



## Estudo de juntas adesivas em degrau: Análise experimental e numérica por Modelos de Dano Coesivo

DIOGO JOSÉ DA COSTA GONÇALVES  
outubro de 2018

# ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

Diogo José Da Costa Gonçalves

1120337

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# ESTUDO DE JUNTAS ADESIVAS EM DEGRAU: ANÁLISE EXPERIMENTAL E NUMÉRICA POR MODELOS DE DANO COESIVO

Diogo José da Costa Gonçalves

1120337

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 Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

**2018**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

A definir

## **Orientador**

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Arguente**

A definir



## AGRADECIMENTOS

Na realização da presente dissertação contei com o apoio e ajuda de várias pessoas, às quais não podia deixar de expressar a minha gratidão. Em primeiro lugar, gostaria de expressar o meu sincero agradecimento ao Excelentíssimo Senhor Professor Doutor Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, por todo o apoio, compreensão e disponibilidade prestada ao longo da realização deste trabalho, sem os quais não seria possível a sua realização

Aos amigos João Silva, Rui Valente, Manuel Silva, Tiago Silva, Nuno Carreira, Gonçalo Vasconcelos e Daniele Cataldo dirijo-lhes um agradecimento pelo acompanhamento durante estes cinco anos.

Igualmente dedico especial agradecimento à Sílvia Xavier pelo apoio incondicional ao longo desta etapa.

Por último, e mais importante presto agradecimento às pessoas mais importantes da minha vida, à minha Mãe, ao meu Pai e ao meu Irmão por todos os esforços e sacrifícios em prol da minha formação. Esta dissertação é dedicada a vocês, muito OBRIGADO.



## PALAVRAS CHAVE

Método de Elementos Finitos, modelos de dano coesivo, mecânica da fratura, adesivo estrutural, juntas adesivas, junta em degrau, ensaios mecânicos.

## RESUMO

De acordo com evidências históricas, a indústria aeronáutica foi pioneira na utilização de ligações adesivas. Esta técnica começou por ser aplicada com adesivos naturais, mas a necessidade de melhorar as propriedades mecânicas levou à introdução de adesivos preparados sinteticamente. A descoberta das vantagens na utilização deste processo fez com que os métodos de ligação mecânicos convencionais como, por exemplo, rebiteagem, aparafusamento e soldadura, fossem substituídos por ligações adesivas. Atualmente, esta técnica impôs-se em diversos setores industriais como aeroespacial, automóvel, eletrónica, entre outros. Devido ao crescimento da aplicação de adesivos estruturais em construções mecânicas, foram desenvolvidos vários tipos de configurações de juntas com o intuito de melhorar o seu desempenho. As geometrias mais comuns são as juntas de sobreposição simples (JSS), juntas de sobreposição dupla (JSD) e juntas com chanfros interiores e exteriores. As juntas em degrau são permanentemente alvo de estudo no que diz respeito à distribuição de tensões que são desenvolvidas na camada adesiva, dado que as suas características não estão plenamente identificadas.

O trabalho realizado consiste na avaliação numérica do desempenho mecânico de juntas adesivas em degrau submetidas a esforços de tração, em função do comprimento de sobreposição ( $L_0$ ). Este estudo tem também como objetivo analisar a influência da rigidez do adesivo utilizado na resistência da junta. Para esse fim, foram analisadas juntas ligadas com três tipos de adesivos, o adesivo altamente frágil Araldite® AV138, o adesivo com características intermédias Araldite® 2015 e o adesivo dúctil Sikaforce® 7752. No desenvolvimento do trabalho numérico foram obtidas, através da análise do método elementos finitos (EF) e com recurso ao *software* Abaqus®, a distribuição de tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e tensões de corte ( $\tau_{xy}$ ) ao longo da camada adesiva. Foram também estudados os modos de rotura das juntas e a evolução da variável de dano (SDEG) ao longo do processo de carregamento, com recurso aos modelos de dano coesivo (MDC). Pelas curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numericamente, foi possível fazer uma previsão da resistência das juntas, definida pela carga máxima admitida ( $P_{m\acute{a}x}$ ). O estudo numérico desenvolvido permitiu verificar que as características do adesivo têm grande influência na resistência da junta. As juntas ligadas com o adesivo frágil apresentam melhores desempenhos para baixos valores de  $L_0$ , enquanto os adesivos dúcteis obtêm

melhores resultados para valores de  $L_0$  elevados, devido à grande capacidade de distribuir e uniformizar as tensões desenvolvidas ao longo da camada adesiva.

## KEYWORDS

Finite Element Method, cohesive zone models, fracture mechanics, structural adhesive, adhesive joints, stepped-lap joint, mechanical tests.

## ABSTRACT

According to historical evidence, the aeronautical industry pioneered the use of adhesive bonds. This technique began by being applied with natural adhesives, but the need to improve the mechanical properties led to the introduction of synthetically prepared adhesives. The discovery of the advantages in using this process meant that conventional mechanical joining methods such as riveting, bolting and welding were replaced with adhesive bonds. Currently, this technique has been imposed in several industrial sectors such as aerospace, automobile, electronics, among others. Due to the growth of the application of structural adhesives in mechanical constructions, several types of joint configurations have been developed to improve their performance. The most common geometries are single-lap joints, double-lap joints and joints with inner and outer chamfering. Step joints are permanently under study regarding the distribution of stresses that are developed in the adhesive layer, since their characteristics are not fully identified.

The work carried out consists of the numerical evaluation of the mechanical performance of bonded stepped-lap joints submitted to tensile stresses as a function of the overlap length ( $L_0$ ). This study also aims to analyze the influence of the stiffness of the adhesive used on the strength of the joint. To this end, bonded joints were analyzed with three types of adhesives, the highly brittle adhesive Araldite® AV138, the intermediate adhesive Araldite® 2015 and the ductile adhesive Sikaforce® 7752. In the development of the numerical work, the distribution of peel stresses ( $\sigma_y$ ) and shear stresses ( $\tau_{xy}$ ) along the adhesive layer were obtained, by the finite element method and with the Abaqus® software. The joint failure modes and the evolution of the damage variable (SDEG) along the loading process were also studied using Cohesive Zone Models (CZM). By means of the numerically obtained  $P$ - $\delta$  curves, it was possible to predict the joints' strength, defined by the maximum load ( $P_{m\acute{a}x}$ ). The developed numerical study allowed to verify that the characteristics of the adhesive have great influence on the joints' strength. The joints bonded with the brittle adhesive exhibit better performances at low  $L_0$  values, while the ductile adhesives obtain better results at high  $L_0$  values, due to the higher ability to distribute and uniformize the stresses developed along the adhesive layer.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
Cr	Crómio
CTCM	Critério de tensão de corte máxima
CTNM	Critério da tensão normal máxima
Cu	Cobre
CZM	<i>Cohesive zone model</i>
DCB	<i>Double-cantilever beam</i>
DIN	<i>Deutsches Institut für Normung</i>
EF E	Elementos finitos
EN	<i>Euro Norm</i>
ENF	<i>End-notched flexure</i>
Fe Fer	Ferro
FE	<i>Finite element</i>
JSD	Junta sobreposição dupla
JSS	Junta sobreposição simples
MDC	Modelos de dano coesivo
MFLE	Mecânica da fratura linear elástica

Mg	Magnésio
Mn	Manganês
pH	Potencial hidrogeniónico
PRFC	Plástico reforçado com fibras de carbono
PRFV	Plástico reforçado com fibra de vidro
PTFE	Politetrafluoretileno
PVC	Policloreto de vinila
Si	Silício
TAST	<i>Thick-adherend shear test</i>
TFFV	Técnica do fecho fenda da virtual
Ti	Titânio
Zn	Zinco

#### Lista de Símbolos

$E$ (Pa)	Módulo de Young
$G$ (Pa)	Módulo de elasticidade transversal
$G_{IC}$ (N/mm)	Tenacidade à tração
$G_{IIC}$ (N/mm)	Tenacidade ao corte
$L_0$ (mm)	Comprimento de sobreposição
$L_T$ (mm)	Comprimento total provete
$N$	Número de degraus
$P$ (N)	Força resistente da junta
$P_{máx}$ (N)	Carga máxima admitida

$S$ (mm)	Parâmetro de cota de maquinagem
$t_A$ (mm)	Espessura de adesivo da porção longitudinal ao carregamento
$t_{A1}$ (mm)	Espessura de adesivo da porção transversal ao carregamento
$t_n^0$ (Pa)	Resistência coesiva à tração
$t_p$ (mm)	Espessura do substrato
$t_s^0$ (Pa)	Resistência coesiva ao corte
$x$ (mm)	Distância desde a extremidade esquerda do adesivo
$x/L_0$	Distância normalizada ao longo do comprimento de sobreposição do adesivo
$\gamma_f$ (%)	Deformação de rotura ao corte
$\delta$ (mm)	Deslocamento associado à solitação de tração da junta
$\delta_{máx}$ (mm)	Deslocamento associado à força máxima resistente da junta
$\delta_n^0$ (mm)	Deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração
$\delta_s^0$ (mm)	Deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte
$\epsilon_f$ (%)	Deformação da rotura à tração
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_e$ (Pa)	Tensão de cedência à tração
$\sigma_f$ (Pa)	Tensão de rotura à tração
$\sigma_y$ (Pa)	Tensão normal segundo a espessura ou de arrancamento
$\sigma_y/\tau_{méd}$ (Pa)	Tensão de arrancamento normalizada para as juntas em degrau
$\tau_f$ (Pa)	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{xy}$ (Pa)	Tensão de corte
$\tau_{xy}/\tau_{méd}$ (Pa)	Tensão de corte normalizada para as juntas em degrau

---

$\tau_y$ (Pa)	Tensão de cedência ao corte
---------------	-----------------------------

---

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 – Junta adesiva [4] .....	8
Figura 2 – Representação dos conceitos de adesão e coesão num junta adesiva [2] .....	8
Figura 3 – Representação das interfaces e interfases de uma junta adesiva [8] .....	9
Figura 4 - Comparação da distribuição das tensões em juntas rebitadas e adesivas [4] .....	10
Figura 5 – Aplicação de ligações adesivas na construção de um satélite (1,2 m de diâmetro/4 m de altura/70 kg de peso) [4] .....	11
Figura 6 – Aplicação de ligações adesivas na construção de um avião comercial [9] .....	12
Figura 7 – Aplicação de ligações adesivas nos painéis de fuselagem do reator [9] .....	12
Figura 8 – Aplicação de adesivo na construção de automóveis (adaptado de [10]) .....	13
Figura 9 – Esquema de um microchip produzido com recurso a adesivos [9] .....	13
Figura 10 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de tração (adaptado de [7]) .....	14
Figura 11 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de compressão (adaptado de [7]) .....	15
Figura 12 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de corte (adaptado de [7]) .....	15
Figura 13 – Comparação da resistência ao corte com o aumento de comprimento vs. largura [11] .....	16
Figura 14 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de clivagem (adaptado de [11]) .....	16
Figura 15 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de arrancamento (adaptado de [11]) ..	17
Figura 16 – Esquema representativo da rotura coesiva (adaptado de [4]) .....	18
Figura 17 – Esquema representativo da rotura adesiva [4] .....	18
Figura 18 – Esquema representativo da rotura mista (adaptado de [4]) .....	19
Figura 19 – Esquema representativo da rotura do substrato [4] .....	19
Figura 20 – Esquema representativo de uma JSS[4] .....	19
Figura 21 – Esquema representativo de uma junta de JSD [4] .....	20
Figura 22 – Esquema representativo de uma junta topo a topo [4] .....	20
Figura 23 – Esquema representativo de uma junta em degrau [4] .....	20
Figura 24 – Esquema representativo de uma junta com chanfro interior [4] .....	21
Figura 25 – Esquema representativo de uma junta com chanfro exterior [4] .....	21
Figura 26 – Esquema representativo de uma cobre-junta [4] .....	21
Figura 27 – Esquema representativo de uma cobre junta dupla [4] .....	21

Figura 28 – Esquema representativo de uma junta tubular [4] .....	22
Figura 29 – Esquema representativo de uma junta com ressalto [4] .....	22
Figura 30 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [30]) .....	25
Figura 31 – Modelo coesivo triangular [42, 43] .....	26
Figura 32 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [60] .....	29
Figura 33 – Esquema representativo de uma JSS com filete de adesivo .....	29
Figura 34 – Modo de transferência de carga e distribuição de tensões para JSS com e sem filete [4] .....	30
Figura 35 – Esboço do chanfro interior na extremidade do aderente [62] .....	30
Figura 36 – Efeito da altura do chanfro na distribuição das tensões na junta (a) tensões $\sigma_y$ (b) tensão de von Mises equivalente [62] .....	31
Figura 37 – Tensões $\tau_{xy}$ obtidas experimentalmente com a variação do ângulo do chanfro [62] .....	31
Figura 38 – Efeito do módulo de elasticidade em juntas adesivas com chanfro [62] .....	32
Figura 39 – Tensões $\tau_{xy}$ obtidas experimentalmente com a variação do módulo de elasticidade [62] .....	32
Figura 40 – Geometria do chanfro em estudo com os respetivos parâmetros [63] .....	33
Figura 41 – Distribuição a) das tensões $\sigma_{zz}$ b) das tensões $\tau_{yz}$ numa junta com chanfros exteriores [63] ..	33
Figura 42 – Efeito do parâmetro $ch$ na resistência de juntas com chanfros exteriores [63] .....	34
Figura 43 – Esquema representativo de uma junta com dois adesivos e distribuição de tensões [2] .....	34
Figura 44 – Gradação do módulo de Young ao longo da JSS [68] .....	35
Figura 45 – Modelo para o estudo do método EF de uma junta em degrau [69] .....	36
Figura 46 – Distribuição de cada componente de tensão: (a) na interface adesiva transversal ao carregamento; (b) na interface adesiva de longitudinal ao carregamento [69] .....	37
Figura 47 – Distribuição da tensão $\sigma_1/\sigma_0$ para a interface superior, inferior e plano da camada média [69] .....	38
Figura 48 – Efeito do módulo de Young do adesivo na tensão $\sigma_1/\sigma_0$ numa junta: (a) interface superior do adesivo e (b) secção ampliada da extremidade da zona de sobreposição [69] .....	39
Figura 49 – Efeito do número de degraus $N$ na tensão $\sigma_1/\sigma_0$ numa junta: (a) na interface superior do adesivo e (b) secção ampliada da extremidade da zona de sobreposição [69] .....	40
Figura 50 – Comparação entre as deformações obtidas experimentalmente e pelo método EF [69] .....	40
Figura 51 – Parâmetros geométricos das JSS utilizadas no estudo [70] .....	41
Figura 52 – Parâmetros geométricos das juntas com um degrau utilizadas no estudo [70] .....	41

