variável de dano | 76 |
| 3.3.3 | Previsão da resistência | 78 |

| | | |
|---------|---|-----|
| 3.3.3.1 | Comparação de resultados | 81 |
| 3.3.3.2 | Deslocamentos até à rotura | 83 |
| 3.3.3.3 | Modos de rotura..... | 85 |
| 3.3.4 | Previsão da energia dissipada | 87 |
| 3.3.5 | Análise dos resultados obtidos..... | 88 |
| 4 | CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS | 93 |
| 5 | BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO..... | 97 |
| 6 | ANEXOS..... | 108 |
| 6.1 | Anexo 1..... | 108 |

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

O mercado cada vez mais competitivo a nível mundial impõe a criação de novos produtos a preços reduzidos, mas de alta qualidade, exigindo assim uma grande precisão no seu dimensionamento. A utilização de juntas adesivas está em franco crescimento em diversas indústrias devido a vários fatores, tais como a capacidade de unir materiais com superfícies irregulares e o elevado desempenho das juntas quando sujeitas a cargas cíclicas. Em contrapartida as juntas adesivas têm uma fraca resistência ao arrancamento e não são desmontáveis. Na maioria dos casos as juntas adesivas são de fácil execução, no entanto, em certos casos são necessárias elevadas temperaturas e pressões para levar a cabo a cura do adesivo [1].

A par da crescente utilização das juntas adesivas na indústria, a comunidade científica que estuda este tema está também ela em franca expansão e encontram-se diversas aplicações tanto em indústrias ponta como em indústrias mais tradicionais. Na maioria das aplicações, as juntas adesivas são planares, tais como em painéis metálicos e polímeros. Utilização de adesivos especificamente em juntas tubulares pode também trazer benefícios, como redução do peso das estruturas, distribuição de tensões mais uniforme, preservação do material dos aderentes e a possibilidade de ligar materiais dissimilares [2].

Juntas adesivas tubulares são atrativas para muitas aplicações, pois oferecem uma vedação inerente e não exigem necessariamente geometrias complexas nas extremidades dos tubos, tais como roscas ou configurações de chanfro [3]. Uma vez que o peso das juntas adesiva é um fator cada vez mais importante, torna-se imperativo projetar juntas com o melhor compromisso entre peso e resistência. Por isso, para além adesivos e aderentes da junta, aspetos dimensionais serão decisivos para a sua resistência, como a largura e comprimento, espessura do adesivo e substratos e inclinação do chanfro [2].

A crescente utilização de juntas adesivas na indústria combinada com o seu comportamento particular, obrigam ao desenvolvimento de ferramentas que possibilitem um projeto rápido e eficaz. O método de EF (elementos finitos) é cada vez mais utilizado para dimensionamento de juntas adesivas que combinado com critérios de dano evidencia-se com uma ferramenta bastante assertiva [4].

1.2 Objetivos

Os objetivos propostos no âmbito do estudo paramétrico numérico de juntas tubulares com chanfro sujeitas a esforços de tração são:

- Descrição de conceitos teóricos importantes para o desenvolvimento do presente trabalho, caracterizando as juntas adesivas, os modelos de previsão de resistência e os esforços em juntas adesivas tubulares;
- Validar dados experimentais de juntas tubulares com os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, cujos dados foram obtidos de trabalhos anteriores [5];
- Elaborar análises numéricas por MDC no Abaqus® dos modelos de juntas tubulares com ângulos *scarf* de 45°, 30°, 20°, 15°, 10° e 3,43°, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752;
- Estudar as distribuições de tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) na camada adesiva, para avaliar e compreender a influência das tensões no processo de rotura das juntas;
- Estudar a evolução do dano nos elementos coesivos da camada de adesivo das JTC;
- Analisar a previsão da resistência das JTC, através das curvas $P-\delta$ obtidas a partir dos estudos numéricos por MDC;
- Análise dos deslocamentos e modos de rotura das JTC, obtidos a partir dos estudos numéricos por MDC;
- Analisar a previsão de energia dissipada das JTC quando sujeitas a esforços de tração, até estas atingirem $P_{m\acute{a}x}$.

1.3 Estrutura do relatório

Para uma melhor compreensão do trabalho desenvolvido, este relatório foi dividido em 4 subcapítulos distintos.

No **capítulo 1** é feito o enquadramento do trabalho, definidos os objetivos e apresentada a estrutura do relatório.

O **capítulo 2** diz respeito à revisão bibliográfica propriamente dita e está dividido em 4 subcapítulos:

- No subcapítulo 2.1 são apresentados os principais tipos de ligações existentes;
- O subcapítulo 2.2 aborda variados temas relacionados com juntas adesivas, tais como as suas aplicações na indústria, os tipos de esforços e modos de rotura em juntas adesivas, bem como as possíveis configurações de juntas adesivas;

- No subcapítulo 2.3 são apresentados os principais métodos de previsão de resistência de juntas adesivas;
- O subcapítulo 2.4 diz respeito a juntas adesivas tubulares, sendo o principal foco os esforços de tração, torção e fadiga.

O **capítulo 3** é diz respeito ao desenvolvimento do trabalho numérico propriamente dito. Este capítulo está dividido em 3 subcapítulos:

- O subcapítulo 3.1 diz respeito à metodologia adotada tanto na validação experimental como no trabalho numérico;
- No subcapítulo 3.2 são analisados e validados os dados experimentais de um trabalho anterior [5], que servirão como base para o trabalho numérico desenvolvido;
- No subcapítulo 3.3 procede-se estudo paramétrico de JTC sujeitas a esforços de tração.

No **capítulo 4** são apresentadas as principais conclusões sobre este trabalho e propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Este capítulo começa por apresentar o tipo de ligações existentes, dando ênfase às vantagens e desvantagens das ligações adesivas quando comparadas com outros tipos de ligações. Seguidamente as ligações adesivas são caracterizadas de uma forma mais profunda, abordando temas como os tipos de esforços, tipos de juntas e modos de rotura das mesmas. Para otimizar o projeto de uma junta adesiva é necessário realizar uma correta avaliação quanto ao seu comportamento durante a aplicação de esforços. Como tal, os métodos analíticos e numéricos de previsão de juntas serão também abordados neste capítulo. Na parte final do capítulo dá-se ênfase às ligações adesivas tubulares, uma vez que é sobre este tipo de juntas que o trabalho de desenvolvimento se vai focar. Aqui é apresentado o estado de arte respetivo aos diferentes tipos de esforços a que este tipo de junta pode ser sujeito.

2.1 Tipos de ligações existentes

Na construção de qualquer estrutura existe a necessidade de unir os componentes com técnicas que garantam uma resistência satisfatória quando esta for sujeita a esforços/carregamentos. Geralmente, as zonas mais críticas das estruturas são as juntas. Como tal, é necessário um método construtivo que garanta que estas sejam seguras e não comprometam a integridade da estrutura. Normalmente, a escolha de um método de ligação não é expedita. Certos processos possuem vantagens e desvantagens em certas aplicações, e a sua seleção implica uma série de ponderações no que respeita ao seu desempenho, capacidade de produção, custo e fiabilidade. Pode ser usada uma série de métodos de ligação para obter a ligação pretendida, tais como as ligações adesivas, soldadura, brasagem e fixações mecânicas [6].

2.1.1 Ligações soldadas

As ligações soldadas são fortemente utilizadas na construção metalomecânica, naval, ferroviária e na construção civil. A soldadura por fusão é um dos processos mais seguros e mais comumente utilizados. No entanto, devido aos fenómenos metalúrgicos que se desenvolvem num curto espaço de tempo, o processo torna-se complexo, sendo necessário um controlo apertado de todas as variáveis envolvidas na sua realização. A soldadura é um processo que tem custo-benefício bastante atrativo, para além de ser um processo de extrema versatilidade que permite a ligação de uma grande gama de

espessuras [7]. Como desvantagens, o processo de soldadura origina distorções e empenos gerados pelo calor libertado durante o processo que por vezes pode também degradar as propriedades do material base. Para além disso, as juntas soldadas são permanentes e por isso não desmontáveis [8].

2.1.2 Ligações aparafusadas e rebitadas

Quando é necessária uma desmontagem fácil da estrutura, as ligações aparafusadas são ideais. Trata-se de um método confiável e seguro, que é amplamente utilizado na indústria. No entanto, este método obriga à realização de furos para colocação de parafusos ou rebites, que diminuem a secção resistente dos componentes e originam concentrações de tensões que podem promover a rutura prematura do material (Figura 1). Para mitigar estes riscos, a espessura do material é aumentada para garantir a segurança quando a estrutura é sujeita a carregamentos [9].

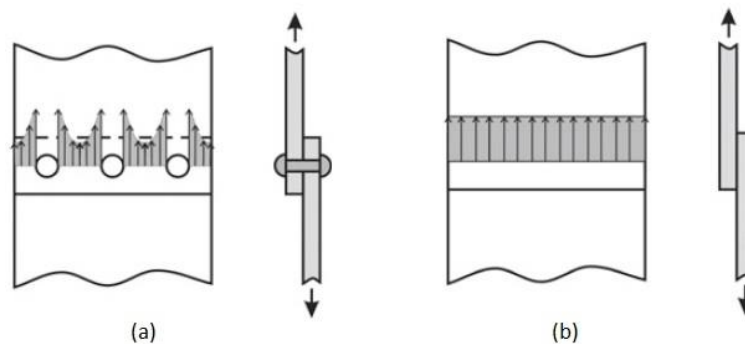


Figura 1 - Distribuição de tensões em juntas adesivas e aparafusadas/rebitadas [9]

2.1.3 Ligações adesivas

As juntas adesivas estruturais têm vindo a ser utilizadas por várias indústrias, tais como a aeronáutica, aeroespacial, automóvel, civil, de componentes de eletrónica, de calçado e das madeiras [9]. As ligações adesivas dão a possibilidade ao projetista de combinar diferentes materiais de forma a otimizar as suas propriedades para a obtenção da melhor solução possível. As juntas adesivas não degradam as propriedades dos materiais e, devido à inexistência de furos possibilitam uma distribuição de tensões mais uniforme evitando, o sobredimensionamentos dos substratos [9].

Tal como todos os processos de ligação, as ligações adesivas apresentam desvantagens como a necessidade de preparação das superfícies, necessidade de controlo das condições ambientais, limitações dos métodos de aplicação e sistemas de cura, bem como o tempo e custo destas particularidades no processo [9].

2.2 Ligações adesivas

2.2.1 Caracterização das juntas adesivas

Para a aplicação de cada junta devem ser tidos em conta requisitos específicos. Ocasionalmente os adesivos são a pior solução para unir dois substratos, mas por vezes são também a melhor ou única solução alternativa. Muitas vezes, deve-se ter em conta o tempo, problemas e custos que podem ser necessários para usar um adesivo. Por exemplo, certos plásticos podem exigir uma preparação de superfície cuidada para que o adesivo molhe a superfície convenientemente. Aplicações que requerem altas temperaturas de serviço vão exigir um adesivo que suporte temperaturas elevadas e tempo elevado de cura. Por outro lado, certas aplicações não poderiam existir sem os adesivos, como por exemplo: união de materiais cerâmicos ou elastómeros, união de substratos com espessura muito reduzida, união das peles ao núcleo em painéis *sandwich*, e uma série de outras aplicações [6]. Desta forma, na Tabela 1 são apresentadas sucintamente as vantagens e desvantagens das ligações adesivas.

Tabela 1 - Vantagens e desvantagens na utilização de adesivos (adaptado de [6])

| Vantagens | Desvantagens |
|---|--|
| Existe uma maior área de distribuição de tensões | As superfícies dos substratos têm de ser limpas cuidadosamente |
| Oferecem uma excelente resistência à fadiga | Podem ser necessários longos períodos de cura |
| Eliminam vibrações e absorvem choques | Temperaturas de trabalho geralmente limitada a 350°F (177°C) |
| Minimizam e previnem corrosão galvânica entre materiais dissimilares | Poderão ser necessárias temperaturas e pressões para a sua cura |
| Permitem unir variadas formas e espessuras de substratos | Podem ser necessários gabaritos e acessórios |
| Permitem a obtenção de contornos/acabamentos suaves | Normalmente é necessário um controlo rígido do processo |
| Vedam as juntas | A inspeção da junta terminada é difícil |
| Permitem unir materiais dissimilares | O tempo de vida útil depende do ambiente a que a junta está sujeita |
| Geralmente mais baratas e rápidas do que ligações aparafusadas | Têm de ser feitas considerações relativas ao ambiente, saúde e segurança |
| Quando é necessário calor, este não é suficientemente alto para afetar partes metálicas | Poderá ser necessário treino especializado para a sua utilização |
| Apresentam um ótimo rácio resistência/peso | |

2.2.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

O número crescente de investigações promissoras relacionadas com ligações adesivas originou uma revolução em diversas indústrias, que se deve ao facto de ser possível constatar que é viável, a nível técnico e económico, substituir por adesivos métodos como a soldadura, ligações aparafusadas e rebitadas, brasagem, entre outras [6].

A indústria aeronáutica foi pioneira na utilização de adesivos o que permitiu um desenvolvimento substancial da área e tornou a sua aplicação mais comum e diversificada [2]. No entanto, atualmente os adesivos são usados numa variedade de indústrias devido às inúmeras vantagens que oferecem. Na indústria automóvel, as ligações adesivas têm sido cada vez mais utilizadas, tornando os veículos mais leves e seguros [10]. Outros exemplos são a construção civil, indústria naval, eletrónica, ferroviária e do calçado. Os bioadesivos estão também em franco desenvolvimento e são bastante usados na biologia e medicina, pois são capazes de imitar estruturas moleculares e mecanismos de adesão encontrados na natureza [9].

2.2.2.1 Indústria aeronáutica

Tal como mencionado anteriormente, a indústria aeronáutica é pioneira na utilização de adesivos, uma vez que as ligações adesivas constituem uma excelente alternativa aos fixadores mecânicos como os rebites. Antes de os adesivos estruturais serem utilizados, os painéis de aviões eram fixados com um elevado número de rebites. A utilização de adesivos permitiu uma redução do peso dos aviões, mantendo ou até melhorando a resistência dos seus componentes. Nos dias de hoje, a utilização dos adesivos na indústria aeronáutica é diversificada de acordo com as propriedades dos diferentes adesivos existentes [11]. Por exemplo, a Figura 2 mostra a extensiva aplicação de ligações adesivas à estrutura de alumínio do avião SAAB 340. Este avião tem uma excelente eficiência e durabilidade estrutural que não seriam possíveis de alcançar com estruturas rebitadas convencionais [9].

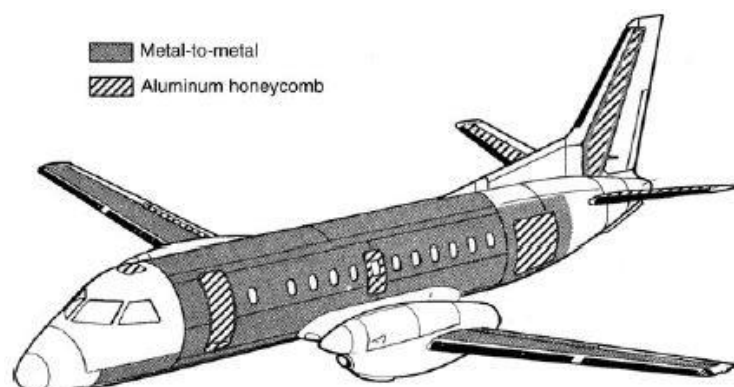


Figura 2 - Aplicação de ligações adesivas na fuselagem, asas e cauda do SAAB 340 [9]

2.2.2.2 Indústria automóvel

Até ao final dos anos 80 os carros eram produzidos maioritariamente por aços macios. Existiram casos onde eram usados em pequenas quantidades aços de alta resistência, ligas de alumínio e plástico reforçado. Com a necessidade de reduzir o peso das estruturas para aumentar a sua eficiência surgiu a produção de carros totalmente em alumínio no início da década de 90, e também a necessidade de otimizar as técnicas de ligação. Foi neste momento que as ligações adesivas começaram a ter um papel de relevância na indústria automóvel [10].

Na atualidade, as ligações adesivas são imprescindíveis no fabrico de veículos devido à sua grande capacidade de ligar diversos materiais. Na indústria automóvel, os adesivos podem ser utilizados para vários fins, tais como a vedação entre superfícies para impedir a passagem de líquidos ou gases, a adesão de diferentes componentes, o travamento de peças, de forma a reduzir vibrações, e a fixação de componentes para aumentar a resistência e flexibilidade da estrutura [12]. Na Figura 3 podem-se observar vários locais onde são utilizados adesivos com diferentes fins num veículo ligeiro moderno.

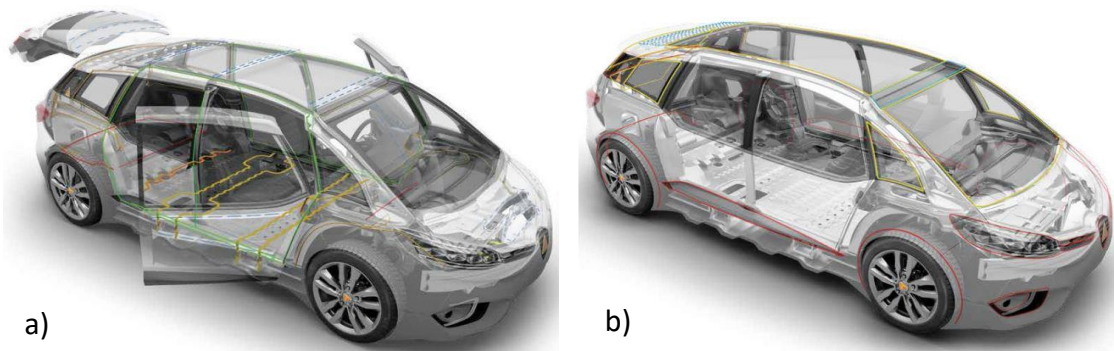


Figura 3 - Diferentes locais de aplicação de adesivos em veículos modernos: a) adesivos utilizados na união de partes da carroçaria [13]; b) adesivos para ligação vidros e acabamentos externos [14]

2.2.2.3 Construção civil

As ligações adesivas na construção civil têm uma longa tradição. A história das ligações adesivas começou na Roma do pré-cristianismo com a invenção da argamassa. Nos dias de hoje a tecnologia dos adesivos é parte integrante da construção civil devido à panóplia de materiais usados e à necessidade de implementar novas soluções de ligação de elevado desempenho e com técnicas de aplicação práticas [9, 15].

Na construção civil, os adesivos têm uma grande utilização não estrutural, nomeadamente com fins decorativos tais como mosaicos e azulejos, revestimentos para janelas e portas, revestimento térmico, entre outros [16]. Por outro lado, aplicações estruturais que requerem a transmissão significativa de esforços são também muito comuns. Alguns exemplos incluem [17]:

- Resinas para juntas de dilatação em estradas;
- Injeção de resina para reparação estrutural de fissuras em betão (Figura 4 (a));
- União entre betão antigo e novo para extensão de estruturas existentes;
- Juntas finas entre betão pré-moldado e betão pré-esforçado na construção segmentada de pontes;
- Camadas resistentes à derrapagem para estradas e outras superfícies;
- Fixações de aço a betão ou rocha;
- Âncoras de arame, corda ou cabo;
- Reforço de estruturas de betão com placas de aço (Figura 4 (b));
- Conexões de estruturas de aço.



a)

b)

Figura 4 - a) Reparação de fissuras em betão através da injeção de resina epóxida; b) reforço de vigas e pilares de um edifício com placas de aço [18]

2.2.2.4 Indústria naval

A indústria de embarcações recreativas também foi das primeiras a adotar o uso de adesivos. À medida que a indústria mudou da construção em madeira e metal para materiais compósitos, o uso de adesivos para a montagem de cascos e cabines aumentou [19]. O uso de adesivos permitiu aos fabricantes produzir estruturas mais leves e rígidas que contribuem para o aumento do desempenho do produto. O interesse no uso de compósitos tem vindo a aumentar também para os grandes navios devido à redução de peso resultante do uso destes materiais, que oferecem consequentemente uma redução de consumo de combustível e custos operacionais [19].

Os materiais envolvidos na produção de barcos são maioritariamente compósitos reforçados com fibra, uma vez que são os materiais que são mais frequentemente montados por colagem nesta indústria. Estes materiais variam desde fibra de vidro de baixo custo, ou poliéster reforçado, até compósitos de carbono-epóxido de alto desempenho e *sandwich* de favo de mel [9]. A Figura 5 mostra as diferentes aplicações de adesivos num barco em polímero reforçado com fibra de vidro.

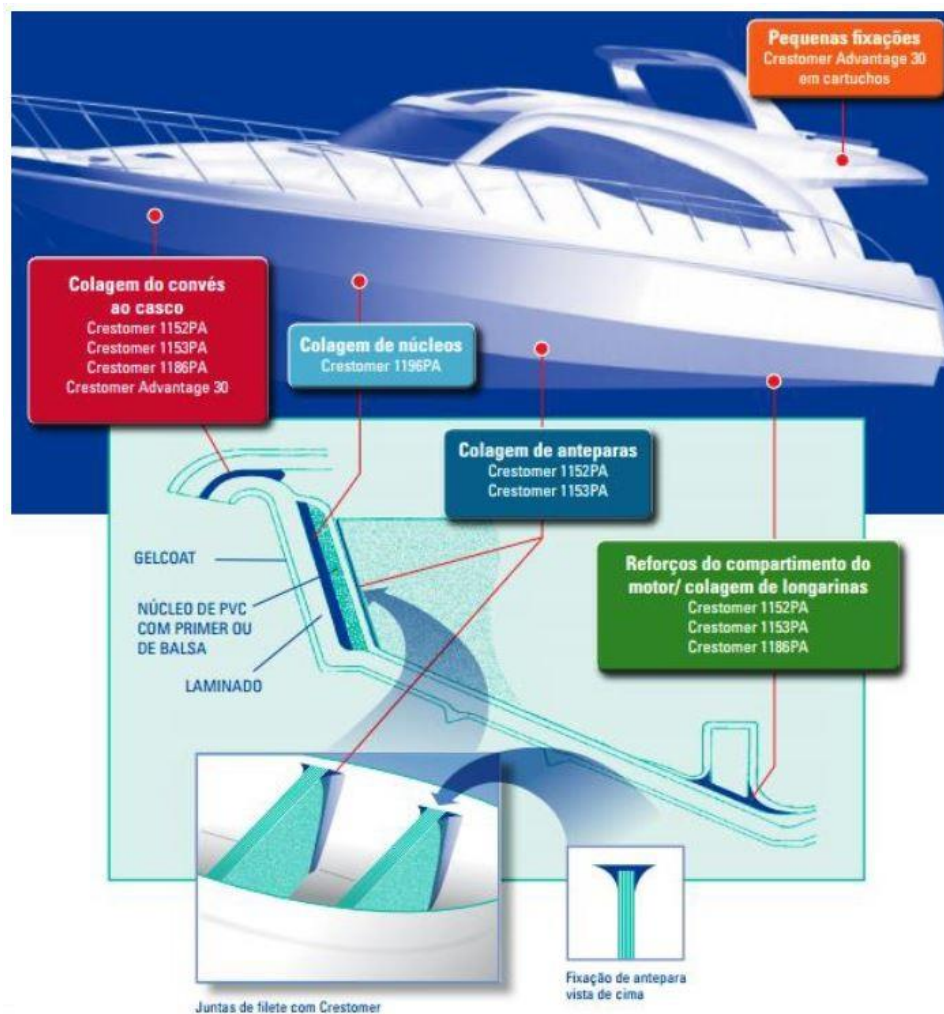


Figura 5 - Esquema das diversas aplicações de adesivos estruturais num barco em polímero reforçado com fibra de vidro [5]

2.2.2.5 Indústria eletrónica

Estima-se que existam mais de 50.000 adesivos diferentes, eletricamente condutores ou não, que são utilizados na indústria eletrónica por todo o mundo. Para assegurar o seu correto funcionamento, os sistemas eletrónicos precisam de ter o melhor comportamento eletro-termo-mecânico possível. Os adesivos oferecem muitas vantagens e satisfazem a maioria dos requisitos [10]:

- Permitem o uso de substratos económicos;
- Permitem o uso de processos de aplicação ultrarrápidos e de elevada precisão;
- Tendência crescente na miniaturização e a integração de alta densidade de componentes;
- Posicionamento e fixação de componentes durante a soldadura;
- Substituição das ligações soldadas quando estas não são viáveis ou por razões ambientais;

- Permitem a fixação de placas e componentes por encapsulação para proteção de danos externos.

Na indústria eletrônica os adesivos são usados para variados fins, tais como, a ligação de *chips* a placas (substrato), placas de circuitos impressos (PCI), num processo conhecido por *die-attach*, técnica *flip chip*, encapsulamento, ecrãs, micro sistemas eletromecânicos e embalagem de componentes eletrônicos [10]. Nas PCI a camada de circuitos de cobre é ligada com adesivos à placa de fibra reforçada com material dielétrico (Figura 6). Na superfície das placas são montados componentes eletrônicos nos circuitos através da aplicação de pequenas gotas de adesivo [20].

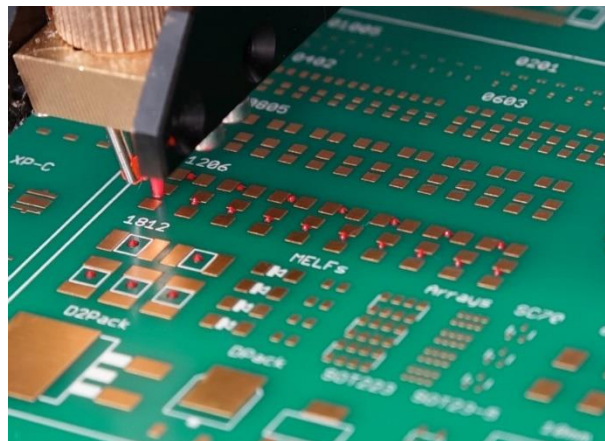


Figura 6 - Utilização de um adesivo para ligar componentes eletrônicos em PCI [21]

2.2.2.6 Indústria do calçado

Na indústria do calçado, as ligações adesivas são uma alternativa à costura e aos pregos ou agrafos para unir os diferentes componentes do sapato. A introdução da tecnologia dos adesivos na indústria do calçado trouxe várias vantagens [10]:

- Obtenção de juntas mais homogêneas e flexíveis;
- Distribuição de esforços mais uniformemente distribuída ao longo da junta;
- Melhor aspeto das juntas e favorecendo novos *designs* e questões relacionadas com moda;
- Maior facilidade na automatização do processo.

As juntas adesivas são usadas para unir algumas dessas partes. Dependendo do tipo de calçado, são requeridos diferentes comportamentos dos adesivos [10]. Na escolha de um adesivo têm de ser tidos em conta fatores como a resistência final da junta, o tipo de substratos, a resistência térmica, o tempo de cura da junta e preço [22].

2.2.3 Tipos de esforços em juntas adesivas

Quando se projeta uma junta, o grande objetivo é obter a resistência máxima para uma determinada área de união. No projeto de juntas adesivas, as características básicas do adesivo deverão ditar o formato da junta [23]. Raramente são encontradas distribuições de tensões uniformes em juntas adesivas. Em vez disso, é normal encontrar distribuições de tensões não uniformes.[2] Quando uma junta é sujeita a carregamentos externos, surgem concentrações de tensões em determinadas zonas da junta, que podem exceder amplamente a tensão de rotura média da junta. Muitas vezes, estas concentrações de tensões são imprevisíveis e determinam a resistência máxima da junta, pelo que é responsabilidade do engenheiro de projeto compensar e minimizar estes efeitos [6].

A Figura 7 mostra os cinco tipos de esforços fundamentais em juntas adesivas: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento. No entanto, é comum encontrar combinações destes esforços em mais aplicações de juntas adesivas [23].

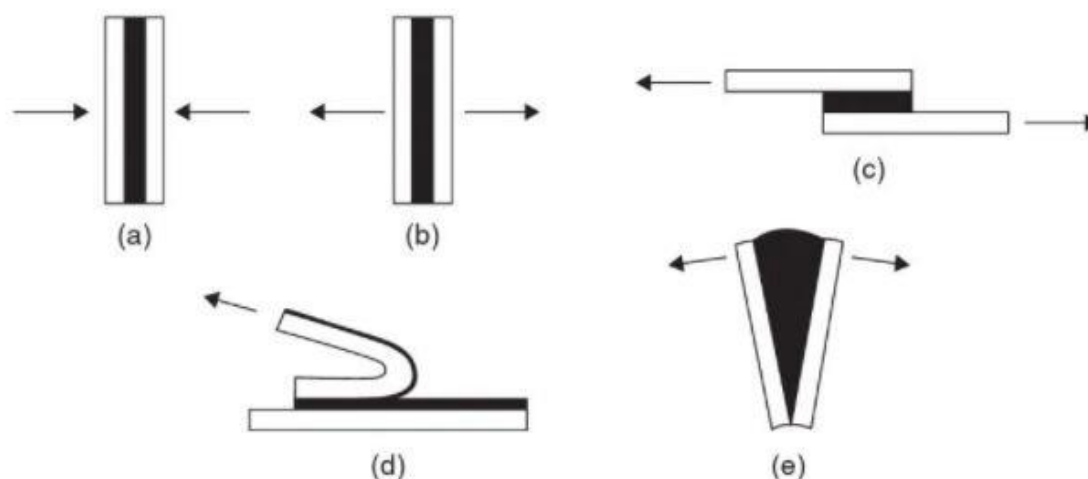


Figura 7 - Tipos de esforços em juntas adesivas: (a) compressão, (b) tração, (c) corte, (d) arrancamento e (e) clivagem [24]

2.2.3.1 Tração

O esforço de tração desenvolve-se quando forças opostas atuam perpendicularmente ao plano da junta, o que resulta numa distribuição de tensões uniforme por toda a extensão da junta. Durante a tração, o adesivo desenvolve picos de tensão nas bordas externas da junta (Figura 8), fazendo com que estas zonas sejam sujeitas a uma quantidade desproporcional de carga. O surgimento de uma pequena fenda poderá propagar-se a toda a área da junta e originar a sua rotura [23].

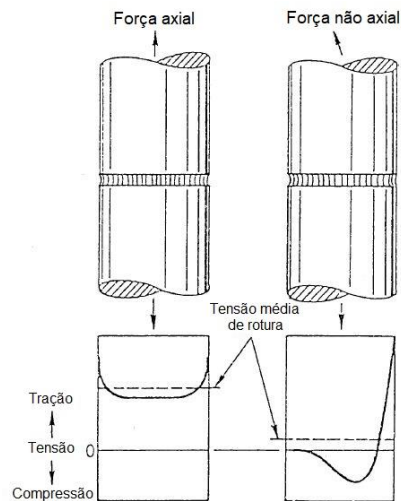


Figura 8 - Diferença de distribuição de tensões causada pela não colinearidade de carga aplicada (adaptado de [6])

Para o esforço ser puramente de tração, as superfícies dos substratos têm de estar paralelas e as cargas perfeitamente axiais. Na prática, o esforço gerado nunca é puramente de tração, pois a espessura de adesivo não é perfeitamente constante, ao ponto de permitir uma distribuição de tensões uniforme, ou a colinearidade de cargas, originando esforços indesejados de clivagem ou arrancamento (Figura 8). Para além disso, os substratos terão de ter rigidez suficiente para garantir uma distribuição de tensões uniforme.

2.2.3.2 Compressão

Quando a carga é de pura compressão, será menos provável que uma junta falhe do que em qualquer outro tipo de carregamento. No entanto, as aplicações de juntas de compressão são limitadas [23]. Tal como nas cargas de tração, a distribuição de tensão pelo adesivo é constante (Figura 9) [25] e, para isso, é importante manter as forças alinhadas para que o adesivo esteja puramente à compressão [6].

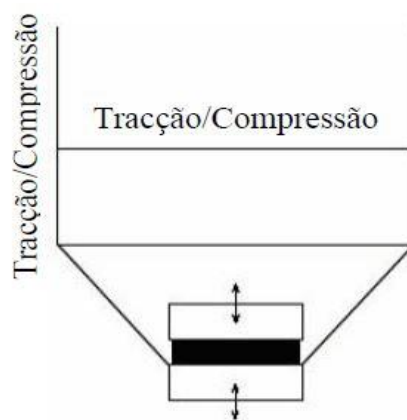


Figura 9 - Distribuição de tensões numa junta sujeita a esforços de tração/compressão [25]

2.2.3.3 Corte

Os esforços de corte são gerados por forças no plano do adesivo que provocam o escorregamento entre os dois substratos. Juntas sujeitas a esforços de corte são usadas frequentemente devido à sua facilidade de aplicação e porque apresentam uma boa resistência [6]. A Figura 10 ilustra as tensões de corte geradas numa junta de sobreposição simples (JSS) quando esta é sujeita a um esforço de tração. É possível verificar que, nas extremidades da junta, o nível de tensões de corte aumenta significativamente, devido ao efeito de deformação diferencial dos substratos ao longo do comprimento da junta adesiva [25].