Figura 53 – Parâmetros geométricos das juntas com três degraus utilizadas no estudo [70] .....	41
Figura 54 – Média das forças máximas de rotura das juntas obtidas experimentalmente [70] .....	42
Figura 55 – Gráficos força vs deslocamento; (a) para juntas do Tipo I, II e III ligadas com o adesivo SBT9244, (b) para juntas do Tipo I, II e III ligadas com o adesivo DP460 [70] .....	43
Figura 56 – Superfície crítica de juntas adesivas [70].....	44
Figura 57 – Comparação da distribuição de tensões da camada adesiva ao longo da linha EF para juntas ligadas com o adesivo SBT9244: (a) tensões $\sigma_y$ e (b) tensões $\tau_{xy}$ [70].....	45
Figura 58 – Comparação da distribuição de tensões da camada adesiva ao longo da linha EF para juntas ligadas com o adesivo DP460: (a) tensões $\sigma_y$ e (b) tensões $\tau_{xy}$ [70] .....	45
Figura 59 – Rotura interlaminar de uma junta ligada com o adesivo AV138 e com $L_0$ de 40 mm [72].....	47
Figura 60 – Ilustração da zona de sobreposição de uma junta adesiva com camada interlaminar [44]....	48
Figura 61 – Forças máximas registadas experimentalmente em JSS para o Araldite® AV138 e Sikaforce® 7888 [72].....	49
Figura 62 – Resultados experimentais vs. previsões analíticas para o Araldite® AV138 [72] .....	49
Figura 63 – Resultados experimentais vs previsões numéricas para o Sikaforce® 7888 [72] .....	50
Figura 64 – Layout dos defeitos na juntas (a) $L_0=25$ e (b) $L_0=50$ mm [74] .....	50
Figura 65 – Distribuição da tensão $\tau_{xy}$ normalizada a meio da camada adesiva em função da percentagem de área defeituosa (a) para juntas ligadas com Araldite® AV138 (b) para juntas coladas com Sikaforce® 7752 [74] .....	51
Figura 66 – Curvas P- $\delta$ obtidas experimental e numericamente (a) para juntas sem defeito com o Araldite® AV138 e $L_0=25$ mm e (b) para juntas sem defeito com o Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm [74].....	51
Figura 67 – Planos considerados para análise das distribuições de tensões [75] .....	52
Figura 68 – Distribuição (a) das tensões $\sigma_y$ e (b) das tensões $\tau_{xy}$ para os diferentes planos e para $L_0=10$ mm [75].....	52
Figura 69 – Valores experimentais e numéricos da $P_m$ em função do $L_0$ para juntas adesivas com o adesivo (a) XNR6823 e (b) XNR6852 [75].....	53
Figura 70 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ da liga de alumínio AW 6082-T651 [60].....	58
Figura 71 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [79].....	59
Figura 72 – Adesivo Araldite® AV138 [77] .....	59
Figura 73 – Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml [77] .....	60
Figura 74 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [79]. .....	61
Figura 75 – Adesivo Sikaforce® 7752 [77] .....	62

Figura 76 – Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [81].....	62
Figura 77 – Esquema representativo da geometria de junta em degrau e respetivas condições fronteira [76].....	63
Figura 78 – Maquinagem dos degraus na Fresadora GambinSA modelo 1m [76] .....	65
Figura 79 – Esquema de cotagem para efeito de maquinagem [76].....	66
Figura 80 – Pormenor da operação de lixagem da superfície do substrato [76] .....	66
Figura 81 – Aspeto da superfície dos substratos após tratamento superficial [76] .....	67
Figura 82 – Pormenor de aplicação adesivo Araldite® 2015 [76].....	68
Figura 83 – Aspeto da junta após a sua montagem [76] .....	69
Figura 84 – Acabamentos pós cura com a) remoção dos excessos de adesivos mais salientes e b) acabamento final dos provetes com mó abrasiva [76].....	69
Figura 85 – Aspeto de um provete pronto a ensaiar [76] .....	70
Figura 86 – Máquina Shimadzu – Autograph AG-X [76] .....	70
Figura 87 – Curvas $P$ - $\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm [76] .....	71
Figura 88 – Curvas $P$ - $\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm [76].....	72
Figura 89 – Curvas $P$ - $\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm [76].....	73
Figura 90 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm [76]73	
Figura 91 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm [76]..	74
Figura 92 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=50$ mm [76] ...	74
Figura 93 – Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em função do valor de $L_0$ [76] .....	75
Figura 94 – Modelo da junta em degrau criado no módulo “Part” do software Abaqus® .....	78
Figura 95 – Imagem do software Abaqus® que mostra a dimensão variável para alteração do $L_0$ .....	78
Figura 96 – Propriedades elásticas inseridas no Abaqus® referentes aos aderentes .....	78
Figura 97 – Propriedades mecânicas utilizadas no módulo “Part” do Abaqus® referentes ao adesivo.....	79
Figura 98 – Propriedades mecânicas utilizadas no módulo “Property” do Abaqus® referentes à camada interlaminar .....	79
Figura 99 – Atribuição “assignment” a) aos aderentes, b) ao adesivo e c) as camadas interlaminares no módulo “Property” do Abaqus® .....	80

Figura 100 – Valores de incrementação utilizados no estudo definidos no <i>software</i> Abaqus® .....	80
Figura 101 – Imagem referente às condições de encastramento e deslocamento da junta inseridas no <i>software</i> Abaqus® .....	81
Figura 102 – Imagem referente aos <i>Mesh Controls</i> inseridos para cada componente da junta no <i>software</i> Abaqus® .....	81
Figura 103 – Imagem das <i>seeds</i> com os parâmetros do <i>bias ratio</i> inseridos no <i>software</i> Abaqus® .....	82
Figura 104 – Ilustração da malha usada no modelo para o estudo numérico da resistência .....	82
Figura 105 – Ilustração da malha usada no modelo para o estudo numérico das tensões .....	82
Figura 106 – Imagem da janela disponível no módulo “ <i>Job</i> ” do <i>software</i> Abaqus® para acompanhar os incrementos realizados no ensaio numérico .....	83
Figura 107 – Ilustração da tensão de von Mises para o incremento correspondente ao $P_{m\acute{a}x}$ .....	83
Figura 108 - MDC triangular implementado no <i>software</i> Abaqus® .....	84
Figura 109 – Esquema referente localização e identificação das regiões preferenciais da ocorrência de rotura .....	87
Figura 110 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante a) em que é atingido o $P_{m\acute{a}x}$ b) em que ocorre a rotura em juntas adesivas ligadas com Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ mm .....	88
Figura 111 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge o $P_{m\acute{a}x}$ das juntas adesivas ligadas com o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm .....	89
Figura 112 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que as juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm atingem o $P_{m\acute{a}x}$ .....	89
Figura 113 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm .....	90
Figura 114 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Sikaforce® 2015 e $L_0=25$ mm .....	90
Figura 115 – Esquema do $L_0$ normalizado no modelo numérico das juntas em degrau estudadas.....	91
Figura 116 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de $L_0$ .....	92
Figura 117 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de $L_0$ .....	92
Figura 118 – Distribuição de tensões $\sigma_y$ a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de $L_0$ .....	93
Figura 119 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de $L_0$ .....	94

Figura 120 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de $L_0$ .....	94
Figura 121 – Distribuição de tensões $\tau_{xy}$ a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de $L_0$ .....	94
Figura 122 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=12,5$ e $25$ mm .....	96
Figura 123 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=12,5$ e $25$ mm .....	96
Figura 124 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=37,5$ e $50$ mm .....	97
Figura 125 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com $L_0=37,5$ e $50$ mm .....	97
Figura 126 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do $L_0$ .....	98
Figura 127 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do $L_0$ .....	99
Figura 128 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do $L_0$ .....	99
Figura 129 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de $P_{m\acute{a}x}$ em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e com $L_0=50$ .....	100
Figura 130 – Curvas $P$ - $\delta$ numéricas de juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e $L_0=12,5$ , $25$ , $37,5$ e $50$ mm .....	101
Figura 131 – Curvas $P$ - $\delta$ numéricas de juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=12,5$ , $25$ , $37,5$ e $50$ mm .....	102
Figura 132 – Curvas $P$ - $\delta$ numéricas de juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $L_0=12,5$ , $25$ , $37,5$ e $50$ mm .....	103
Figura 133 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente para juntas em degrau em função do adesivo....	104
Figura 134 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138 .....	105
Figura 135 – Comparação das tensões $\tau_{xy}/\tau_{m\acute{e}d}$ em juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138 e $L_0=50$ mm.....	106
Figura 136 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015.....	106
Figura 137 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752.....	107
Figura 138 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138 .....	108
Figura 139 – $P_{m\acute{a}x}$ em função de $L_0$ para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015.....	109

---

Figura 140 – $P_{máx}$ em função de $L_0$ para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752.....	109
--	-----



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização de juntas adesivas (adaptado de [7]) .....	10
Tabela 2 – Variáveis geométricas e mecânicas definidas no estudo de Ichikawa et al. [69].....	37
Tabela 3 – Comparação da relação entre os valores de carga máxima obtidos experimental e numericamente [70]. .....	44
Tabela 4 – Variáveis necessárias para definir a plasticidade de um metal vs. de um material compósito (1 representa a direção das fibras, 2 representa a direção transversa e 3 representa a direção fora do plano) .....	48
Tabela 5 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [77].....	57
Tabela 6 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651; dados do fabricante [77].....	58
Tabela 7 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [79, 80]. .....	60
Tabela 8 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [79]. .....	61
Tabela 9 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [81]. .....	63
Tabela 10 – Parâmetros usados na geometria de junta [76].....	64
Tabela 11 – Comprimento de corte dos substratos [76] .....	65
Tabela 12 – Parâmetros de maquinagem (operação fresagem) [76] .....	65
Tabela 13 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm .....	85
Tabela 14 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm .....	86
Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm .....	87
Tabela 16 – Tabela dos modos de rotura numéricos .....	87



# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	1
1.1	Contextualização .....	1
1.2	Objetivos .....	2
1.3	Organização da dissertação .....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	7
2.1	Ligações adesivas .....	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas .....	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas .....	11
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas .....	13
2.1.4	Configurações possíveis de junta .....	19
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas .....	22
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos .....	23
2.2.2	Mecânica da fratura .....	24
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	25
2.2.4	Mecânica do dano .....	26
2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido .....	28
2.3	Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência .....	29
2.3.1	Filetes de adesivo .....	29
2.3.2	Chanfros interiores e exteriores.....	30
2.3.3	Utilização de dois adesivos.....	34
2.3.4	Gradação de propriedades dos aderentes .....	35
2.3.5	Utilização de degraus na zona de sobreposição.....	35
2.4	Modelação de juntas em material compósito .....	46
2.4.1	Especificidades das juntas em material compósito.....	47
2.4.2	Exemplos de trabalhos publicados na área .....	48

---

3	DESENVOLVIMENTO.....	57
3.1	Trabalho experimental.....	57
3.1.1	Materiais utilizados.....	57
3.1.1.1	Substratos.....	57
3.1.1.2	Adesivos.....	58
3.1.1.2.1	Araldite® AV138.....	58
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	60
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	62
3.1.2	Geometria das juntas.....	63
3.1.3	Processo de fabrico.....	64
3.1.4	Ensaio das juntas.....	70
3.1.5	Resultados obtidos.....	71
3.1.5.1	Curvas P- $\delta$ .....	71
3.1.5.2	Modos de rotura.....	73
3.1.5.3	Resistência das juntas.....	75
3.2	Trabalho numérico.....	77
3.2.1	Condições da análise numérica.....	77
3.2.2	Modelo de dano coesivo.....	83
3.2.2.1	Modelo de dano triangular.....	83
3.2.2.2	Determinação das propriedades coesivas.....	84
3.2.2.2.1	Araldite® AV138.....	85
3.2.2.2.2	Araldite® 2015.....	85
3.2.2.2.3	Sikaforce® 7752.....	86
3.2.3	Modos de rotura numéricos.....	87
3.2.3.1	Araldite® AV138.....	88
3.2.3.2	Araldite® 2015.....	89
3.2.3.3	Sikaforce® 7752.....	90
3.2.4	Análise de tensões na junta.....	91
3.2.4.1	Tensões de arrancamento.....	91

---

3.2.4.2	Tensões de corte.....	93
3.2.5	Estudo da variável do dano .....	95
3.2.6	Previsão da resistência .....	100
3.2.7	Comparação com juntas em degrau com aderentes de alumínio.....	104
3.2.8	Comparação com juntas de sobreposição simples e dupla.....	107
4	CONCLUSÕES.....	113
5	REFERÊNCIAS.....	117



# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

Hoje em dia a técnica de ligação com recurso a adesivos estruturais tem um lugar de destaque em vários setores de indústria, tais como automóvel, aeroespacial, eletrónica, entre outros. Contudo, este processo começou por ser utilizado na indústria aeronáutica, em que eram usados adesivos naturais para fazer as ligações. O seu potencial e a descoberta das suas principais vantagens permitiram que se alastrasse para outras indústrias.

As juntas adesivas apresentam enumeras vantagens quando comparadas com os métodos de ligação tradicionais como rebiteagem, ligações aparafusadas e soldadura. A melhor e mais uniforme distribuição de tensões, a baixa adição de peso à estrutura e a possibilidade de ligar materiais dissimilares são algumas das vantagens associadas a este processo. O uso de adesivos permite também a obtenção de peças de geometria complexa, que dificilmente era possível por outra forma de ligação.

Contudo, esta técnica também apresenta desvantagens, uma vez que na maioria dos casos é tipicamente impraticável desmontar a estrutura como acontece nas ligações aparafusadas. A resistência da junta depende do tipo de solicitação a que esta sujeita, dado que é sensível às tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ), e das características mecânicas dos materiais utilizados. Existem outros fatores que afetam a resistência das juntas, tais como a preparação superficial dos substratos e as condições de temperatura e humidades a que estão sujeitas. As juntas adesivas podem ser fabricadas com várias configurações, em que as principais são as juntas de sobreposição simples (JSS), juntas de sobreposição dupla (JSD) e juntas com chanfros interiores e exteriores. Os diferentes tipos de geometrias devem ser considerados em projeto, de forma a selecionar a que evita forças de arrancamento e tensões localizadas.

O crescimento e a importância do papel desempenhado das ligações adesivas nos variados setores de indústria levaram à necessidade de desenvolver ferramentas que permitissem o projeto e dimensionamento assim como a previsão do seu comportamento e desempenho. A utilização de método de elementos finitos (EF) em conjunto com os modelos de dano são, hoje em dia, uma ferramenta fundamental para esse efeito. Os modelos de dano coesivo (MDC) assumem grande importância, por combinarem parâmetros de resistência e tenacidade dos adesivos para previsão do desempenho da ligação.

## 1.2 Objetivos

A presente dissertação, realizada no âmbito da unidade curricular DPEST, consiste na realização do estudo numérico de juntas adesivas em degrau (*stepped-lap joint*) fabricadas com aderentes em polímero reforçado a fibra de carbono (PRFC), solicitadas à tração, com o objetivo de analisar o seu desempenho. Para isso foram estudados vários comprimentos de sobreposição ( $L_0$ ) para três tipos de adesivos: Araldite® AV138, Araldite®2015 e Sikaforce®7752.

Para o trabalho numérico foi feita uma análise pelo método de EF com o recurso ao *software* Abaqus®. O estudo numérico consistiu na determinação da distribuição das tensões  $\sigma_y$  e das tensões de corte ( $\tau_{xy}$ ) ao longo da camada adesiva. Através dos MDC foi possível determinar a variável de dano SDEG (*stiffness degradation*), que permite mostrar a degradação do adesivo desde o início do ensaio até à ocorrência da rotura do modelo. Através dos ensaios realizados no *software* Abaqus® foram também obtidas as curvas  $P-\delta$  para cada adesivo e respetivos valores de  $L_0$ . Por último, é comparada a resistências de juntas em degrau com aderentes em PRFC com juntas em degrau com aderentes de alumínio, JSS e JSD.

## 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação está subdividida em 4 capítulos:

No 1º capítulo é feita uma introdução e contextualização ao tema abordado, são enunciados os objetivos propostos e é descrita de forma sucinta a organização da presente dissertação.

De seguida, no capítulo 2 está apresentada a revisão bibliográfica do tema abordado, que consiste num prefácio relativo às ligações adesivas. Este capítulo encontra-se dividido em vários subcapítulos para facilitar a interpretação do trabalho desenvolvido. Na caracterização das juntas adesivas são apresentadas as suas principais características e propriedades, e são dadas a conhecer algumas das mais importantes aplicações das juntas adesivas. No mesmo subcapítulo são analisados e explicados os esforços e os modos de rotura a que uma junta pode estar sujeita, assim como as principais configurações de juntas existentes. No subcapítulo seguinte são apresentadas as técnicas mais relevantes atualmente disponíveis na previsão da resistência das juntas adesivas. Por fim, são enumeradas algumas alterações possíveis de juntas adesivas para aumentar a sua resistência, referidas algumas especificidades de juntas em material compósito e dados exemplos de trabalhos publicados na área.