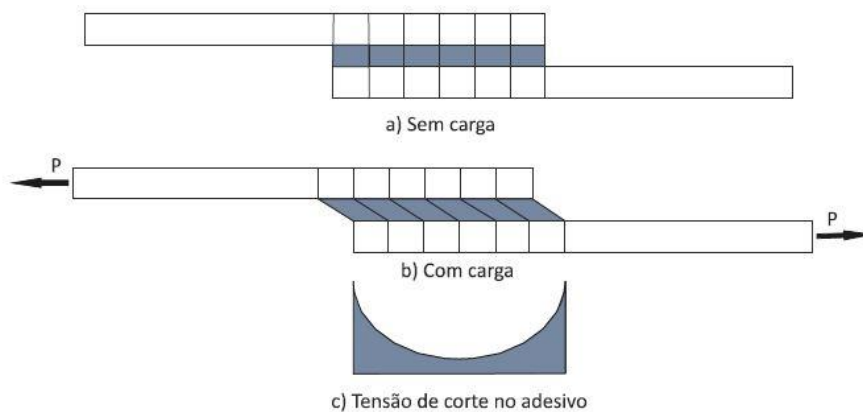


Figura 10 - Distribuição de tensões de corte numa JSS sujeita a esforço de tração, segundo o modelo analítico de Volkersen [26]

Este efeito evidencia-se ainda mais à medida que o comprimento da junta aumenta, pelo que a largura da mesma é mais relevante para o aumento da sua resistência. Tal como se pode observar na Figura 11, a largura da junta faz com que a sua resistência aumente de forma linear. Por outro lado, o aumento do comprimento de sobreposição (L_0) faz com que a resistência aumente mas com tendência decrescente devido ao efeito mais marcante da deformação diferencial dos substratos [25].

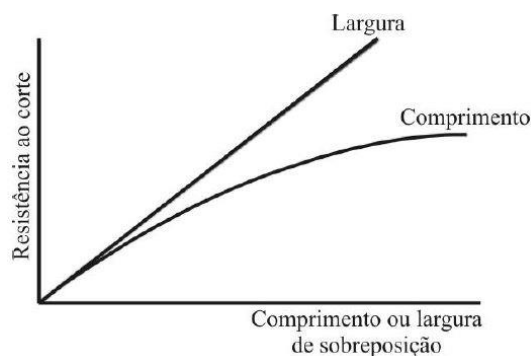


Figura 11 - Efeito do comprimento e da largura de sobreposição [25]

2.2.3.4 Clivagem e arrancamento

A clivagem e arrancamento são os esforços mais indesejados para as juntas adesivas. A clivagem é definida pelo esforço originado por forças nas extremidades de aderentes rígidos, forçando a sua separação. O arrancamento é um esforço muito semelhante à clivagem, com a diferença de as forças de separação serem aplicadas a substratos flexíveis, provocando um ângulo de separação superior (Figura 12) [6].

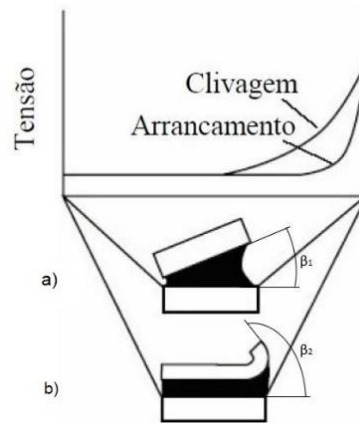


Figura 12 - Distribuição de tensões e ângulos de separação em juntas sujeitas a esforços de a) clivagem b) e arrancamento (adaptado de [25])

Posto isto, pode-se concluir que a rigidez dos substratos é um fator que afeta significativamente o nível de tensões de arrancamento. Apenas com o desenvolvimento dos métodos analíticos de Goland e Reissner [27] foi tido em conta a rotação da junta, originada pela flexibilidade dos substratos, que causam um momento fletor na junta. A nível de tensões de corte, a análise de Goland e Reissner [27] apresenta resultados similares à análise de Volkersen [28]. No entanto, esta análise permite determinar tensões de transversais de arrancamento (Figura 13) [26].



Figura 13 - Tensões de arrancamento numa JSS [26]

A ductilidade e rigidez do adesivo são fatores que também têm um contributo significativo na resistência da junta a esforços de clivagem e arrancamento. Enquanto que os adesivos frágeis são bastante sensíveis a este tipo de esforços, ao adesivos dúcteis suportam melhor este tipo de esforços, pois permitem uma plastificação do mesmo nas regiões de maior tensão [29].

2.2.4 Modos de rotura em juntas adesivas

O propósito principal de uma junta adesiva é que esta suporte os esforços gerados pelo carregamento dos substratos. Os ensaios destrutivos, como por exemplo os ensaios de tração a JSS, são comumente utilizados para verificar o correto funcionamento de uma junta. A norma ASTM D 5573 – 99 classifica os modos de rotura em juntas adesivas.

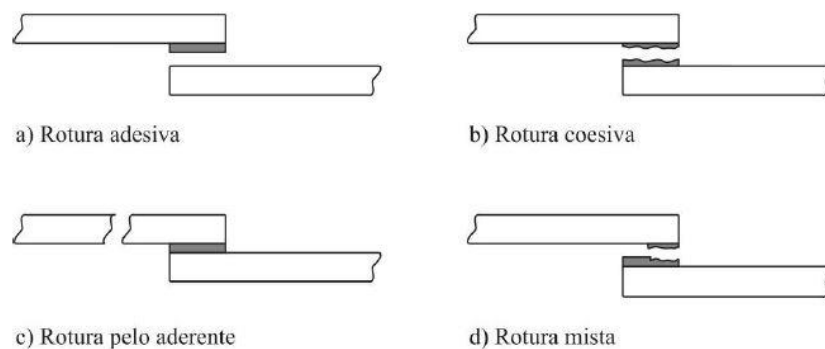


Figura 14 - Modos de rotura em juntas adesivas [26]

Apesar de a norma descrever sete tipos de rotura, os quatro mais frequentes são apresentados na Figura 14 [25]:

- **Rotura adesiva**, na interface entre o aderente e o adesivo (a);
- **Rotura coesiva**, no interior do adesivo (b);
- **Rotura pelo substrato** (c);
- **Rotura mista** (d).

2.2.4.1 Rotura adesiva

A rotura adesiva ocorre quando a superfície de um dos substratos está isenta de adesivo. Isto significa que a rotura tem lugar na interface entre o adesivo e os aderentes, sendo normalmente fruto de uma incompatibilidade de materiais ou preparação de superfície deficiente [30].

2.2.4.2 Rotura coesiva

A rotura coesiva ocorre quando a resistência do próprio adesivo é inferior à resistência de adesão e à própria resistência dos substratos. Neste tipo de rotura ambos os substratos estão cobertos por adesivo [25].

2.2.4.3 Rotura pelo substrato

A rotura pelo substrato, tal como o nome indica, ocorre quando a resistência dos substratos é inferior tanto à resistência interna do adesivo, como à resistência de ligação entre os aderentes e adesivos [25].

2.2.4.4 Rotura mista

A rotura mista é uma combinação entre a rotura coesiva e adesiva. Este tipo de rotura é muitas vezes gerado pela má preparação de superfície dos aderentes, o que resulta numa rotura coesiva nessas mesmas zonas [25].

2.2.5 Configurações possíveis de junta

Segundo Petrie [6], uma junta adesiva ideal é aquela que em qualquer direção de carregamento, o adesivo é sujeito a esforços na direção de maior resistência à rotura. Posto isto, as juntas devem ser projetadas com o objetivo de favorecer a distribuição de tensões mais uniforme nas mesmas, utilizando sempre que possível o sentido de maior resistência do adesivo.

Algumas configurações de juntas podem não ser práticas, ter um custo de fabrico elevado ou alinhamento difícil. Por esse motivo, o engenheiro projetista deve ter muitas vezes em conta estes fatores para otimizar o desempenho do adesivo. Na Figura 15 são apresentadas as configurações de junta mais comuns utilizadas em engenharia.

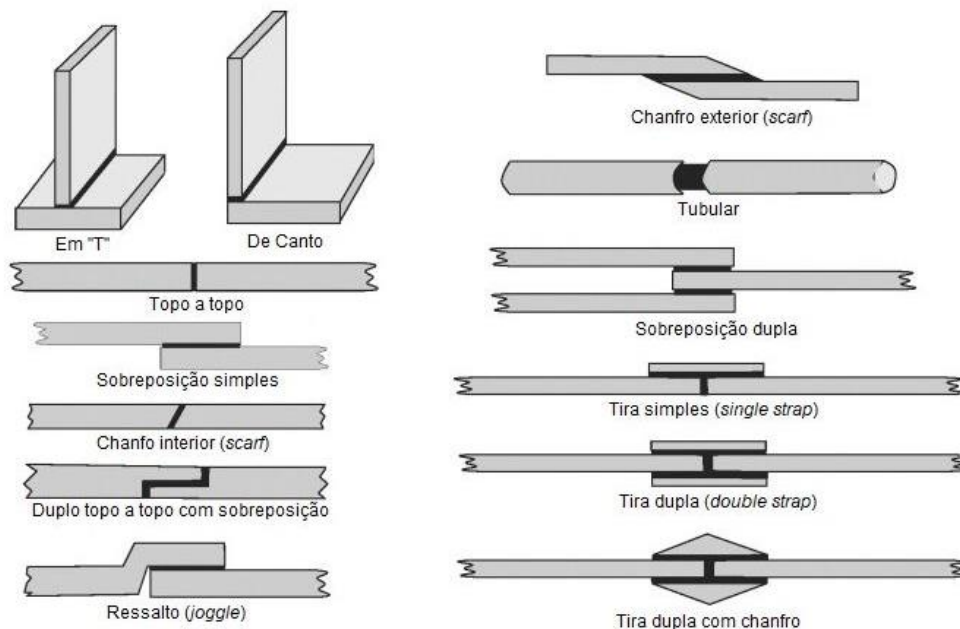


Figura 15 - Tipos de juntas mais comuns utilizadas em engenharia (adaptado de [31])

2.2.5.1 Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição são as juntas adesivas mais comuns devido à sua simplicidade de fabricação, à aplicabilidade em aderentes finos e ao esforço de corte a que estão sujeitas. Contudo, os aderentes nas juntas de sobreposição estão deslocados do plano da junta, gerando um momento fletor que cria esforços de arrancamento, comprometendo o funcionamento da junta adesiva [6]. Este problema levou ao aparecimento de variantes da junta de sobreposição, que visam reduzir os esforços de arrancamento.

Na Figura 16 são apresentadas algumas das possíveis variantes das juntas de sobreposição. As juntas com ressalto d), e) e f) permitem manter as forças alinhadas e minimizar a deflexão transversal. A junta de sobreposição dupla c), também permite minimizar ou mesmo eliminar deflexão transversal se as forças aplicadas aos substratos superior e inferior forem equivalentes. A junta de sobreposição com chanfro b) permite a diminuição da concentração de tensões nas extremidades da ligação, quando comparada com a JSS a) [24].

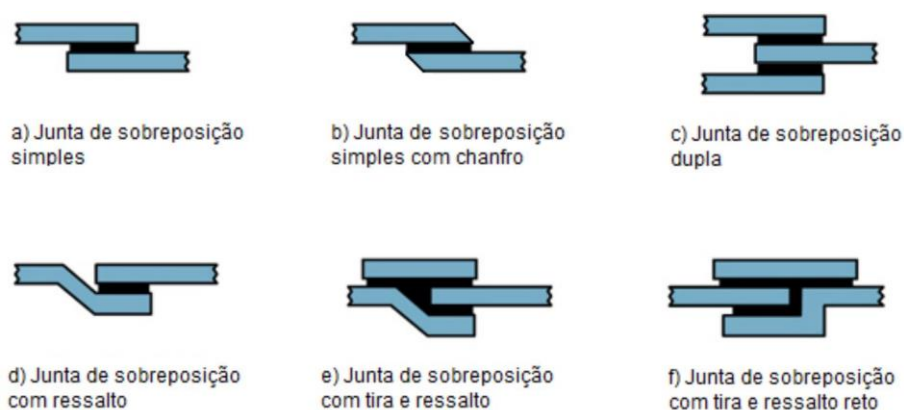


Figura 16 - Configurações de juntas de sobreposição [24]

2.2.5.2 Juntas topo a topo – Butt joint

As juntas de topo a topo são as juntas mais fáceis de conceber, a par das juntas de sobreposição. Contudo, estas juntas não suportam esforços de flexão pois os adesivos são sujeitos a esforços de clivagem. Se os substratos forem demasiado espessos para conceber uma junta de sobreposição, o desempenho de uma junta de topo a topo pode ser melhorado de variadas formas (Figura 17). Todas estas variantes da junta de topo a topo permitem a redução dos esforços de clivagem no adesivo [6].

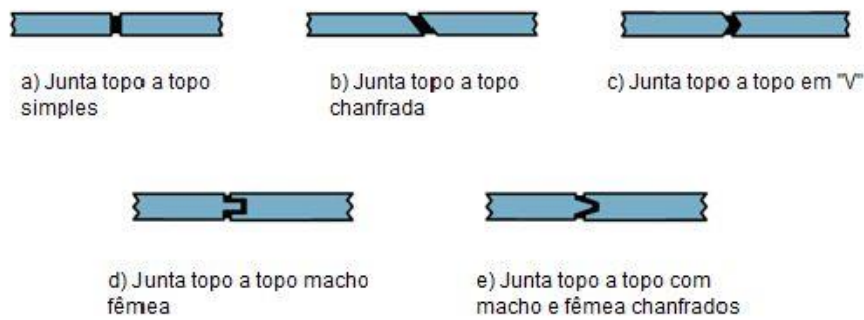


Figura 17 - Configurações de juntas topo a topo [11]

O chanfro das juntas b) e c) permite um melhor alinhamento das forças relativamente à junta topo a topo e é executado com relativa facilidade, recorrendo a operações de maquinagem. As juntas d) e e), macho-fêmea, têm a vantagem de se autocentrarem e permitem alocar uma maior quantidade de adesivo, contribuindo para uma maior resistência da junta devido à maior área de adesivo [24].

2.2.5.3 Juntas em T

As juntas em T podem ser divididas em juntas com componentes a 90° ou outras disposições, tal como é apresentado na Figura 18. Este tipo de juntas pode ser carregado com forças na direção normal (N), que por norma é o sentido de maior resistência da junta, ou na direção transversal, que é a que apresenta menor resistência. Na Figura 18 estão representadas uma série de variantes das juntas em T, que com reforços melhoram o desempenho da junta quando sujeita a esforços transversais [24].

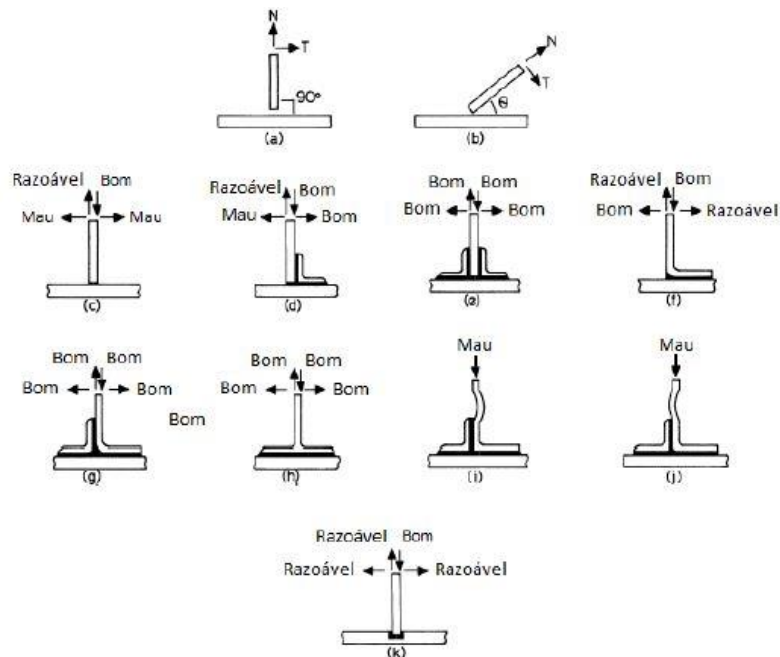


Figura 18 - Configurações de juntas em T [24]

2.2.5.4 Juntas de canto

Tal como as juntas em T, este tipo de juntas pode ser dividido em juntas com substratos a 90° ou outras disposições, e o carregamento pode ser efetuado na direção normal (N) e transversal (T), como representado na Figura 19. Na mesma Figura 19 pode-se verificar que, ao adicionar reforços, a resistência das juntas melhora consideravelmente quando comparada com a junta a), que apresenta o pior dos desempenhos [24].

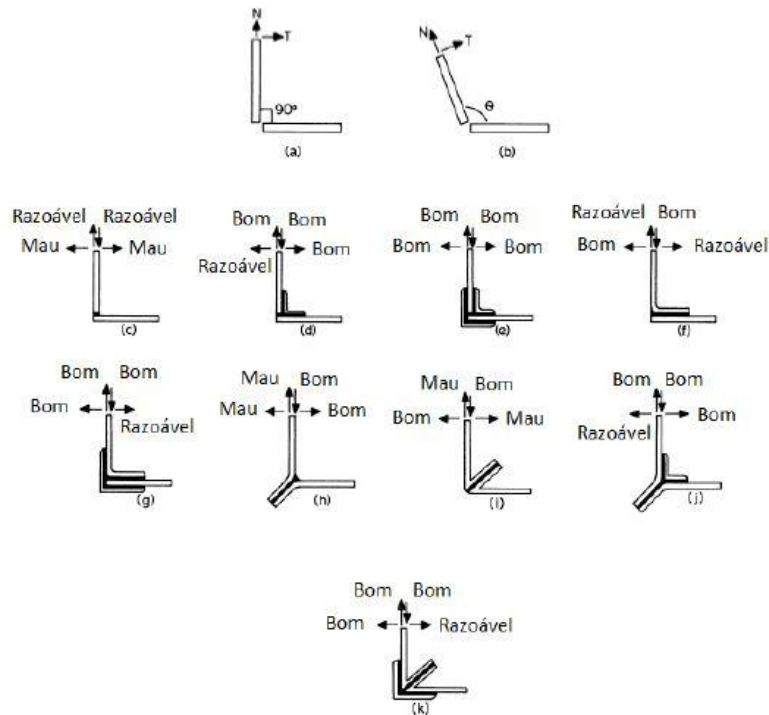


Figura 19 - Configurações de juntas de canto [24]

2.2.5.5 Juntas com tira

As juntas com tira de reforço são uma alternativa viável às juntas de sobreposição quando os substratos têm espessuras elevadas, e também para manter as forças alinhadas [6]. As diferentes configurações de juntas com tira estão representadas na Figura 20. A junta com tira simples a) não é simétrica e é suscetível a esforços de flexão, sendo a junta com tira dupla b) uma melhor alternativa para evitar este tipo de esforços. As juntas de tira dupla com rebaixo d) e de tira dupla chanfrada d) são as melhores alternativas para evitar esforços de flexão. No entanto, estas juntas obrigam à maquinagem dos substratos [24].

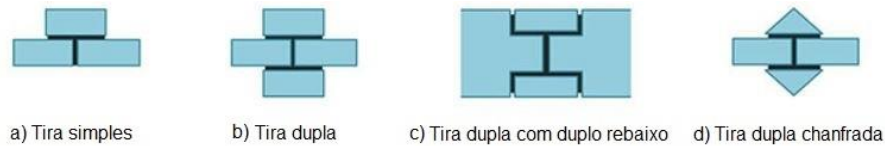


Figura 20 - Configurações de juntas com tira de reforço (adaptado de [32])

2.2.5.6 Juntas cilíndricas

As ligações adesivas são muito úteis para unir tubos e varões. Os carregamentos a que estas juntas estão sujeitas podem ser axiais ou de torção. No primeiro caso, existem concentrações de tensões nas bordas da junta, tal como nas juntas topo a topo. Para melhorar a resistência a cargas axiais, as extremidades dos tubos podem ter chanfros (Figura 21) [9].

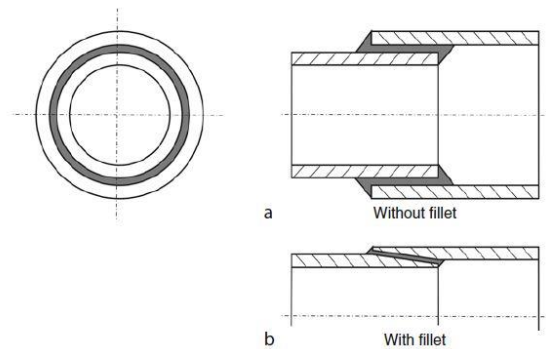


Figura 21 - Junta tubular com as extremidades dos substratos: a) sem a presença de chanfro; b) com a presença de chanfro [9]

Na Figura 22 e Figura 23 estão representadas algumas das configurações recomendadas para juntas cilíndricas em tubos e varões/veios. Estas variantes apresentam vantagens quando comparadas com a junta cilíndrica de topo a topo, pois possuem uma maior área de ligação, que contribui para uma diminuição das tensões de arrancamento. No entanto, a maioria das soluções apresentadas requer a maquinagem dos substratos e são difíceis de inspecionar no interior [9, 24].

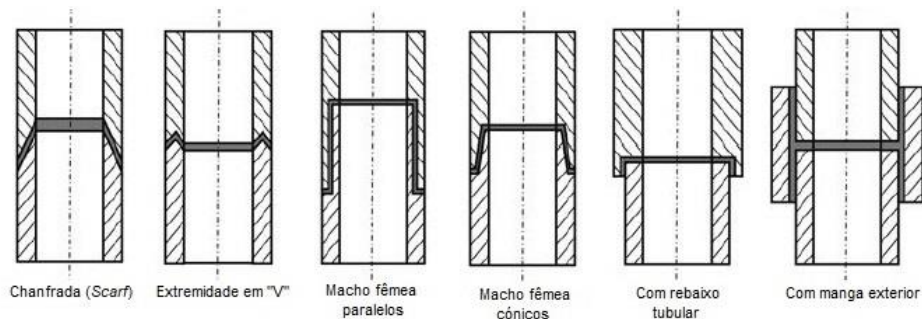


Figura 22 - Juntas cilíndricas em tubos (adaptado de [9])

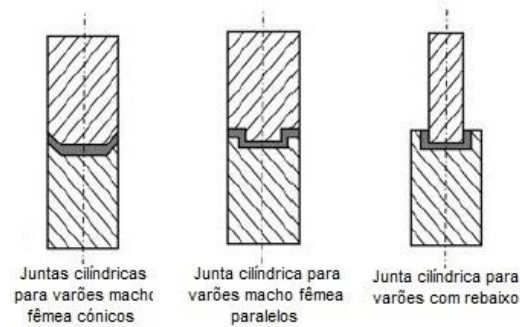


Figura 23 - Juntas cilíndricas em varões/veios (adaptado de [9])

2.2.6 Juntas adesivas com defeitos

Numa junta adesiva podem existir diversos defeitos possíveis de ocorrer em juntas adesivas. Na Figura 24 estão representados muitos dos possíveis defeitos. A presença de defeitos numa junta adesiva é mais indicativa da fraca fabricação da junta do que a sua falha eminente, especialmente a curto prazo. A longo prazo, os defeitos permitem a entrada de água e substâncias agressivas, e favorecem o aparecimento de nucleação de fissuras por fadiga [9]. As porosidades estão presentes na grande parte das ligações adesivas e são causadas por voláteis e ar aprisionado no adesivo. Os vazios podem também ser causados por reações químicas envolvidas no processo de cura, ar aprisionado no adesivo ou pela aplicação insuficiente de adesivo, bem como pelo movimento relativo dos aderentes durante o processo de cura. As fissuras em adesivos estão relacionadas com problemas de cura ou devido a esforços cíclicos elevados (fadiga). As zonas de má cura são usualmente originadas por uma incorreta mistura dos componentes do adesivo ou exposição térmica insuficiente. Superfícies de adesivo não ligadas são uma forma alternativa de vazio, frequentemente causado pela aplicação de adesivo a um substrato de forma desigual ou pela preparação de superfície defeituosa. Este defeito é crítico pois, apesar de o adesivo e substrato estarem em contacto, não existe força de ligação entre eles [9].

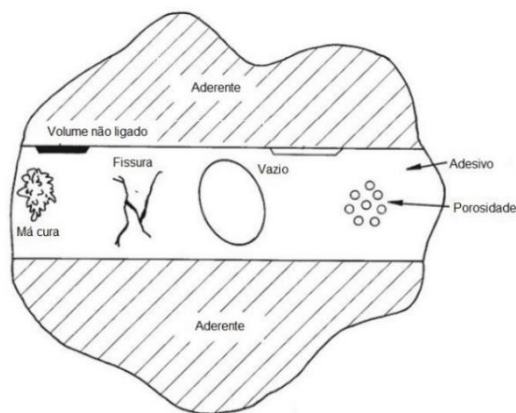


Figura 24 - Representação de defeitos que poderão existir numa junta adesiva (adaptado de [9])

2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

Para que seja utilizado todo o potencial da tecnologia das ligações adesivas é necessário que seja possível prever a resistência das juntas, conhecendo as propriedades dos materiais, geometria e condições fronteira. Um pré-requisito para uma correta previsão da resistência de juntas adesivas é o completo conhecimento das tensões, deformações e todos os mecanismos associados à promoção da falha. Essencialmente, existem duas abordagens possíveis para a solução destes problemas: métodos analíticos (análises de forma fechada) e métodos numéricos (por exemplo, o método EF) [33].

2.3.1 Modelos analíticos

Os métodos analíticos de análise de tensões, também comumente conhecidos como “*closed-form stress analyses*” [10], baseiam-se em equações diferenciais, originadas pela interpretação e extrapolações de ensaios experimentais, que caracterizam o estado de tensão e deformação das ligações adesivas [34]. Na utilização destes métodos, é inevitável o uso de simplificações e suposições para obter a solução, e são difíceis de incluir não linearidades. No entanto, uma vez encontrada a solução, é relativamente simples levar a cabo um estudo paramétrico para estudar o efeito e grau de importância da alteração de parâmetros geométricos e materiais envolvidos [33]. Os métodos analíticos permitem prever o aumento de tensões com a variação da espessura de adesivo ou o comprimento ou largura da junta. No entanto, estes não têm em consideração a variação de tensões ao longo da junta. Este facto deve-se à não consideração do estado de tensão tridimensional devido ao efeito de Poisson (Figura 25), mas que é de extrema importância quando a rotura ocorre perto da interface [35].

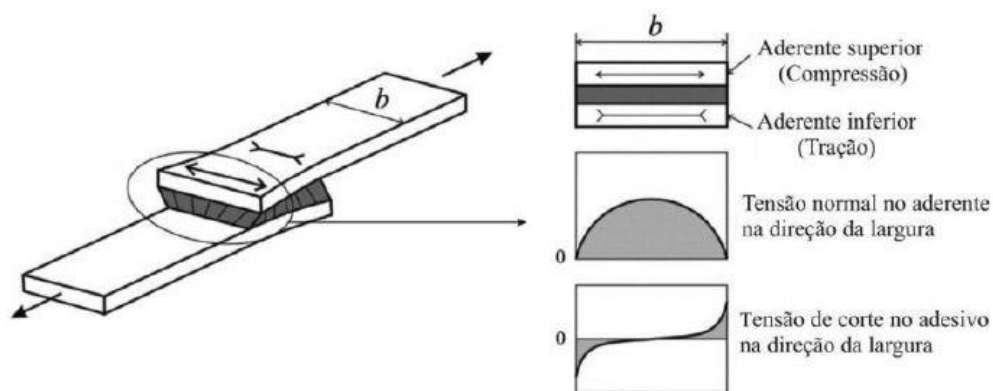


Figura 25 - Efeito de *Poisson* tridimensional numa JSS [36]

As formulações de Volkersen [28] e Goland e Reissner [27] foram pioneiras na área de análise de estruturas ligadas, pelo que trouxeram vantagens na análise de campos de tensão em estruturas coladas, graças a simplificações de geometrias, carregamentos e condições fronteira [4].

As formulações dos autores supracitados continham várias limitações mencionadas anteriormente, mas ainda assim foram a base para trabalhos mais complexos e refinados [37]. A Tabela 12 do Anexo 1 apresenta uma série de considerações e aspetos levados em conta em trabalhos de diversos autores na área das ligações adesivas.

2.3.2 Métodos numéricos

A utilização de métodos numéricos torna-se essencial para a resolução de problemas com geometrias e condições fronteira mais complexa [25], bem como quando os adesivos se deformam plasticamente ou os aderentes são materiais compósitos [38]. Os métodos numéricos mais utilizados para a resolução de equações diferenciais são o método de elementos finitos (MEF), o método das diferenças parciais e o método das diferenças finitas [38].

O MEF é baseado na ideia de dividir um objeto de geometria complexa em simples blocos ou em pequenas partes. A primeira abordagem deste princípio data de 1943 com o trabalho de Courant [39], mas no contexto das juntas adesivas o MEF só começou a ser utilizado por Wooley e Carver [40] em 1971 e posteriormente por Harris e Adams [41] em 1984, sendo que a análise dos últimos é das mais completas, pelo que considera o efeito da não linearidade geométrica e também da plasticidade dos aderentes e do adesivo. O MEF é utilizado frequentemente na análise de ligações entre materiais compósitos, pois o seu comportamento anisotrópico dificulta drasticamente qualquer abordagem analítica [2, 37]. Também na análise de juntas híbridas, torna-se altamente complexa a análise por métodos analíticos, sendo indispensável a utilização do MEF [42].

O modelo de uma junta adesiva pelo MEF pode ser representado por uma geometria bidimensional (2D) ou tridimensional (3D): os elementos 2D contínuos podem ser de estado plano de deformação, estado plano de tensão ou de estado plano de deformação generalizada. Por outro lado, os elementos 3D contínuos permitem eliminar as aproximações introduzidas pelos planos de tensão e deformação. Apesar de existirem efeitos que são apenas considerados nas análises 3D, como a deformação lateral (Adams e Peppiatt [43]) e efeitos anti clásticos ou de Poisson (Adams e Davies [44]), existem vários estudos que comprovam que as análises 2D permitem obter resultados bastante satisfatórios (Adams, Adams [34], Adams e Davies [45]).

Na construção de um modelo de EF é importante ter um número de elementos adequado para obter o melhor compromisso possível entre o tempo de computação e a exatidão dos resultados. O número de graus de liberdade do modelo é muitas vezes constrangido para diminuir o tempo de computação devido à memória do computador (He [46]). Atualmente estão disponíveis no mercado vários *softwares* de MEF, tais como o Nastran[®], Solidworks[®] Simulation, Ansys[®], Nisa[®] e Abaqus[®] [37].

Apesar de o MEF ser capaz de considerar cargas, geometrias, propriedades do material e condições de fronteira complexas, deve ser tido em conta, por parte do projetista, que as soluções geradas são aproximações à realidade [47].

2.3.2.1 *Mecânica dos meios contínuos*

Na mecânica dos meios contínuos podem ser usados tanto métodos analíticos como métodos numéricos para a determinação de tensões e deformações em juntas adesivas. Geralmente consideram-se os seguintes critérios:

- Tensão ou deformação máxima;
- Tensão ou deformação pontual a uma dada distância da extremidade da zona de ligação;
- Tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite.

Para estimar a resistência das ligações adesivas são comparados os valores de tensão instalada obtidos nos modelos com os valores máximos admissíveis do adesivo e dos substratos. Numa JSS é possível prever a resistência da junta pelo método analítico de Volkersen [28], que apenas considera a deformação do adesivo ao corte. Desta forma, a tensão máxima de corte é considerada um critério de rotura. O critério de tensão principal máxima foi utilizado por Adams, Adams [34] com recurso ao MEF, conseguindo bons resultados na previsão da resistência de juntas adesivas. Este mesmo estudo mostrou que a dimensão da malha é um fator preponderante para a análise de tensões, devido às concentrações de tensões existentes nas extremidades da zona de ligação. Na mecânica dos meios contínuos, os critérios de dano aplicados a modelos analíticos conseguem reproduzir bons resultados [48]. Contudo, não levam em conta certos aspetos, como a concentração de tensões ou a presença de defeitos no adesivo. Segundo Harris e Adams [41], os critérios baseados em tensões não são adequados para adesivos dúcteis, uma vez que estes ainda suportam deformações elevadas após ultrapassarem a sua tensão de cedência.

2.3.2.2 *Mecânica da fratura*

Enquanto na mecânica dos meios contínuos se assume que a estrutura e materiais são contínuos e ausentes de qualquer defeito ou particularidade na sua geometria, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo. Este método admite que o material pode conter defeitos gerados no seu funcionamento ou mesmo durante o processo de fabrico. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suficientemente relevantes para provocar a rotura da estrutura, ou se estes se vão propagar para dimensões críticas durante o período de vida da estrutura. No período de vida de uma estrutura, esta pode ser sujeita a cargas de impacto, fadiga ou grandes variações de temperatura, que poderão ser os fatores causadores da propagação dos defeitos [2]. O estudo pioneiro de Griffith [49], que estudou os

princípios básicos da mecânica da fratura em fibras de vidro, prova que qualquer corpo possui defeitos e que a rotura se propaga sempre a partir do mais crítico.

A indústria aeronáutica foi a primeira a introduzir conceitos de tolerância ao dano baseados em conceitos de fratura linear elástica. Uma vez que este conceito não é aplicável a materiais dúcteis, pois parte do material plastifica antes da iniciação da fenda, Hutchinson [50] e Rice [51] criaram a solução de Hutchinson-Rice-Rosengreen para modelar roturas dúcteis. Em vez de valores de intensidade de tensão, a taxa de libertação de energia de tração (G_I) ou de corte (G_{II}) é utilizada na maioria dos estudos de juntas adesivas, comparando com o respetivo valor de resistência à fratura ou G_c [52]. Na realidade, todas as fraturas em ligações adesivas têm lugar em modo misto devido ao efeito dos substratos e às propriedades do adesivo à tração e corte. Este facto obriga à introdução do conceito de envelope de fratura, que tem em conta a tenacidade do adesivo tanto à tração como ao corte.

Na Figura 26 são ilustrados os diferentes modos de propagação de uma fenda. O modo I representa o modo de abertura e o modo II e III são modos de corte. No modo II a frente da fenda é perpendicular ao movimento relativo da fenda, enquanto que no modo III esse movimento é paralelo [2].

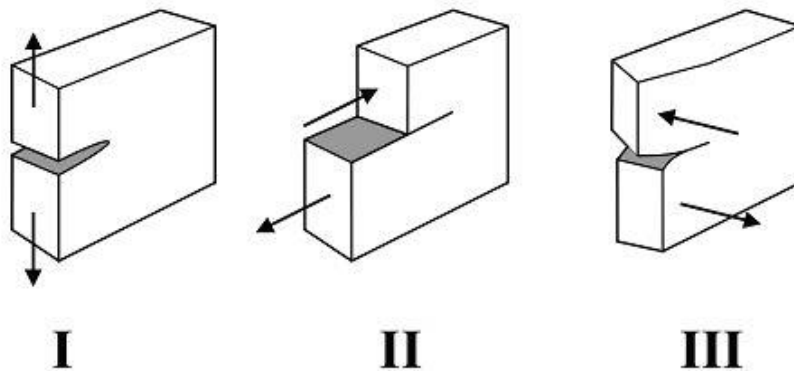


Figura 26 - Modos de rotura [53]

O trabalho de Marzi, Rauh [54] apresenta resultados de ensaios mecânicos de fratura em compósitos reforçados com carbono. A capacidade de considerar a falha interlaminar de compósitos numa simulação numérica é de extrema importância em aplicações da indústria automóvel. Por esta razão, foram levados a cabo por vários investigadores testes experimentais e modelos numéricos com o objetivo de fazer a previsão de falha mais realística possível através de uma simulação numérica. O estudo de Marzi, Rauh [54] permitiu concluir que as leis de separação de tração no modo I diferem significativamente do modo II. Enquanto no modo I existe uma forte dependência da taxa de libertação de energia no modo II não existe esta dependência.

2.3.2.3 Modelos de dano coesivo

Barenblatt [55] e Dugdale [56] foram os autores que desenvolveram os estudos que deram início ao conceito de MDC, que caracteriza o dano de fratura na frente da fenda quando sujeita a cargas estáticas, abrindo portas para o desenvolvimento de formulações mais refinadas que caracterizam o dano em estruturas. É assim possível, com recurso aos MDC, analisar o início de fendas e a sua propagação, quer no interior, interface dos materiais ou ainda em delaminação de compósitos.

Alguns programas de análise pelo MEF permitem avaliar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [57] pois possibilitam a incorporação de modelos de dano coesivo em elementos coesivos ou de mola [58]. Os MDC permitem avaliar o crescimento do dano em estruturas, pela introdução artificial de zonas para sua propagação. Para isso, são modeladas interfaces ou regiões finitas de acordo com leis coesivas previamente estabelecidas (tração-separação). As duas técnicas existentes para modelar o dano através de elementos coesivos são:

- **Aproximação local:** as leis coesivas são aplicadas em nós homólogos dos elementos coesivos e também podem unir nós sobrepostos de diferentes materiais (Figura 27 a)) [59];
- **Aproximação contínua:** as leis coesivas são aplicadas diretamente entre dois materiais ligados, para simular uma camada fina de material como o adesivo (Figura 27 b)) [60].

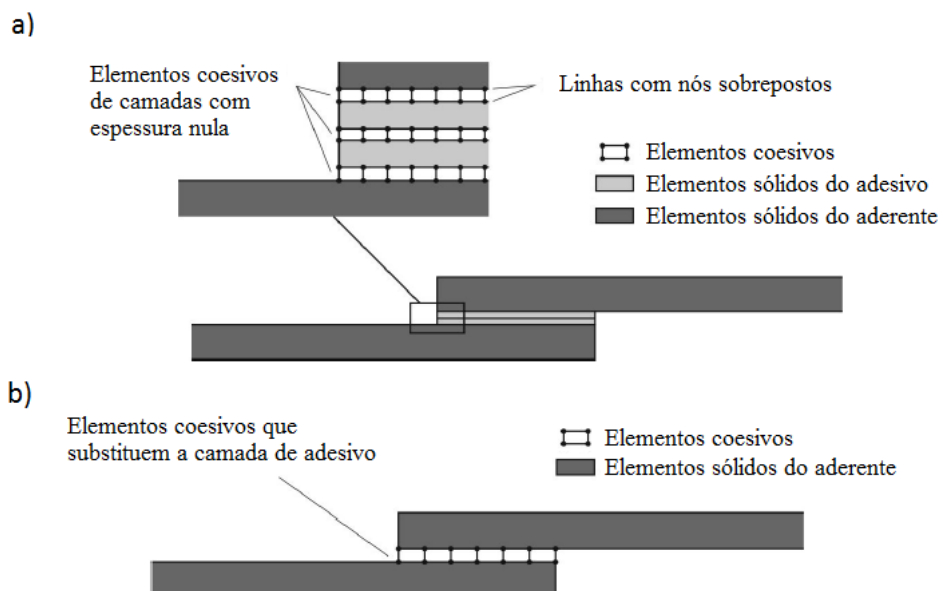


Figura 27 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e aproximação contínua (b) (adaptado de [47])

Através da implementação das leis de tensão-deslocamento, os MDC permitem avaliar a propagação da fenda sem ter em conta os fenómenos microscópicos existentes no início da fenda. A presença de uma fenda inicial não é imperativa para a aplicação dos MDC [61]. Os MDC aplicados conjuntamente com o MEF, são uma ferramenta bastante versátil que permite avaliar o início e propagação do dano num único modelo numérico [62]. A grande limitação na utilização de MDC é a obrigatoriedade de inserir elementos coesivos no caminho do dano. Daí ser um método bastante eficaz nas juntas adesivas, uma vez que o caminho do dano é bem conhecido. O *software* Abaqus® tem os MDC implementados quer em 2D e 3D para análises estáticas. A vantagem dos modelos 3D é que incluem a componente de corte fora do plano [63].

Tendo em conta o comportamento dos materiais e a interface em simulação, podem ser consideradas diversas leis coesivas para a obtenção de resultados mais precisos. Para o efeito existem vários MDC, como o modelo exponencial, linear parabólico, polinomial, trapezoidal e o triangular [64]. O último é o modelo mais usado devido à sua simplicidade, pois é o que exige menor número de parâmetros a serem determinados, ao mesmo tempo que proporciona resultados bastante precisos para a maioria das condições reais [65]. A Figura 28 estabelece a relação linear entre tensões e deslocamentos relativos do modelo coesivo triangular. Este modelo possui duas versões distintas: modo puro e modo misto.

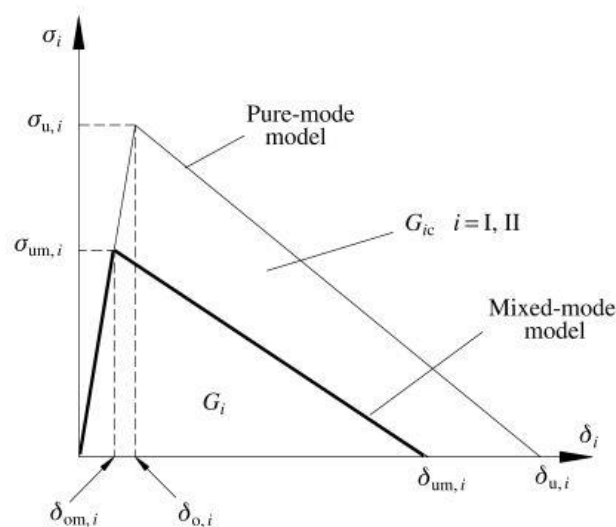


Figura 28 - Modelo coesivo triangular [66]

O modo puro caracteriza-se pelo dano se propagar num conjunto específico de nós homólogos quando os valores de tensão no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto caracteriza-se por utilizar critérios de energia e tensão para associar os modos puros de corte e tração. A área do menor triângulo representa a energia libertada em cada modo, enquanto a área do maior triângulo corresponde à energia crítica de fratura [66, 67].

2.3.2.4 *Mecânica do dano*

A mecânica do dano é considerada um método alternativo aos MDC, uma vez que permite introduzir dano nos elementos através da redução dos esforços transmitidos. Nos métodos de mecânica do dano, é definido um parâmetro de dano que altera a resposta dos materiais pela redução de rigidez e resistência. Existem trabalhos que utilizam esta metodologia, nomeadamente em ligações adesivas finas [68] ou delaminação de compósitos ou rotura da matriz [69]. Com o parâmetro de dano definido, torna-se possível simular a evolução do dano e da fratura de uma fenda [58]. Este parâmetro de dano pode ser categorizado em dois grupos distintos: (1) variáveis que modelam o dano pela adaptação das propriedades do material, mesmo que estas não estejam diretamente ligadas ao mecanismo do dano e (2) variáveis que estão diretamente relacionadas com a mecânica do dano, tal como a dimensão de porosidades ou área de micro-cavidades [70]. Tal como noutros modelos de previsão de resistência, o crescimento do dano depende da carga para simulações estáticas e do número de ciclos para simulações de fadiga [71]. A grande vantagem da mecânica do dano, comparativamente com os MDC, é que permite prever o dano mesmo quando o caminho de propagação da fenda não é conhecido [72].

A publicação de trabalhos relacionados com mecânica do dano em juntas adesivas é escassa, mas existem autores, como Hua, Crocombe [73], que estudaram a previsão de resistência das juntas adesivas sujeitas a degradação ambiental, propondo um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha. Com este modelo, foi possível simular o efeito de degradação ambiental através da introdução de um parâmetro de dano calibrado experimentalmente através de ensaios de fratura em provetes à flexão em modo misto, permitindo assim a redução de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente. Os resultados obtidos através do modelo para a resistência da junta e o caminho do dano foram similares aos resultados obtidos experimentalmente.

2.3.2.5 *Método de Elementos Finitos Extendido*

Fundamentalmente, o método de elementos finitos extendido (MEFX) consiste numa nova formulação do MEF, que permite a modelação e análise do crescimento do dano em meios contínuos. O MEFX torna-se mais vantajoso do que modelação por MDC pois não requer que a fratura siga um caminho pré-definido, o que permite que as fendas se possam propagar livremente sem a necessidade de corrigir a malha que rodeia a fratura ou de a malha coincidir com a geometria das discontinuidades [74]. Belytschko e Black [75] foram os primeiros autores a apresentar os conceitos fundamentais do MEFX, no final dos anos 90. O MEFX diferencia-se do MEF pois permite a separação das faces da fenda pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos nas imediações da fenda [76]. À medida que a fenda se propaga, as suas extremidades

mudam de posição e orientação continuamente, e simultaneamente são criadas funções de enriquecimento necessárias para os nós dos elementos finitos circundantes da fenda.

Campilho, Banea [77] utilizaram o MEFX e MDC para prever a resistência de juntas de sobreposição simples e dupla com um adesivo dúctil e substratos de alumínio, sujeitos a diferentes esforços de tração de força e com vários comprimentos de sobreposição. O objetivo principal do trabalho foi avaliar as capacidades e/ou limitações do uso das implementações atuais dos MDC ou MEFX no Abaqus®. Comparando os resultados experimentais e de simulação, o MDC revelou-se uma técnica com previsões de resistência bastante precisas, o que já era esperado, tendo em conta a vasta quantidade de trabalhos de validação desta técnica em vários problemas de engenharia. O MEFX não provou ser o método mais eficaz para prever a propagação do dano em modo misto, pois a fenda cresce numa direção perpendicular às tensões máximas da extremidade da fenda, na direção dos aderentes em vez de ao longo da camada de adesivo, pelo que não representa o comportamento natural de uma junta adesiva.

2.4 Juntas adesivas tubulares

Com o passar dos anos várias indústrias têm aumentado o uso de ligações adesivas tubulares devido ao baixo peso das mesmas, à distribuição mais uniforme de esforços, à não alteração da matéria-prima e à possibilidade de unir materiais dissimilares. Estas juntas são capazes de suportar cargas significativamente elevadas quando utilizadas em aplicações estruturais, como na montagem de chassis automóveis. Devido às suas variadas vantagens, a comunidade científica tem realizado diversas investigações com o objetivo de avaliar o comportamento das juntas adesivas tubulares [78].

Existem na literatura vários estudos experimentais, tanto analíticos como numéricos, que abordam as juntas tubulares quando sujeitas a diversos tipos de esforços. Adams e Peppiatt [79] foram os primeiros a analisar juntas tubulares em 1977, com o estudo em juntas elásticas isotrópicas sujeitas a cargas axiais e torsionais [80]. Hipol [81] foi também dos primeiros a estudar a otimização da geometria de uma junta tubular de sobreposição simples. Este autor usou um modelo de EF para avaliar a influência do L_0 , espessura do adesivo, rigidez relativa dos aderentes e geometria das extremidades dos aderentes na distribuição de tensões. Hosseinzadeh, Shahin [80] e Jung Lee, Min Cho [82] também realizaram estudos nesta área com conclusões similares [78].

As juntas adesivas proporcionam um método apropriado e leve de montar estruturas de tubos de paredes finas de forma eficaz. Tipicamente, neste género de estruturas, as juntas são do tipo JST (Figura 29 (a)) e JTC (Figura 29 (b)).

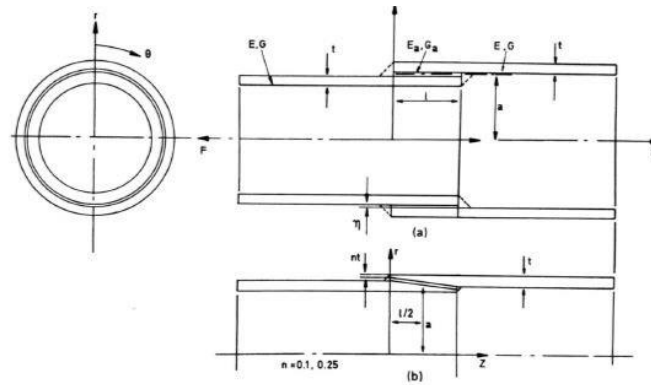


Figura 29 - Geometria da: a) JST; b) JTC [34]

A literatura relacionada com o estudo de distribuição de tensões em juntas tubulares de paredes finas é ainda escassa. Contudo, no caso do carregamento axial, os mecanismos de distribuição de tensões são os mesmos presentes numa JSS: (1) deformação diferencial; (2) flexão introduzida pela não colinearidade da sobreposição dos tubos; (3) efeitos de extremidade (concentração de tensões). Por outro lado, na torção apenas são considerados a deformação diferencial e efeitos de forma, uma vez que não existem efeitos de flexão [43].

2.4.1 Juntas tubulares sujeitas a esforços de tração

Nguyen e Kedward [83] são autores de um artigo onde se desenvolveu um modelo analítico simples capaz de determinar a distribuição de tensões de corte no adesivo de uma JTC sujeita a um carregamento de tração. A abordagem é uma extensão do modelo analítico de Volkersen [28], que é frequentemente aplicada a JSS. A representação matemática consiste em funções lineares e exponenciais empregadas para modelar o comportamento elástico-plástico usualmente observado em adesivos estruturais. Na Figura 30 estão representados os elementos infinitesimais de uma JTC sujeita a esforços de tração.

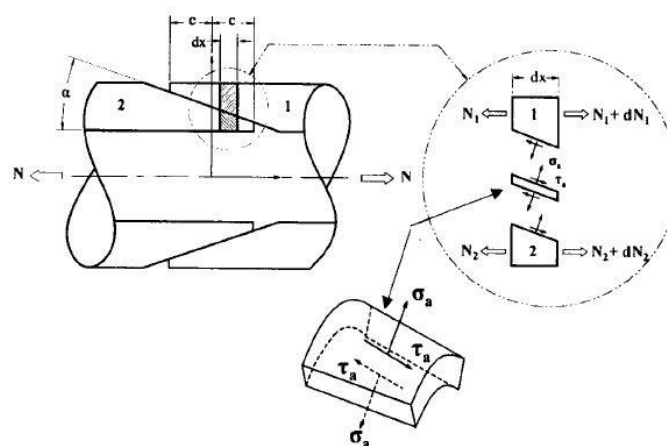


Figura 30 - Elementos infinitesimais em tensão numa JTC [83]

No âmbito do mesmo artigo, foi realizada a simulação da JTC sujeita a esforços de tração pelo método de EF no *software* Ansys® 5.6. Na Figura 31 está representado o respetivo modelo de EF usado. A tensão de corte e distribuições de tensões de corte obtidas pelos modelos analíticos desenvolvidos foram aceitavelmente próximas aos resultados obtidos pelo modelo de EF.

A JTC com ângulo de 10° oferece um maior desempenho em carga estática, com um menor pico de tensão de corte e uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo do comprimento da junta, quando comparada com uma JST.

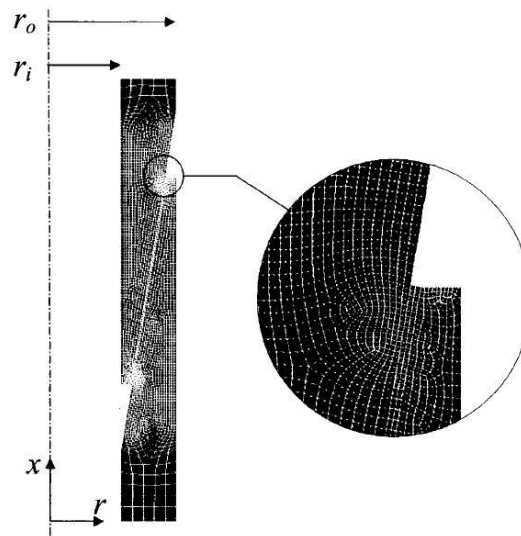


Figura 31 - Modelo de EF da JTC [83]

Labbé e Drouet [78] são autores de um estudo numérico onde foi procurado otimizar JST sujeitas a uma carga axial. Para otimizar a JST foi estudado o impacto dos parâmetros geométricos na distribuição de tensões da junta. Os autores representaram o modelo a partir do modelo 2D representado na Figura 32, uma vez que a geometria e a carga da junta tubular são axisimétricas.

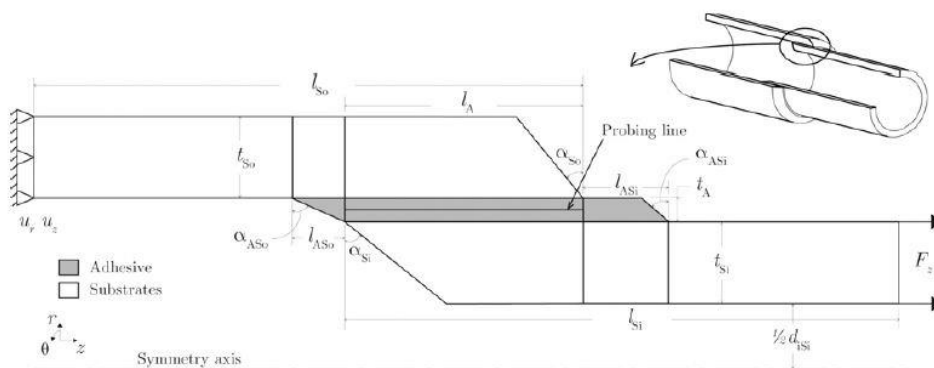


Figura 32 - Modelo axisimétrico 2D de EF da junta adesiva tubular [78]

Este estudo levou às seguintes conclusões [78]:

- A tensão normal nas extremidades aumenta com as espessuras do substrato t_{Si} e t_{So} ;
- Quando o ângulo dos chanfros na extremidade dos substratos, α_{Si} e α_{So} , não se encontram dentro do intervalo 0° e 45° , geram um aumento das tensões normais na camada de adesivo na extremidade do tubo interior, enquanto a distribuição das mesmas permanece constante ao longo da película de adesivo;
- A concentração de tensões nas extremidades da junta aumenta com o comprimento do chanfro, l_{Asi} e l_{Aso} ;
- Quanto maior o diâmetro do substrato, menor é a magnitude das tensões normais;
- O único parâmetro sem influência significativa a nível de tensões são os chanfros dos substratos nas extremidades dos mesmos.

Kim e Lee [84] levaram a cabo um estudo onde o módulo de elasticidade e tensão de rotura de adesivos, bem como resistência à tração de JST foram ensaiadas experimentalmente e numericamente considerando diferentes frações volúmicas de partículas de alumínio e temperaturas ambiente. A partir dos ensaios de tração realizados, foi possível perceber que as propriedades mecânicas dos adesivos diminuem drasticamente junto da temperatura de transição vítrea, enquanto nos adesivos com enchimento de alumínio a deterioração das propriedades é linear (Figura 33).

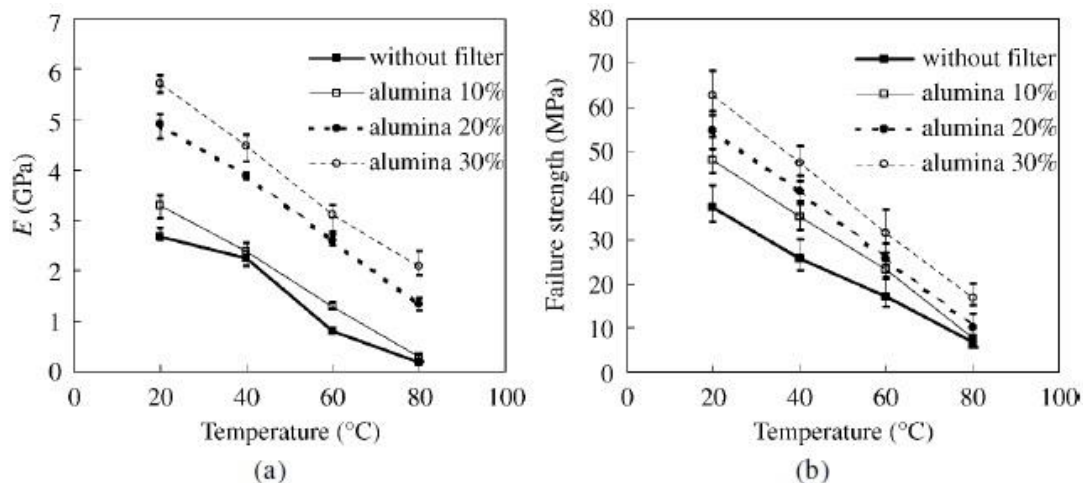


Figura 33 - Propriedades à tração do adesivo com diferentes frações volúmicas de partículas de alumínio a temperaturas ambiente distintas: (a) módulo de elasticidade longitudinal (b) tensão de rotura [84]

Também foi constatado que a função de degradação térmica das propriedades do adesivo proposta por Chamis e Sinclair [85] pode não inferir corretamente as propriedades mecânicas do adesivo acima da temperatura de transição vítrea, pelo que foi deduzida uma nova fórmula para determinar o módulo de elasticidade longitudinal

do adesivo tendo em conta a temperatura ambiente e fração volúmica de partículas de alumínio (Figura 34).

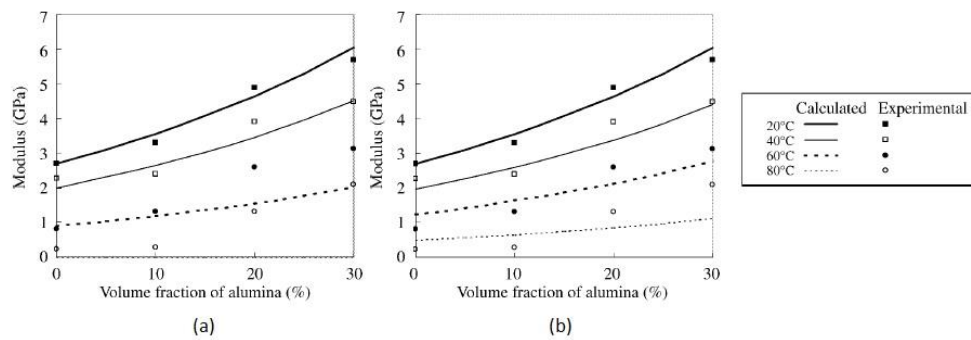


Figura 34 - Módulo de elasticidade do *adesivo epóxico* com partículas de alumínio: (a) valores obtidos pela equação de Chamis e Sinclair e (b) função obtida pela nova equação [84]

2.4.2 Juntas tubulares sujeitas a esforços de torção

Hosseinzadeh, Shahin [80] levaram a cabo uma investigação onde foi estudado o comportamento de juntas adesivas tubulares de aço sujeitas a esforços de torção. Os autores recorreram ao modelo de plasticidade de Ramberg-Osgood [86] para caracterizar o comportamento das juntas em estudo, e foram comparados os resultados obtidos com a solução alcançada por simulações de EF realizadas em Abaqus®. O estudo demonstrou que o modelo mencionado anteriormente retrata de forma satisfatória o comportamento das juntas com vários comprimentos de sobreposição. Foi também possível perceber a distribuição de tensões na junta e o modo de rotura.

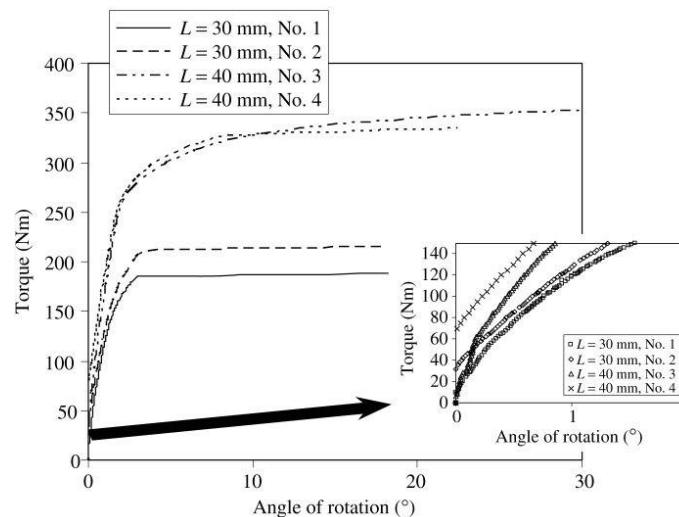


Figura 35 - Comportamento plástico de dois comprimentos de sobreposição diferentes, L , resultantes do teste de torção estático [80]

Na Figura 35 está representado o gráfico de binário vs. deformação angular resultante do ensaio estático de torção a juntas tubulares para $L_0=30$ mm e $L_0=40$ mm (duas

amostras para cada comprimento). Tal como se pode observar no gráfico da Figura 35, a resposta do adesivo à torsão é completamente plástica. Mesmo ampliando a fase inicial do gráfico, verifica-se que o comportamento do adesivo não é linear em qualquer momento.

Considerando o comportamento linear do adesivo, os resultados da análise de EF revelaram que juntas com comprimentos de sobreposição diferentes apresentavam as mesmas tensões máximas, quando sujeitas a um momento torsor da mesma magnitude. No entanto, considerando o comportamento não linear do adesivo, a junta com $L_0=40$ mm gerou um aumento de 33% na resistência à torção face a $L_0=30$ mm.

A consideração de parâmetros plásticos também fez com que a tensão no interior da zona de ligação aumentasse com o incremento da torção, enquanto a tensão nas extremidades se manteve constante. Isto significa que a região interior da junta se mantém no regime elástico e as extremidade se deformam plasticamente [80].

Je Hoon Oh [87] realizou um estudo numérico onde foi abordada a previsão da resistência de juntas adesivas tubulares com aderentes em compósito pela combinação de análises térmicas e mecânicas. Foi realizada uma análise de EF 2D para calcular as tensões térmicas residuais geradas pelo arrefecimento desde a temperatura de cura do adesivo e uma análise não linear para estimar as tensões mecânicas do adesivo (Figura 36).

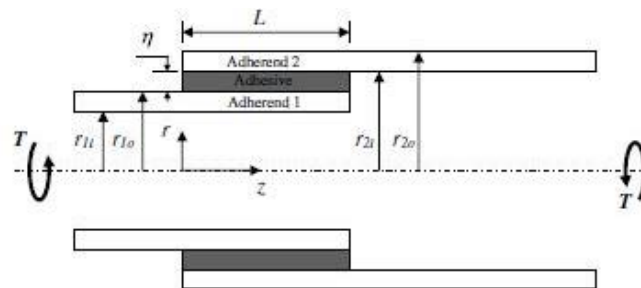


Figura 36 - Configuração da junta tubular de sobreposição [87]

As falhas da junta foram avaliadas por 3 critérios de falha distintos: rotura coesiva, rotura adesiva e rotura pelo substrato. As distribuições de tensões térmicas residuais derivadas do processo de fabrico foram analisadas pela variação do ângulo de empilhamento do compósito.

Usando o coeficiente de expansão térmica (CET) longitudinal, transversal e radial efetivo do tubo de compósito, foram calculadas as tensões térmicas residuais para vários ângulos de empilhamento, tendo-se concluído que as tensões térmicas residuais aumentam com o ângulo de empilhamento (Figura 37).

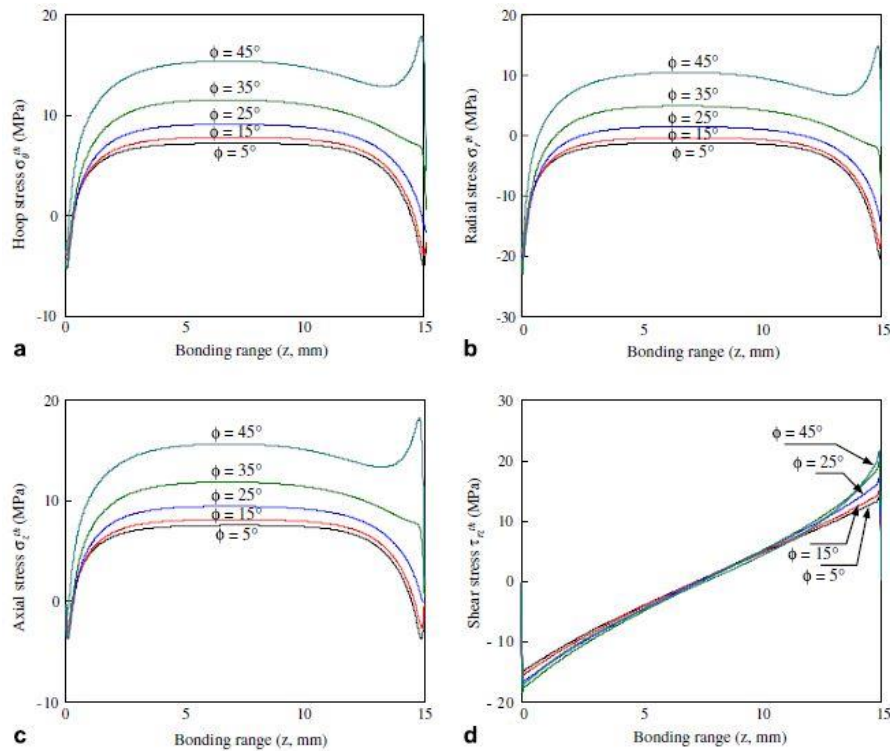


Figura 37 - Distribuição de tensões térmicas residuais para vários ângulos de empilhamento (ϕ) ($\Delta T=60^{\circ}\text{C}$): (a) tensões tangenciais, (b) tensões radiais, (c) tensões axiais, e (d) tensões de corte [87]

A rotura coesiva e pelo substrato ocorrem para ângulos de empilhamento reduzidos, uma vez que a influência das tensões térmicas residuais é negligenciável, enquanto para ângulos de empilhamento elevados dá-se a rotura adesiva devido às altas tensões térmicas residuais presentes.