O capítulo 3 é dedicado ao desenvolvimento do trabalho experimental e numérico realizado. Relativamente à parte experimental, são enunciados os materiais utilizados e as suas propriedades, para além do processo de fabrico, geometria e especificidades dos

testes realizados das juntas, seguindo-se da respetiva análise dos resultados obtidos. Depois de referir as condições da realização do trabalho experimental, são apresentadas e analisadas as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) obtidas. A segunda metade deste capítulo diz respeito ao trabalho numérico desenvolvido com recurso ao *software* Abaqus®. Este subcapítulo inicia-se com a explicação das condições da análise numérica e do MDC utilizado. Seguidamente, é dado a conhecer o estudo realizado da variável de dano SDEG, assim como os modos de rotura numérico e a previsão de resistência das juntas, para cada  $L_0$ . Para concluir o capítulo é feita uma comparação entre os valores obtidos numericamente de juntas em degrau com aderentes em PRFV e os valores registados experimentalmente para juntas em degrau com aderentes de alumínio, JSS e JSD.

No 4º capítulo são dadas as conclusões retiradas a partir do estudo desenvolvido assim como são propostos possíveis trabalhos futuros.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas
- 2.3 Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência
- 2.4 Modelação de juntas em material compósito



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

As evidências arqueológicas sugerem que a espécie humana usa adesivos há milhares de anos, pelo que é impossível definir com exatidão uma data e um local para o início da sua utilização. A descoberta dos adesivos e suas utilidades não foi instantânea, mas sim um processo lento e gradual, começando pela aplicação de produtos rudimentares constituídos por substâncias de natureza aglutinante [1].

Segundo factos históricos, a indústria aeronáutica foi uma das principais responsáveis pelo desenvolvimento dos adesivos, por exemplo, no início do século XX eram usados adesivos baseados em caseína, um material polimérico natural, na construção de aeronaves. O uso de adesivos naturais permitia a ligação de praticamente todos os materiais. Contudo, estes aderentes eram frágeis e apresentavam pouca durabilidade, principalmente em ambientes húmidos. Porém, durante os anos 40 e 50 decorreram avanços importantes para a resolução dessas contrariedades, levando ao aparecimento dos primeiros adesivos à base de polímeros sintéticos como o caso dos epóxidos, fenólicos, acrílicos e uretanos. Hoje em dia a maior parte dos adesivos naturais foram substituídos por completo por adesivos preparados sinteticamente [2].

Com a introdução de adesivos à base de polímeros sintéticos, houve uma evolução significativa deste método de ligação. Desta forma, é importante classificar os adesivos em estruturais ou não estruturais, tendo em conta a sua resistência. Considera-se um adesivo estrutural, quando resiste a forças de separação substanciais (6,9 MPa ao corte) conferindo rigidez e resistência à estrutura [3]. Por outro lado, um adesivo não estrutural não cumpre este requisito e é utilizado em aplicações de menor responsabilidade. Este tipo de adesivo pode ser encontrado sob várias formas, como por exemplo colas de contacto, fitas adesivas e borrachas sintéticas.

Atualmente, a técnica de ligação com recurso a adesivos estruturais tem um lugar de destaque nos métodos de produção devido ao seu potencial, dado que permite facilmente a implementação em sequências industriais tanto de produção em massa como de baixa produção, e oferece grande flexibilidade de projeto. Estas e outras vantagens associadas ao uso desta tecnologia proporcionaram a sua aplicação não só em setores de alta tecnologia como a indústria aeronáutica e automóvel, mas também em indústrias mais tradicionais como, por exemplo, a indústria de calçado [4].

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Designam-se juntas adesivas (Figura 1), a ligação de dois aderentes de materiais similares e/ou dissimilares por um processo de contacto. Com esse fim, é utilizado um adesivo que adere às superfícies dos materiais a ligar, onde se estabelece um vínculo físico-mecânico que permite a transferência de forças entre ambos [5].

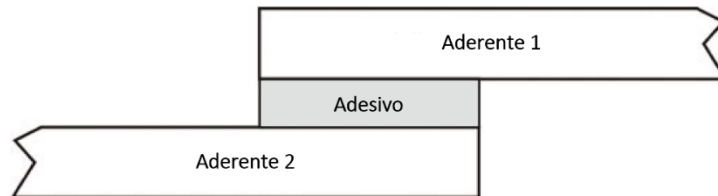


Figura 1 – Junta adesiva [4]

A norma DIN EN 923 [6] define um adesivo como uma substância não metálica capaz de unir dois substratos, de materiais similares ou dissimilares, por um processo de adesão em que a associação estabelecida entre os elementos supõe a existência de resistência interna (i.e., coesão).

Para a caracterização de juntas adesivas é necessário fazer a distinção entre os conceitos de adesão e coesão. A adesão é a atração entre duas substâncias resultantes das forças intermoleculares que se estabelece entre elas. Por outras palavras, é a responsável por manter dois materiais juntos nas suas superfícies. A coesão está associada às forças intermoleculares que se verificam dentro de uma substância [7]. Como mostra a Figura 2, numa junta adesiva a adesão encarrega-se de manter os substratos unidos ao adesivo e a coesão de manter a integridade do adesivo.

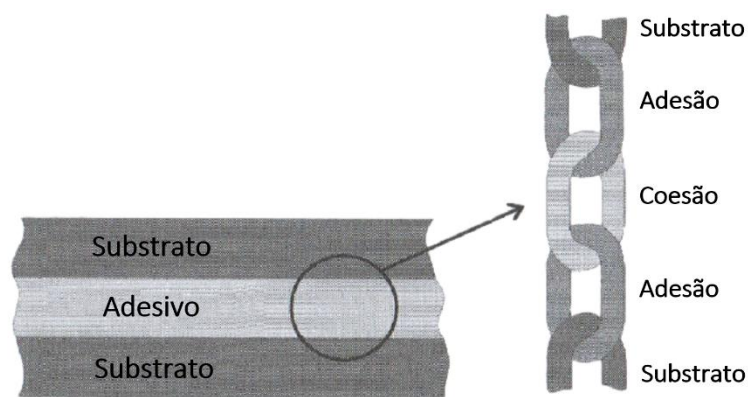


Figura 2 – Representação dos conceitos de adesão e coesão num junta adesiva [2]

Posteriormente à ligação é possível distinguir duas regiões: a interfase e a interface (Figura 3). A interfase é constituída por uma fina região na zona de contacto entre o adesivo e o aderente, e tem propriedades químicas e físicas diferentes da parte maciça

do aderente e do adesivo. A interface, ou camada limite, é definida pelo plano de contato entre as superfícies dos dois materiais, adesivo e aderente [2].

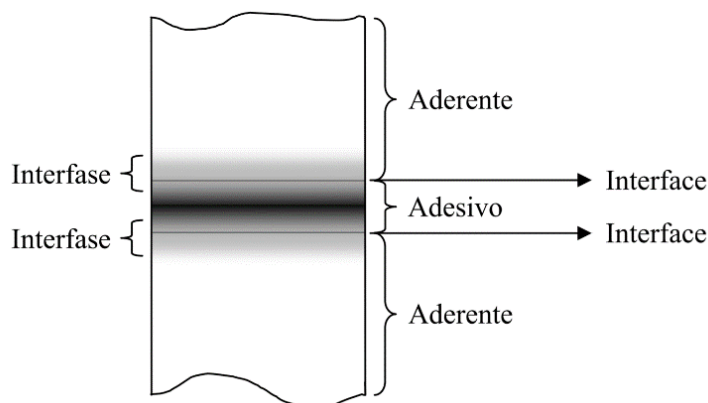


Figura 3 – Representação das interfaces e interfases de uma junta adesiva [8]

Para assegurar a integridade da junta adesiva, a produção deve ter em consideração as características específicas dos materiais utilizados, assim como as etapas seguintes [2]:

- Seleção adequada do adesivo:
  - ↳ Tendo em conta a resistência mecânica, temperatura de serviço, o meio ambiente e o método de aplicação;
- Projeto da junta:
  - ↳ De modo a garantir que o nível tensão no adesivo não ultrapassa a sua resistência;
- Preparação da superfície:
  - ↳ Para garantir uma boa adesão;
- Fabrico da junta:
  - ↳ Assegurar condições de temperatura e pressão ideal para a cura do adesivo;
- Controlo de qualidade da junta:
  - ↳ Através de ensaios destrutivos e não destrutivos.

Ao longo do tempo as juntas adesivas têm substituído os métodos tradicionais de ligação, como por exemplo, ligações aparafusadas, rebitadas ou soldadas. Contrariamente ao que acontece nestes métodos mencionados, numa ligação adesiva existem poucos casos em que há necessidade de maquinagem e a carga térmica a que a junta está sujeita é reduzida ou quase nula, não introduzindo, geralmente, tensões internas. Outra, e uma das principais vantagens da utilização de adesivos, é a distribuição uniforme das cargas e tensões sobre a área total da junta, ao invés de concentrá-las em alguns pontos, como é o caso das ligações rebitadas, o que permite aumentar a capacidade de transmissão de carga e rigidez da ligação (Figura 4) [4].

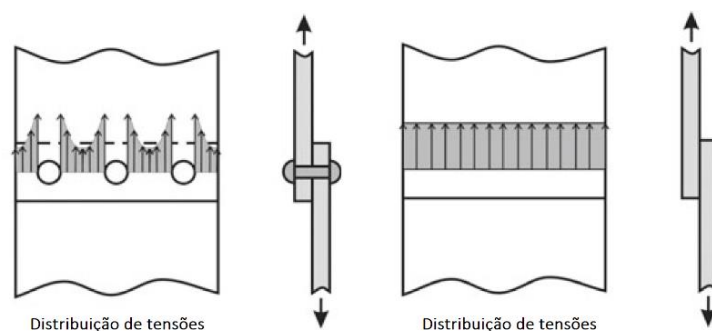


Figura 4 - Comparação da distribuição das tensões em juntas rebitadas e adesivas [4]

Na Tabela 1 são apresentadas algumas das principais características das juntas adesivas.

Tabela 1 – Caracterização de juntas adesivas (adaptado de [7])

Juntas adesivas	
Tipo de ligação	Ligação tipicamente permanente
Distribuição de tensões	Distribuição uniforme ao longo da largura da junta
Aparência	Boa aparência, quase invisível sem contornos
Ligações dos materiais	Permite ligação entre diferentes materiais
Resistência a temperatura	Fraca resistência a elevadas temperaturas
Resistência mecânica	Boa resistência à corrosão e à fadiga
Preparação de fabrico	Necessidade de limpeza/tratamento dos aderentes exigente
Pós-processamento	Não é necessário na maioria das vezes
Equipamento	Dispensadores multi-componentes têm um custo elevado Necessidade de <i>gabarit</i> , dado o processo de cura não ser instantâneo.
Meio envolvente	Elevada sensibilidade a solventes
Tempo de produção	Variável Entre alguns segundos a várias horas
Propriedades dinâmicas	Amortecimento de vibrações e absorção de choque
Aplicabilidade	Aplicação quase universal

### 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

As ligações adesivas estão em permanente desenvolvimento, e com o decorrer dos anos, a sua utilização tem tido um forte crescimento. Atualmente, os adesivos desempenham um papel fundamental em vários setores da indústria, nomeadamente:

- Indústria aeroespacial

Na indústria aeroespacial o peso assume um papel preponderante, dado que o combustível necessário para o lançamento de um satélite varia proporcionalmente com a sua massa. Portanto, cada grama retirada ao peso da estrutura resulta numa diminuição do consumo, o que leva a um custo de operação menor. Por estes motivos, são usados compósitos reforçados com fibras de carbono de alta resistência para a construção da maior parte das estruturas, devido a sua boa relação rigidez/densidade quando comparado com alumínio ou titânio. Na Figura 5 mostra o tubo central de um satélite fabricado em compósito, em que apresenta um peso reduzido comparativamente a satélites construídos com outros materiais. Com a utilização de materiais compósitos a ligação por adesivos tornou-se uma tecnologia obrigatória neste tipo de indústria, já que o aparafusamento e a rebitagem são associados a concentrações de tensões junto das ligações, e também são desaconselhadas em laminados devido à possibilidade de delaminação [4].

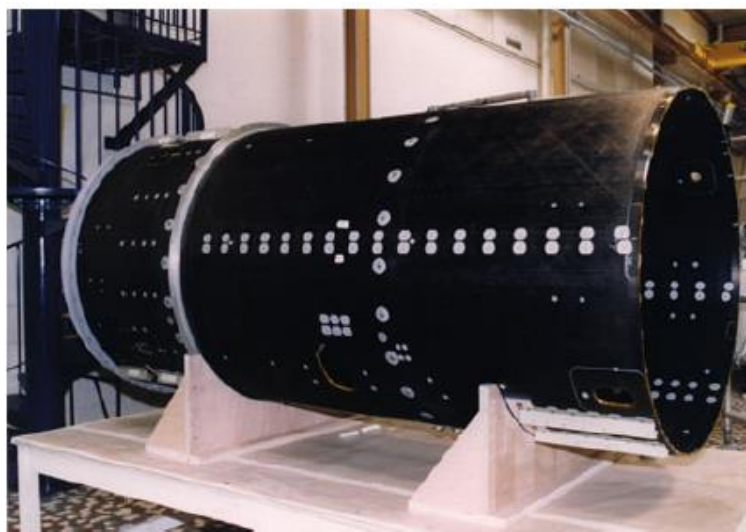


Figura 5 – Aplicação de ligações adesivas na construção de um satélite (1,2 m de diâmetro/4 m de altura/70 kg de peso) [4]

- Indústria aeronáutica

Os adesivos são utilizados há muito tempo na construção de aviões (Figura 6), dado que permitem a produção de estruturas mais leves e a obtenção de superfícies lisas, aumentando a aerodinâmica e mantendo a resistência comparativamente às fixações mecânicas.

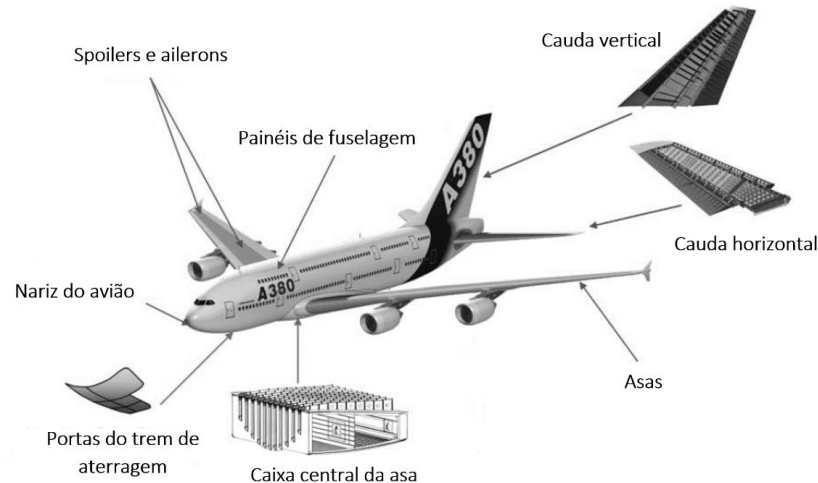


Figura 6 – Aplicação de ligações adesivas na construção de um avião comercial [9]

Também os painéis de fuselagem dos reatores (Figura 7) são fixos com o recurso a adesivos mas, neste caso, as elevadas temperaturas condicionam o dimensionamento da junta e a escolha do adesivo.

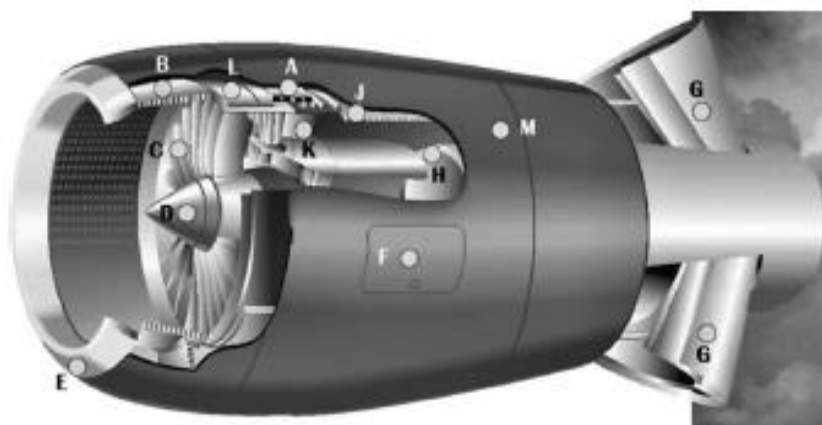


Figura 7 – Aplicação de ligações adesivas nos painéis de fuselagem do reator [9]

- **Indústria automóvel**

A redução do peso das estruturas é um passo importante para a otimização do desempenho na indústria automóvel. Esse fator conduziu à necessidade de substituir o uso de aço na construção de chassis por materiais mais leves como ligas de alumínio, magnésio, plásticos e materiais compósitos. A introdução de juntas adesivas permitiu a ligação desses materiais, o que não seria possível pelos métodos de ligação tradicionais. Para além da ligação dos materiais usados na estrutura, a indústria automóvel também usa os adesivos para colocação de para-brisas, revestimentos acústicos e insonorização interior com aplicação de painéis isolantes (Figura 8) [10].

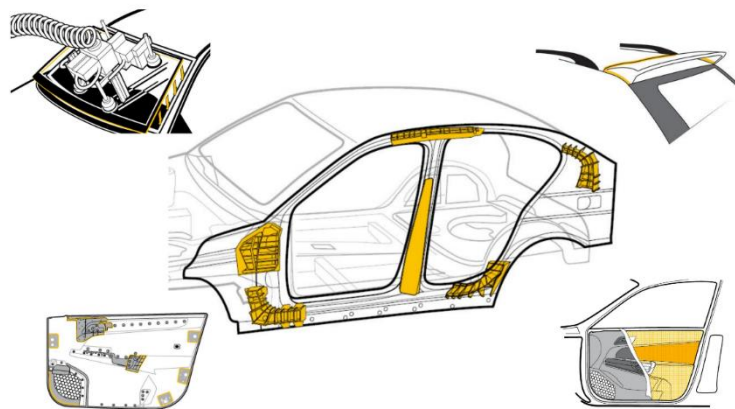


Figura 8 – Aplicação de adesivo na construção de automóveis (adaptado de [10])

- Indústria eletrônica

No caso da indústria eletrônica, os adesivos condutores anisotrópicos têm substituído as fixações convencionais de microcircuitos em plástico e cerâmica, tornando esta tecnologia cada vez mais indispensável na produção de circuitos integrados [1]. Atualmente, as estruturas dos módulos *multichip* híbridas (Figura 9) são produzidas por meio de adesivos isolantes e resistentes ao calor, utilizados para ligar a estrutura do *chip* ao substrato de silício [9].

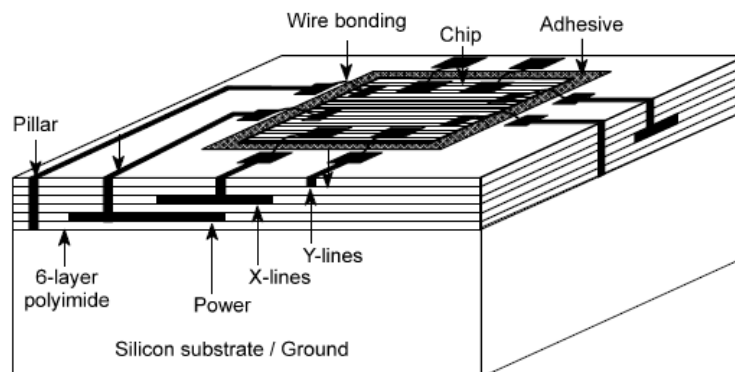


Figura 9 – Esquema de um microchip produzido com recurso a adesivos [9]

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

Uma ligação adesiva estrutural pode estar sujeita a vários tipos de esforços, tais como:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem (*cleavage*);
- Arrancamento (*peel*).

### Esforço de tração

Este carregamento consiste na aplicação de forças perpendiculares ao plano de colagem, promovendo a separação dos aderentes. Neste caso, a distribuição das tensões normais instaladas ao longo do adesivo não é uniforme, visto que surgem picos de tensões provocados por clivagem ou arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição (Figura 10). Estes dois fenómenos ocorrem porque, na prática, há muita dificuldade em controlar a espessura do adesivo e de garantir que as cargas sejam rigorosamente axiais [7, 11].

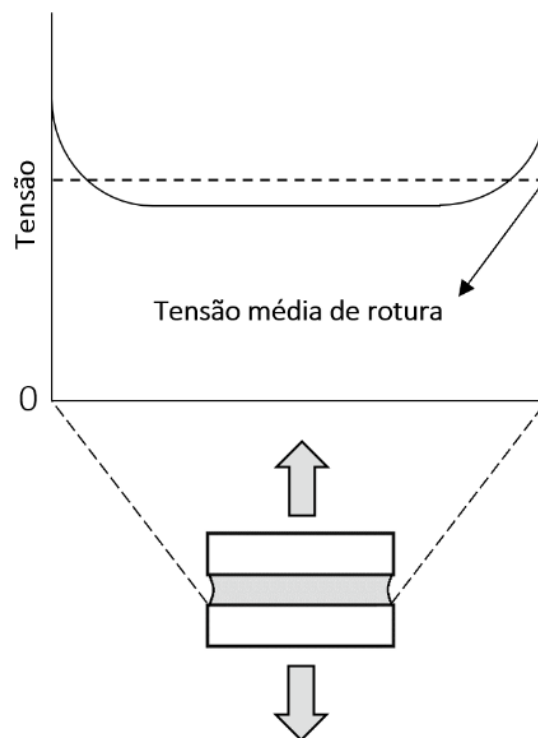


Figura 10 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de tração (adaptado de [7])

### Esforço de compressão

Similarmente ao que acontece no esforço de tração, também no de compressão a carga deve manter-se perpendicular à superfície de ligação, de forma a que o adesivo permaneça em compressão pura. O que difere entre os dois tipos de carregamentos são as direções opostas das forças atuantes (Figura 11). Nestas condições de compressão é altamente improvável que um adesivo rompa, expeto em casos que exista uma distribuição de tensões desiguais podendo originar alguns pontos de rotura preferencial. Na verdade, uma junta em compressão pura praticamente não necessita de adesivo [7, 11].

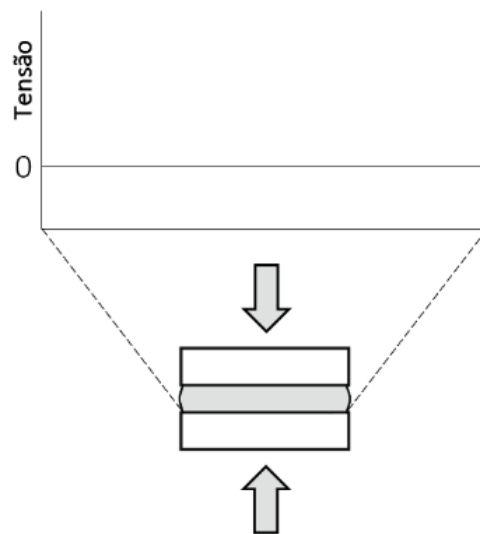


Figura 11 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de compressão (adaptado de [7])

### Esforço de corte

Neste caso, as forças são aplicadas no plano de colagem promovendo o escorregamento entre os dois aderentes. Geralmente, as juntas são mais resistentes quando solicitada ao corte [7]. É de notar que as extremidades da junta estão sujeitas a tensões elevadas comparativamente com a secção central (Figura 12), que pouco contribui para a resistência da junta adesiva.

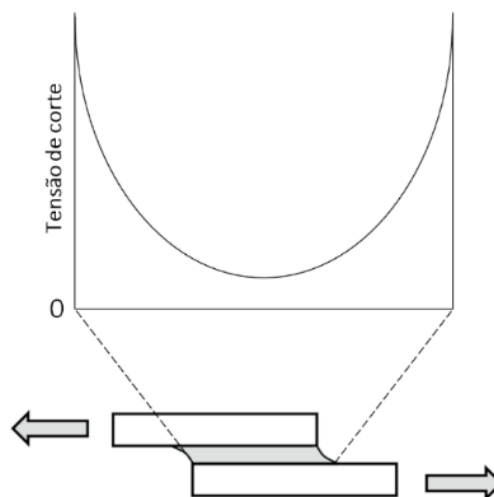


Figura 12 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de corte (adaptado de [7])

Esta distribuição é característica das tensões  $\tau_{xy}$  e deve-se a fenómenos relacionados com a variação da deformação axial dos aderentes ao longo de  $L_0$ . Assim, dois aderentes em sobreposição, com comportamentos opostos no que respeita à deformação, originam picos de tensões  $\tau_{xy}$  em ambas as extremidades de sobreposição.[12].

O aumento da largura de sobreposição tem uma maior importância na resistência da junta que o seu comprimento, visto que proporciona um acréscimo da área de colagem nas extremidades onde as concentrações de tensões são maiores. Na verdade, também o  $L_0$  contribui para um aumento da resistência da junta, mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado da deformação diferencial dos aderentes com o aumento deste parâmetro (Figura 13) [11].

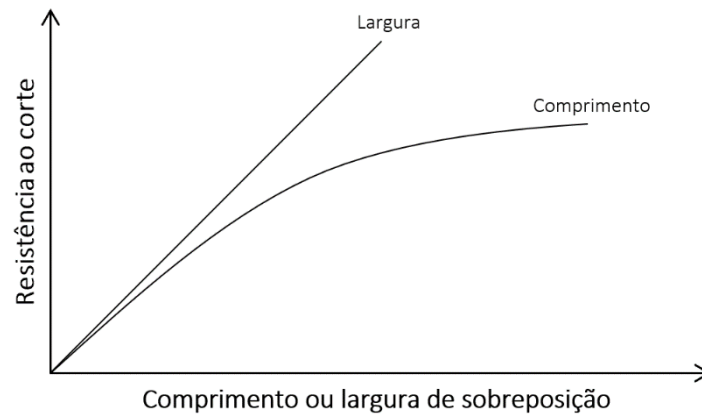


Figura 13 – Comparação da resistência ao corte com o aumento de comprimento vs. largura [11]

### Esforço de clivagem – *cleavage*

As tensões de clivagem são originadas por forças de tração na extremidade de uma junta rígida, com o intuito de separar os substratos. Desta forma, gera-se uma forte concentração de tensões na extremidade da junta, que fica sob o efeito de forças de clivagem (Figura 14). Por outro lado, a extremidade oposta pouco contribui para a resistência da junta [11].

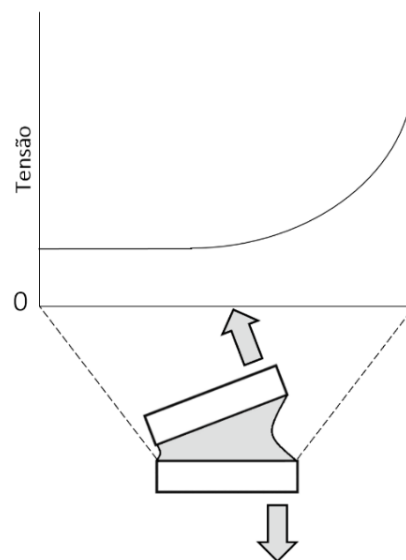


Figura 14 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de clivagem (adaptado de [11])

### Esforço de arrancamento – *peel*

À semelhança dos esforços de clivagem, também os esforços de arrancamento são provocados por forças de tração na extremidade da ligação. Contudo, apenas se desenvolvem tensões  $\sigma_y$  em casos onde um ou ambos os substratos são flexíveis. Esta propriedade permite a sua deformação plástica por ação das forças empregues. Como mostra Figura 15, isto leva a uma maior concentração de tensões numa zona mais localizada da extremidade submetida a cargas [11].

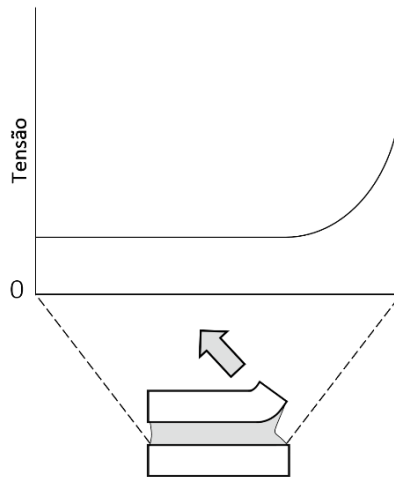


Figura 15 – Carregamento e distribuição de tensões em esforço de arrancamento (adaptado de [11])

Neste tipo de carregamento é benéfica a utilização de adesivos mais dúcteis e flexíveis, pois permitem uma distribuição de tensões menos concentrada. Em contrapartida, os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento e tornam a junta adesiva menos resistente [4].

Os esforços de clivagem e arrancamento são os principais inimigos das juntas adesivas. Portanto, estes devem ser evitados sempre que possível e dar prioridade a configurações que suportem maioritariamente esforços de corte.

As juntas adesivas, quando são submetidas aos esforços anteriormente referidos, podem chegar à rotura. Para um melhor estudo e análise das juntas, a norma ASTM D 5573 – 99 [13] prevê vários modos de rotura. Os que se aplicam às juntas adesivas são:

- Rotura coesiva:
  - ↳ Ocorre no interior do adesivo;
- Rotura adesiva:
  - ↳ Ocorre na interface entre o aderente e o adesivo;
- Rotura do substrato,
  - ↳ Ocorre num dos aderente devido a esforços de tração;
- Rotura mista.
  - ↳ Existência de zonas de rotura coesiva e outras de rotura adesiva na zona de ligação.

Estes modos de rotura dependem não só do tipo de carregamento, mas também da qualidade e geometria da junta. A sua identificação é preponderante na caracterização das propriedades do adesivo e, conseqüentemente, da junta adesiva em causa.

- **Rotura coesiva**

A rotura coesiva ocorre no interior do adesivo devido às forças de ligação entre o adesivo e o substrato serem superiores à resistência interna do próprio adesivo. Este tipo de rotura é identificável pela total cobertura de adesivo em ambas as superfícies de sobreposição (Figura 16).

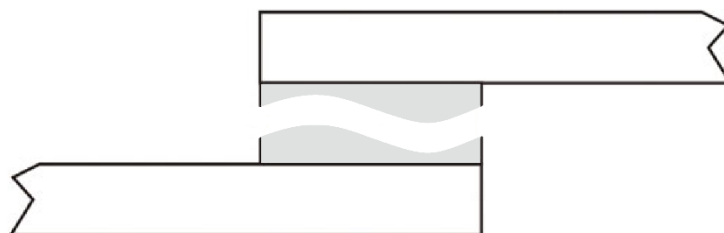


Figura 16 – Esquema representativo da rotura coesiva (adaptado de[4])

A ocorrência deste modo revela uma boa preparação das superfícies, assim como o máximo proveito da resistência do adesivo [4, 14].