2.4.3 Juntas tubulares sujeitas a carregamentos de fadiga

Em engenharia, o fenómeno de fadiga está geralmente associado à perda de integridade estrutural ao longo do tempo devido a cargas cíclicas ou intermitentes. A importância da fadiga baseia-se na frequente ocorrência de rotura sobre cargas cíclicas bastante inferiores àquelas que originariam uma rotura estática [10]. O fenómeno de fadiga é bastante comum na maioria dos materiais e é estimado que 80% de todas as roturas em engenharia sejam atribuídas à fadiga [10].

Knox, Cowling [88] realizaram um estudo experimental para investigar o desempenho à fadiga de uma junta de tubular compósita com 100 mm de diâmetro sujeita a cargas mecânicas externas. Foram examinados os comportamentos à fadiga quando a junta está sujeita tanto as cargas axiais como de flexão, e também a influência de defeitos axisimétricos [88].

A partir do trabalho experimental realizado neste estudo, foi possível concluir que:

- O envelhecimento da junta, ocorrendo à temperatura e humidade ambiente, pode ser benéfico a longo prazo para a resistência a cargas de fadiga;
- Carregamentos de fadiga axiais em juntas tubulares fabricadas por enrolamento filamentar são mais influentes para a vida útil à fadiga da junta do que carregamentos cíclicos devido a pressão interna;
- Em carregamentos de flexão e tração, temperaturas elevadas (90°C) reduzem a vida útil à fadiga;
- Podem estar presentes nas extremidades das juntas, grandes defeitos axisimétricos que mesmo assim a junta consegue manter uma integridade adequada a longo prazo.

A resistência de juntas de sobreposição tubulares é afetada por vários fatores, tais como a folga diametral, tipo de montagem, material dos substratos, temperatura de operação, tipo de carga, rugosidade das superfícies, etc. Sekercioglu [89] levou a cabo um estudo onde foram testados 44 provetes de JST. Metade dos provetes foram sujeitos a ensaios estáticos e os restantes sujeitos a ensaios dinâmicos. De acordo com a carga aplicada, a confiabilidade de resistência das juntas adesivas sujeitas a carregamentos dinâmicos foi de 92%, enquanto para cargas estáticas foi de 89%.

Com este estudo experimental foi possível concluir que, para testes dinâmicos, os dados são limitados devido ao tempo elevado para a execução dos ensaios. Mesmo assim admite-se que as análises de confiabilidade de juntas adesivas podem ser realizadas de acordo com este estudo, sempre que houver falta de conhecimento sobre a confiabilidade das juntas.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Metodologia

O presente capítulo tem como objetivo descrever a metodologia adotada tanto na validação experimental como no trabalho numérico. Primeiramente são descritas as geometrias das juntas a analisar bem como os materiais dos utilizados. É também abordado o modelo de dano coesivo triangular e a determinação das propriedades coesivas dos diferentes adesivos. Por fim, são descritas as condições das análises numéricas com o passo a passo do procedimento seguido no *software* Abaqus®.

3.1.1 Geometrias

Uma vez que não será realizado um trabalho experimental torna-se necessário validar de alguma forma a metodologia usada para o trabalho numérico. Como não existem trabalhos experimentais com metodologias equivalentes em JTC, a validação experimental terá como base o trabalho experimental em JST realizado por Ferreira [5].

3.1.1.1 Geometria da validação experimental

Na Figura 38 está representada a configuração da JST utilizada na validação experimental. A espessura do adesivo (t_A) é a mesma para todas as amostras (0,20 mm), bem como espessura dos substratos interior (t_{SI}) e exterior (t_{SE}) (2 mm). O mesmo se sucede relativamente ao diâmetro externo dos tubos: interior (d_{SI}) 20mm e exterior (d_{SE}) 22,40 mm. O comprimento dos substratos (L_S) tem o valor de 50 mm até aos pontos de amarração. Foram concebidas dez amostras para cada um dos três adesivos em estudo, cinco delas com um $L_O=20$ mm e as restantes cinco $L_O=40$ mm. O valor do comprimento total (L_T) da amostra em estudo depende de L_O .

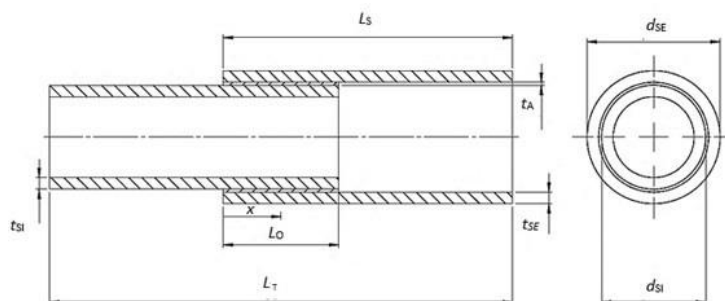


Figura 38 - Configuração da geometria da JST de validação [5]

3.1.1.2 Geometria do trabalho numérico

Na Figura 39 está representada a JTC utilizada no trabalho numérico. O valor de t_A é o mesmo para todas as amostras (0,20 mm), bem como t_S (2 mm). O mesmo se sucede relativamente a d_S , com 20 mm, e L_S , de 80 mm. O parâmetro geométrico sujeito a variação foi α , que assumiu os valores de 45°, 30°, 20°, 15°, 10° e 3,43°.

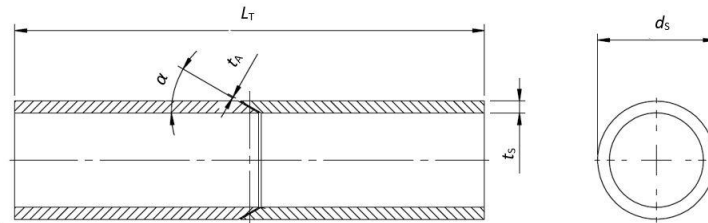


Figura 39 - Configuração da geometria JTC para análise numérica

3.1.2 Materiais

3.1.2.1 Substratos

Todas as juntas adesivas foram concebidas com aderentes em liga de alumínio AW6082-T651. Esta liga foi caracterizada em estudos anteriores [77], onde foram obtidas as seguintes propriedades mecânicas: resistência à tração de $324,00 \pm 0,16$ MPa, módulo de Young de $70,07 \pm 0,83$ GPa, tensão de cedência à tração de $261,67 \pm 7,65$ MPa e deformação de rotura à tração de $21,70 \pm 4,24\%$. Na Figura 40 é possível observar as curvas σ - ϵ obtidas experimentalmente através da norma ASTM-E8M-04 [77] e ainda a aproximação numérica usada nos modelos MDC e MEFX [90]

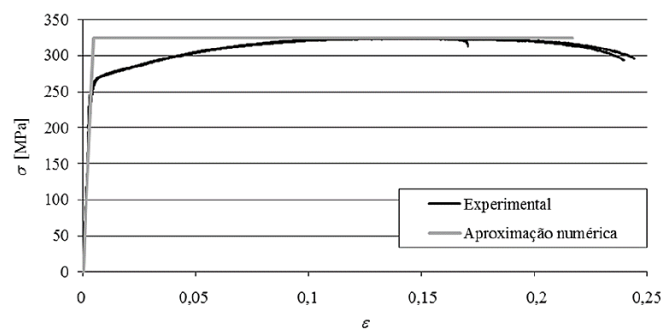


Figura 40 - Curvas tensão-deformação (σ - ϵ) da liga de alumínio AW6082-T651 [3]

3.1.2.2 Adesivos

Para promover a união entre os substratos de alumínio, foram selecionados 3 tipos de adesivos para as juntas adesivas tubulares: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. As propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes dos 3 adesivos

mencionados anteriormente encontram-se na Tabela 2. As curvas σ - ϵ de provetes maciços ensaiados à tração dos respectivos adesivos estão representadas na Figura 41.

3.1.2.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 combinado com o endurecedor HV 998 é considerado um epóxido bi-componente que apresenta boas características químicas e mecânicas e é considerado um adesivo frágil [91].

3.1.2.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 é um adesivo estrutural bi-componente com resistência à tração inferior ao adesivo Araldite® AV138. No entanto, este possibilita uma melhor distribuição de tensões graças à sua ductilidade moderada [92].

3.1.2.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752 trata-se de um adesivo à base de poliuretano constituído por dois componentes: resina e endurecedor (FRW L60). É um adesivo dúctil que, comparativamente aos adesivos anteriores, apresenta uma menor resistência à tração.

Tabela 2 - Propriedades mecânicas dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 [92-94]

| Propriedades | Araldite® AV138 | Araldite® 2015 | Sikaforce® 7752 |
|---|-------------------|----------------|-----------------|
| Módulo de Young, E [GPa] | 4,89 ± 0,81 | 1,85 ± 0,21 | 0,494 ± 89,6 |
| Coeficiente de Poisson, ν^b | 0,35 | 0,33 | 0,33 |
| Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa] | 36,49 ± 2,47 | 12,63 ± 0,61 | 3,24 ± 0,5 |
| Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa] | 39,45 ± 3,18 | 21,63 ± 1,61 | 11,49 ± 0,3 |
| Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%] | 1,21 ± 0,10 | 4,77 ± 0,15 | 19,18 ± 1,4 |
| Módulo de elasticidade transversal, G [GPa] | 1,56 ± 0,01 | 0,56 ± 0,21 | 0,1878 ± 16,4 |
| Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa] | 25,1 ± 0,33 | 14,60 ± 1,30 | 5,16 ± 1,1 |
| Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa] | 30,2 ± 0,40 | 17,90 ± 1,80 | 10,17 ± 0,6 |
| Deformação de rotura ao corte, γ_f [%] | 7,8 ± 0,7 | 43,90 ± 3,40 | 54,82 ± 6,4 |
| Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm] | 0,20 ^a | 0,43 ± 0,02 | 2,36 ± 0,2 |
| Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm] | 0,38 ^a | 4,70 ± 0,34 | 5,41 ± 0,5 |

^a valores estimados na referência [93].

^b valor do fabricante

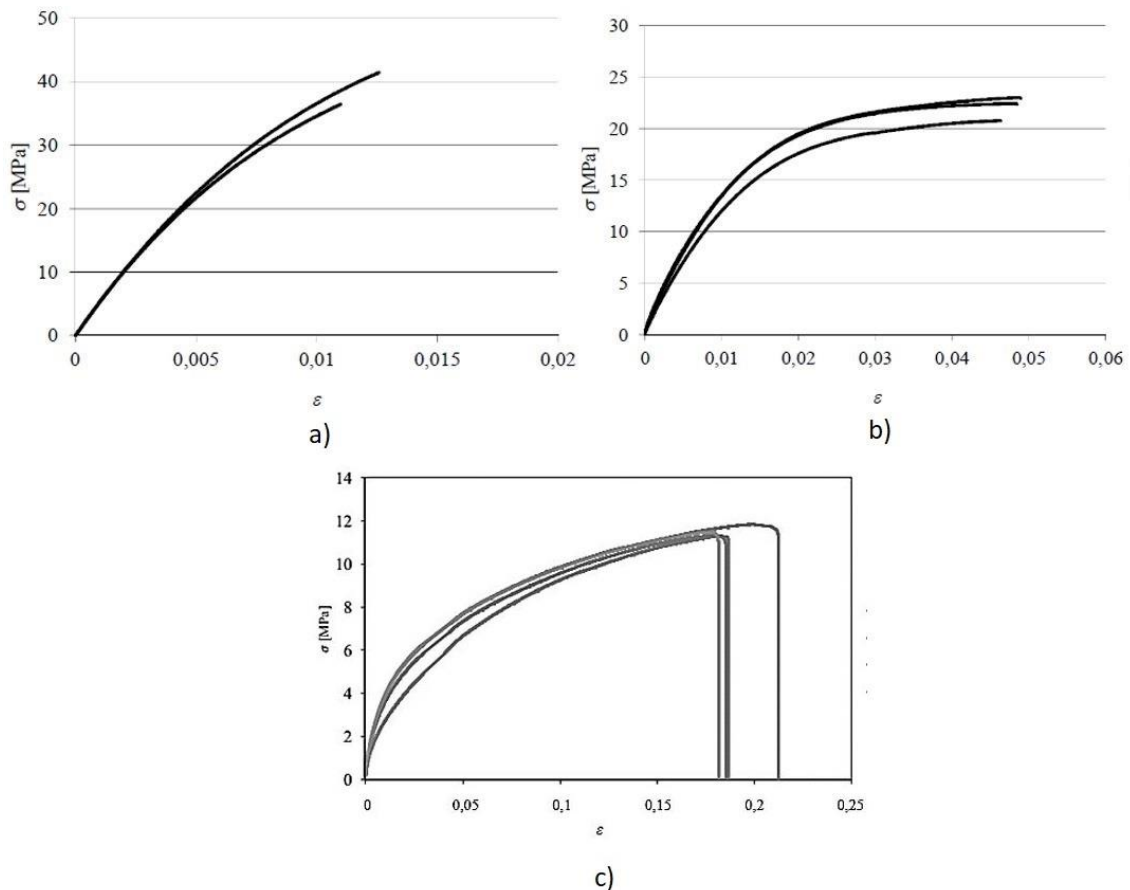


Figura 41 – Curvas σ - ϵ dos adesivos (a) Araldite®, (b) AV138, Araldite® 2015 e (c) SikaForce® 7752 Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade [92-94]

3.1.3 Modelo de dano coesivo triangular

Na literatura, são propostas várias leis coesivas para diferentes materiais, sendo que a lei exponencial [95] e a triangular [96] são as mais comumente utilizadas. No presente trabalho foi utilizada a lei coesiva de tração-separação triangular disponível no *software* Abaqus® para simular a propagação do dano numa JST e JTC.

O modelo de dano triangular pode ser do tipo 2D ou 3D, sendo que no modelo triangular 2D são distinguidos dois modos, o puro e o misto (Figura 42). O modo puro divide-se em modo I e modo II. No modo I a fenda abre por esforços de tração, enquanto no modo II a fenda propaga por esforços de corte [97]. Em modo misto, os modos I e II atuam simultaneamente, e são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tração e corte [98].

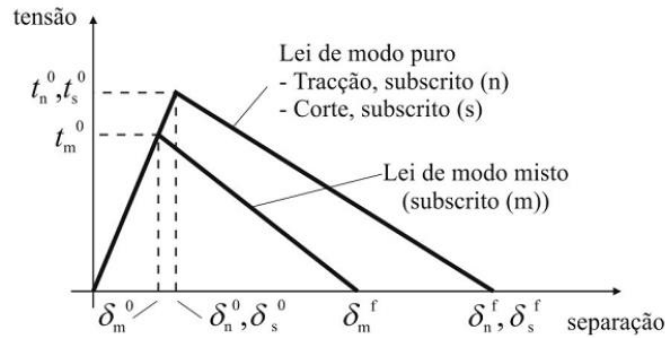


Figura 42 - MDC triangular [93]

A matriz \mathbf{K}_{COH} (1) define a relação de tensões e deformações à tração e corte nos elementos coesivos, antes da ocorrência do dano. A matriz contém parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição está dependente da formulação utilizada:

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

Quando a formulação é local, os elementos coesivos servem para simular fratura de espessura nula. Neste caso, os parâmetros da matriz \mathbf{K}_{COH} são bastante altos, com a finalidade se não existirem deformações na estrutura, resultantes da presença dos elementos coesivos [99]. Na formulação contínua de camadas finas para ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo a equação (2), onde G é o módulo de elasticidade transversal:

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

Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [98]. O critério da tensão nominal quadrática, expresso pela expressão (3) define a iniciação do dano em modo misto.

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

“ $\langle \rangle$ ” são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente à compressão não contribui para a iniciação do dano. A taxa de degradação da rigidez do material após a iniciação do dano caracteriza a evolução do mesmo. Quando a resistência máxima é atingida (t_m^0 na Figura 42), a rigidez do material começa a ser degradada. A separação completa de um par de nós homólogos, δ_m^f , é prevista por um critério linear energético, definido pela equação (4), em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} [100]:

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

3.1.4 Determinação das propriedades coesivas

Para caracterizar as leis coesivas à tração e corte é necessário conhecer t_{n0} , t_{s0} , G_{IC} e G_{IIC} . Alguns estudos no passado assumiam por aproximação que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos em ensaios de adesivo maciço [99, 101]. No entanto, estudos mais recentes revelaram que as restrições às deformações na camada do adesivo provocadas pelos substratos, e a propagação da fenda tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades obtidas para o adesivo maciço e como camada fina [102-104]. Desta forma, torna-se necessária a utilização de métodos apropriados para a definição das propriedades que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes estão a ser utilizados.

3.1.4.1.1 Araldite® AV138

Para a determinação das leis coesivas do adesivo Araldite® AV138 foi utilizado o método inverso de um trabalho anterior [105]. Para definição de t_{n0} e t_{s0} foram utilizados, respetivamente, valores de resistência obtidos em ensaios de tração ao adesivo maciço e de corte, designados por *Thick Adherend Shear Test* (TAST). Estes valores, combinados com valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis, foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas. As leis obtidas foram então aplicadas num modelo numérico e posteriormente, por comparação das curvas P - δ experimentais, foi possível ajustar G_{IC} e G_{IIC} até que estes reproduzissem os resultados experimentais. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente por ensaios de tração ao adesivo maciço e de corte (TAST), respetivamente. No referido trabalho [77] foi concluído que os parâmetros obtidos reproduzem de forma adequada as propriedades do adesivo.

3.1.4.1.2 Araldite® 2015

Para determinação das leis coesivas do adesivo Araldite® 2015 foi utilizado igualmente um método inverso no mesmo trabalho referido anteriormente [105]. Neste caso, os parâmetros obtidos experimentalmente foram G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente. De seguida foram utilizados estes valores de G_{IC} e G_{IIC} e valores aproximados de t_{n0} ou t_{s0} para a construção de uma lei coesiva. Novamente, através da aproximação das curvas P - δ numéricas e experimentais, os valores de t_{n0} ou t_{s0} foram definidos de forma que a lei coesiva permitisse reproduzir fielmente o comportamento observado do adesivo [106]. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente por ensaios de adesivo maciço [107] e de corte (TAST), respetivamente.

3.1.4.1.3 SikaForce® 7752

O processo de obtenção das propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 foi semelhante ao utilizado para o adesivo Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_{IC} por ensaio de fratura ENF, seguido do ajuste iterativo de t_{s0} [108]. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fratura DCB e o valor de t_{n0} foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [94]. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST), respetivamente [94].

A Tabela 3 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada dos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 numa lei em modo misto.

Tabela 3 - Parâmetros coesivos em tração e corte para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 [77] [105] [94]

| Adesivo | E [MPa] | G [MPa] | t_n^0 [MPa] | t_s^0 [MPa] | G_{IC} [N/mm] | G_{IIC} [N/mm] |
|-----------------|---------------------------------|---------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------------|---------------------------------------|--|
| Araldite® AV138 | 4890 | 1560 | 39,45 | 30,20 | 0,20 | 0,38 |
| Araldite® 2015 | 1850 | 560 | 21,63 | 17,90 | 0,43 | 4,70 |
| SikaForce® 7752 | 493,81 | 187,75 | 11,49 | 10,17 | 2,36 | 5,41 |

3.1.5 Condições de análise numérica

A análise numérica teve como base o MEF e, para tal, foi selecionado o *software* Abaqus®, versão 6.13 (Dassault Systèmes). Este é um *software* que permite a utilização de um módulo integrado de MDC para prever a resistência de juntas adesivas. São apresentados de seguida os passos de pré-processamento da modelação por esta técnica, fazendo referência aos módulos de *software* onde foi introduzida a informação: *Part, Property, Assembly, Step, Load, Mesh, Job* e *Visualization*. Uma vez que os modelos são constituídos por uma peça única não há necessidade de executar nenhuma ação no passo *Interaction*.

A análise de MEF tem por base a utilização de elementos axisimétricos deformáveis de quatro nós (CAX4 do ABAQUS®) para a modelação dos substratos, e elementos coesivos axisimétricos (COHAX4R do ABAQUS®) para a camada do adesivo, como aproximação da geometria em análise, que fornece resultados precisos para este tipo de geometrias [109].

Na interface gráfica do *software* Abaqus® existem vários passos que devem ser completados de forma sequencial. Como tal, de seguida são descritas essas operações para a criação de uma JST e JTC.

3.1.5.1 1º Passo – Part

No primeiro passo foi efetuado o desenho da JST (Figura 43 a) e da JTC (Figura 43 b). Para modelar os substratos e adesivos, desenhou-se um corpo único, que posteriormente foi dividido em partições para atribuição dos respetivos materiais. A modelação dos aderentes foi efetuada com elementos axisimétricos quadrangulares de quatro nós. Na análise de rotura por MDC considerou-se o comportamento não linear geométrico das juntas.

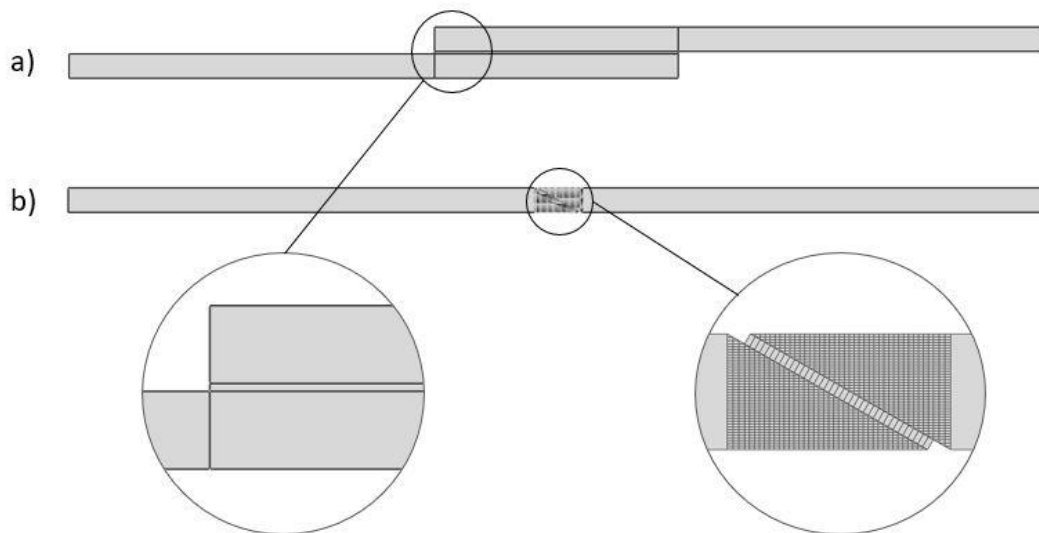


Figura 43 – Diferentes partições existentes no modelo criado no Abaqus®: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC $\alpha=30^\circ$

Nas simulações numéricas das JST e JTC foram construídos modelos com as dimensões de cada configuração de junta. Na Figura 44 a) é representada a construção de uma JST com $L_0=20$ mm, enquanto a Figura 44 b) mostra a construção de uma JTC com um ângulo de chanfro de 30° . Tratando-se de análises de elementos axisimétricos, em ambas construções é possível observar os eixos de revolução que posicionam o modelo no centro do sistema de eixos e ditam o diâmetro das juntas tubulares.

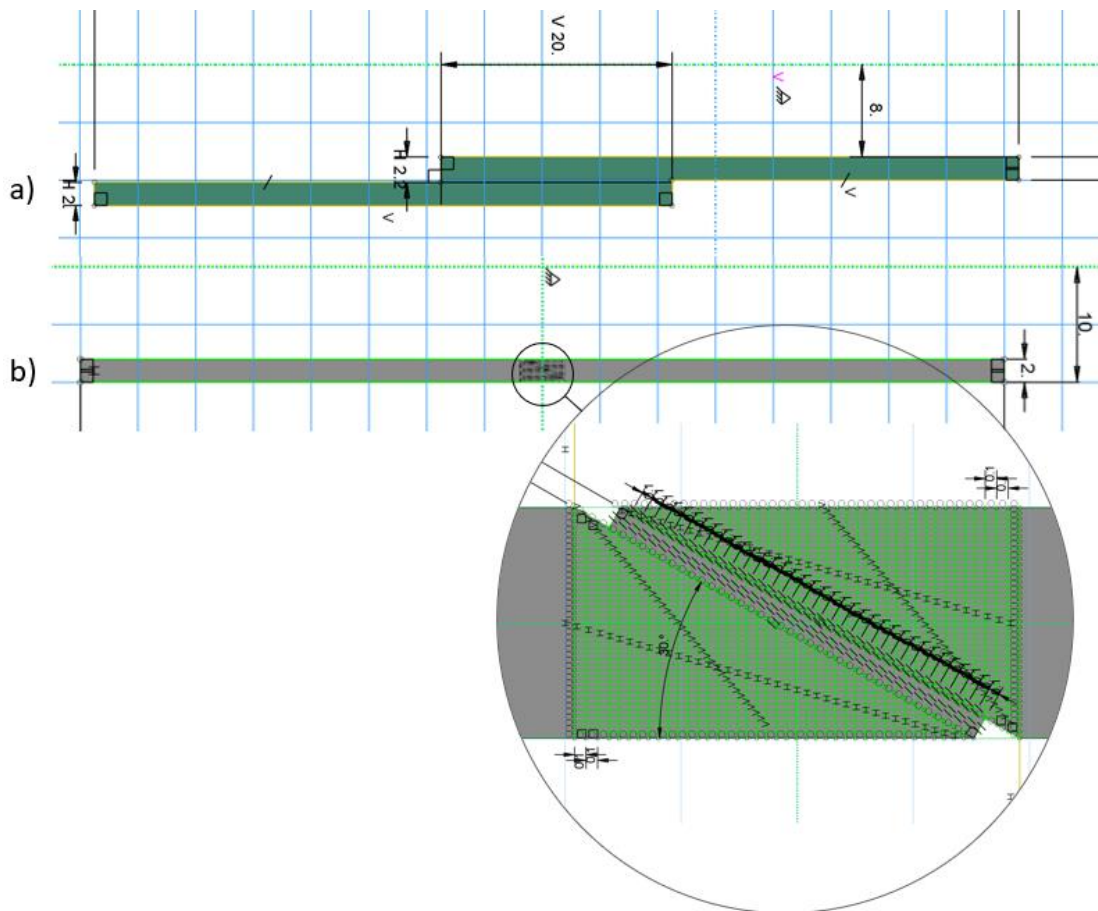


Figura 44 - Desenho 2D no Abaqus® de: a) JST com $L_o=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$

Após o desenho dos conjuntos substrato-adesivo foi necessário efetuar partições de forma a atribuir diferentes propriedades e diferentes comportamentos às secções (Figura 43). Para a JST, na camada de adesivo, modelada por elementos MDC, considerou-se apenas um elemento na direção de t_A . Na JTC consideraram-se elementos com 0,1 mm ao longo do comprimento da camada de adesivo. Neste caso foi criada uma inclinação com o ângulo desejado, e posteriormente os substratos foram divididos em elementos quadrangulares e triangulares para modelar a rampa inclinada que constitui o *scarf*. O número de elementos é função de α , o que por sua vez faz variar o comprimento da camada de adesivo. As partições criadas devem isolar diferentes zonas da junta, como a camada de adesivo com $t_A=0,2$ mm e os aderentes.

3.1.5.2 2º Passo – Property

Depois de ter as partições criadas (adesivo e substratos), é neste passo que são atribuídas as suas propriedades mecânicas. Também é neste módulo que são criados os materiais e atribuídas secções às devidas partições. Na Figura 45 podem ser observados os elementos ao quais foi atribuído o material adesivo (elementos a vermelho), e os elementos que foram definidos como aderente (elementos a azul). Na definição das

propriedades dos materiais foram usadas as propriedades mencionadas no capítulo 3.1.2. O adesivo é modelado pela aproximação contínua, com uma única linha de elementos coesivos e uma lei de tração-separação triangular, incluindo a rigidez da camada adesiva. Para alumínio é considerada a sua rigidez e plasticidade de forma a aferir se os tubos cedem antes ou depois da camada adesiva.

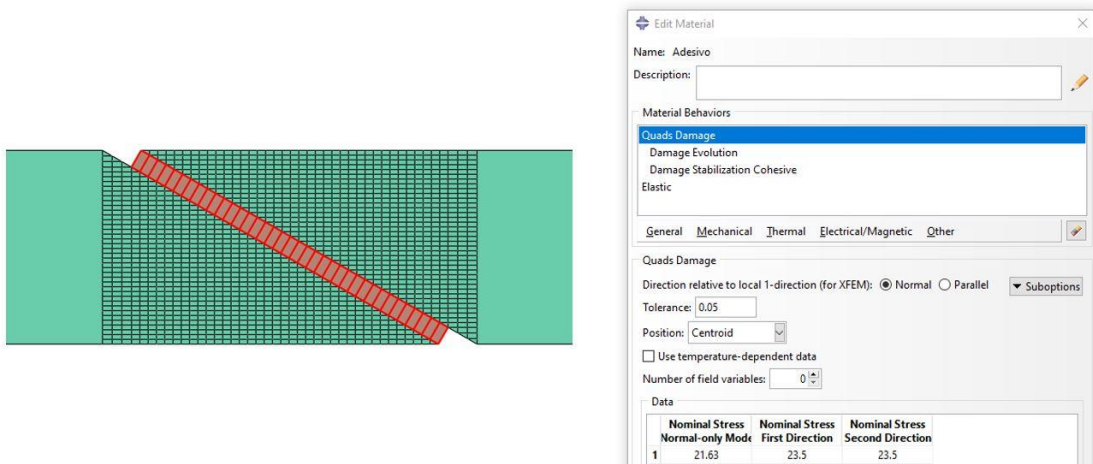


Figura 45 - Definição das propriedades dos materiais e atribuição dos mesmos às respetivas partições

3.1.5.3 3ª Passo – Assembly

Como os modelos são constituídos por um componente (embora dividido em partições relativas aos diferentes constituintes da junta), não é necessário executar nenhuma operação neste passo. No entanto, é necessário inserir o componente único a analisar no espaço de trabalho do *assembly*.

3.1.5.4 4ª Passo – Step

É neste passo que são definidos os parâmetros de computação da simulação. A Figura 46 mostra os parâmetros inseridos nas simulações realizadas. Para evitar a paragem precoce da simulação por exceder o limite máximo de incrementos foi definido o valor de 10000 para o número máximo de incrementos. Tanto o incremento inicial como o tamanho do incremento máximo foram definidos como 1%. O tamanho mínimo do incremento foi um valor extremamente baixo para evitar problemas de convergência, principalmente na fase de propagação do dano.

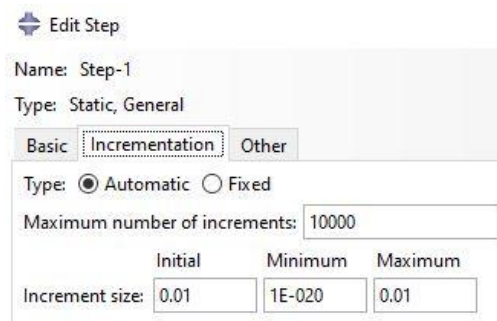


Figura 46 - Definição de incrementos para análise do Abaqus®

3.1.5.5 5º Passo – Load

Neste passo são definidas as condições fronteira do modelo para simular o carregamento de tração das juntas adesivas. Na Figura 47 é possível visualizar as condições fronteira impostas para as JST e JTC no Abaqus®. Numa das extremidades é imposto um encastramento, enquanto na extremidade oposta é aplicado um deslocamento longitudinal e uma restrição radial à secção. O deslocamento longitudinal foi ajustado para cada modelo devido às diferentes propriedades do adesivo e diferentes valores de L_0 e α , que possibilitam a maior ou menor deformação dos substratos de alumínio.

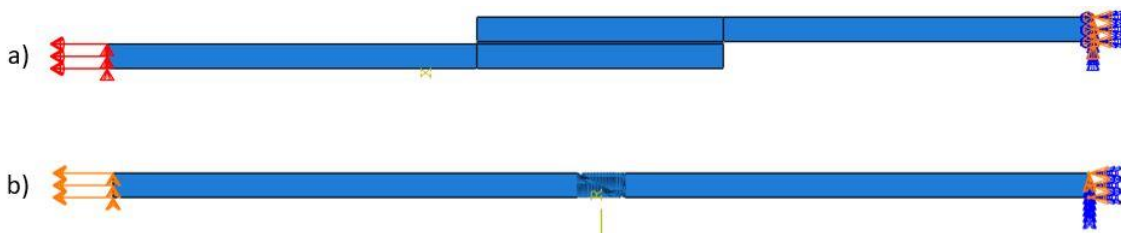


Figura 47 – Representação das condições fronteira impostas nos modelos: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$

3.1.5.6 6º Passo – Mesh

Neste passo é efetuada a discretização do modelo em elementos finitos. As zonas onde são previstos maiores gradientes de tensão devem ser o mais refinadas possível. Por esta razão, nas extremidades da JST (Figura 48 a), a dimensão da malha é mais reduzida de forma a obter valores com elevada precisão. Para a JST foi definido um *bias ratio* que origina um refinamento crescente à medida que se aproximam as extremidades de L_0 . A criação da malha da JTC (Figura 48 b), na zona de sobreposição, foi atribuída segundo as dimensões das partições definidas anteriormente, enquanto para os substratos também foi definido um *bias ratio* ao longo do seu comprimento. Seguidamente foi introduzida viscosidade aos elementos coesivos ($1e^{-5}$ N.s/mm) [110] para evitar problemas de convergência, o que torna o processo de propagação mais suave. Foram também aplicados os *mesh controls* em função do tipo de elemento. Para os substratos

foi aplicado um *mesh control structured*, enquanto para a camada de adesivo foi definido um *mesh control sweep*.

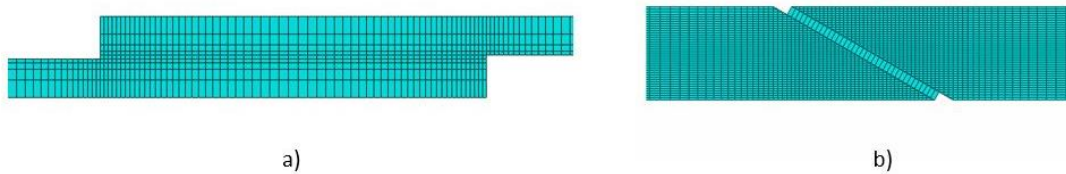


Figura 48 - Detalhe da malha de MEF na zona de sobreposição da: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$

3.1.5.7 7º Passo – Job

É neste passo onde se dá início à simulação computacional. São atribuídos o nome e a capacidade computacional que se pretende dedicar à simulação. Por fim, a simulação é submetida e a sua evolução pode ser seguida. Na Figura 49 é apresentada a janela de monitoramento da simulação. A simulação possui apenas um *step* que possui vários incrementos. Por sua vez, os incrementos podem possuir mais do que uma tentativa e diversas iterações. Na coluna *Step Time/LPF* pode ser observada a percentagem de conclusão da simulação, sendo o valor final de 1, enquanto na coluna *Time/LPF Inc* é apresentado a percentagem da simulação respeitante a cada incremento.

Tub_Sarf_30_AR2015 Monitor

Job: Tub_Sarf_30_AR2015 Status: Completed

| Step | Increment | Att | Severe Discon Iter | Equil Iter | Total Iter | Total Time/Freq | Step Time/LPF | Time/LPF Inc |
|------|-----------|-----|--------------------|------------|------------|-----------------|---------------|--------------|
| 1 | 1 | 1 | 0 | 2 | 2 | 0.01 | 0.01 | 0.01 |
| 1 | 2 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0.02 | 0.02 | 0.01 |
| 1 | 3 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0.03 | 0.03 | 0.01 |
| 1 | 4 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0.04 | 0.04 | 0.01 |
| 1 | 5 | 1 | 0 | 1 | 1 | 0.05 | 0.05 | 0.01 |

Figura 49 - Janela de monitoramento da simulação no Abaqus®

3.1.5.8 8º Passo – Visualization

Neste passo é possível visualizar os resultados obtidos para as juntas adesivas. Na Figura 50 é possível observar uma a) JST com $L_0=20$ mm e uma b) JTC com $\alpha=30^\circ$ após rotura completa da camada de adesivo. Depois de terminada a simulação é possível extrair os dados XY da reação do encastramento e o deslocamento na extremidade oposta, o que permite a criação das curvas $P-\delta$.

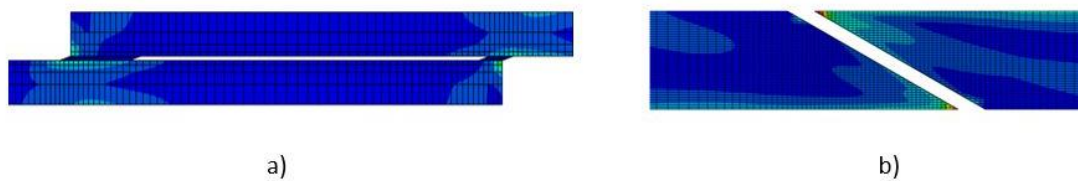


Figura 50 - Aspeto da distribuição de tensões após simulação no Abaqus®: a) JST com $L_0=20$ mm, b) JTC com $\alpha=30^\circ$

3.2 Validação experimental

3.2.1 Resultados experimentais obtidos

No presente subcapítulo são apresentadas as curvas força-deslocamento ($P-\delta$) para os diferentes adesivos e valores de L_0 , referentes aos ensaios experimentais das JST. Foram realizados ensaios de tração para cada caso, tendo sido obtido roturas coesivas para todas as amostras testadas. A análise destes dados experimentais é de extrema importância, uma vez que servirá como validação das soluções obtidas pelos estudos numéricos, no subsequente capítulo 3.3.

3.2.1.1.1 Araldite® AV138

Na Figura 51 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente, em JST, para o adesivo Araldite® AV138 e diferentes valores de L_0 . Nos provetes com $L_0=20$ mm (Figura 51 a) verifica-se a plastificação dos substratos nas amostras 1 e 2, enquanto as restantes amostras apresentam um comportamento linear até à rotura. A plastificação dos substratos poderá ter sido originada por excesso de adesivo na junta, gerando uma área de contacto superior à desejada. Em todos os provetes com $L_0=40$ mm (Figura 51 b) os substratos sofreram plastificação. Genericamente, foi possível obter uma boa repetibilidade das curvas $P-\delta$, sendo que a variação existente é associada a questões associadas ao fabrico dos provetes e variação das propriedades dos materiais.

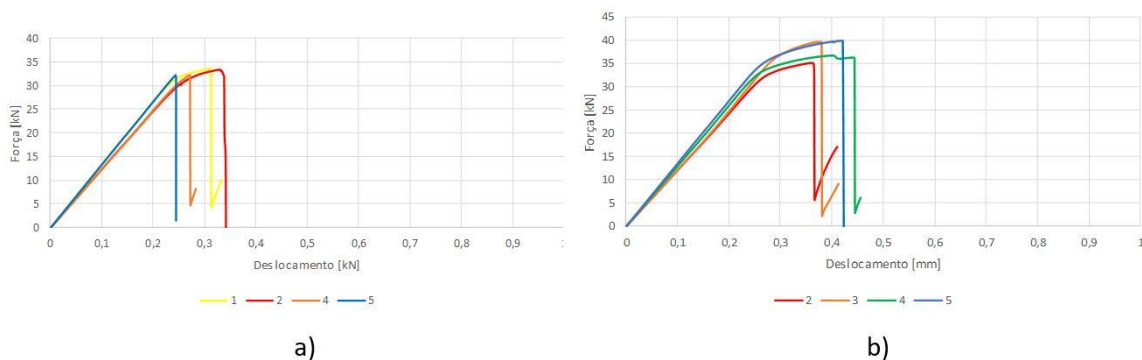


Figura 51 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® AV138: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [5]

3.2.1.1.2 Araldite® 2015

Na Figura 52 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente, em JST, para o adesivo Araldite® 2015 e diferentes valores de L_0 . Para $L_0=20$ mm (Figura 52 a), as JST com Araldite® 2015 apresentam todas um comportamento linear até à rotura, uma vez que apresentam cargas máximas inferiores às obtidas no adesivo Araldite® AV138. Desta forma não se verifica a plastificação dos substratos para $L_0=20$ mm, ao contrário do que acontece para $L_0=40$ mm (Figura 52 b). No geral, verifica-se uma boa repetibilidade em termos de rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento.

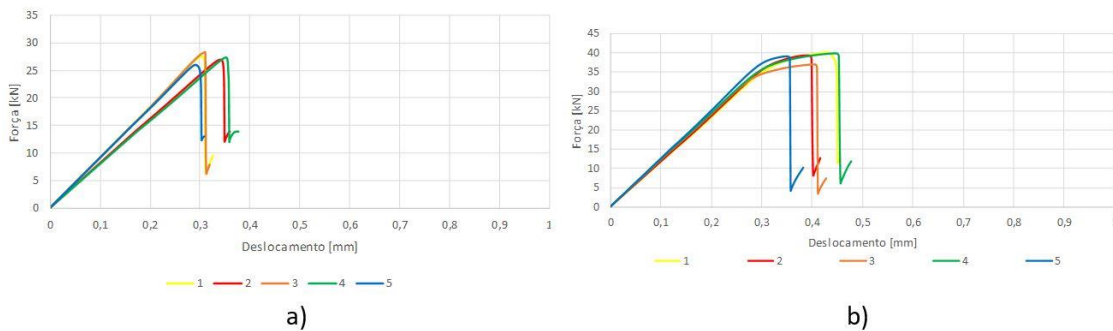


Figura 52 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o Araldite® 2015: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [5]

3.2.1.1.3 SikaForce® 7752

Para o adesivo SikaForce® 7752, são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente na Figura 53.

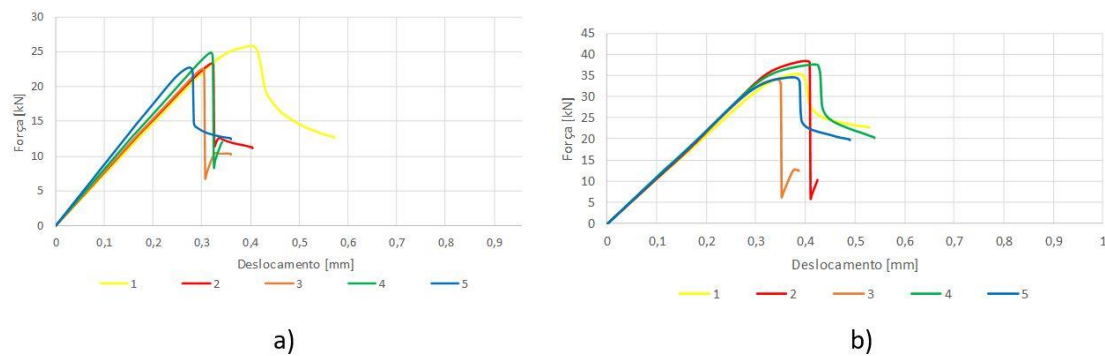


Figura 53 - Curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente para o SikaForce® 7752: a) $L_0=20$ mm; b) $L_0=40$ mm [5]

À semelhança do que se verificou nos provetes com o adesivo Araldite® AV138 com $L_0=20$ mm, também para o adesivo SikaForce® 7752 (Figura 53 a) se verificou que, num dos provetes, houve plastificação do adesivo enquanto nos restantes constatou-se o comportamento linear das juntas até à rotura. Nos provetes com $L_0=40$ mm (Figura 53 b) verificou-se a plastificação dos substratos em todas as amostras, se bem que o provete 3 apresentou uma deformação até à rotura inferior aos restantes, muito

provavelmente justificado pela falta de concentricidade dos dois aderentes. Apesar destas diferenças, em geral assiste-se a uma boa repetibilidade das curvas no que concerne à rigidez, carga máxima e respetivo deslocamento.

3.2.2 Comparação de resultados

Na Figura 54 é possível observar graficamente, o incremento da força máxima aplicada ($P_{m\acute{a}x}$) com a variação de L_0 para as juntas com os três adesivos. Na Tabela 4 são apresentados os valores médios de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e o aumento percentual dos mesmos, para os três adesivos em estudo. Na Figura 54 é possível observar a evolução gráfica de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em estudo, em função de L_0 .

Tabela 4 - $P_{m\acute{a}x}$ 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 juntas adesivas tubulares [5]

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

O adesivo Araldite® AV138, para um valor de $L_0=20$ mm, foi dos três, o que apresentou um valor de $P_{m\acute{a}x}$ superior (32797,5 N). Para um valor de $L_0=40$ mm, $P_{m\acute{a}x}$ teve um aumento relativamente reduzido de 15,4% até 367854,2 N, o que evidencia a sua fragilidade. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um valor de $P_{m\acute{a}x}$ mais reduzido para um $L_0=20$ mm (27238,4 N). Contudo, o aumento percentual para um $L_0=40$ mm foi de 43,4%, apresentando-se como a junta mais resistente com $P_{m\acute{a}x}=39066,8$ N. Devido à sua elevada ductilidade, o adesivo SikaForce® 7752 é aquele que apresenta maior aumento percentual entre $L_0=20$ mm e $L_0=40$ mm (50,6%). Contudo, a carga máxima manteve-se abaixo dos adesivos anteriormente descritos, com $P_{m\acute{a}x}=23856,4$ N para $L_0=20$ mm e $P_{m\acute{a}x}=35929,9$ N para $L_0=40$ mm.

Através da realização dos ensaios experimentais verifica-se que o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com L_0 varia consoante o tipo de adesivo. Os adesivos Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 são aqueles que apresentam maior resistência em ambos os valores de L_0 . Por outro lado, o adesivo Sikaforce® 7752 é aquele que revela um maior aumento percentual do $P_{m\acute{a}x}$ com o aumento de L_0 . Este incremento de resistência superior aos restantes adesivos deve-se ao facto de o adesivo Sikaforce® 7752 ser o adesivo mais dúctil dos três estudados. Também o adesivo Araldite® 2015 acaba por apresentar uma resistência superior ao Araldite® AV138 com $L_0=40$ mm pela mesma razão referida anteriormente.

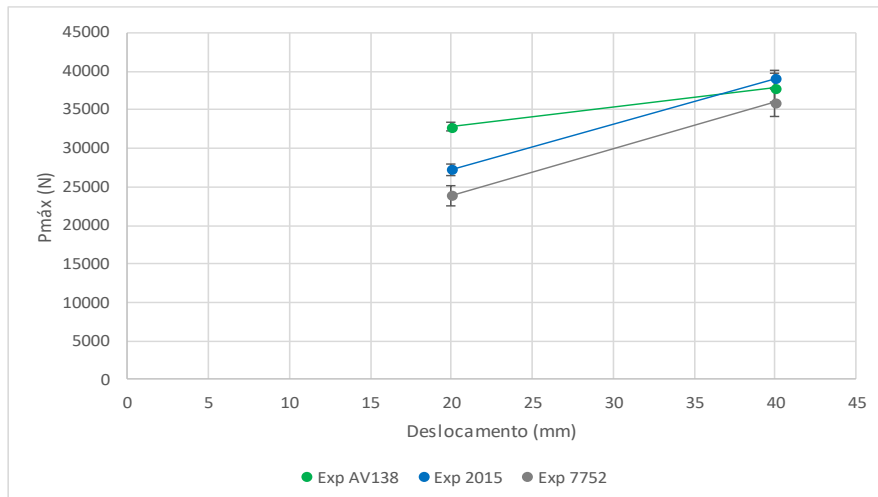


Figura 54 - Variação de $P_{máx}$ com L_0 para as juntas adesivas com os três adesivos [5]

3.2.3 Análise de tensões nas juntas

Neste capítulo são analisadas as tensões de arrancamento (σ_y) e tensões de corte (τ_{xy}) a meio da espessura do adesivo para as JST com diferentes adesivos e valores de L_0 . Todas as distribuições de tensões estão normalizadas por τ_{avg} , que representa a média de tensões na ligação adesiva para cada valor de L_0 . As figuras seguintes representam a distribuição de tensões σ_y e das tensões τ_{xy} em função x/L_0 , em que x está definido na Figura 38.

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 55 são apresentadas as distribuições de tensões σ_y para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos em estudo. De uma forma geral, as tensões σ_y são de magnitude inferior às tensões de τ_{xy} , exceto nas extremidades da junta adesiva devido à sua geometria. Na região central da junta geram-se tensões de compressão e nas suas extremidades tensões de tração devido à deformação transversal da junta provocada pela deformação dos substratos. Estas tensões de arrancamento nas extremidades da junta adesiva poderão conduzir à rotura prematura da mesma [99, 111]. Para valores de L_0 mais elevados os picos de tensão nas extremidades da junta tendem a aumentar. Esta tendência acaba muitas vezes por parar a propagação do dano localizado nas zonas de singularidades [112], o que justifica por vezes o valor de $P_{máx}$ ser obtido após a iniciação da fenda [113]. Na Figura 55 é possível observar que, tanto para $L_0=20$ mm como para $L_0=40$ mm, o adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta maiores picos de tensão junto das extremidades da junta adesivo. Estes picos de tensão devem-se à elevada rigidez do adesivo e podem provocar a rotura prematura da junta adesiva. O adesivo SikaForce® 7752, sendo um adesivo de elevada ductilidade, é aquele que apresenta menores picos de tensões, tal como era espectável.

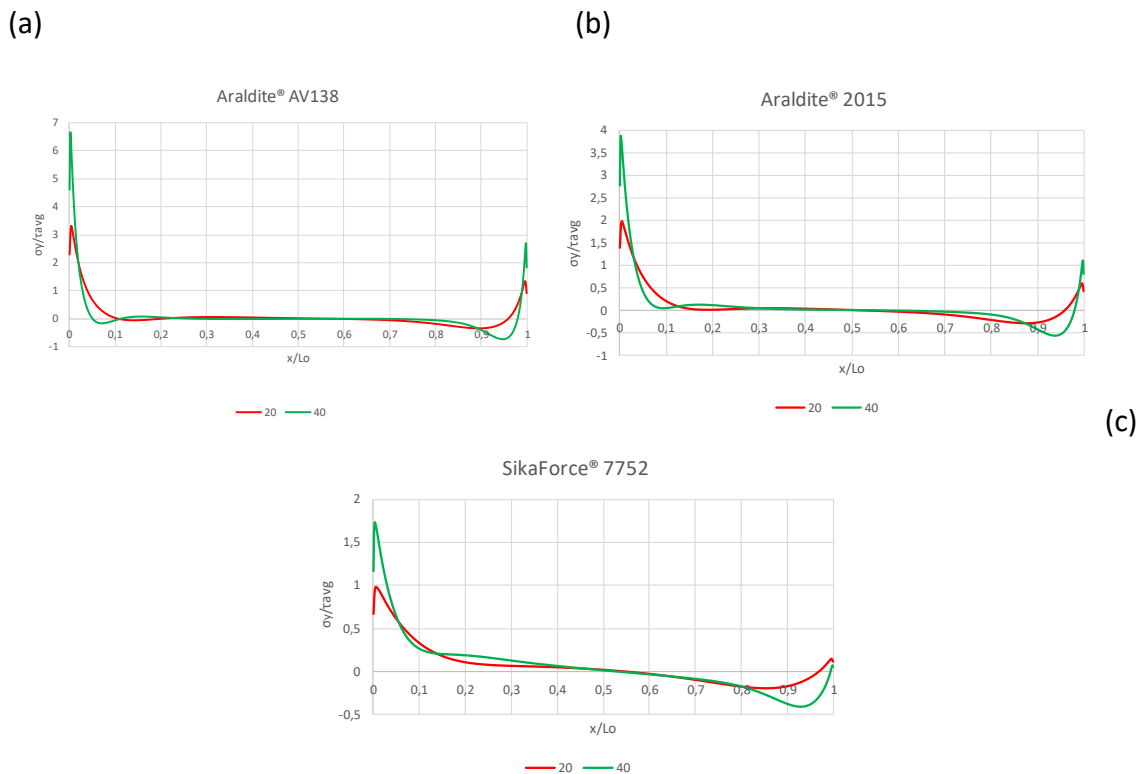


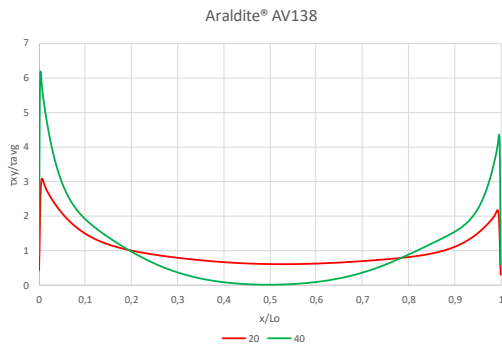
Figura 55 - Distribuição das tensões σ_y nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [5]

3.2.3.2 Tensões de corte

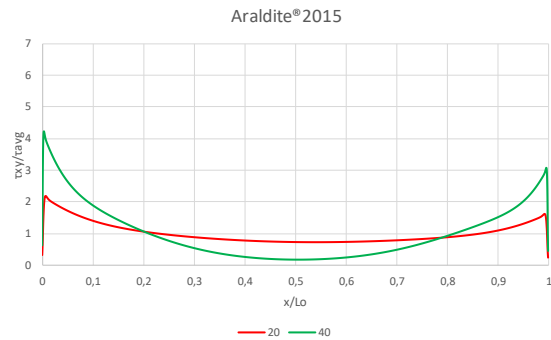
Na Figura 56 são apresentadas as distribuições de tensões τ_{xy} para as juntas adesivas tubulares com os três adesivos em estudo. Tal como se sucede para as tensões σ_y , a distribuição de tensões τ_{xy} apresentam valores mais altos junto às extremidades de L_0 e valores mais reduzidos na região central de L_0 . Este efeito deve-se à existência de uma deformação diferencial dos aderentes ao longo do eixo de revolução da junta [114, 115]. Com o aumento de L_0 , gradientes de tensão τ_{xy} tendem a aumentar devido às crescentes deformações longitudinais nos substratos. Nas juntas adesivas onde são utilizados adesivos frágeis, as tensões σ_y e τ_{xy} não permitem a plastificação nas extremidades de sobreposição, o que afeta a resistência da junta [116]. Por outro lado, nas juntas adesivas onde são empregues adesivos dúcteis, existe uma melhor distribuição de tensões, diminuindo os picos de tensão nas extremidades de L_0 enquanto a zona interna de sobreposição é gradualmente colocada sob cargas crescentes durante o carregamento, o que promove o aumento da resistência da junta [29, 99]. Entre adesivos, o Araldite® AV13 é o que apresenta maiores picos de concentração de tensões τ_{xy} nas extremidades das juntas, pelo facto de ser um adesivo extremamente frágil. O mesmo se sucede para o adesivo Araldite® 2015, no entanto com picos de valores inferiores, uma vez que este adesivo apresenta uma rigidez inferior ao adesivo Araldite® AV13. À semelhança do que foi constatado na análise de tensões σ_y , o adesivo

SikaForce® 7752 é o que apresenta valores de τ_{xy}/τ_{avg} mais baixos, devido a um E inferior em relação aos outros adesivos. No entanto, é possível observar que a zona interna da junta é mais carregada do que nos restantes adesivos.

(a)



(b)



(c)

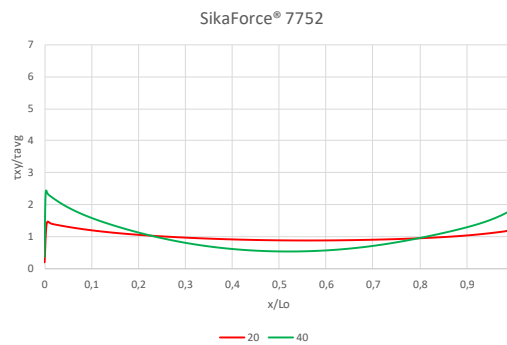


Figura 56 - Distribuição das tensões τ_{xy} nas juntas adesivas tubulares: (a) Araldite® AV138; (b) Araldite® 2015; (c) SikaForce® 7752 [5]

3.2.4 Previsão da resistência por MDC

O presente capítulo tem como objetivo fazer a comparação dos resultados dos ensaios experimentais com as previsões de $P_{m\acute{a}x}$ obtidas através dos MDC, de forma a validar as propriedades obtidas nas simulações numéricas. Desta forma, será possível a posterior realização do estudo paramétrico numérico de JTC, uma vez que a técnica numérica considerada, em conjunto com os valores das constantes de engenharia utilizadas reproduzem resultados de acordo com a realidade. Nos gráficos da Figura 57, Figura 58 e Figura 59 é possível observar a comparação das curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente (curvas cinzentas) e as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente pelo MDC.

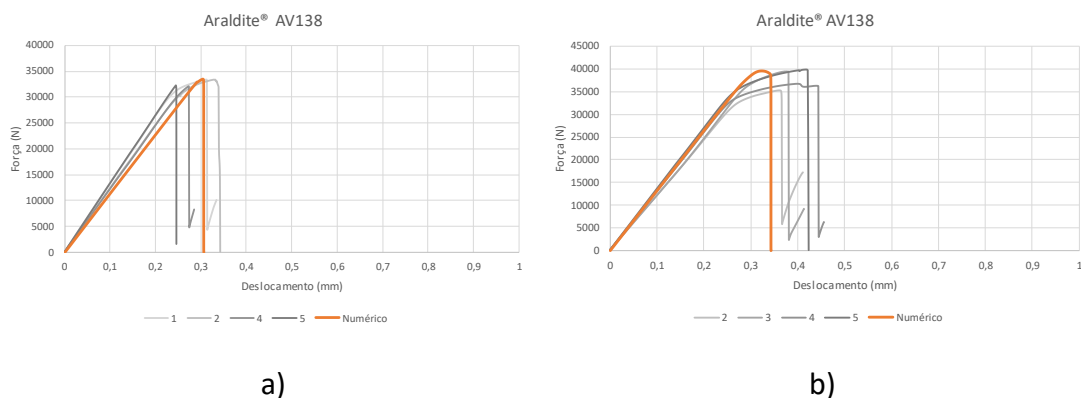


Figura 57 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [5]

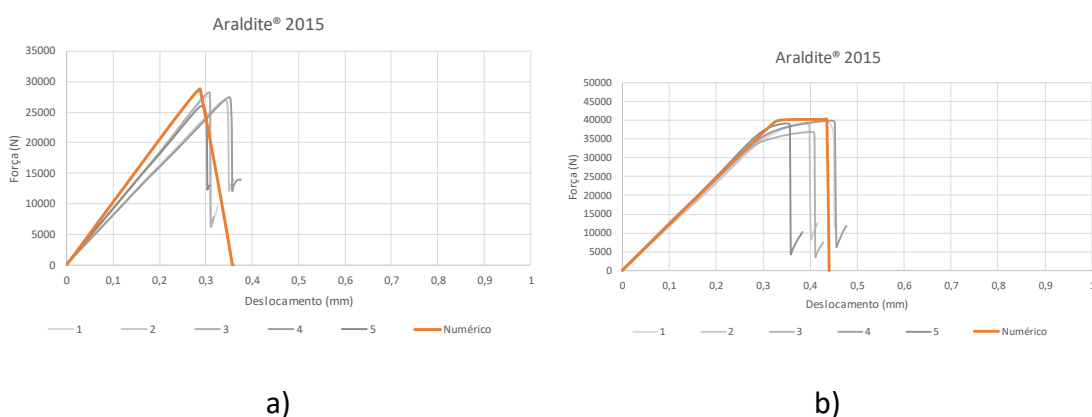


Figura 58 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [5]

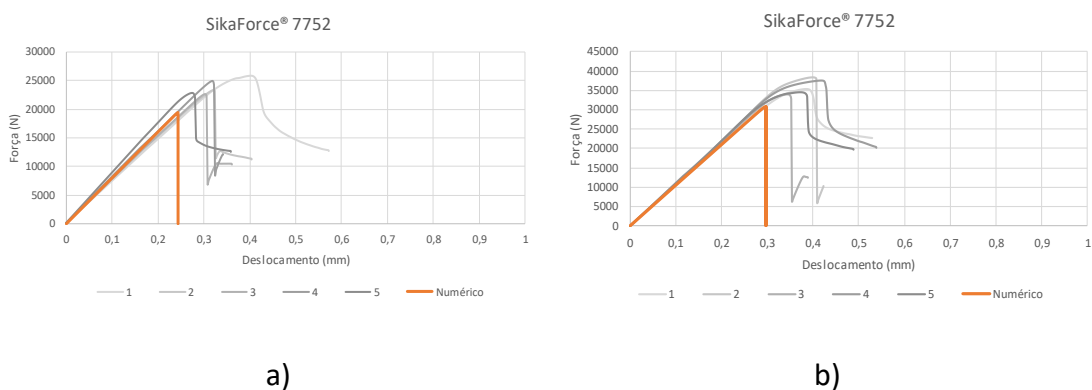


Figura 59 – Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752, com (a) $L_0=20$ mm e (b) $L_0=40$ mm [5]

As curvas P - δ obtidas numericamente reproduzem de forma fiel os resultados experimentais, especialmente para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 (Figura 57 e Figura 58), em relação à $P_{\text{máx}}$, rigidez e deslocamento até rotura [90]. No caso do adesivo SikaForce® 7752 (Figura 59), os valores experimentais de $P_{\text{máx}}$ e deslocamento

de rotura foram superiores ao estimado pelo MDC. O facto de o adesivo ser bastante dúctil levou a que a lei coesiva triangular usada para modelar a camada de adesivo subestimasse os resultados experimentais [91].

3.2.5 Discussão dos resultados obtidos

Com a presente validação experimental é possível aferir que o adesivo Araldite® AV138 é aquele que proporciona uma JST com maior resistência mecânica para $L_0=20$ mm. Contudo, trata-se de um adesivo frágil, o que provoca gradientes de tensões σ_y e τ_{xy} que são altamente prejudiciais para a resistência de juntas adesivas. A rotura da junta dá-se no momento em que é atingida τ_f devido à capacidade de plastificação quase nula deste tipo de adesivos [116]. O adesivo Araldite® 2015 possui uma rigidez inferior ao adesivo Araldite® AV138, pelo que apresenta picos de tensões inferiores. A ductilidade característica deste adesivo permitiu uma distribuição de tensões mais uniforme por todo L_0 . Este facto permitiu também um aumento importante de resistência da junta com $L_0=20$ mm para $L_0=40$ mm, tornando o adesivo Araldite® 2015 naquele que proporciona uma junta tubular com maior resistência mecânica para $L_0=40$ mm. O adesivo SikaForce® demonstrou ser o menos resistente dos três estudados. O seu perfil de tensões τ_{xy} (Figura 56 c) apresenta uma boa uniformidade na distribuição de tensões, mais evidente para valores de L_0 inferiores. Os picos de tensão existentes são muito inferiores aos observados nos restantes adesivos, o que reduz a probabilidade de rotura prematura da junta adesiva. No entanto, devido à elevada ductilidade do adesivo, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ das JST foram inferiores.

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

O presente subcapítulo tem como principal objetivo aferir se os resultados numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ são válidos, através da comparação com os respetivos resultados experimentais. A Figura 60 representa os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de L_0 e as previsões numéricas obtidas pela lei coesiva triangular, considerando os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

As previsões numéricas da Figura 60 demonstram que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos através do MDC triangular e experimentais são bastante próximos para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Relativamente ao adesivo SikaForce® 7752, observa-se uma discrepância relevante entre resultados experimentais e numéricos. O adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta menores diferenças entre valores experimentais e numéricos, com uma diferença de 2,4% para $L_0=20$ mm e 4,7% para $L_0=40$ mm. O adesivo Araldite® 2015 apresenta também diferenças muito reduzidas, com 6,1% para $L_0=20$ mm e 2,9% para $L_0=40$ mm.

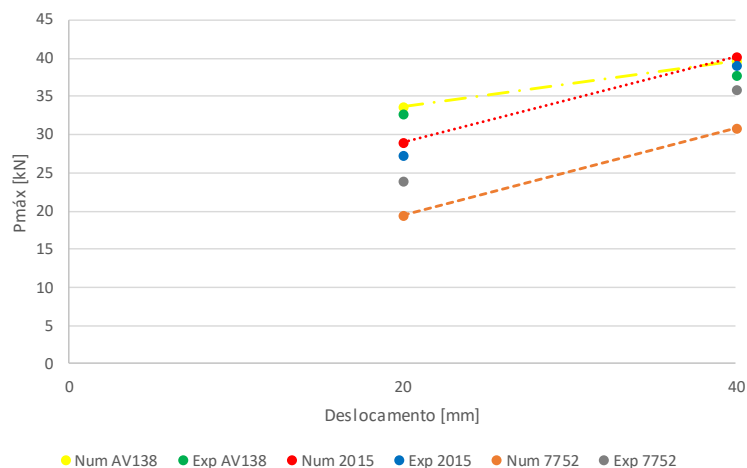


Figura 60 - $P_{máx}$ em função de L_0 para os três adesivos: resultados experimentais e previsão por MDC para as juntas adesivas tubulares [5]

Tanto para o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, os valores de $P_{máx}$ numéricos obtidos pelo MDC triangular foram inferiores aos resultados experimentais, sendo considerados adequados tendo em conta as diferenças mínimas constatadas. No caso das juntas com o adesivo SikaForce® 7752, os valores de $P_{máx}$ obtidos pelo MDC triangular foram bastante inferiores aos resultados experimentais, com uma diferença de 18,4% para $L_0=20$ mm e 14,3% para $L_0=40$ mm. Isto acontece porque, para juntas com adesivos dúcteis simulados através de MDC triangular, pode existir uma depreciação imediata da tensão após atingida a resistência coesiva [92]. Ainda assim, trabalhos sobre a delaminação de compósitos demonstram que mesmo com leis coesivas não adequadas, é possível obter uma estimativa grosseira da resistência da junta, desde que os valores de resistência coesiva (t_n^0 e t_s^0) e de tenacidade à fratura (G_{IC} e G_{IC}) tenham sido corretamente estimados [117]. Portanto, tendo em conta todos estes fatores, aceitam-se os valores obtidos numericamente apesar da diferença obtida.