- **Rotura adesiva**

Neste caso a rotura dá-se na interface entre um dos aderentes e o adesivo. Numa análise após a rotura da junta pode verificar-se que a superfície de um dos aderentes está coberta de adesivo, enquanto o aderente oposto não apresenta quaisquer vestígios de adesivo (Figura 17). Este cenário é causado pela falha de adesão entre o adesivo e a superfície do aderente, e pode dever-se a uma má preparação das superfícies da junta.

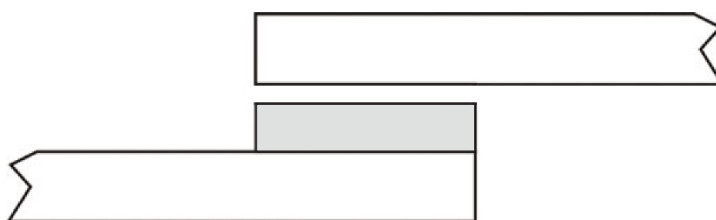


Figura 17 – Esquema representativo da rotura adesiva [4]

É de referir que muitas roturas consideradas adesivas são, na verdade, roturas coesivas. Numa observação mais profunda da superfície do substrato revela-se, por vezes, a presença de uma fina película de adesivo [4, 14].

- **Rotura mista**

Esta rotura traduz-se na combinação da rotura adesiva e coesiva (Figura 18). Os motivos principais que podem levar uma junta à rotura mista são a não uniformização da limpeza dos substratos ou uma deficiente preparação do adesivo e fabrico da junta [2].

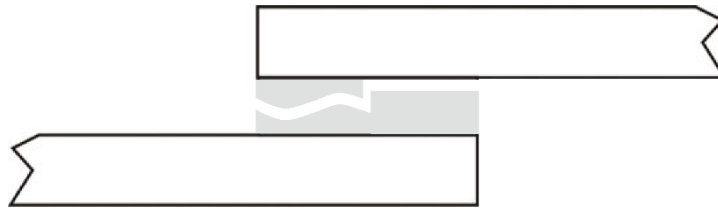


Figura 18 – Esquema representativo da rotura mista (adaptado de [4])

- **Rotura do substrato**

Consiste na quebra do aderente (Figura 19) por ação das tensões de tração impostas e, tal como a rotura coesiva no adesivo, também este é um modo de rotura preferencial, dado que se utiliza na totalidade a resistência do adesivo aplicado na junta [2, 4].



Figura 19 – Esquema representativo da rotura do substrato [4]

#### 2.1.4 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem ser fabricadas com várias configurações dependendo, por exemplo, do tipo de esforços e da carga a que a junta vai estar sujeita. Os tipos de juntas mais comuns são os seguintes:

→ Juntas de sobreposição simples (JSS)

Esta é a configuração mais fácil e simples de fabricar e, por isso, uma das mais usadas em aplicações industriais de baixa responsabilidade. Contudo, é difícil centrar a aplicação da carga, provocando a flexão levando ao aparecimento de tensões de tração nas extremidades (esforços de clivagem e de arrancamento), o que reduz a resistência da junta [7].

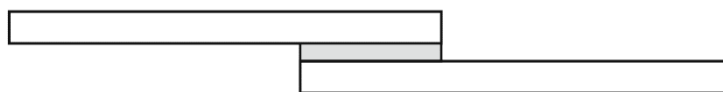


Figura 20 – Esquema representativo de uma JSS[4]

→ Juntas de sobreposição dupla

Com o objetivo de reduzir as tensões  $\sigma_y$ , foram desenvolvidas JSD, que diminuem o efeito da flexão e, conseqüentemente, aumentam a resistência da ligação comparativamente às JSS. A produção mais morosa representa uma das desvantagens do uso de JSD.



Figura 21 – Esquema representativo de uma junta de JSD [4]

#### → Juntas topo a topo

As juntas topo a topo apresentam uma eficácia reduzida devido a concentrações de tensões  $\sigma_y$  na extremidade e/ou de clivagem em caso de flexão. Por estes motivos, também não é a configuração de junta ideal para a determinação de propriedades de adesivos através do ensaio de tração [4, 7].



Figura 22 – Esquema representativo de uma junta topo a topo [4]

#### → Juntas em degrau

A utilização das juntas em degrau reduz significativamente os esforços de arrancamento, proporcionando uma maior resistência da junta. Todavia, esta configuração necessita de um tempo de fabrico elevado e caro, pois é necessário maquinar os degraus [4]. No caso do uso de substratos em compósitos, a maquinagem pode danificar as fibras. Como alternativa os degraus podem ser fabricados durante o empilhamento antes da cura, evitando a maquinagem, mas dificultando o processo de fabrico [15].

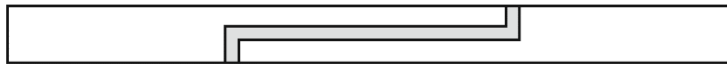


Figura 23 – Esquema representativo de uma junta em degrau [4]

#### → Juntas com chanfro interior e exterior

O uso de chanfros interiores (Figura 24) nas juntas adesivas permite diminuir os gradientes de esforços ao longo do adesivo. Já no caso da utilização de chanfros exteriores (Figura 25) reduzem-se os efeitos de arrancamento nas extremidades. No entanto, é difícil maquinar estes tipos de chanfros, o que se traduz num maior tempo de fabrico e, conseqüentemente, um custo mais elevado [4].

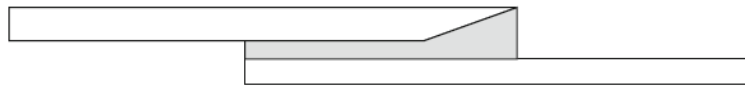


Figura 24 – Esquema representativo de uma junta com chanfro interior [4]

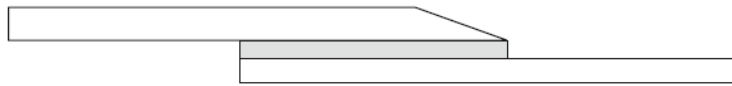


Figura 25 – Esquema representativo de uma junta com chanfro exterior [4]

#### → Cobre-junta

São juntas topo a topo com um reforço como ilustra a Figura 26. Esta configuração apresenta uma resistência superior às juntas topo a topo, mas está igualmente sujeita a esforços de arrancamento [7].

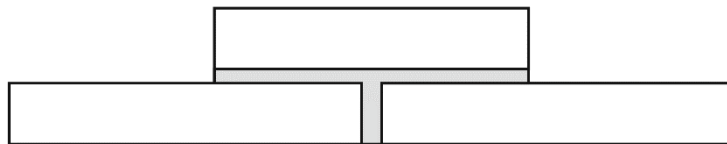


Figura 26 – Esquema representativo de uma cobre-junta [4]

#### → Cobre-junta dupla

São juntas similares às anteriores, com a adição de outro reforço do lado oposto (Figura 27). Este reforço duplo contribui para a diminuição do aparecimento da flexão mas, por outro lado, aumenta o tempo de fabrico [7].

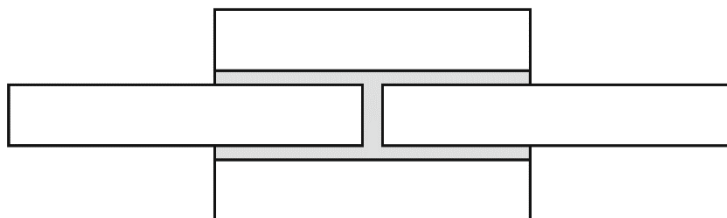


Figura 27 – Esquema representativo de uma cobre junta dupla [4]

A juntas tubulares são muito úteis para a ligação de tubos com tubos/veios, contudo a sua preparação e fabrico requer vários cuidados que dificultam bastante a sua aplicação. Para que haja união dos aderentes, pelo menos um deles deve ser chanfrado com um ângulo de 15 a 30°, devendo as partes aderentes ser unidas com movimentos circulares lentos. Existem algumas soluções para assegurar que o adesivo preenche toda a cavidade da ligação, como por exemplo, o uso de orifícios para injeção de adesivo e abertura de canais para facilitar a saída de ar.

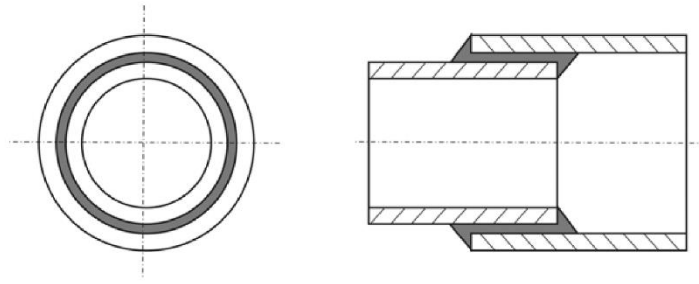


Figura 28 – Esquema representativo de uma junta tubular [4]

#### → Juntas com ressalto

A dificuldade de centrar a aplicação da carga em JSS conduziu ao fabrico de juntas de ressalto, uma solução simples e eficaz para garantir o alinhamento das forças. O fabrico deste tipo de juntas torna-se um processo árduo caso sejam usados materiais frágeis ou de alta resistência [7].

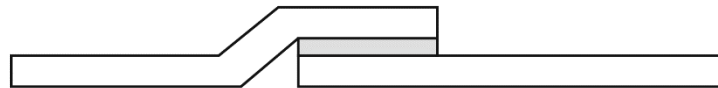


Figura 29 – Esquema representativo de uma junta com ressalto [4]

## 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

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

Os estudos que permitiram um avanço no estudo das juntas adesivas remontam à década de 30 com o modelo analítico de Volkersen [16], que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. Em contrapartida, a formulação analítica torna-se mais complexa na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [17] é a técnica mais comumente utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [18], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Recorreu-se então à mecânica dos

meios contínuos para a previsão da resistência das juntas coladas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado.

O MEF também pode ser combinado com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Porém, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional [19]. Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fratura, através da utilização de elementos coesivos para promover a propagação de fendas.

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

### 2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos consiste numa técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação. A previsão é efetuada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Para o efeito, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, o que permite estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [16], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [12] usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de  $L_0$ . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [20]. No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [18], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

### 2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que as estruturas não são necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a  $180^\circ$ . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fratura permite avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, estes se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo [21]. Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith [22] através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projeto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fratura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final [23]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson [24] e por Rice [25] para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia,  $G_I$  ou  $G_{II}$ , e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura,  $G_c$  [26], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

### 2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com os estudos de Barenblatt [27] e Dugdale [28], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito de cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [29].

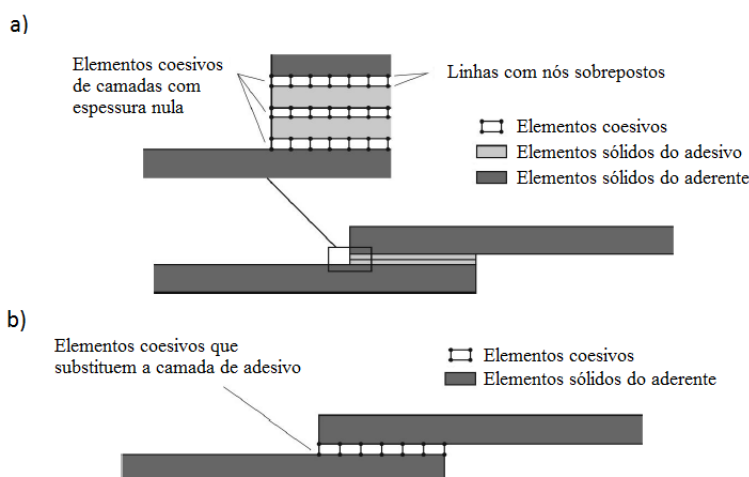


Figura 30 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de [30])

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fratura [31]. O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 30), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [32], ou podem ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [33].

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação de leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e consequentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais.

As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [34]. Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte [35].

Ao longo dos anos, foram estudados vários MDC, como o modelo linear parabólico [36], triangular [37], exponencial [38], polinomial [39] e trapezoidal [33]. Com base no comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [40].

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [41]. Trata-se de um modelo coesivo baseado em MEF de interface [42] de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 31).

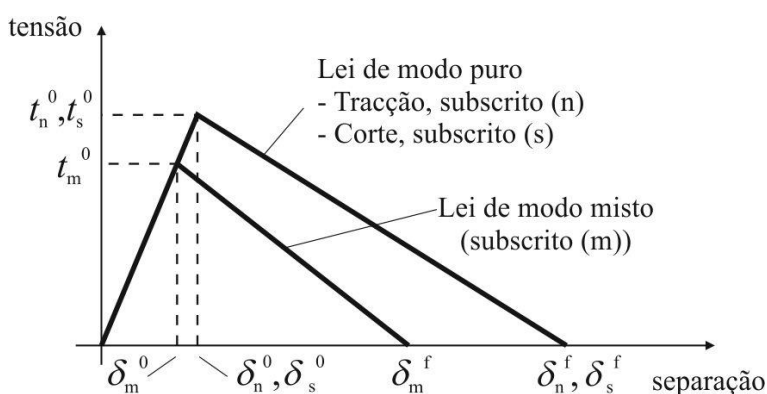


Figura 31 – Modelo coesivo triangular [42, 43]

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [44]. Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [45] e modo II [46].

#### 2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano apresentada neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços

transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze [47] para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. [48] para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fratura de uma fenda, com trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [29].

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [49]. Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas [50] ou do número de ciclos para análises de fadiga [51, 52]. Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajetos pré-definidos [53].

Hua et al. [54] propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fratura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. [55] usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de  $E$  e do coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) do material na respetiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

### 2.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  (deslocamentos de tração e corte correspondentes à carga máxima admitida ( $P_{máx}$ ), respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [56]. Belytschko e Black [57], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [58]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [59].

Campilho et al. [60] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de JSS e JSD, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparou resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 32). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

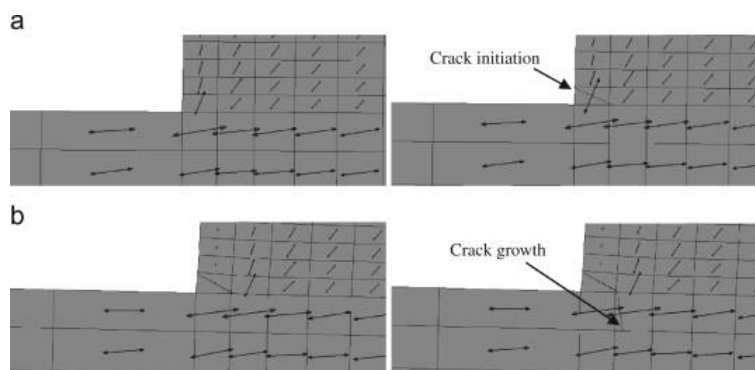


Figura 32 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [60]

### 2.3 Juntas adesivas com alterações para aumento de resistência

Para que seja retirado o máximo rendimento de uma junta adesiva submetida a um determinado esforço, é necessário que a sollicitação empregue seja na direção de maior resistência à rotura. Contudo, dependendo da geometria da junta pretendida nem sempre é possível a sua obtenção com essas características. De seguida, são apresentadas algumas alterações possíveis no fabrico de ligações adesivas, que visam o aumento da resistência e consequente desempenho das juntas concebidas.

#### 2.3.1 Filetes de adesivo

Esta alteração consiste na introdução de um filete de adesivo, conforme se observa na Figura 33. A presença deste excesso de adesivo aumenta a resistência da junta, uma vez que reduz os picos de tensões verificados na zona crítica das ligações adesivas, ou seja, nas extremidades de sobreposição.



Figura 33 – Esquema representativo de uma JSS com filete de adesivo

A transferência de carga e a distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  numa JSS com e sem filete está esquematicamente representada na Figura 34. Em JSS com filete a transferência de carga é feita sobre uma maior área, o que proporciona a sua transmissão mais suave e a redução significativa das tensões  $\tau_{xy}$  máximas [4].