Após esta análise, consideram-se os resultados numéricos obtidos válidos e, como tal, a técnica numérica e respetivos parâmetros coesivos encontram-se válidos para a realização do estudo numérico que se segue, relativo a JTC solicitadas à tração com os mesmos adesivos.

3.3 Trabalho numérico

No presente capítulo procede-se ao estudo paramétrico de JTC sujeitas a esforços de tração. As geometrias e materiais utilizados já foram definidos anteriormente no capítulo 3.1.1 e 3.1.2, respetivamente. Nas seguintes análises de MDC apresentadas são utilizadas propriedades dos materiais que foram validadas no capítulo 3.2. As condições de análise numérica do seguinte estudo foram também definidas no capítulo 3.1.5.

Este estudo consiste na alteração de α nas juntas adesivas tubulares e verificação, com recurso às curvas P - δ e aos gradientes de tensão σ_y e τ_{xy} , do efeito no comportamento das mesmas. Também será estudada a variável do dano para os diferentes adesivos, bem como a energia dissipada.

3.3.1 Análise de tensões na junta

Para a obtenção das tensões de corte e arrancamento na camada do adesivo foram usados os modelos previamente definidos no capítulo 3.1.5. Nestes modelos foram realizadas ligeiras alterações para possibilitar a extração das tensões. Os elementos da camada do adesivo foram alterados de coesivos para elementos sólidos homogêneos, sendo atribuídas as propriedades mecânicas (módulo de Young (E) e coeficiente de Poisson (ν) apresentadas no capítulo 3.1.2). assumindo-se assim o domínio elástico e um comportamento isotrópico. Posteriormente, foi realizado um maior refinamento da malha da camada de adesivo, dividindo cada elemento do adesivo em 100 partes (10 partes ao longo da espessura e 10 partes ao longo do comprimento) como pode ser observado na Figura 61.

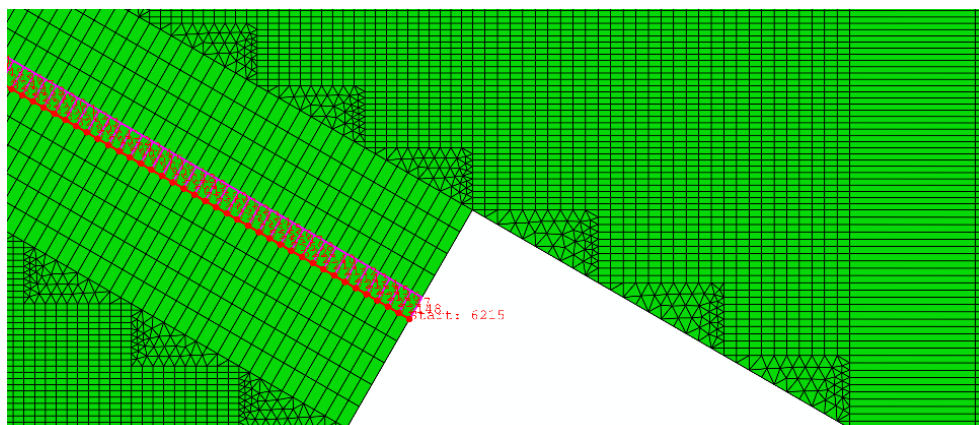


Figura 61 - Exemplo de malha após refinamento e *path* definido para obtenção das tensões no Abaqus®

Após a obtenção do primeiro incremento do ensaio de tração foi selecionado o caminho – *path* – por onde se pretende obter os valores de tensão de corte e arrancamento. Este caminho tem início a meio da espessura de adesivo na extremidade exterior de L_0 e fim na extremidade oposta (Figura 61).

De seguida, é possível extrair os dados de tensão dos pontos selecionados anteriormente. A forma do modelo deve ser indeformável e os valores do eixo “X” devem ser normalizados. É então desta forma que são selecionadas as variáveis de saída $S11$ (σ_x), $S22$ (σ_y) e $S12$ (τ_{xy}) (Figura 62).

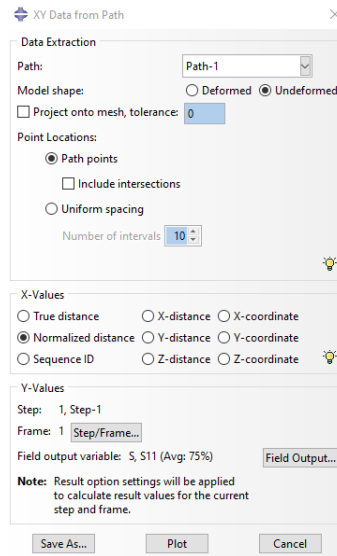


Figura 62 - Extração de valores de tensão no Abaqus®

Uma vez que as juntas em estudo possuem um chanfro, a camada de adesivo não se encontra orientada com o referencial dos dados de tensão retirados anteriormente. Como tal, existe a necessidade de transpor estes dados para o referencial adequado para cada valor de α , no sentido de obter as tensões de corte ao longo da camada de adesivo (τ_{xy}) e normais na direção perpendicular (σ_y). Como tal, os valores de σ_y e τ_{xy} foram transpostos através das fórmulas (6) e (7), respetivamente. Na Figura 63 é apresentado o referencial em que os dados são extraídos do Abaqus® ($x'y'$) e o referencial que permite a obtenção das tensões ao longo da camada de adesivo (xy).

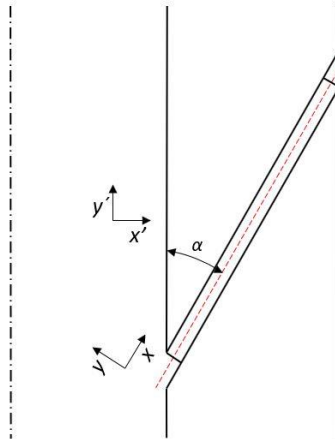


Figura 63 - Referenciais da JTC

$$\sigma_y = \frac{\sigma_{x'} + \sigma_{y'}}{2} - \frac{\sigma_{x'} - \sigma_{y'}}{2} \times \cos(2\theta) - \tau_{x'y'} \times \sin(2\theta) \quad (6)$$

$$\tau_{xy} = -\frac{\sigma_{x'} + \sigma_{y'}}{2} \times \sin(2\theta) + \tau_{x'y'} \times \cos(2\theta) \quad (7)$$

Com o objetivo de facilitar a análise de tensões nas juntas adesivas, todos os valores de σ_y e τ_{xy} foram normalizados de acordo com o respetivo valor de τ_{avg} e traçados os gráficos de distribuições de tensões que serão analisados nos capítulos seguintes.

3.3.1.1 Tensões de arrancamento

Na Figura 64 e Figura 65 estão presentes as distribuições de tensões σ_y normalizadas pelo valor de τ_{avg} para os valores de $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$.

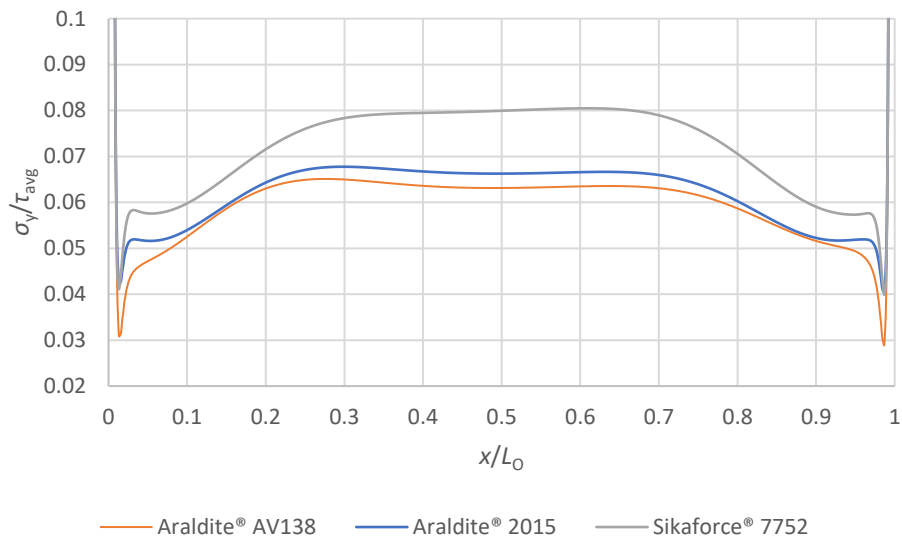


Figura 64 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$

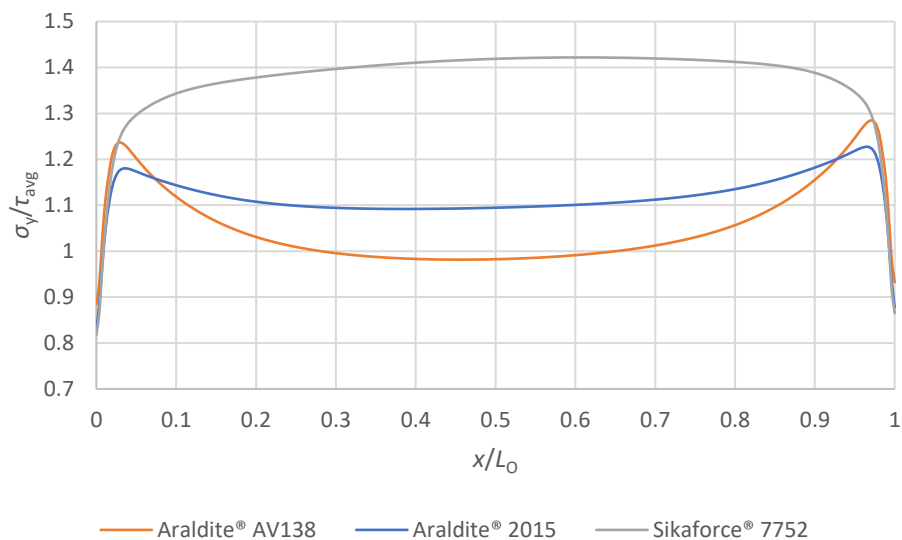


Figura 65 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=45^\circ$

De forma geral, pela observação da distribuição de tensões σ_y para os diferentes valores de α , constatou-se um aumento das tensões em forma de picos nas extremidades de L_0

com o aumento da rigidez do adesivo, com a exceção da curva para a JTC com o adesivo SikaForce® 7752 e $\alpha=45^\circ$. Não é possível observar os picos de tensão das curvas para juntas com $\alpha=3,43^\circ$ pois estas foram truncadas, de forma que seja mais perceptível o seu comportamento. Para estas curvas os picos de tensão foram muito semelhantes, sendo notório um pequeno acréscimo com o aumento da rigidez do adesivo. Por outro lado, as tensões σ_y no ponto intermédio de L_0 tendem a ser mais elevadas para o adesivo mais dúctil (SikaForce® 7752), enquanto o adesivo mais rígido (Araldite® AV138) apresenta uma maior diferença entre as tensões nas extremidades de L_0 e no ponto intermédio de L_0 . Este é um comportamento diretamente relacionado com a rigidez do adesivo e já foi constatado em análises semelhantes com diferentes configurações de juntas, nomeadamente juntas de sobreposição dupla [77] ou juntas com chanfro interior [118]. Analisando as curvas da Figura 64 e Figura 65 percebe-se que para $\alpha=45^\circ$ os gradientes de tensões σ_y aproxima-se de τ_{avg} , o que indica que as tensões σ_y têm tendência de crescimento com o aumento de α , independentemente do adesivo testado. Verifica-se ainda um aumento progressivo das tensões de pico σ_y com o aumento de L_0 . Esta tendência deve-se ao gradiente crescente das deformações longitudinais dos substratos, à medida que se aumenta o valor de L_0 , que por sua vez é consequência do aumento das áreas de ligação e cargas transmitidas [77].

Na Figura 66, Figura 67 e Figura 68 estão representadas as curvas das distribuições de tensões σ_y em função da variação de α , para os três adesivos em estudo.

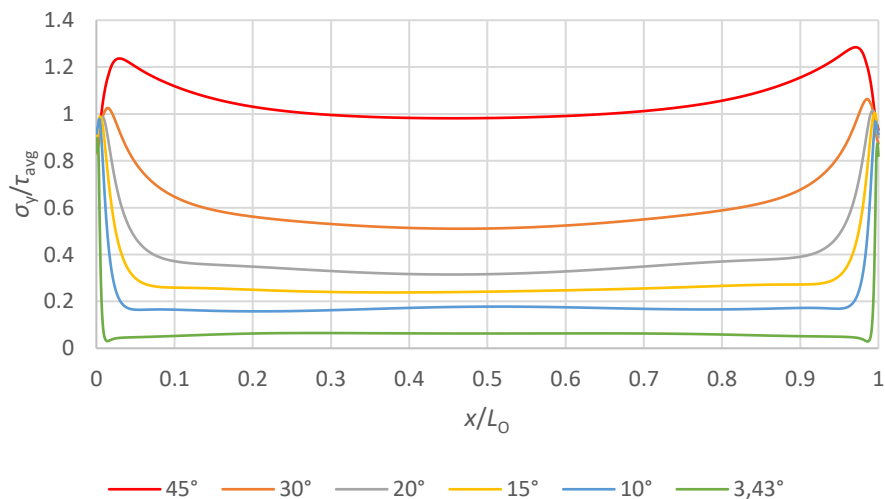


Figura 66 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® AV138

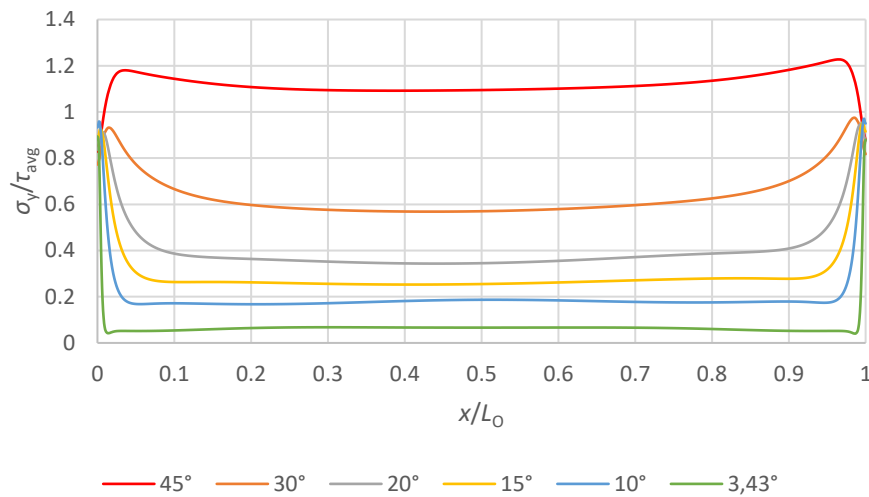


Figura 67 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® 2015

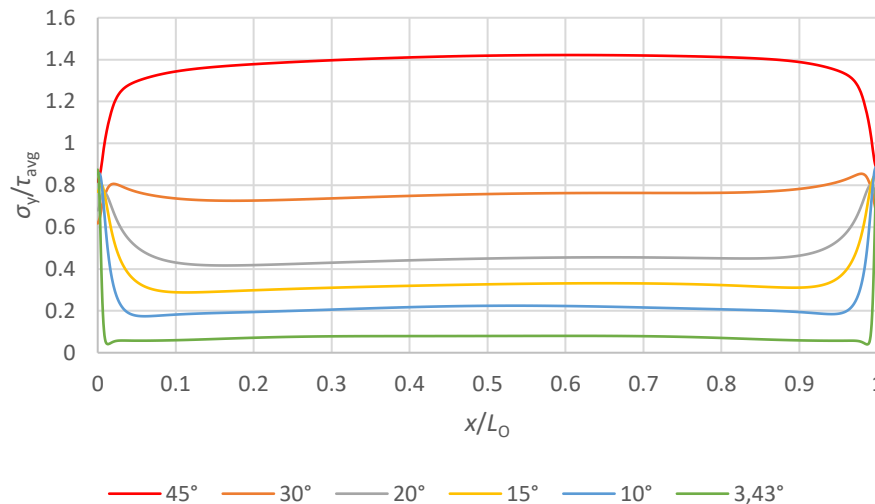


Figura 68 - Distribuição das tensões σ_y/τ_{avg} nas JTC em função da variação de α para o adesivo SikaForce® 7752

A partir das distribuições de tensões σ_y apresentadas, é possível observar uma tendência crescente das tensões de pico com o aumento de α . Para além das tensões de pico, também as tensões ao longo de L_0 tendem a ser maiores com o aumento de α . Com o aumento de α os valores de σ_y tendem a aproximar-se de τ_{avg} , o que pode ser explicado pelo facto de $\alpha=45^\circ$ proporcionar uma preponderância idêntica entre σ_y e τ_{xy} [66]. No limite, se $\alpha=90^\circ$, as tensões de corte a que o adesivo estaria sujeito seriam próximas de zero e este estaria sujeito essencialmente a tensões de arrancamento. O adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta maior rigidez. Como tal, com a exceção $\alpha=45^\circ$, os valores mais elevados de σ_y/τ_{avg} registados são do adesivo Araldite® AV138 (Figura 66). Os picos de concentração de tensões estão localizados junto às extremidades da junta adesiva, para $x/L_0=0$ e $x/L_0=1$. Isto acontece porque nas extremidades de L_0 são geradas tensões devido à deformação transversal da junta ou curvatura dos substratos [99]. O

aumento de σ_y correspondente à variação de $\alpha=3,43^\circ$ para $\alpha=45^\circ$ é de mais de 10 vezes, o que mostra que a diminuição de α , neste tipo de juntas, reduz consideravelmente as tensões de arrancamento, com benefícios expectáveis para a resistência das juntas.

Na Tabela 5 são apresentados os valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos em estudo, em função de α .

Tabela 5 - Valores máximos de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função de α

| Adesivo | α (°) | | | | | |
|-----------------|--------------|------|------|------|------|-------|
| | 45° | 30° | 20° | 15° | 10° | 3,43° |
| Araldite® AV138 | 1,28 | 1,06 | 1,01 | 1,00 | 0,98 | 0,90 |
| Araldite® 2015 | 1,23 | 0,97 | 0,95 | 0,95 | 0,96 | 0,89 |
| Sikaforce® 7752 | 1,42 | 0,85 | 0,80 | 0,84 | 0,89 | 0,87 |

A partir da Tabela 5 é possível observar o valor máximo de $\sigma_y/\tau_{avg}\approx 1,42$, para o adesivo Sikaforce® 7752 e $\alpha=45^\circ$, sendo que este não se apresenta em forma de pico, mas sim uniformemente distribuído ao longo de L_0 . Por isso, para os restantes valores de α , as juntas com adesivo Sikaforce® 7752 são as que apresentam valores máximos de σ_y/τ_{avg} menores por apresentam picos de tensão mais baixos, devido à sua extrema ductilidade. De forma geral, os valores máximos de σ_y/τ_{avg} tendem a decrescer com a diminuição de α , essencialmente devido à redução da componente de tensões de arrancamento com a aproximação de $\alpha=0^\circ$. Comparando os 3 adesivos em estudo, de forma geral o adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta maiores picos de tensão nas extremidades de L_0 e consequentemente valores máximos de σ_y/τ_{avg} mais elevados, devido à sua elevada rigidez. Por outro lado, o adesivo mais dúctil (Sikaforce® 7752) é aquele que apresenta uma distribuição de tensões σ_y/τ_{avg} mais uniforme ao longo de L_0 .

Na Tabela 6 estão presentes os valores médios de σ_y/τ_{avg} ao longo de L_0 , para cada um dos adesivos e em função de α .

Tabela 6 - Valores médios de σ_y/τ_{avg} para os três adesivos, em função de α

| Adesivo | α (°) | | | | | |
|-----------------|--------------|------|------|------|------|-------|
| | 45° | 30° | 20° | 15° | 10° | 3,43° |
| Araldite® AV138 | 1,05 | 0,61 | 0,39 | 0,29 | 0,19 | 0,07 |
| Araldite® 2015 | 1,12 | 0,64 | 0,41 | 0,30 | 0,20 | 0,07 |
| Sikaforce® 7752 | 1,37 | 0,76 | 0,46 | 0,34 | 0,23 | 0,08 |

Comparando os valores médios de σ_y/τ_{avg} apresentados na Tabela 6 observa-se uma grande variação das tensões em função de α , com valores médios de σ_y/τ_{avg} mais elevados para $\alpha=45^\circ$ e valores mais baixos para $\alpha=3,43^\circ$. Por outro lado, existe pouca variação do valor médio de σ_y/τ_{avg} entre os três adesivos em estudo.

Conclui-se que a rigidez do adesivo tem grande influência no que concerne à existência de picos de tensões de arrancamento nas extremidades de L_0 . No entanto, esta propriedade dos adesivos revela-se pouco influente relativamente aos valores médios de tensões σ_y/τ_{avg} .

3.3.1.2 Tensões de corte

Neste capítulo, são apresentadas várias figuras com a evolução das tensões τ_{xy} normalizadas ao longo de L_0 , tendo em conta a variação do adesivo e de α . A Figura 69 e Figura 70 mostra a evolução das tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função do adesivo utilizado, para $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, respetivamente.

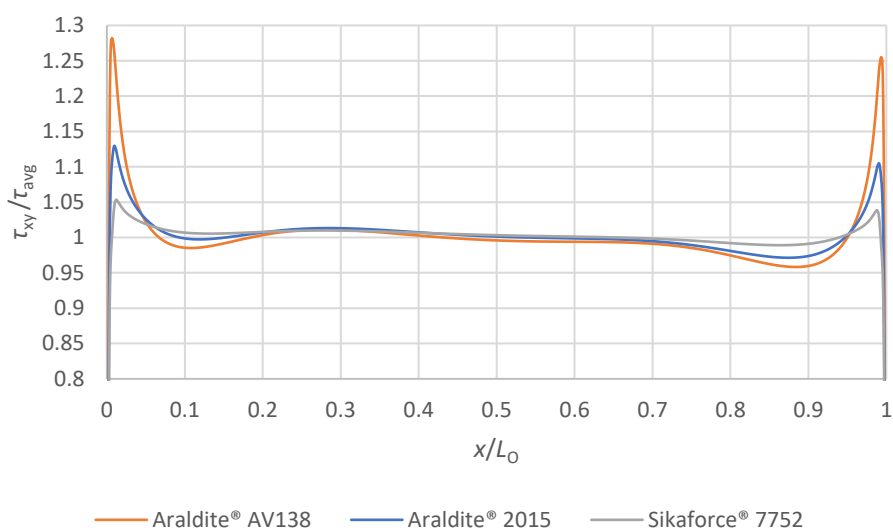


Figura 69 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$

Pela análise da Figura 69 e Figura 70, verifica-se que as tensões são praticamente constantes ao longo de L_0 . As distribuições de tensões τ_{xy} para os diferentes adesivos são muito similares, o que indica que a rigidez do adesivo é pouco significativa para o aumento das tensões de corte neste tipo de configuração de junta. No entanto, nas JTC com $\alpha=3,43^\circ$, a existência de picos nas extremidades de L_0 é bem mais perceptível, com o adesivo mais rígido (Araldite® AV138) a originar maiores picos de tensão e com o adesivo mais dúctil (Sikaforce® 7752) a apresentar um comportamento mais uniforme ao longo do comprimento de sobreposição. O comportamento observado para valores de α inferiores pressupõe uma degradação do estado de tensão na camada adesiva, que por si só tenderia a diminuir a resistência da junta. No entanto, a diminuição do valor de

α provoca o aumento exponencial de L_0 , que tipicamente se sobrepõe ao efeito das tensões e permite o aumento da resistência da junta [105]. Este efeito não se verifica com tanto vigor nas juntas adesivas com $\alpha=45^\circ$, uma vez que as tensões τ_{xy} são bastante constantes ao longo de L_0 .

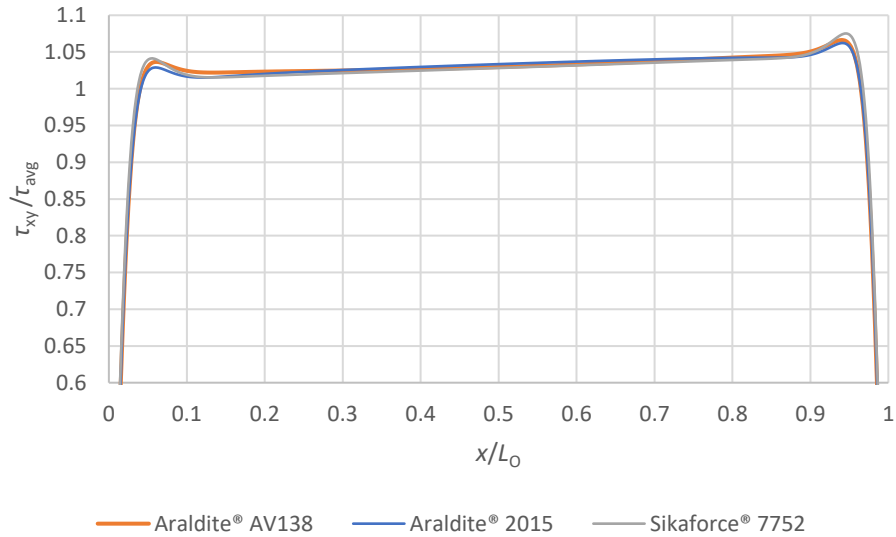


Figura 70 – Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas JTC em função da variação do adesivo para $\alpha=45^\circ$

Na Figura 71, Figura 72 e Figura 73 apresentam-se os resultados das tensões de corte normalizadas ao longo de L_0 para os três adesivos em estudo, obtidos para os diferentes valores de α simulados no Abaqus®.

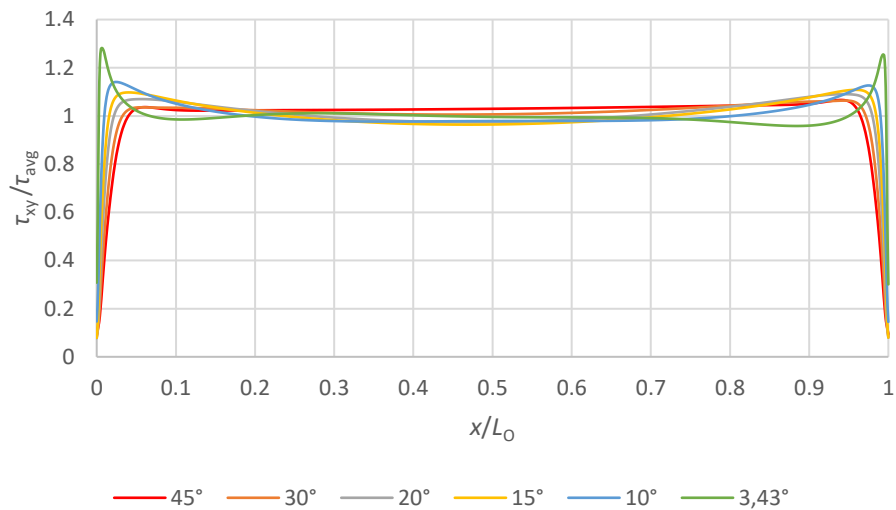


Figura 71 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® AV138

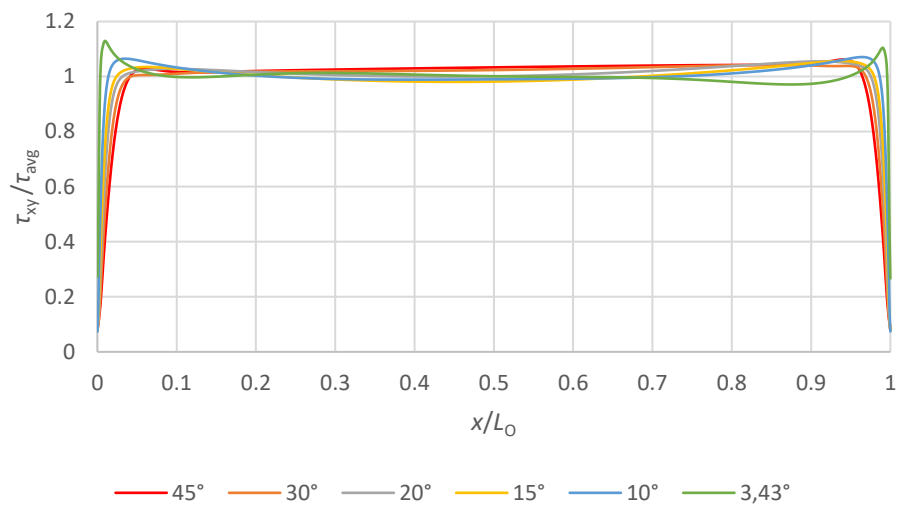


Figura 72 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas JTC em função da variação de α para o adesivo Araldite® 2015

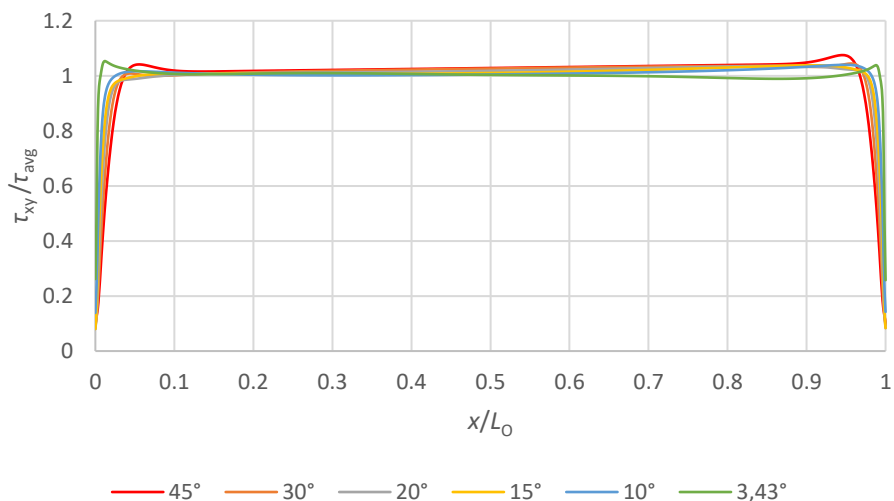


Figura 73 - Distribuição das tensões τ_{xy}/τ_{avg} nas JTC em função da variação de α para o adesivo Sikaforce® 7752

Observando a Figura 71, Figura 72 e Figura 73, pode-se dizer que as tensões τ_{xy} normalizadas se caracterizam pelo comportamento bastante uniforme ao longo de L_0 , sendo que existem ligeiros picos nas extremidades. Na zona interior da zona de sobreposição, as tensões τ_{xy} possuem uma grandeza muito semelhante a τ_{avg} , com a exceção das extremidades da sobreposição, que constituem zonas de concentração de tensões. Por esta razão, os valores de tensão τ_{xy}/τ_{avg} são próximos de 1 ao longo de L_0 , independentemente do valor de α . Os picos observados nas extremidades da sobreposição devem-se à deformação diferencial dos aderentes ao longo de L_0 , que é nula na extremidade livre dos mesmos, e aumenta até à extremidade oposta [99]. Os gradientes de tensão tendem a ser menores na região central da sobreposição, uma vez que o referido efeito é anulado e são desenvolvidas tensões τ_{xy} apenas devido ao esforço

de tração aplicado na junta. Apesar de todos os adesivos apresentarem uma distribuição de tensões bastante uniforme, é perceptível que o adesivo Araldite® AV138 é aquele que apresenta picos de tensões mais relevantes, enquanto o adesivo Sikaforce® 7752 é o que apresenta um comportamento mais uniforme. Esta diferença entre adesivos deve-se essencialmente à rigidez dos mesmos, na medida em que, à medida em que a rigidez do adesivo aumenta, maior é a influência da deformação diferencial dos substratos nas extremidades da ligação [66]. Na maioria das curvas também se verifica um ligeiro aumento dos picos de tensão τ_{xy} para $L_0=1$. Esta tendência deve-se ao gradiente crescente de deformações longitudinais, resultante da distinta área de secção resistente dos tubos ligados [48].

Na Tabela 7 são apresentados os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos em estudo, em função de α .

Tabela 7 - Valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} para os três adesivos, em função de α

| Adesivo | α (°) | | | | | |
|------------------------|--------------|------|------|------|------|-------|
| | 45° | 30° | 20° | 15° | 10° | 3,43° |
| Araldite® AV138 | 1,07 | 1,06 | 1,09 | 1,11 | 1,14 | 1,28 |
| Araldite® 2015 | 1,06 | 1,04 | 1,06 | 1,06 | 1,06 | 1,13 |
| Sikaforce® 7752 | 1,07 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,04 | 1,05 |

Pela observação dos valores de τ_{xy}/τ_{avg} presentes na Tabela 7 também é perceptível a distribuição bastante uniforme deste tipo de tensões ao longo de L_0 para todos os adesivos em estudo. É notório que, para qualquer valor de α , os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} são mais elevados para o adesivo de maior rigidez (Araldite® AV138) e menores para o adesivo de maior ductilidade (Sikaforce® 7752). Esta tendência é espectável devido ao efeito de deformação diferencial dos aderentes, que é mais gravoso para adesivos de maior rigidez [66]. Contata-se também que a diferença entre adesivos é mais perceptível para valores de α inferiores e quase irrisória para valores de α superiores. Analisando os valores máximos de τ_{xy}/τ_{avg} correspondentes ao adesivo Araldite® AV138, é notória uma tendência crescente com a diminuição de α . Para adesivos mais dúcteis esta tendência é menos evidente, sendo que para o adesivo Sikaforce® 7752 a mesma não se constata.

Pode-se concluir que, tanto a rigidez dos adesivos como a variação de α , têm uma fraca influência no que concerne à distribuição de tensões de corte normalizadas ao longo de L_0 em JTC.

3.3.2 Estudo da variável de dano

No presente subcapítulo, é realizada a análise do dano existente nas JTC com os três adesivos em estudo, através de gráficos que mostram o dano (SDEG) em função do comprimento normalizado da camada do adesivo (x/L_0) no instante de $P_{\text{máx}}$. SDEG está compreendido entre os valores de 0 (material não danificado) e 1 (rotura completa). Para obtenção dos dados de SDEG, primeiramente é determinado o incremento em que é atingido $P_{\text{máx}}$, através das curvas $P-\delta$. De seguida, é criado um *path* ao longo da camada de adesivo que determinará os nós em que serão retirados os valores de SDEG, no Abaqus®.

A Figura 74, Figura 75 e Figura 76 mostram a variável SDEG ao longo de x/L_0 em JTC com diferentes valores de α , para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Observando a Figura 74, Figura 75 e Figura 76, pode-se dizer que a maior incidência do dano se dá nas extremidades de L_0 , de forma coerente com as distribuições de tensões apresentadas no capítulo 3.3.1. As juntas com o adesivo Araldite® AV138 apresentam dano apenas nas extremidades de L_0 , sendo que o adesivo não apresenta qualquer dano em zonas intermédias de L_0 . A elevada rigidez deste adesivo faz com que o dano no mesmo se concentre nas extremidades chegando mesmo a atingir a rotura (SDEG=1) numa pequena porção do adesivo (para $\alpha=15^\circ$ e $\alpha=10^\circ$) no momento em que $P_{\text{máx}}$ é atingido. Na junta com $\alpha=3,43^\circ$, com este mesmo adesivo, não se verifica dano no adesivo uma vez que os aderentes sofreram plastificação.

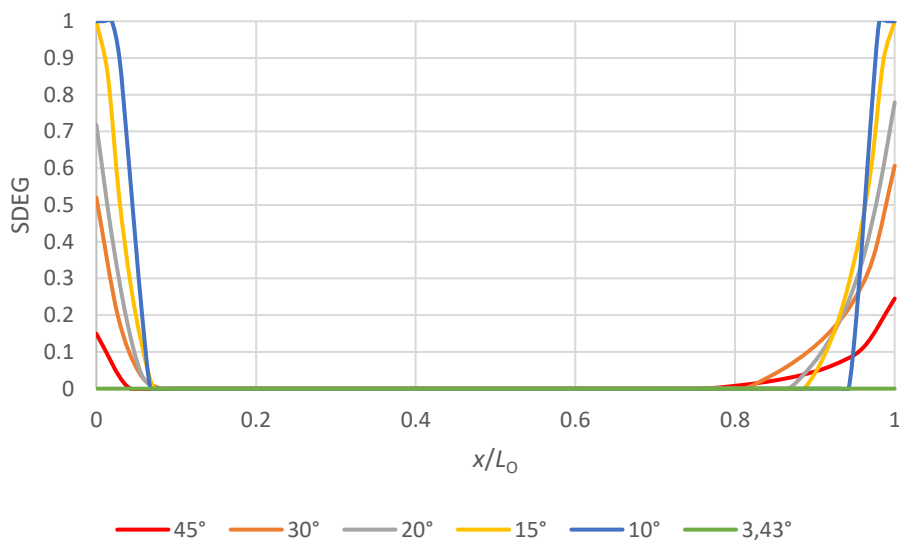


Figura 74 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima ao longo de x/L_0 para o adesivo Araldite® AV138 em juntas com diferentes α

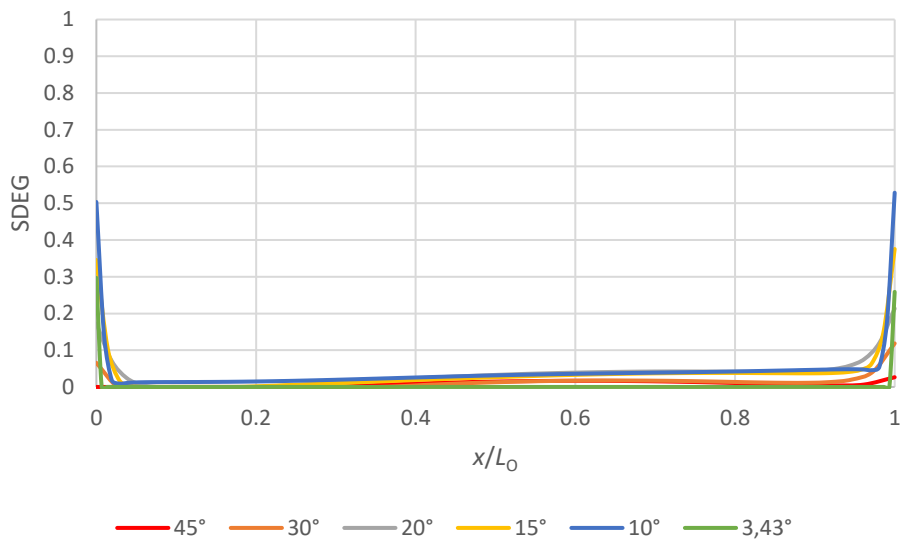


Figura 75 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima ao longo de x/L_0 para o adesivo Araldite® 2015 em juntas com diferentes α

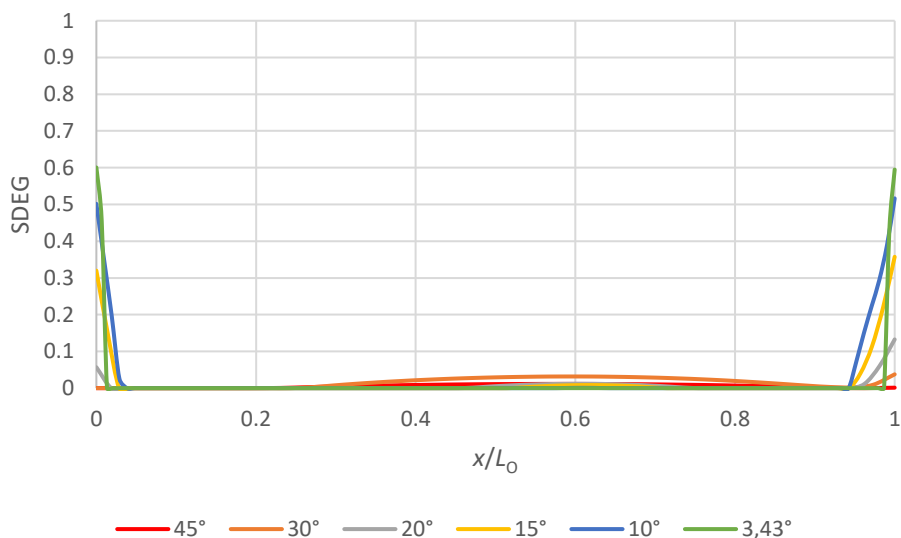


Figura 76 - Extensão do dano (SDEG) à carga máxima ao longo de x/L_0 para o adesivo Sikaforce® 7752 em juntas com diferentes α

Analisando a extensão do dano das juntas com o adesivo Araldite® 2015 (Figura 75), pode dizer-se que também se verificam picos nas extremidades de L_0 , no entanto existe um crescimento ligeiro do dano à medida que se aproxima a extremidade interior da junta ($x/L_0=1$). Este aspeto está em concordância com a análise de tensões e deve-se ao gradiente crescente de deformações longitudinais resultante da distinta área de secção resistente dos aderentes [77]. À semelhança do que se verificou para o adesivo Araldite® AV138, também os aderentes plastificaram para $\alpha=3,43^\circ$. A maior extensão de dano verificada para este adesivo deu-se na JTC com $\alpha=10^\circ$ (SDEG=0,53). No entanto, no adesivo Araldite® 2015 verifica-se um ligeiro dano no último nó da zona de

sobreposição, no momento em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido. O adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 76) também não apresenta rotura completa para nenhum valor de α , no incremento correspondente a $P_{m\acute{a}x}$. O maior valor de dano verificou-se na JTC com $\alpha=3,43^\circ$ (SDEG=0,6). Por se tratar de um adesivo de elevada ductilidade, este permite que a distribuição de tensões seja mais uniformemente distribuída ao longo de L_0 . Por esta razão, verifica-se que o dano se estende à zona intermédia de L_0 .

Analisando o dano entre os vários valores de α verifica-se que, com a diminuição deste, o dano é mais acentuado nas extremidades de L_0 . Comparando os três adesivos em estudo, verifica-se com o aumento da rigidez, a magnitude do dano aumenta para todos os valores de α . Por outro lado, o aumento da ductilidade permite uma distribuição do dano mais uniforme no instante em que ocorre $P_{m\acute{a}x}$, o que conduz a uma melhor utilização da resistência do adesivo em toda a extensão da ligação.

3.3.3 Previsão da resistência

No presente subcapítulo são inicialmente apresentadas as curvas P - δ obtidas através da análise numérica por MDC realizada no Abaqus®. Estas curvas P - δ são comparadas em função do adesivo utilizado e para diferentes valores de α . Da avaliação das diferentes curvas é possível aferir a resistência mecânica máxima das JTC e observar a evolução do seu comportamento com a variação dos parâmetros mencionados.

Na Figura 77 e Figura 78 é possível observar o comportamento das JTC quando sujeitas a esforços de tração, em função do adesivo aplicado, para os valores de $\alpha=3,43^\circ$ e $\alpha=45^\circ$, respetivamente. Entre adesivos, e independentemente do valor de α , constata-se que o adesivo Araldite® AV138 é aquele apresenta um $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado, seguido do Araldite® 2015 e por fim do menos resistente Sikaforce® 7752. Os distintos valores de $P_{m\acute{a}x}$ devem-se sobretudo às propriedades mecânicas características de cada adesivo, tais como a tensão de rotura à tração e corte. De facto, devido aos poucos gradientes de tensão, conforme descrito no capítulo 3.3.1, a ductilidade do adesivo tem influência não desprezável, mas diminua na resistência das juntas, ao contrário do que se observa por exemplo para JSS. Este fenómeno, apesar da sua influência discreta em JTC, não deve ser desprezado porque pressupõe a degradação do estado de tensão na camada adesiva e por si só tende a diminuir a resistência da junta [66]. Por isso, para as JTC de $\alpha=45^\circ$ a diferença entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ é mais expressiva, pois o efeito mencionado anteriormente não é tão perceptível. Já para as JTC com valores de α inferiores, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ dos três adesivos tendem a ser mais próximos, uma vez que a influência das tensões de pico é mais penalizadora para adesivos mais rígidos como o Araldite® AV138. Contudo, nas JTC de $\alpha=3,43^\circ$, com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 verifica-se que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ está limitado pela plastificação dos aderentes constatada.

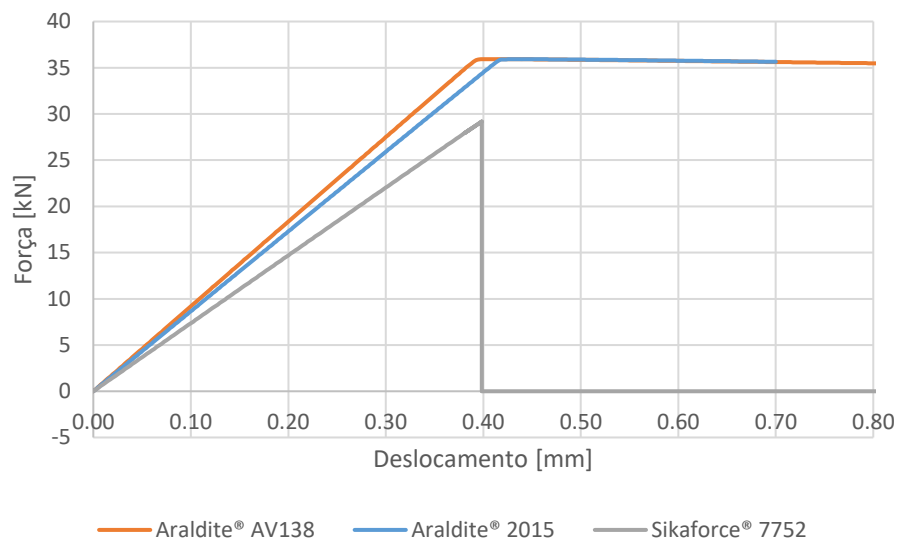


Figura 77 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação do adesivo para $\alpha=3,43^\circ$

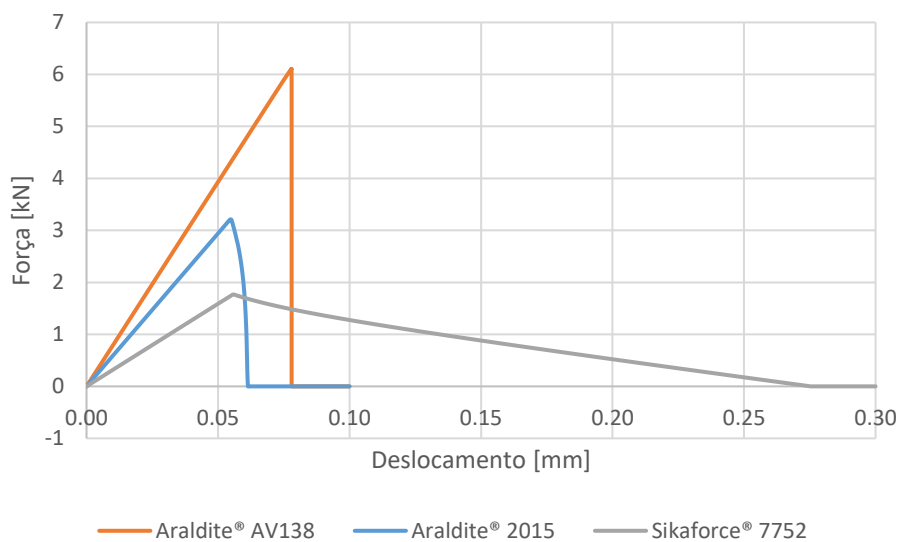


Figura 78 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação do adesivo para $\alpha=45^\circ$

Na Figura 79, Figura 80 e Figura 81 é possível observar o comportamento que as JTC apresentam quando sujeitas a esforços de tração, em função da variação de α , para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Para todos os adesivos em estudo é notório o acréscimo de $P_{\text{máx}}$ à medida que α diminui. Este facto deve-se essencialmente ao aumento de L_0 que por sua vez aumenta a secção resistente da junta adesiva [25]. Por outro lado, a diminuição de α provoca também a diminuição de tensões de arrancamento que são esforços altamente indesejados em juntas adesivas e proporcionam a rotura prematura das mesmas [6].

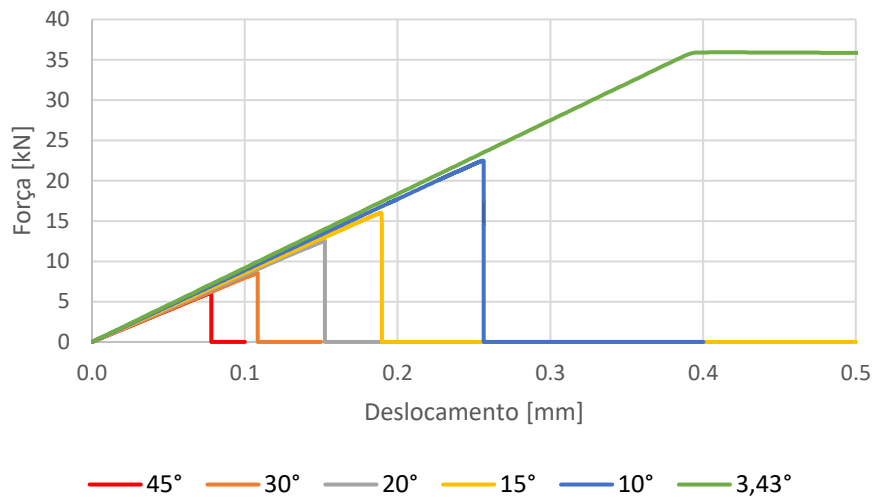


Figura 79 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação de α , para o adesivo Araldite® AV138

Relativamente ao adesivo Araldite® AV138, verifica-se linearidade até à rotura e os valores de $P_{\text{máx}}$ mais elevados para todos os valores de α , entre todos os adesivos. Para a JTC com o adesivo Araldite® AV138 e $\alpha=3,43^\circ$ o valor de $P_{\text{máx}}$ é limitado pela resistência dos aderentes, uma vez que se verificou a sua plastificação. Neste caso truncou-se o deslocamento de forma que seja perceptível o comportamento desta junta adesiva até à rotura.

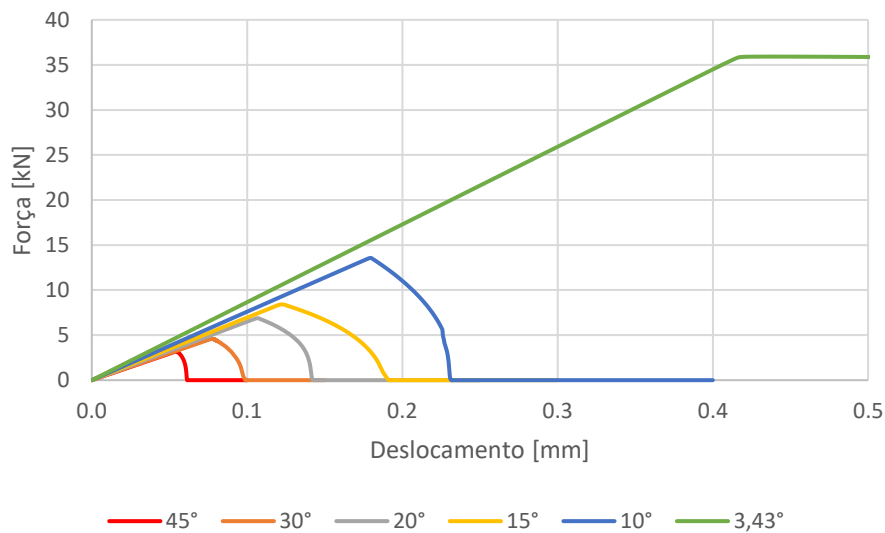


Figura 80 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação de α , para o adesivo Araldite® 2015

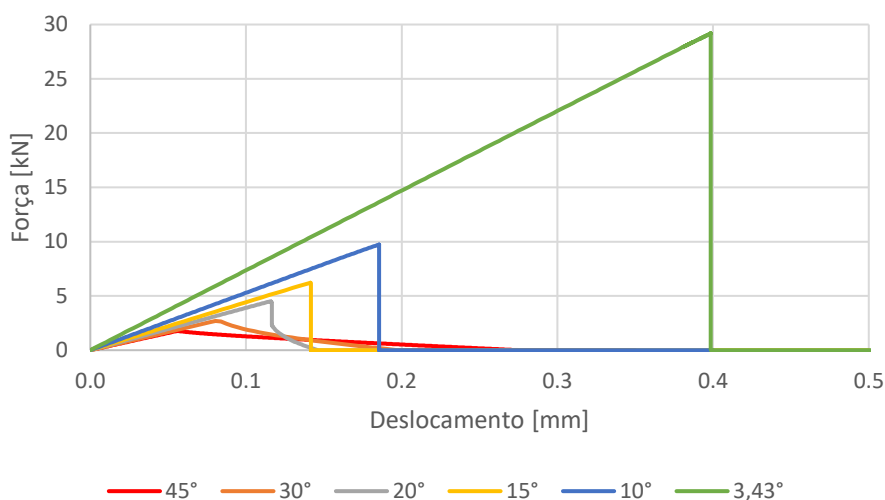


Figura 81 - Curvas $P-\delta$ obtidas por MDC no Abaqus® em função da variação de α , para o adesivo Sikaforce® 7752

O adesivo Araldite® 2015 apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ também bastante altos e um comportamento linear até à rotura. Sendo um adesivo de ductilidade moderada, este possibilita uma melhor distribuição de tensões que conseqüentemente favorece a resistência das juntas adesivas [92]. No entanto, devido à resistência inferior relativamente ao adesivo Araldite® AV138, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são inferiores. À semelhança do que se verificou para o adesivo Araldite® AV138, a resistência máxima da JTC com $\alpha=3,43^\circ$ foi limitada pela resistência dos aderentes, uma vez que se verificou a sua plastificação. Para valores de α iguais ou inferiores a 10° verifica-se o amaciamento do adesivo. Nestes casos o adesivo rompe lentamente continuando a transmitir esforços até à rotura.

O adesivo Sikaforce® 7752 é o adesivo cujos valores de $P_{m\acute{a}x}$ são mais baixos para todos os valores de α . Também neste adesivo é perceptível o aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o decréscimo de α . Verificou-se a linearidade das curvas $P-\delta$ até à rotura, sendo que nas JTC com $\alpha=20^\circ$, $\alpha=30^\circ$ e $\alpha=45^\circ$ existiu a degradação do adesivo que faz com que este, após ter atingido $P_{m\acute{a}x}$, transmita esforços até à rotura. Para este adesivo, devido à menor $P_{m\acute{a}x}$, não se observou plastificação dos substratos para nenhuma condição.

3.3.3.1 Comparação de resultados

Na Tabela 8 estão presentes os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para todos os valores de α considerados e o aumento percentual de cada um relativamente a $\alpha=45^\circ$ ($\Delta P_{m\acute{a}x}$). Na Figura 82 é possível observar a evolução gráfica de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos, em função de α .

Pela análise da Tabela 8 verifica-se que o adesivo Araldite® AV138 é o que apresenta maior resistência para valores de $\alpha=45^\circ$. A tendência crescente de $P_{m\acute{a}x}$ à medida que α diminui verifica-se até $\alpha=3,43^\circ$, com um valor de 35,93 kN. No entanto, o aumento

percentual é o menor de entre os adesivos, com o valor de 268,48% de $\alpha=45^\circ$ para $\alpha=10^\circ$, com um $P_{m\acute{a}x}=22,49$ kN. Isto deve-se ao facto de o adesivo Araldite® AV138 ter uma rigidez muito elevada, pelo que não permite acomodar os picos de tensão de arrancamento nas extremidades de L_0 , que consequentemente leva à degradação do estado de tensão da camada de adesivo e à rotura prematura do mesmo. No entanto, como já foi referido, o valor de $P_{m\acute{a}x}=35,93$ kN, obtido para $\alpha=3,43^\circ$ não serve como base de comparação para $\Delta P_{m\acute{a}x}$ uma vez que este valor é limitado pela resistência máxima dos aderentes.

Tabela 8 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ [kN] para os três adesivos em função de α , e respetivo $\Delta P_{m\acute{a}x}$

| α [°] | Araldite® AV138 | $\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%] | Araldite® 2015 | $\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%] | Sikaforce® 7752 | $\Delta P_{m\acute{a}x}$ [%] |
|--------------|-----------------|------------------------------|----------------|------------------------------|-----------------|------------------------------|
| 45 | 6,10 | - | 3,21 | - | 1,76 | - |
| 30 | 8,53 | 39,76% | 4,59 | 42,86% | 2,69 | 52,74% |
| 20 | 12,54 | 105,45% | 6,88 | 114,27% | 4,49 | 154,89% |
| 15 | 16,02 | 162,52% | 8,42 | 162,08% | 6,20 | 251,85% |
| 10 | 22,49 | 268,48% | 13,56 | 322,24% | 9,71 | 450,57% |
| 3,43 | 35,93 | 488,67% | 35,92 | 1018,61% | 29,2 | 1554,85% |

O adesivo Araldite® 2015, para $\alpha=45^\circ$, apresenta uma resistência máxima de aproximadamente metade do valor obtido para o adesivo Araldite® AV138 (3,21 kN), essencialmente devido aos valores de tensão de rotura à tração e ao corte de ambos os adesivos. À semelhança do adesivo Araldite® AV138, o valor de $P_{m\acute{a}x}$ foi limitado pela resistência dos aderentes, obtendo um $P_{m\acute{a}x}=35,92$ kN. O aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ para $\alpha=10^\circ$ (322,24%) é consideravelmente superior comparado com o adesivo Araldite® AV138, obtendo-se um $P_{m\acute{a}x}=13,56$ kN. A ductilidade do adesivo permite uma melhor distribuição de tensões τ_{xy} , através da redução dos picos nas extremidades de L_0 , que consequentemente aumentam da resistência das juntas, especialmente para valores de α menores [92]. No que concerne às tensões σ_y , constatou-se também que, especialmente para valores de α superiores, a maior ductilidade de adesivo beneficia a distribuição deste tipo de tensões ao longo de L_0 , pelo que permite um aumento da resistência máxima das juntas relativamente ao adesivo Araldite® AV138.

O adesivo Sikaforce® 7752 é aquele que apresenta JTC com resistências inferiores, pelo que apresenta $P_{m\acute{a}x}$ mais de 3 vezes inferior ao valor obtido para o adesivo Araldite® AV138, para $\alpha=45^\circ$. Por outro lado, este é o adesivo com maior aumento percentual de resistência para $\alpha=10^\circ$. A alta ductilidade do adesivo, aliada ao aumento de secção resistente resultante da redução de $\alpha=45^\circ$ para $\alpha=10^\circ$, permitiu um aumento percentual

da resistência de 450,57%, com um $P_{m\acute{a}x}=9,71$ kN, valor que fica abaixo dos restantes adesivos apenas 39,65% (Araldite® AV138) e 131,64% (Araldite® 2015).

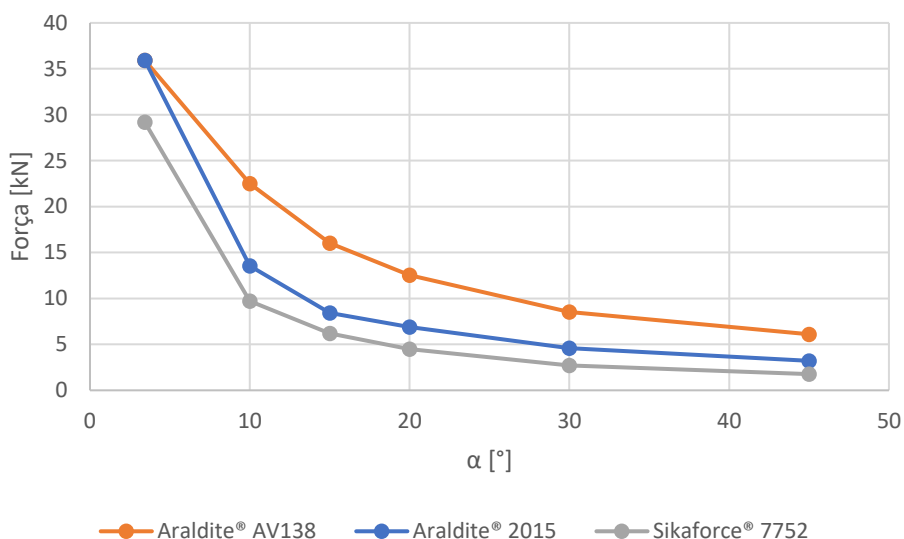


Figura 82 – Evolução de $P_{m\acute{a}x}$ em função de α , para os três adesivos

A partir da Figura 82 é possível visualizar a evolução gráfica de $P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos em estudo. Verifica-se que as curvas dos adesivos mais dúcteis (Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) seguem uma tendência semelhante. Para estes adesivos é bem perceptível que o incremento de resistência mais importante se verifica das JTC com $\alpha=10^\circ$ para $\alpha=3,43^\circ$. Por outro lado, o adesivo Araldite® AV138 tem um incremento de resistência mais gradual com a diminuição de α . O incremento de resistência de $\alpha=10^\circ$ para $\alpha=3,43^\circ$ nos adesivos Araldite® AV13 e Araldite® 2015 é limitado pela resistência dos aderentes à tração, motivo pelo qual as retas convergem para $\alpha=3,43^\circ$.

3.3.3.2 Deslocamentos até à rotura

Na Tabela 9 estão presentes os valores de deslocamento até à rotura ($\delta P_{m\acute{a}x}$) para todos os valores de α considerados e o aumento percentual de cada um relativamente a $\alpha=45^\circ$ ($\Delta\delta$). Na Figura 83 é possível observar a evolução gráfica de $\delta P_{m\acute{a}x}$ para os três adesivos, em função de α .

Pela observação da Tabela 9 é possível constatar que a JTC com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=3,43^\circ$ foi a que obteve um maior deslocamento até atingir $P_{m\acute{a}x}$ (0,439 mm). No entanto, este valor é influenciado pela plastificação dos aderentes. Por isso, pela análise dos valores de deslocamento das juntas com $\alpha=10^\circ$, pode-se dizer que o adesivo Araldite® AV138 é aquele que admite maior deslocamento relativo entre os dois aderentes. Esta diferença deve-se à sua maior resistência em relação aos restantes adesivos. Por outro lado, para todos os valores de α , com a exceção de $\alpha=3,43^\circ$, o

adesivo que admite menores deslocamentos até atingir $P_{m\acute{a}x}$ é o adesivo Araldite® 2015 com valores muito semelhantes aos do adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 9 - Valores de $\delta P_{m\acute{a}x}$ [mm] para os três adesivos em função de α , e respetivo $\Delta\delta$

| α [°] | Araldite® AV138 | $\Delta\delta$ [%] | Araldite® 2015 | $\Delta\delta$ [%] | Sikaforce® 7752 | $\Delta\delta$ [%] |
|--------------|-----------------|--------------------|----------------|--------------------|-----------------|--------------------|
| 45 | 0,0779 | - | 0,0547 | - | 0,0562 | - |
| 30 | 0,1083 | 38,98% | 0,0780 | 42,47% | 0,0805 | 43,11% |
| 20 | 0,1523 | 95,40% | 0,1070 | 95,49% | 0,1156 | 105,56% |
| 15 | 0,1894 | 143,11% | 0,1230 | 124,66% | 0,1414 | 151,32% |
| 10 | 0,2559 | 228,39% | 0,1800 | 228,77% | 0,1854 | 229,61% |
| 3,43 | 0,4150 | 432,59% | 0,4392 | 702,28% | 0,3984 | 608,31% |

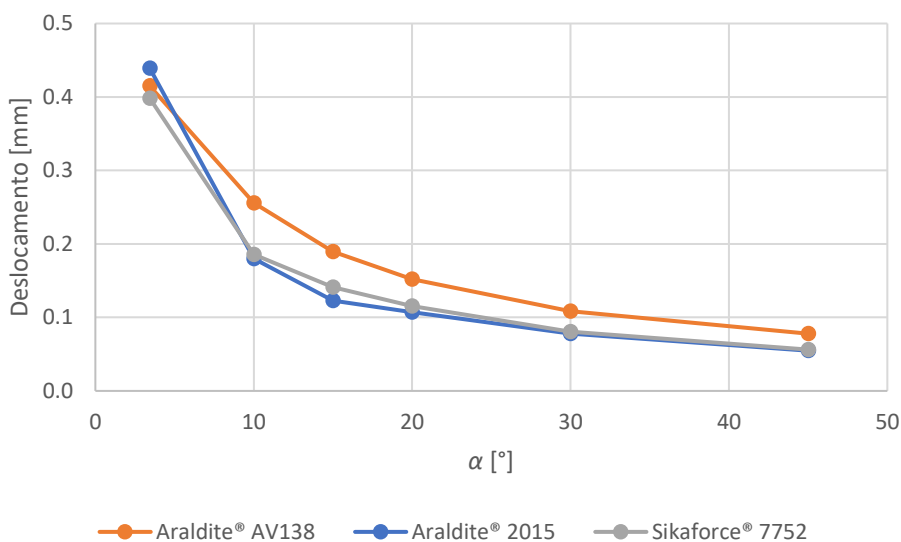


Figura 83 - Evolução de $\delta P_{m\acute{a}x}$ em função de α , para os três adesivos

Como espectável, verifica-se a tendência crescente de deslocamentos com a diminuição de α , justificada pelo aumento de $P_{m\acute{a}x}$ e correspondente deformação axial da JTC. Observa-se também que o aumento percentual de deslocamentos em função da variação de α é muito semelhante para todos os adesivos em estudo. A grande semelhança no aumento dos deslocamentos para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 deve-se ao facto de a relação entre tensões de cedência e módulos de elasticidade dos adesivos ser muito semelhante entre eles.

3.3.3.3 Modos de rotura

De seguida, através são apresentados os modos de rotura das juntas adesivas para os diferentes adesivos e em função de α . Na Tabela 10 são apresentados os modos de rotura obtidos para todos os adesivos em estudo, em função de α .