Em 1987, Adams e Harris [61] testaram juntas de alumínio com e sem filete e observaram um aumento de aproximadamente 54% na resistência da junta com filete, e esta percentagem aumentou quando testadas juntas em material compósito.

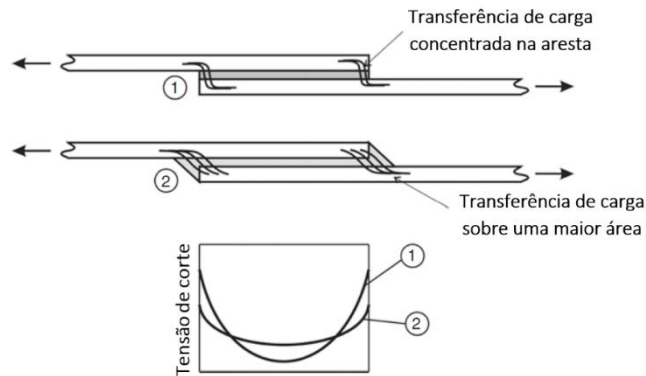


Figura 34 – Modo de transferência de carga e distribuição de tensões para JSS com e sem filete [4]

### 2.3.2 Chanfros interiores e exteriores

Relativamente aos chanfros interiores, Min You et al. [62] estudaram a influência da altura e do ângulo do chanfro nas extremidades dos aderentes (Figura 35), assim como a distribuição de tensões em JSS utilizando vários adesivos com diferentes módulos de elasticidade. Este estudo contou com uma análise numérica, em que se recorreu ao método de EF com elementos elasto-plásticos, e com ensaios experimentais.

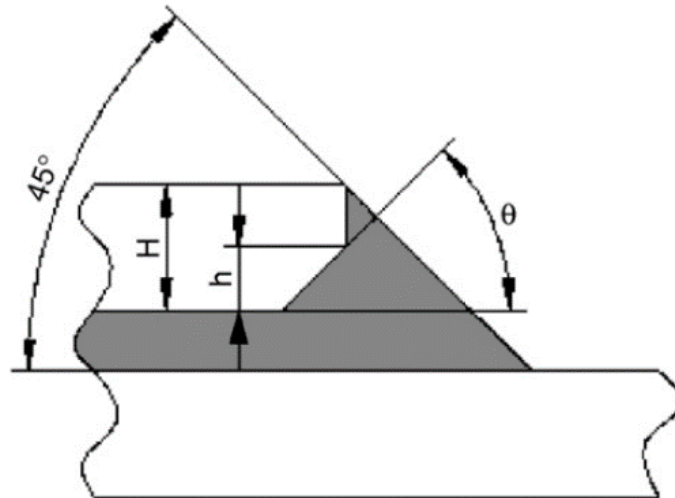


Figura 35 – Esboço do chanfro interior na extremidade do aderente [62]

Na Figura 36 pode-se observar que, devido à existência do chanfro, os picos das tensões na secção intermédia da sobreposição diminuem consideravelmente com a variação da altura e ângulo do chanfro.

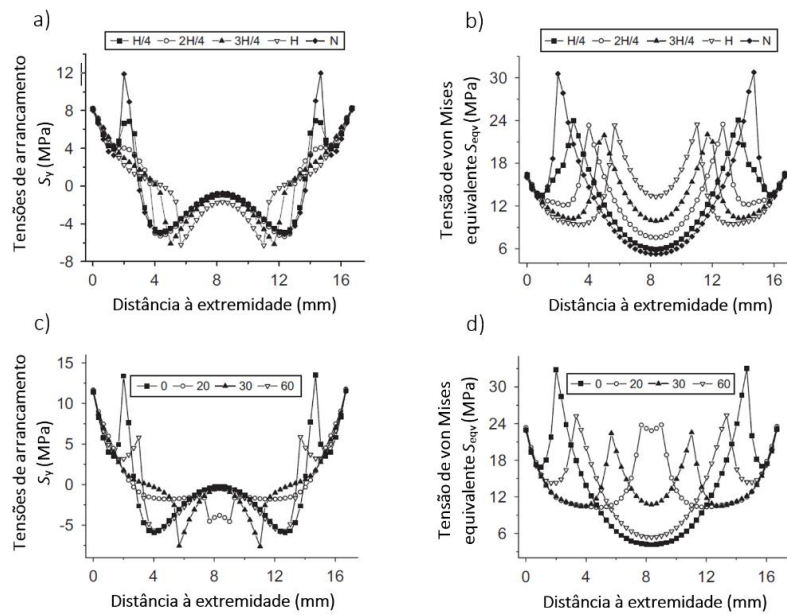


Figura 36 – Efeito da altura do chanfro na distribuição das tensões na junta (a) tensões  $\sigma_y$  (b) tensão de von Mises equivalente [62]

Por outro lado, os picos mais próximos da extremidade dos aderentes não apresentam uma diferença muito significativa, nem com o aumento da altura do chanfro nem com o aumento do ângulo. Apesar disso, numa análise mais profunda é de notar que as tensões  $\sigma_y$  diminuem gradualmente enquanto as tensões de von Mises equivalente aumentam depois de uma descida inicial.

Para todos os ângulos de chanfros que foram estudados, os valores mínimos das tensões de pico foram obtidos sob as condições de  $h=H$  e  $\theta=30^\circ$ , o que foi comprovado com os resultados experimentais apresentados na Figura 37, onde as maiores tensões  $\tau_{xy}$  foram registadas nessas mesmas condições.

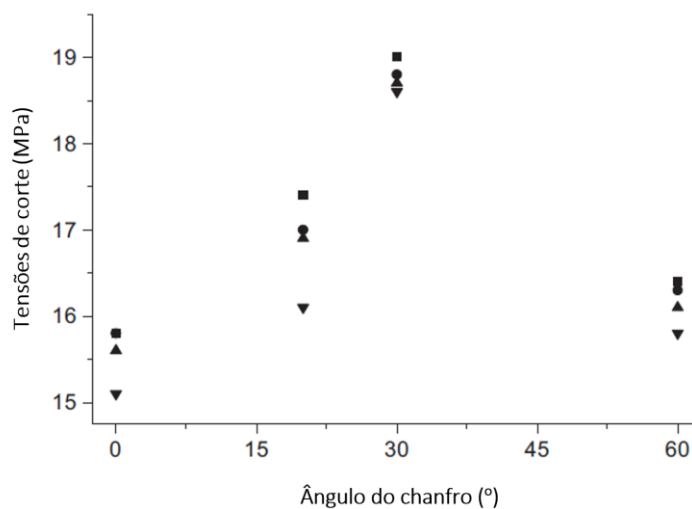


Figura 37 – Tensões  $\tau_{xy}$  obtidas experimentalmente com a variação do ângulo do chanfro [62]

Para averiguar a influência do módulo de elasticidade, estudaram-se juntas sob as mesmas condições, ou seja, com  $h=H$  e  $\theta=30^\circ$ . Na figura observa-se que o uso de um adesivo de baixo módulo de elasticidade resulta numa redução dos picos de tensões perto das extremidades dos filetes. Para além disso, também o pico da tensão  $\sigma_y$  registada foi menor na parte central da sobreposição. Contudo, o pico das tensões de von Mises equivalente aumentou significativamente.

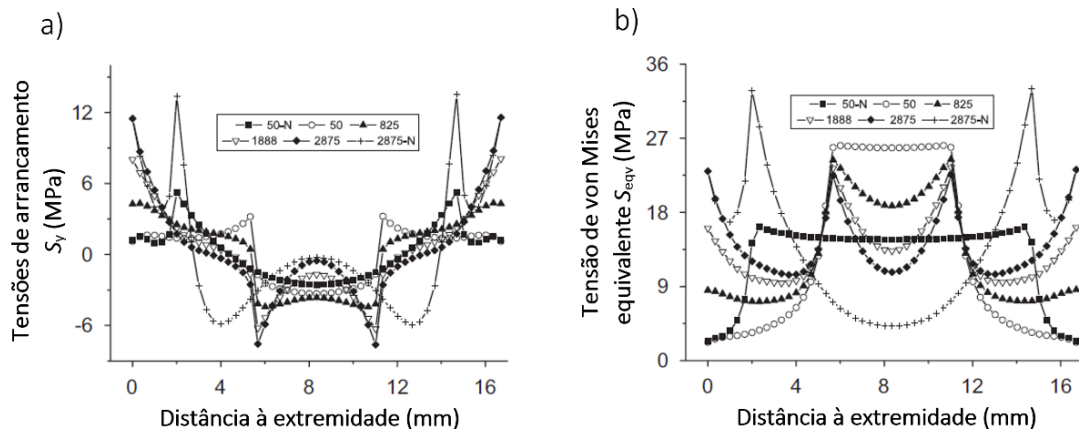


Figura 38 – Efeito do módulo de elasticidade em juntas adesivas com chanfro [62]

Em relação ao uso de um adesivo com alto módulo de elasticidade, a figura mostra que a existência de um chanfro causa uma diminuição do picos de tensões devido a sua transferência para o meio da zona de sobreposição. Este fenómeno resulta num aumento da resistência da junta adesiva.

Como anteriormente, também neste caso ao resultados da simulação numérica estavam de acordo com os resultados experimentais obtidos, presentes na Figura 39.

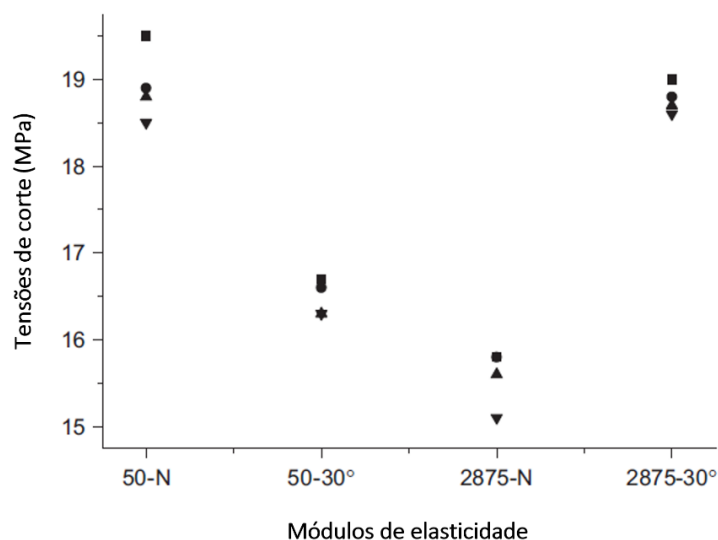


Figura 39 – Tensões  $\tau_{xy}$  obtidas experimentalmente com a variação do módulo de elasticidade [62]

Em relação aos chanfros exteriores P. Golewski et al. [63] realizaram um estudo numérico onde relacionaram a resistência e as tensões desenvolvidas numa JSS com o tamanho do chanfro. Para isso, foi criado um modelo de EF 3D e submetido a uma deformação uniaxial quase estática, ou seja, uma análise não linear com recurso ao Abaqus®.

Para avaliar a influência dos chanfros foram analisados os resultados obtidos através da variação do parâmetro  $C$  presente na Figura 40.

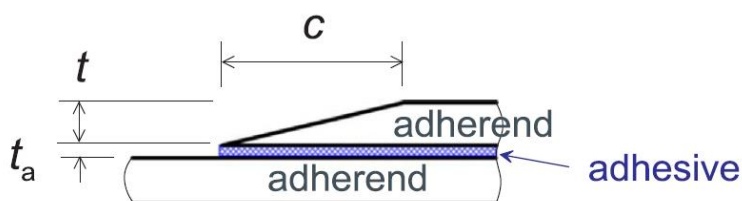


Figura 40 – Geometria do chanfro em estudo com os respetivos parâmetros [63]

Nos modelos utilizados para os testes o valor de  $C$  variou desde 1 mm até 10 mm, onde em cada modelo o incremento era de 1 mm. Os resultados do estudo são apresentados em relação a uma variável adimensional ( $ch=c/t$ ).

Como se pode observar na Figura 41 a), o uso de chanfro reduz significativamente a tensão normal ( $\sigma_{zz}$ ) instalada na junta (aproximadamente 3 vezes). Caso semelhante acontece com as tensões  $\tau_{yz}$ , em que o aumento do parâmetro  $ch$  contribui para uma redução de aproximadamente 39% (Figura 41 b)).

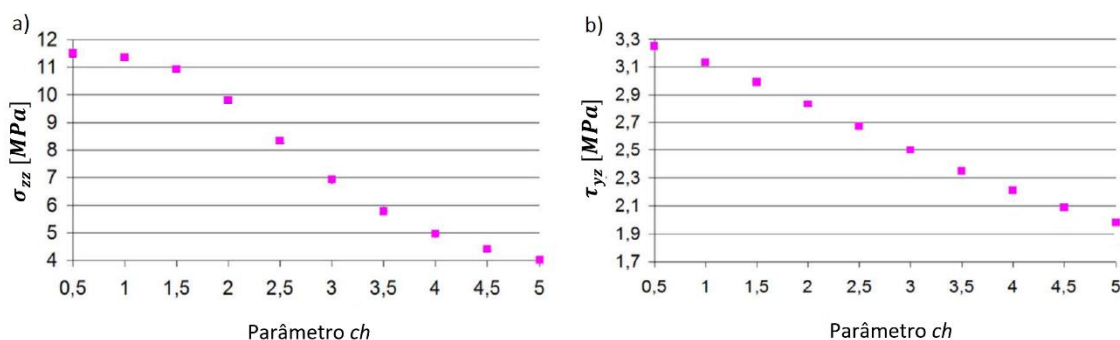


Figura 41 – Distribuição a) das tensões  $\sigma_{zz}$  b) das tensões  $\tau_{yz}$  numa junta com chanfros exteriores [63]

Relativamente à resistência da junta, a Figura 42 mostra que para valores de  $ch$  inferiores a 2, o uso de chanfros exteriores não tem qualquer impacto na sua capacidade de carga. Por outro lado, quando  $ch > 2$  a presença de chanfros nos aderentes resulta num aumento significativo da resistência da junta. Isto deve-se ao facto de as tensões  $\sigma_{zz}$  na camada de adesivo terem sofrido uma redução considerável.

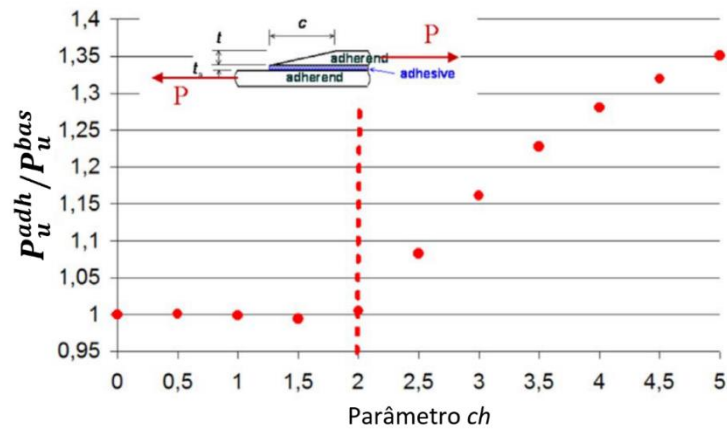


Figura 42 – Efeito do parâmetro  $ch$  na resistência de juntas com chanfros exteriores [63]

### 2.3.3 Utilização de dois adesivos

A utilização de dois adesivos com propriedades diferentes tem como finalidade melhorar a distribuição de tensões e aumentar a resistência da junta. Como mostra a Figura 43, o adesivo rígido e frágil deve ser colocado no centro da zona de sobreposição, enquanto o adesivo flexível e dúctil é posicionado nas duas extremidades da ligação, propensas a concentrações de tensões [4]. Em 1966, Raphael [64] propôs e desenvolveu um modelo analítico para este caso. Uns anos mais tarde também Srinivas [65] efetuou estudos paramétricos sobre o tema e, finalmente no ano de 2003, Pires et al. [66] comprovaram este conceito experimentalmente.

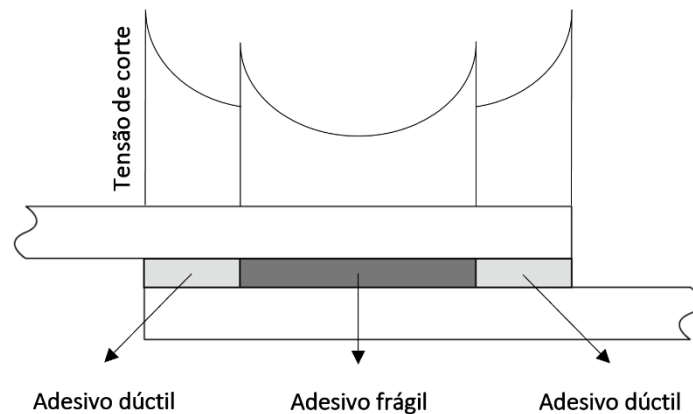


Figura 43 – Esquema representativo de uma junta com dois adesivos e distribuição de tensões [2]

Esta técnica permite reduzir as concentrações de tensões e aumentar a resistência comparativamente a qualquer tipo de junta com apenas um adesivo rígido e frágil. No entanto, a dificuldade da separação adequada do adesivo torna a sua aplicação complexa. A evolução deste tema foi vantajoso para o campo aeronáutico, dado que apresentam bom comportamento tanto a altas como a baixas temperaturas [67].

### 2.3.4 Gradação de propriedades dos aderentes

Neste caso, modificam-se as propriedades dos aderentes de forma a que haja uma gradação longitudinal do módulo de Young na região de sobreposição (Figura 44). Ganesh e Choo [68] desenvolveram estudos onde abordaram essa alteração em juntas solicitadas à tração, em JSS e JSD com aderentes de PRFV. A gradação do módulo de Young foi conseguida com a variação do ângulo de orientação das fibras de reforço durante o fabrico da estrutura laminada.

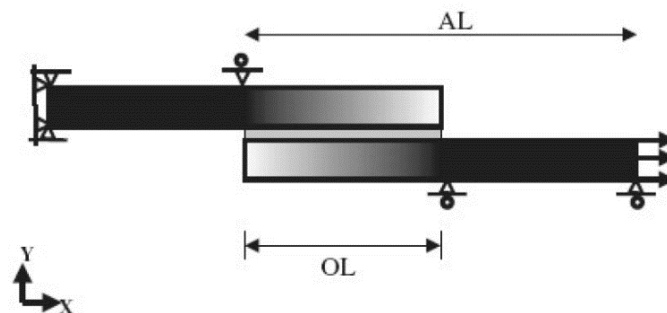


Figura 44 – Gradação do módulo de Young ao longo da JSS [68]

Através do método EF foi analisada a distribuição de tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo em juntas com diferentes esquemas de gradação do módulo de Young na zona de sobreposição. Posteriormente foram comparados os resultados obtidos com valores apresentados por JSS e JSD tradicionais.

Este método tornou o laminado menos rígido nas extremidades de sobreposição e concedeu à junta uma redução de 20% do pico das tensões  $\tau_{xy}$  no adesivo próximo dessas zonas, comparativamente com juntas sem modificação das propriedades dos aderentes.

A utilização desta técnica revelou ser uma opção fiável em juntas fabricadas em material compósito, devido às tensões  $\sigma_y$  e, principalmente,  $\tau_{xy}$  diminuírem, mas também porque neste caso a gradação das propriedades elásticas dos aderentes é relativamente simples.

### 2.3.5 Utilização de degraus na zona de sobreposição

Outra alternativa possível para aumentar a resistência de uma junta adesiva é a utilização de degraus na zona de sobreposição. Esta configuração é denominada por junta em degrau, e encontra-se em fase de estudo tanto das suas características e propriedades como das suas possíveis aplicações.

Um estudo desenvolvido por Ichikawa et al. [69] pretendia analisar a distribuição de tensões e realizar a previsão de resistência para juntas em degrau solicitadas à tração,

recorrendo a cálculos de EF tridimensionais. Para isso estudou-se a influência dos seguintes parâmetros na distribuição de tensões:

- Módulo de Young do adesivo;
- Número de degraus.

Para realizar o estudo de EF recorreu-se ao *software* ANSYS®, onde se examinou a distribuição de tensões nas interfaces das juntas, considerando o regime elasto-plástico de deformação do adesivo. Além disso, foi efetuado um ensaio experimental para que os resultados obtidos através do método EF pudessem ser comparados e validados.

A Figura 45 mostra o modelo tridimensional adotado por Ichikawa et al. para o cálculo da distribuição de tensões e para a previsão da resistência de juntas adesivas em degrau através do método EF, quando solicitadas à tração.

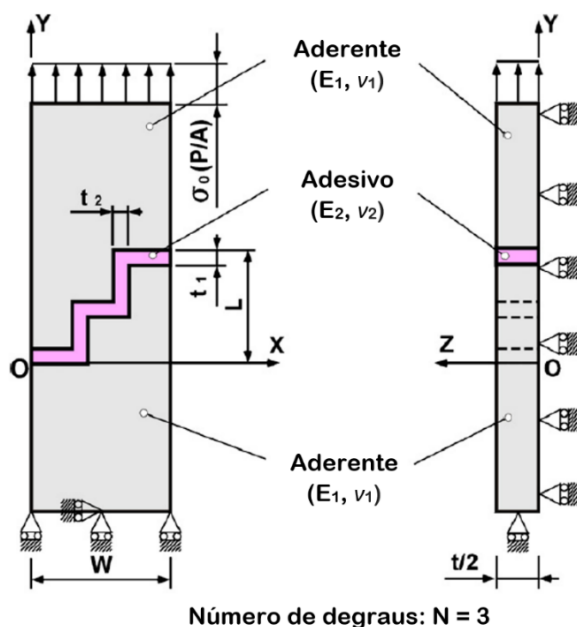


Figura 45 – Modelo para o estudo do método EF de uma junta em degrau [69]

Na Tabela 2 estão identificadas as dimensões associadas às diversas variáveis geométricas e mecânicas indicadas na Figura 45.

Para prever a resistência da junta quando sujeita a esforços de tração, o método de EF foi efetuado no intervalo elasto-plástico do adesivo, com o recurso a elementos de malha hexaédricos.

A resistência da junta foi calculada pelo critério da tensão principal máxima, ou seja, quando o valor da tensão principal máxima ( $\sigma_1$ ) na extremidade da interface do adesivo atinge a tensão de rotura do adesivo ( $\sigma_c$ ) sujeito à tensão tração ( $\sigma_0$ ), este valor da tensão de tração ( $\sigma_0$ ) é definido como sendo o valor da resistência da junta.

Tabela 2 – Variáveis geométricas e mecânicas definidas no estudo de Ichikawa et al. [69]

Variável	Dimensão
$E_1$	Módulo de Young do aderente
$\nu_1$	Coefficiente de Poisson do aderente
$E_2$	Módulo de Young do adesivo
$\nu_2$	Coefficiente de Poisson do adesivo
$t_1$	Espessura do adesivo na direção segundo eixo y
$t_2$	Espessura do adesivo na direção segundo eixo x
$N$	Número de degraus
$W$	Largura do provete
$t$	Espessura do provete

A Figura 46 (a) e Figura 46 (b) mostram as distribuição de cada componente de tensão ( $\sigma_x$ ;  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$ ,  $\tau_{xy}$ ,  $\tau_{yz}$  e  $\tau_{zx}$ ) na interface do adesivo transversal e longitudinal ao carregamento, respetivamente, obtidos através método EF. Em ambos os casos a distância de sobreposição em relação à extremidade da juntas, representas pela abcissa ( $x/W$  e  $y/L$ ), encontra-se normalizada.

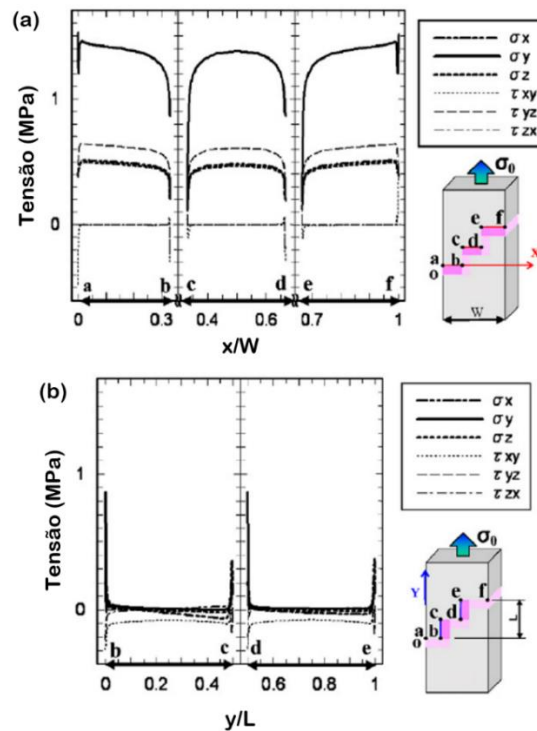


Figura 46 – Distribuição de cada componente de tensão: (a) na interface adesiva transversal ao carregamento; (b) na interface adesiva de longitudinal ao carregamento [69]

Ao examinar os gráficos obtidos verifica-se que a componente de tensão  $\sigma_y$  é a que apresenta maior valor na interface do adesivo transversal ao carregamento, dado que a sua direção é a mesma da carga aplicada. No caso da interface do adesivo longitudinal ao carregamento, a componente de tensão  $\sigma_y$  tem valor praticamente nulo ao longo do  $L_0$ , com exceção das extremidades onde se geram picos de tensão. Uma vez que o valor de componente de tensão na interface do adesivo transversal ao carregamento é maior que o registado na interface longitudinal, prevê-se que a rotura da junta tenha início numa das extremidades da interface do adesivo transversal à aplicação da carga.

A Figura 47 mostra a distribuição da tensão principal máxima normalizada ( $\sigma_1/\sigma_0$ ) na interface superior, inferior e no plano médio da camada adesiva transversal ao carregamento. Tal como o valor da tensão, também a distância relativa à extremidade da junta ( $x/W$ ) se encontra normalizada.

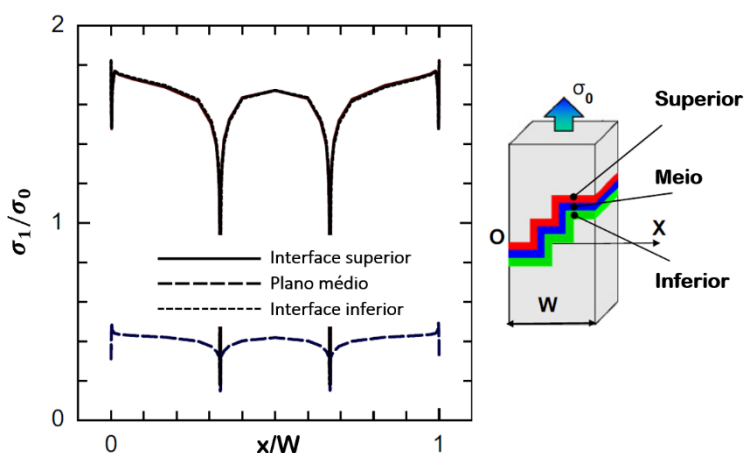


Figura 47 – Distribuição da tensão  $\sigma_1/\sigma_0$  para a interface superior, inferior e plano da camada média [69]

Como se pode observar, a tensão  $\sigma_1/\sigma_0$  atinge o pico de maior valor nas extremidades da interface superior do adesivo. O plano médio e a interface inferior da camada adesiva desenvolvem tensões muito idênticas, uma vez que a diferença é inferior a 1%, e apresentam valores de tensão reduzidos comparativamente com a interface superior.

O efeito do módulo de Young do adesivo na distribuição da tensão  $\sigma_1/\sigma_0$  nas interfaces adesivas transversais ao carregamento numa junta com três degraus é apresentado na Figura 48 (a), que mostra as várias distribuições de tensões para os diferentes valores de  $E_2$  (módulo de Young). A Figura 48 (b) mostra o mesmo efeito numa zona ampliada da extremidade de sobreposição. A partir dos dados fornecidos pelos gráficos, conclui-se que a junta apresenta maior resistência com o aumento do módulo de Young ( $E_2$ ). Em ambos os casos, a distância de sobreposição em relação à extremidade da juntas, representada pela abcissa ( $x/W$ ), encontra-se normalizada.

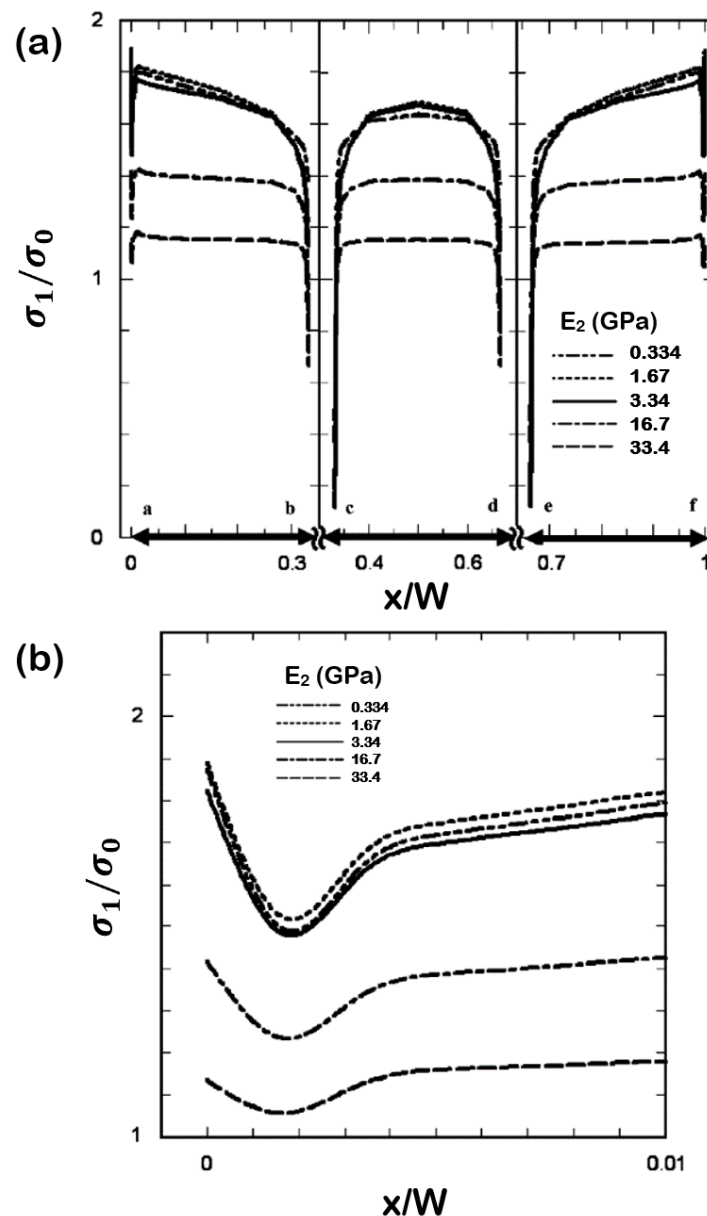


Figura 48 – Efeito do módulo de Young do adesivo na tensão  $\sigma_1/\sigma_0$  numa junta: (a) interface superior do adesivo e (b) secção ampliada da extremidade da zona de sobreposição [69]

Outro parâmetro a que este tudo se propôs foi averiguar a influência do número de degraus ( $N$ ) numa junta adesiva. Para cumprir esse objetivo foi feito um estudo numérico para analisar a evolução da distribuição da tensão  $\sigma_1/\sigma_0$  em juntas com 1, 2, 3 e 5 degraus.