Pode-se constatar que a maioria das JTC simuladas obtiveram uma rotura coesiva, com a exceção das juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 de $\alpha=3,43^\circ$. No capítulo 3.3.3, através das curvas $P-\delta$, foi possível constatar a plastificação dos adesivos. Nestas curvas o valor de $P_{m\acute{a}x}$ foi limitado por esta mesma plastificação, não permitindo extrair todo potencial do adesivo.

Tabela 10 - Modos de rotura das JTC dos adesivos em estudo, em função de α

| Adesivo | 45° | 30° | 20° | 15° | 10° | 3,43° |
|-----------------|---------|---------|---------|---------|---------|----------|
| Araldite® AV138 | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Aderente |
| Araldite® 2015 | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Aderente |
| Sikaforce® 7752 | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Coesiva | Coesiva |

Na Figura 84 é apresentada a visualização gráfica da deformação plástica equivalente (PEEQ) para as juntas com $\alpha=3,43^\circ$, no instante de $P_{m\acute{a}x}$. De referir que os valores máximos de PEEQ foram de 0,27% para o adesivo Araldite® AV138 e 0,28% para o adesivo Araldite® 2015. Na Figura 85 é apresentada a visualização gráfica da PEEQ para as juntas de $\alpha=45^\circ$, no mesmo instante.

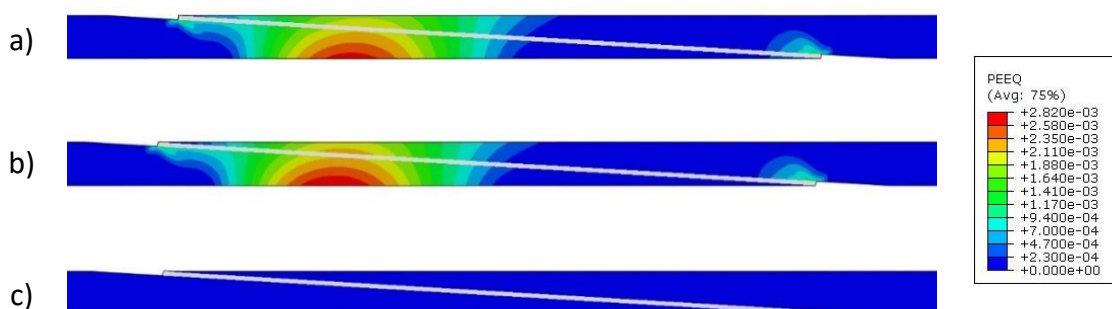
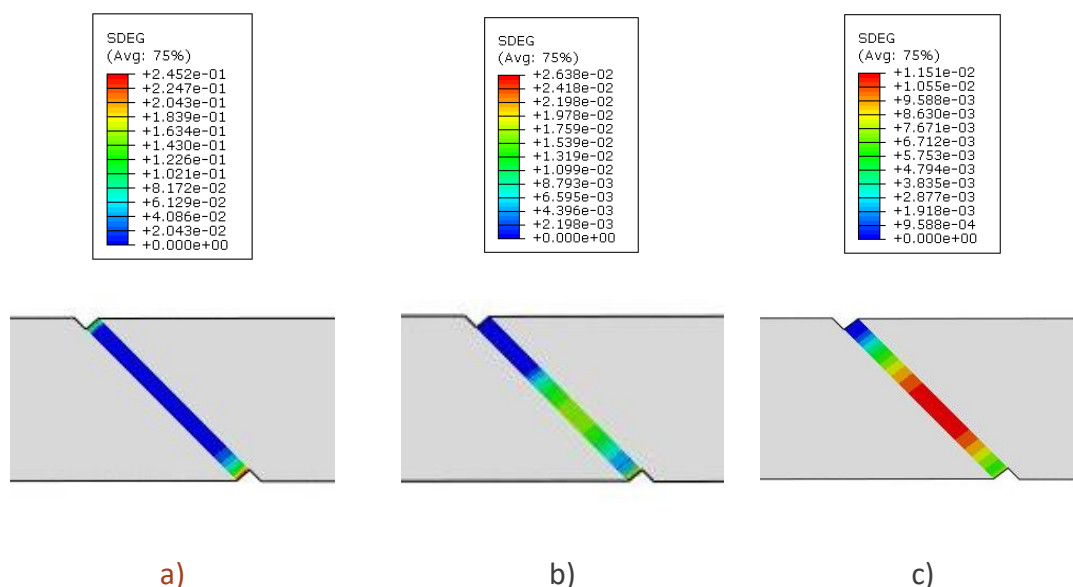


Figura 84 – Visualização gráfica da PEEQ em JTC com $\alpha=3,43^\circ$, com os adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752

Figura 85 - Visualização gráfica da PEEQ em JTC com $\alpha=45^\circ$

As visualizações gráficas da PEEQ na Figura 84 e Figura 85 dizem respeito ao incremento em que $P_{\text{máx}}$ é atingido para cada uma das juntas em particular. Na Figura 84 (a) e (b) estão representadas as juntas cujos aderentes sofreram plastificação, onde é notório o gradiente de deformações nos mesmos. Por outro lado, na junta referente ao adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 84 c), os aderentes não sofrem qualquer tipo de deformação quando $P_{\text{máx}}$ é atingido. O mesmo acontece para as restantes juntas adesivas simuladas. Isto deve-se ao facto de a resistência da junta adesiva ser inferior à resistência dos aderentes. Não havendo deformações nos aderentes, torna-se inútil avaliar este mesmo parâmetro.

Figura 86 - Visualização gráfica do SDEG em JTC com $\alpha=45^\circ$, com os adesivos: (a) Araldite® AV138, (b) Araldite® 2015 e (c) Sikaforce® 7752

Como tal, na Figura 86 é apresentada a visualização gráfica da extensão do dano (variável SDEG) no adesivo que, tal como o nome indica, permite avaliar o dano causado na camada de adesivo. Também as extensões do dano presentes na Figura 86 dizem respeito ao incremento correspondente a $P_{\text{máx}}$ de cada junta. É possível observar que, para um adesivo mais rígido como o Araldite® AV138, a junta adesiva apenas apresenta dano junto das extremidades (Figura 86 a), pois o adesivo não permite que haja uma distribuição de tensões ao longo de L_0 , originando a concentração de tensões nas extremidades da junta que levam à rotura prematura da junta. Por outro lado, o adesivo

Sikaforce® 7752, que se caracteriza pela alta ductilidade, permite que haja uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo de L_0 . Consequentemente, no momento em que $P_{m\acute{a}x}$ é alcançado, o adesivo apresenta dano praticamente em todo o comprimento de sobreposição. O adesivo Araldite® 2015 apresenta um comportamento intermédio entre os dois adesivos referidos, na medida em que se observa dano muito ligeiro nas extremidades do adesivo, em simultâneo com uma zona intermédia com dano reduzido.

3.3.4 Previsão da energia dissipada

Neste subcapítulo é analisada a energia dissipada nas juntas adesivas, quando sujeitas a esforços de tração, até estas atingirem $P_{m\acute{a}x}$. Na Tabela 11 são apresentados os valores de energia dissipada calculados para as JTC com os três adesivos em estudo, em função de α . Na Figura 87 é possível observar a evolução gráfica da energia dissipada para os três adesivos, em função de α .

A energia dissipada é obtida através do cálculo da área abaixo das curvas $P-\delta$. Para ter um termo comparativo entre as diversas curvas $P-\delta$, foi calculada a energia dissipada até $P_{m\acute{a}x}$ ser atingido. De forma geral, a energia dissipada segue uma tendência semelhante a $P_{m\acute{a}x}$. Verifica-se uma tendência exponencial crescente da energia dissipada com a diminuição de α , para qualquer adesivo. A JTC com o adesivo Araldite® 2015 e $\alpha=3,43^\circ$ é aquela que requer maior energia até atingir $P_{m\acute{a}x}$ (8,34 J). Apesar de o $P_{m\acute{a}x}$ ser igual ao adesivo Araldite® AV138, devido à plastificação dos aderentes, a junta com o adesivo Araldite® 2015 sofreu um maior deslocamento que consequentemente resultou numa maior energia dissipada. Tendo em conta que a rigidez dos adesivos provoca um aumento da concentração de tensões, que penaliza a resistência da junta, pode-se dizer que esta propriedade provoca por si só uma diminuição da energia dissipada. No entanto, nos casos em estudo, o aumento de rigidez do adesivo é acompanhado da melhoria das propriedades mecânicas do mesmo, que se sobrepõe ao efeito das concentrações de tensões mencionadas.

Tabela 11 - Valores de energia dissipada [J] para os três adesivos, em função de α

| Adesivo | α (°) | | | | | |
|------------------------|--------------|------|------|------|------|-------|
| | 45° | 30° | 20° | 15° | 10° | 3,43° |
| Araldite® AV138 | 0,24 | 0,46 | 0,95 | 1,50 | 2,90 | 7,92 |
| Araldite® 2015 | 0,10 | 0,24 | 0,55 | 0,91 | 1,72 | 8,34 |
| Sikaforce® 7752 | 0,05 | 0,11 | 0,26 | 0,43 | 0,90 | 5,80 |

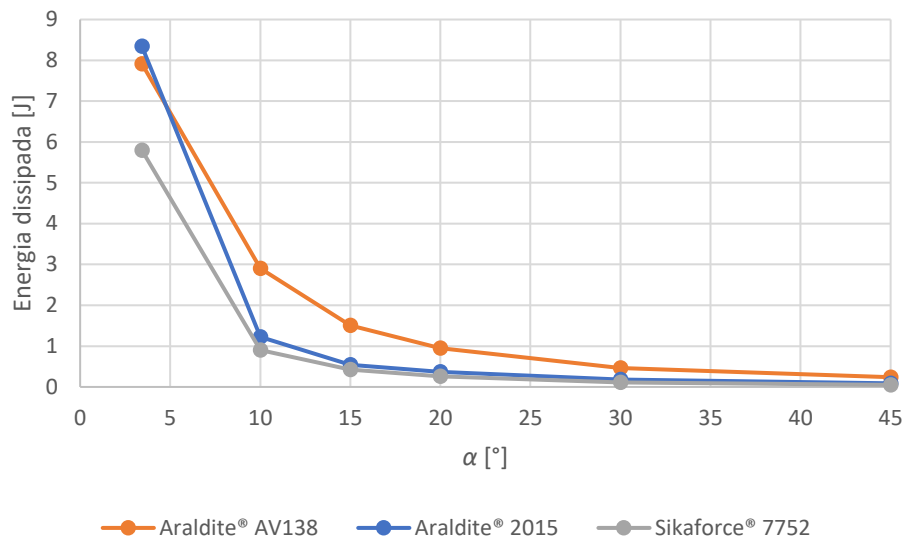


Figura 87 - Evolução da energia dissipada em função de α , para os três adesivos

3.3.5 Análise dos resultados obtidos

Nos capítulos anteriores foi analisado o comportamento de JTC quando sujeitas a esforços de tração, no que diz respeito à distribuição de tensões na camada de adesivo, a extensão do dano no mesmo, a previsão da resistência máxima das juntas e ainda a energia dissipada nestas solicitações.

Em termos de estudo de tensões para esta configuração de junta, verifica-se a existência de picos nas extremidades que tendem a aumentar com o decrescer de α . Também se verificou que, com o aumento da rigidez do adesivo, agravam-se os efeitos de concentração de tensões e magnitude dos picos nas extremidades de L_0 . Apesar da existência de picos de tensão em todas as juntas estudadas, constata-se que esta configuração de junta proporciona uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo de L_0 , quando comparada com outro tipo de configurações.

Quanto à variável de dano, verifica-se que está sempre em concordância com as distribuições de tensões das mesmas juntas. De forma geral, verifica-se a existência de picos nas extremidades, com tendência de danos nulos ou muito reduzidos na zona intermédia de L_0 . Analisando entre os vários α , observa-se que com a sua diminuição, o dano tende a iniciar-se mais junto das extremidades de L_0 , acompanhado também de um incremento na sua magnitude, exceto no caso de se observar plastificação dos aderentes antes de ocorrer dano no adesivo. Com o aumento da rigidez do adesivo, é também notório um incremento da magnitude do dano nas extremidades da zona de sobreposição.

No que diz respeito à previsão da resistência das juntas adesivas, verifica-se que o adesivo mais resistente é o Araldite® AV138, obtendo os valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados para todos os α . Por outro lado, a elevada rigidez do adesivo, que não possibilita a distribuição de tensões tão uniforme ao longo de L_0 , origina um aumento percentual de $P_{m\acute{a}x}$ menor com a diminuição de α , mesmo sem contabilizar $\alpha=3,43^\circ$, cujo $P_{m\acute{a}x}$ foi afetado pela plastificação dos aderentes.

A energia dissipada até à junta atingir $P_{m\acute{a}x}$ é uma característica diretamente relacionada ao deslocamento e força máxima que a junta atingiu. Como tal, a sua tendência é semelhante à da resistência das juntas. A energia dissipada tende a aumentar com o decréscimo de α .

**CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE
TRABALHOS FUTUROS**

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

O presente trabalho consistiu no estudo paramétrico numérico de juntas tubulares com chanfro sujeitas a esforços de tração. Para isso, procedeu-se à validação do modelo numérico (MDC) a partir de ensaios experimentais realizados em trabalhos anteriores [5]. Após a validação do método numérico utilizado, procedeu-se às análises paramétricas numéricas pretendidas recorrendo ao *software* Abaqus®. Este estudo paramétrico baseou-se na utilização de três adesivos distintos: um adesivo frágil (Araldite® AV138), um de resistência e ductilidade média (Araldite® 2015) e ainda um de elevada ductilidade e resistência moderada (Sikaforce® 7752). Para além da variação do adesivo, o outro parâmetro utilizado foi a variação do ângulo *scarf* para os valores de 45°, 30°, 20°, 15°, 10° e 3,43°.

Primeiramente foram avaliadas as distribuições de tensões σ_y e τ_{xy} ao longo da camada adesiva. Verificou-se que, de forma geral, as distribuições de tensões σ_y apresentam valores mais altos em forma de picos nas extremidades de L_0 , sendo que tendem a aumentar a sua magnitude com o decréscimo de α . A rigidez dos adesivos também é um fator preponderante na distribuição de tensões σ_y da camada de adesivo. Com o aumento da rigidez os picos de tensão σ_y tendem a aumentar nas extremidades de L_0 . Por outro lado, os adesivos de maior flexibilidade permitem que haja uma distribuição de tensões σ_y mais uniforme ao longo de L_0 , pelo que a zona intermédia da junta também contribui de forma relevante para a resistência máxima da mesma. Relativamente às tensões τ_{xy} também se verificou a existência de picos nas extremidades de L_0 , no entanto de menor magnitude, quando comparados com as tensões σ_y . Em virtude da análise dos gráficos de distribuição de tensões τ_{xy}/τ_{avg} em função da variação do adesivo, constatou-se que existe um agravamento ligeiro dos picos de tensão nas extremidades de L_0 com o aumento da rigidez do adesivo. Este incremento de tensões nas extremidades da zona de sobreposição foi também notório com a diminuição de α , à semelhança do que se verificou também para as tensões σ_y . No entanto, este agravamento é muito ligeiro e as tensões τ_{xy} apresentam um comportamento bastante uniforme ao longo de L_0 . Com base no que foi apresentado pode-se dizer que as JTC são juntas que garantem uma distribuição de tensões τ_{xy} praticamente uniforme ao longo de L_0 , e são pouco sensíveis à variação da rigidez do adesivo e de α .

De seguida foi analisada a extensão do dano ao longo da ligação adesiva, para o incremento correspondente a $P_{m\acute{a}x}$. Para todos os adesivos verificou-se a existência de picos de dano nas extremidades de L_0 , com um agravamento dos mesmos para adesivos

de maior rigidez. O adesivo mais frágil (Araldite® AV138) chegou mesmo a atingir a rotura total (SDEG=1) junto das extremidades, para valores de α menores, e dano nulo (SDEG=0) na zona intermédia de L_0 . Em adesivos de maior ductilidade verificou-se uma extensão do dano ao longo de uma maior porção de L_0 , e a existência de picos de menor magnitude nas extremidades. Relativamente ao parâmetro α , observou-se que com o seu decréscimo, o dano tende a iniciar mais junto das extremidades de L_0 , acompanhado de um aumento da sua magnitude.

A análise da previsão da resistência das JTC foi realizada através das curvas $P-\delta$ obtidas através do estudo numérico por MDC realizado no Abaqus®. Através da análise das curvas $P-\delta$ tornou-se evidente que o valor de α é altamente influente na resistência máxima da junta adesiva [6]. Para todos os adesivos verificou-se uma tendência clara de aumento de $P_{m\acute{a}x}$ com o decréscimo de α . Esta tendência deve-se essencialmente ao aumento da secção resistente de adesivo, que é função de α [25], mas também à diminuição de tensões de arrancamento que são altamente prejudiciais para o desempenho de juntas adesivas. O adesivo com propriedades mecânicas superiores (Araldite® AV138) foi aquele que obteve $P_{m\acute{a}x}$ mais elevado para todos os valores de α . No entanto, foi perceptível que, devido à sua elevada rigidez, este não beneficia da diminuição de α na mesma proporção como um adesivo dúctil. A rigidez do adesivo proporciona o aparecimento de picos de tensão de maior magnitude devido ao efeito de deformação diferencial dos aderentes ao longo de L_0 , que é nula na extremidade livre dos mesmos, e aumenta até à extremidade oposta [99]. Desta forma, pode-se dizer que a resistência máxima de uma JTC depende principalmente de α e das propriedades mecânicas do adesivo. A rigidez do mesmo acaba por não ser um fator tão preponderante para a resistência da junta, no entanto tem uma influência importante nas distribuições de tensões, que podem provocar a rotura prematura da junta [99, 111].

A evolução energia dissipada até à junta atingir $P_{m\acute{a}x}$ seguiu uma tendência semelhante à da resistência das juntas. A energia dissipada tende a aumentar com o decréscimo de α e com a melhoria das propriedades mecânicas do adesivo, que proporcionam maiores deslocamentos e forças máximas aplicadas.

Como propostas de trabalhos futuros, sugerem-se os seguintes:

- Utilizar aderentes de maior espessura ou resistência, para evitar a sua plastificação nas JTC em que se verificaram $P_{m\acute{a}x}$ mais elevados;
- Avaliar a capacidade dos MDC em prever a resistência de JTC com aderentes compósitos e respetiva simulação de roturas interlaminares;
- Validar os resultados numéricos do estudo paramétrico com ensaios experimentais;
- Efetuar o mesmo estudo comparativo para outro tipo de solicitações, como por exemplo torção, fadiga ou impacto.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Da Silva, L.F.M. e A. Öchsner, *Modeling of adhesively bonded joints*. 2008, Berlin Heidelberg: Springer.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, e M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto, Portugal: Publindústria.
3. Parashar, A. e P. Mertiny, *Adhesively bonded composite tubular joints*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2012. **38**: p. 58-68.
4. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2015.
5. Ferreira, L.R.F., *Estudo paramétrico numérico de juntas adesivas tubulares sujeitas a esforços de tração*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2017.
6. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, EUA: McGraw-Hill.
7. Silva, F.J., *Tecnologia da soldadura: Uma abordagem técnico-didática*. Porto: Publindústria, Edições Técnicas, 2014.
8. Santos, J.F.d.O., *Processos de Soldadura*. 1993.
9. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlin Heidelberg: Springer Science & Business Media.
10. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Cambridge Inglaterra: Elsevier.
11. Louro, A., I. Vicente, D. Santos, L. Máximo, J. Amorim, e R. Carvalho, *Adesivos em engenhos mecânicos: Adesivos estruturais na construção de aviões*, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
12. Neto, C., J. Soomayor, J. Moreira, M. Silva, e R. Afonso, *Adesivos Estruturais em Automóveis*, Faculdade de Engenharia do Porto, 2010.
13. SIKA. *Body Shop Adhesives: Stronger bonds start with SIKA*. 2019 [citado a 12/2020]; Disponível em: https://automotive.sika.com/content/dam/dms/global-industry/i/Sika%20Stronger%20Bonds%20Brochure%20US%20Letter%20Final%2010.23.2019_web.pdf.
14. SIKA. *Assembly Line Adhesives: Durable bonds and simplified processes start with SIKA*. 2019 [citado a 12/2020]; Disponível em: <https://automotive.sika.com/content/dam/dms/global->

industry/a/Sika%20Assembly%20Line%20Brochure%20US%20Letter%2010.23.2019_web.pdf.

15. 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**(2): p. 115-129.
16. Mays, G., *Adhesives in civil engineering / G.C. Mays, A.R. Hutchinson*, ed. A.R. Hutchinson. 1992, Cambridge [England] ; New York, NY, USA: Cambridge University Press.
17. Mays, G., *Structural applications of adhesives in civil engineering*. Materials science and technology, 1985. **1**(11): p. 937-943.
18. HORSEEN. *Structural Strengthening Product*.
[citado a 12/2020]; Disponível em: <https://www.horseen.com/product/six-structural-strengthening-system>.
19. Speth, D.R., Y.P. Yang, e G.W. Ritter, *Qualification of adhesives for marine composite-to-steel applications*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(2): p. 55-62.
20. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. Mestrado, no curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2016.
21. FRITSCH. *SMD glue dispensing*. 2020 [citado a 12/2020]; Disponível em: <https://www.fritsch-smt.de/en/dispensing/electronical-applications/smd-glue-dispensing>.
22. 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.
23. Ebnesajjad, S. e A.H. Landrock, *Adhesives technology handbook*. 2014, Amsterdão, Holanda: William Andrew.
24. Carvalho, U.T.F., *Modelação de juntas adesivas por modelos de dano coesivo utilizando o método direto*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2016.
25. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007.
26. Sousa, F.S.M.d., *Caracterização de adesivos de altas temperaturas para aplicações aeroespaciais*. 2010.
27. Goland, M. e E. Reissner, *The stress in cemented joints*. J. Appl. Mech, 1944. **66**: p. A17-A27.
28. Volkersen, O., *Die Nietkraftverteilung in zugbeanspruchten Nietverbindungen mit konstanten Laschenquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938. **15**: p. 41-47.

29. Davis, M. e D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. International journal of adhesion and adhesives, 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
30. Vallée, T., J.R. Correia, e T. Keller, *Probabilistic strength prediction for double lap joints composed of pultruded GFRP profiles—Part II: Strength prediction*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(13): p. 1915-1930.
31. *Capítulo 17 - Adhesive Bonding*, in *Handbook of Plastics Joining (2ª edição)*, M.J. Troughton, Editor. 2009, William Andrew Publishing: Boston. p. 145-173.
32. D'SOURCE. *Various types os joint Designs*. 2020 [citado a 01/2021]; Disponível em: <http://www.dsource.in/course/designing-plastic-products-injection-moulding/assembly-techniques-plastics/non-detachable-2>.
33. 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.
34. Adams, R.D., R.D. Adams, J. Comyn, W.C. Wake, e W. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 1997, Berlim, Alemanha: Springer Science & Business Media.
35. Vaningen, J. e A. Vlot, *Stress analysis of adhesively bonded single lap joints: Survey and evaluation of analyses*. STIN, 1993. **94**: p. 34643.
36. da Silva, L.F., R.F. Lima, e R.M. Teixeira, *Development of a computer program for the design of adhesive joints*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(12): p. 889-918.
37. Almeida, F.J.S., *Estudo e otimização de juntas do tipo Tpeel soldadas, adesivas e híbridas*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2015.
38. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, in *Advances in numerical modeling of adhesive joints*. 2012, Springer: Berlim, Alemanha. p. 1-93.
39. Courant, R., *Variational methods for the solution of problems of equilibrium and vibrations*. Lecture notes in pure and applied mathematics, 1994: p. 1-1.
40. Wooley, G.R. e D.R. Carver, *Stress concentration factors for bonded lap joints*. Journal of Aircraft, 1971. **8**(10): p. 817-820.
41. 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.
42. Goncalves, J., M. De Moura, e P. De Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(5): p. 357-365.
43. Adams, R. e N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive bonded tubular lap joints*. The Journal of Adhesion, 1977. **9**(1): p. 1-18.

44. Adams, R.D. e R. Davies, *Strength of joints involving composites*. The Journal of Adhesion, 1996. **59**(1-4): p. 171-182.
45. Adams, R. e R. Davies, *Strength of lap shear joints*, in *Adhesion Science and Engineering*. 2002, Elsevier: Amesterdão, Holanda. p. 111-144.
46. He, X., *A review of finite element analysis of adhesively bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(4): p. 248-264.
47. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer.
48. 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.
49. 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.
50. 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.
51. 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.
52. 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.
53. CAMBRIDGE, U.O. *Brittle Fracture*. 2021 [citado a 01/2021]; Disponível em: https://www.doitpoms.ac.uk/tlplib/brittle_fracture/same.php?printable=1.
54. Marzi, S., A. Rauh, e R.M. Hinterhölzl, *Fracture mechanical investigations and cohesive zone failure modelling on automotive composites*. Composite Structures, 2014. **111**: p. 324-331.
55. 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.
56. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
57. 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.
58. 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.

59. 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.
60. 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.
61. Wang, Y., J. Chen, e H. Li, *Improved cohesive zone model and its application in interface contact analysis*. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2008. **21**(4): p. 295-302.
62. Cornec, A., I. Scheider, e K.-H. Schwalbe, *On the practical application of the cohesive model*. Engineering fracture mechanics, 2003. **70**(14): p. 1963-1987.
63. 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.
64. 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.
65. 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.
66. 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.
67. 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.
68. 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.
69. Daudeville, L. e P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
70. Kattan, P.I. e G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001, Berlin Heidelberg: Springer
71. 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.
72. 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.

73. 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.
74. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Hoboken, Nova Jersey, EUA: Wiley-Blackwell.
75. 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.
76. 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.
77. 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.
78. Labbé, S. e J.-M. Drouet, *A multi-objective optimization procedure for bonded tubular-lap joints subjected to axial loading*. International journal of adhesion and adhesives, 2012. **33**: p. 26-35.
79. Adams, R. e N. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. Journal of strain analysis, 1974. **9**(3): p. 185-196.
80. Hosseinzadeh, R., K. Shahin, e F. Taheri, *A simple approach for characterizing the performance of metallic tubular adhesively-bonded joints under torsion loading*. Journal of adhesion science and technology, 2007. **21**(16): p. 1613-1631.
81. Hipol, P.J., *Analysis and optimization of a tubular lap joint subjected to torsion*. Journal of composite materials, 1984. **18**(4): p. 298-311.
82. 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.
83. Nguyen, V. e K.T. Kedward, *Non-linear Modeling of Tubular Adhesive Scarf Joints Loaded in Tension*. The Journal of Adhesion, 2001. **76**(3): p. 265-292.
84. Kim, J.K. e D.G. Lee, *Thermal characteristics of tubular single lap adhesive joints under axial loads*. Journal of adhesion science and technology, 2001. **15**(12): p. 1511-1528.
85. Daniel, I.M., *Composite materials: testing and design*. Vol. 787. 1982, Pensilvânia, EUA: ASTM International.
86. Mendelson, A., *Plasticity: theory and application*, ed. M.s.i.a. mechanics. 1983, Nova Iorque, EUA: Malabar, Fla. : R.E. Krieger Pub. Co.
87. Oh, J.H., *Strength prediction of tubular composite adhesive joints under torsion*. Composites science and technology, 2007. **67**(7-8): p. 1340-1347.

88. Knox, E., M. Cowling, e S. Hashim, *Fatigue performance of adhesively bonded connections in GRE pipes*. International journal of fatigue, 2000. **22**(6): p. 513-519.
89. Sekercioglu, T., *Strength based reliability of adhesively bonded tubular lap joints*. Materials & design, 2007. **28**(6): p. 1914-1918.
90. Fernandes, T.A.B., *Aplicação de métodos numéricos avançados para a previsão de resistência de ligações adesivas*. Tese de Mestrado, no curso de Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 2014.
91. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*. Tese de Mestrado, no curso de Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto. 2015.
92. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, e L.F. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
93. Neto, J., R.D. Campilho, e L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
94. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2014.
95. 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.
96. 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.
97. Jousset, P. e M. Rachik, *Comparison and evaluation of two types of cohesive zone models for the finite element analysis of fracture propagation in industrial bonded structures*. Engineering Fracture Mechanics, 2014. **132**: p. 48-69.
98. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
99. Campilho, R.D., M. De Moura, e J. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
100. Da Silva, L.F. e R.D. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, Berlim, Alemanha: Springer.
101. Pocius, A.V., *“Adhesion and Adhesives Technology, An introduction, 2nd Edition*. 2002, Munique: Hanser.

102. Andersson, T. e U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
103. Leffler, K., K.S. Alfredsson, e U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
104. Högberg, J.L. e U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
105. Campilho, R., A. Pinto, M.D. Banea, R. Silva, e L.F. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
106. De Moura, M., J. Gonçalves, J. Chousal, e R. Campilho, *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 419-426.
107. Marques, E. e L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
108. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2014.
109. Sousa, C.C.R.G.d., *Comparação de técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência de juntas adesivas de sobreposição simples*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2015.
110. Rocha, R.J.B. e R.D.S.G. Campilho, *Evaluation of different modelling conditions in the cohesive zone analysis of single-lap bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2018. **94**(7): p. 562-582.
111. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, e J. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(2): p. 195-205.
112. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2012.
113. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. Tese de doutoramento, no curso de Engenharia Mecânica, Universidade do Porto (Portugal), Porto, Portugal. 2009.
114. Luo, Q. e L. Tong, *Fully-coupled nonlinear analysis of single lap adhesive joints*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(7–8): p. 2349-2370.
115. Vable, M. e J.R. Maddi, *Boundary element analysis of adhesively bonded joints*. International journal of adhesion and adhesives, 2006. **26**(3): p. 133-144.

116. Grant, L., R. Adams, e L.F. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International journal of adhesion and adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
117. Yang, Q. e B. Cox, *Cohesive models for damage evolution in laminated composites*. International Journal of Fracture, 2005. **133**(2): p. 107-137.
118. Silva, D.F.O.d., *Utilização do método direto de obtenção de leis coesivas para previsão de resistência de juntas com chanfro interior*. Tese de Mestrado, no curso de Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, Portugal. 2017.
119. Hart-Smith, L.J., *Adhesive-bonded single-lap joints*. 1973, Washington, D.C., EUA: NASA (National Aeronautics and Space Administration).
120. Williams Jr, J.H., *Stresses in adhesive between dissimilar adherends*. The Journal of Adhesion, 1975. **7**(2): p. 97-107.
121. Ojalvo, I. e H. Eidinoff, *Bond thickness effects upon stresses in single-lap adhesive joints*. AIAA journal, 1978. **16**(3): p. 204-211.
122. Bigwood, D. e A.D. Crocombe, *Elastic analysis and engineering design formulae for bonded joints*. International journal of Adhesion and Adhesives, 1989. **9**(4): p. 229-242.
123. Delale, F., F. Erdogan, e M. Aydinoglu, *Stresses in adhesively bonded joints: a closed-form solution*. Journal of Composite Materials, 1981. **15**(3): p. 249-271.
124. Yuceoglu, U. e D.P. Updike, *Stress analysis of bonded plates and joints*. 1980.
125. Allman, D., *A theory for elastic stresses in adhesive bonded lap joints*. The Quarterly journal of mechanics and applied mathematics, 1977. **30**(4): p. 415-436.
126. Renton, W.J. e J.R. Vinson, *The efficient design of adhesive bonded joints*. The Journal of Adhesion, 1975. **7**(3): p. 175-193.
127. Chen, D. e S. Cheng, *An analysis of adhesive-bonded single-lap joints*. 1983.

ANEXOS

6 ANEXOS

6.1 Anexo 1

Tabela 12 - Resumo de considerações mais significativas nas teorias de modelos analíticos de diversos autores [5]

| Considerações | Goland e Reissner (1944) [27] | Hart-Smith (1973) [119] | Williams (1975) [120] | Ojalvo e Eidinof (1978) [121] | Bigwood e Crocombe (1989) [122] | Delale et al. (1981) [123] | Tuceoglu e Updike (1980) [124] | Alliman (1977) [125] | Renton e Vinson (1975) [126] | Chen e Cheng (1983) [127] |
|---|----------------------------------|----------------------------|--------------------------|----------------------------------|------------------------------------|-------------------------------|-----------------------------------|-------------------------|---------------------------------|------------------------------|
| Filete de canto do adesivo desprezado | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Direção da largura desprezada | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Tensões longitudinais no adesivo inexistentes | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Estado plano de tensão | X | X | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Análise elástica | X | | X | X | X | X | X | X | X | X |
| Deformação ao corte dos aderentes | | | | | | X | X | X | X | X |
| Tensão de corte nula na aresta da junta | | | | | | | | X | X | X |
| Tensão de corte variável ao longo da espessura do adesivo | | | | X | | | | | | |
| Tensão normal variável ao longo da espessura do adesivo | | | | | | | | | X | X |
| Junta simétrica | X | | | X | | X | | | X | X |