A Figura 49 (a) mostra esse efeito no global da junta adesiva, enquanto a Figura 49 (b) apresenta o mesmo efeito, mas ampliando a extremidade da zona de colagem. Depois de analisar os gráficos verifica-se que o valor de  $\sigma_1/\sigma_0$  perto da extremidade diminui à medida que se aumenta o número de degraus. Estes dados validam o conceito de que o aumento do número de degraus infere maior resistência à junta.

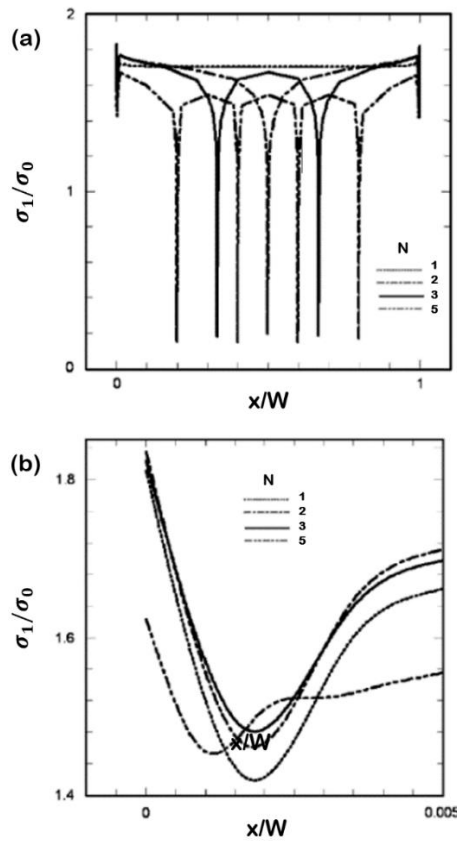


Figura 49 – Efeito do número de degraus  $N$  na tensão  $\sigma_1/\sigma_0$  numa junta: (a) na interface superior do adesivo e (b) secção ampliada da extremidade da zona de sobreposição [69]

Para se poder comparar as deformações calculadas numericamente, foram colocados extensómetros ao longo da camada adesiva da junta para obter resultados experimentais. O gráfico da Figura 50 mostra a relação entre os dois, onde a ordenada representa a deformação  $\varepsilon_y$  e a abcissa representa o valor da largura da junta normalizada ( $x/W$ ).

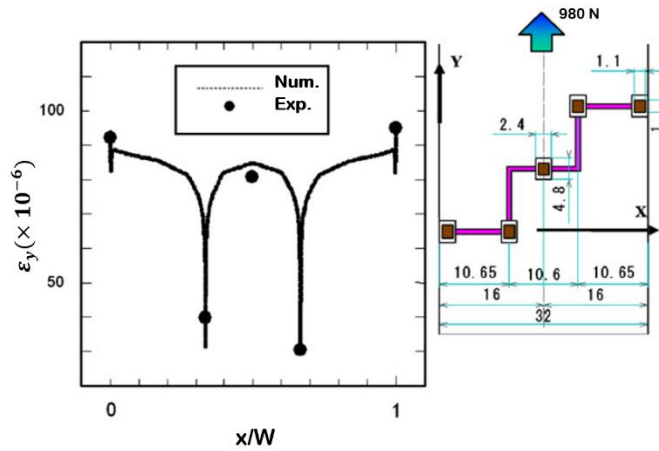


Figura 50 – Comparação entre as deformações obtidas experimentalmente e pelo método EF [69]

Pela observação do gráfico pode-se considerar que existe uma boa correlação entre as deformações previstas numericamente e as registadas experimentalmente pelos extensómetros, o que constitui mais um ponto a favor da capacidade de previsão do método EF.

Por último, o valor da resistência verificado no ensaio experimental foi aproximadamente 29 MPa, enquanto o valor obtido numericamente foi de 28 MPa. Estes resultados reforçam e validam as capacidades do método EF na previsão da resistência das juntas adesivas.

Mais tarde, com vista a aprofundar os conhecimentos em relação a este tema, Akpinar [70] realizou um estudo em que pretendia analisar e comparar o desempenho de três configurações de juntas diferentes pelo método EF, em que a área de colagem é equivalente em todos os casos. De modo a validar a análise numérica realizada pelo método EF, efetuaram-se testes experimentais para a comparação dos resultados obtidos. As configurações e dimensões geométricas das juntas usadas no estudo foram as apresentadas na Figura 51, Figura 52 e Figura 53.

→ Junta de sobreposição simples (Tipo-I)

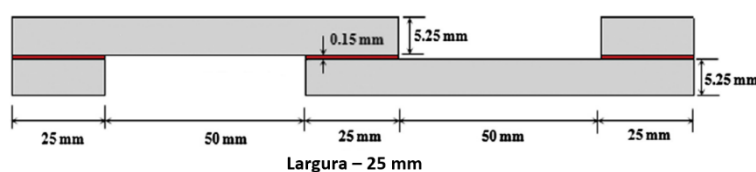


Figura 51 – Parâmetros geométricos das JSS utilizadas no estudo [70]

→ Junta com um degrau (Tipo-II)

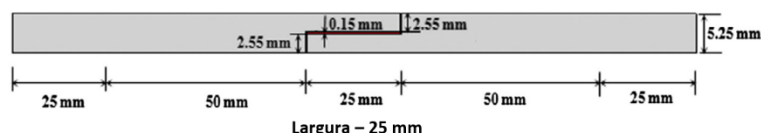


Figura 52 – Parâmetros geométricos das juntas com um degrau utilizadas no estudo [70]

→ Junta com três degraus (Tipo-III)

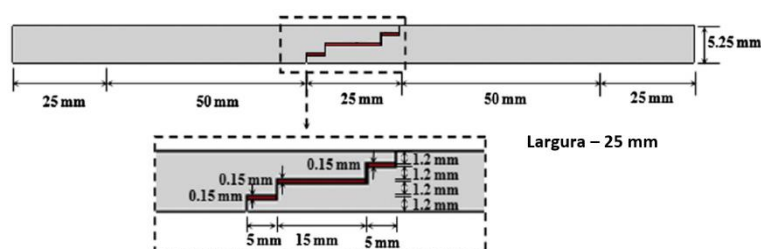


Figura 53 – Parâmetros geométricos das juntas com três degraus utilizadas no estudo [70]

Para além disso, o estudo visa também determinar a influência do tipo de adesivo usado na resistência da junta. Para tal, foi utilizado o adesivo bi-componente DP460 da 3M®, de carácter rígido, e o adesivo do tipo filme SBT9244 da 3M®, de carácter dúctil. Em relação ao material dos aderentes, foi seleccionada a liga de alumínio AA2024-T3.

Todas as juntas, independentemente da sua geometria, foram ensaiadas à tração com uma velocidade de 1 mm/min, em que as condições fronteira assim como as cargas aplicadas foram idênticas em qualquer um dos casos.

As três diferentes configurações utilizadas nos ensaios experimentais foram modeladas tridimensionalmente pelo *software* ANSYS. A análise de tensões das juntas foi realizada com recurso a um método de EF não linear, no qual se considera a geométrica e o comportamento dos materiais, adesivos e aderentes, não-lineares. A modelação 3D usa malha mais refinada em zonas onde a distribuição de tensões é crítica. O modelo recorre ao critério de cedência de von Mises para a determinação da tensão equivalente ( $\sigma_{eq}$ ) e da deformação equivalente ( $\epsilon_{eq}$ ) da camada adesiva e dos aderentes.

Na Figura 54 está representada a média das forças máximas registadas experimentalmente e na Figura 55 os gráficos da força-deslocamento para cada configuração em função do adesivo utilizado, obtidos através de ensaios de tração.

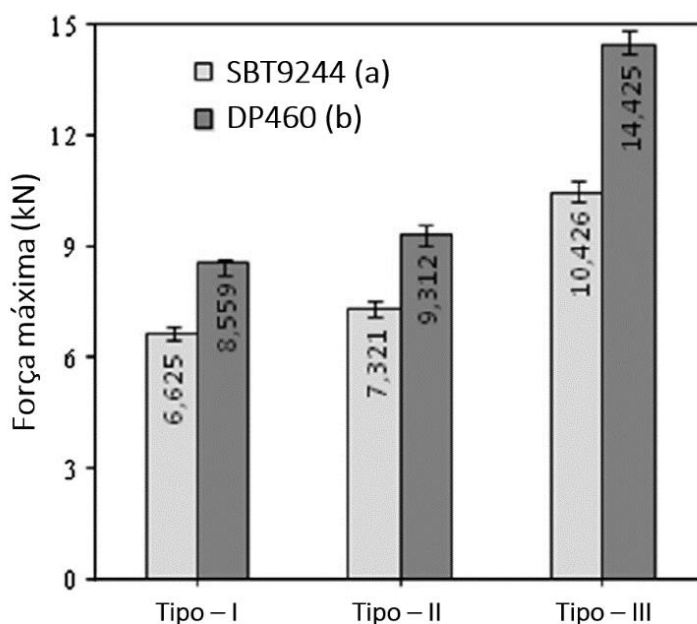


Figura 54 – Média das forças máximas de rotura das juntas obtidas experimentalmente [70]

Numa breve análise das forças máximas obtidas é possível verificar que as juntas em degrau apresentam maior resistência do que as JSS, independentemente da utilização de um adesivo rígido ou dúctil.

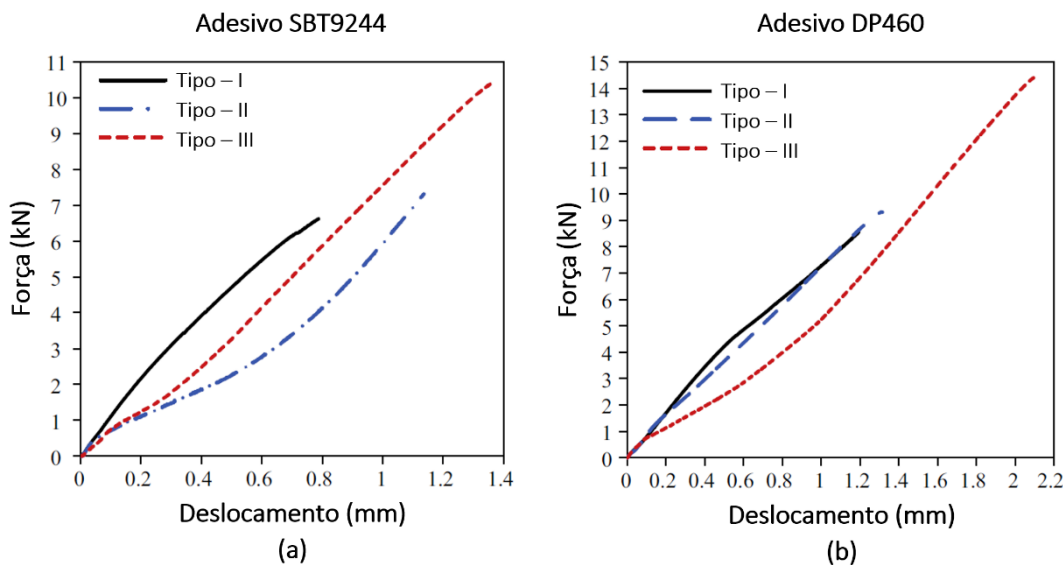


Figura 55 – Gráficos força vs deslocamento; (a) para juntas do Tipo I, II e III ligadas com o adesivo SBT9244, (b) para juntas do Tipo I, II e III ligadas com o adesivo DP460 [70]

Aprofundado o estudo do gráfico da Figura 54, e comparando a JSS (Tipo I) e a junta com um degrau (Tipo II) ligada com o adesivo dúctil, observa-se uma redução do efeito do momento fletor que se desenvolve na JSS (Tipo I), devido à excentricidade da carga. Embora se registre uma melhoria, o aumento da resistência da junta é de apenas  $\approx 11\%$ . Este facto pode estar relacionado com a redução da rigidez devido à diminuição de espessura do aderente na zona de sobreposição.

Por outro lado, a comparação da JSS (Tipo I) com a junta de três degraus (Tipo III) mostra que a utilização dos três degraus se traduz num aumento significativo (60%) da capacidade de carga.

Relativamente às tensões  $\sigma_y$ , nas JSS (Tipo I) e nas juntas com um degrau (Tipo II), geram-se nas extremidades de sobreposição, o que origina o aparecimento de fendas que se propagam subitamente para o interior da área de colagem, provocando a rotura da ligação. No caso das juntas com três degraus (Tipo III), as maiores tensões  $\sigma_y$  ocorrem junto à aresta de sobreposição (aproximadamente a 3 mm das bordas dos degraus laterais), formando uma fenda que cresce de forma repentina até ao fim desses degraus. De seguida, surgem novamente tensões  $\sigma_y$ , desta vez na extremidade do degrau central, o que forma uma nova fenda e um súbito crescimento para o centro causando a rotura da junta. Este processo até à rotura aumenta significativamente a capacidade de carga da junta.

No que se refere ao adesivo rígido, os resultados obtidos experimentalmente mostram que a utilização de juntas com um degrau (Tipo II) e juntas com três degraus (Tipo III) beneficiam de um aumento na sua resistência, em cerca de 8,8% e 68%, respetivamente, quando comparadas com as JSS (Tipo I).

As curvas força-deslocamento apresentadas na da Figura 55 demonstram que a minimização do efeito do momento fletor, provocado pela excentricidade da carga na JSS (Tipo I), representa não só um aumento da capacidade de carga, mas também um alongamento da deformação das junta com degraus. No caso das juntas ligadas com o adesivo flexível (SBT9244) registou-se um maior alongamento, sob a mesma carga, na junta com um degrau (Tipo II). Por outro lado, nas juntas onde foi empregue o adesivo rígido (DP460), verificou-se maior capacidade de deformação nas juntas com três degraus (Tipo III).

Na análise numérica, a tensão  $\sigma_{eqv}$  foi calculada usando o critério de von Mises, considerando-se que a rotura da junta ocorre quando a tensão equivalente de von Mises ( $\sigma_{eqv}$ ) calculada em qualquer ponto da camada adesiva atinge a tensão de rotura do adesivo. Na Tabela 3 é apresentada a relação entre os valores obtidos de carga máxima experimentalmente e os valores resultantes da análise efetuada pelo método de EF.

Tabela 3 – Comparação da relação entre os valores de carga máxima obtidos experimental e numericamente [70].

Tipo de junta	Carga máxima EXP [N] ( $F_{EXP}$ )	Carga máxima do MEF [N] ( $F_{MEF}$ )	$F_{MEF}/F_{EXP}$
<b>Adesivo SBT9244</b>			
Tipo I	6625	6890	1,04
Tipo II	7321	7680	1,05
Tipo III	10 426	10 730	1,03
<b>Adesivo DP460</b>			
Tipo I	8559	8120	0,95
Tipo II	9312	9140	0,98
Tipo III	14 425	14 050	0,97

Os resultados da análise numérica e do estudo experimental mostram que o local crítico para a ocorrência da rotura é a interface entre a camada do adesivo e o aderente superior (a superfície ABCD da Figura 56).

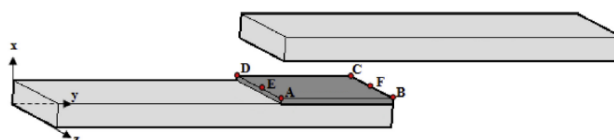


Figura 56 – Superfície crítica de juntas adesivas [70]

Na Figura 57 e Figura 58 são comparadas as distribuições das tensões  $\sigma_y$  e das tensões  $\tau_{xy}$ , dado que são as mais prejudiciais para o desempenho da junta, ao longo da linha média da camada do adesivo (na linha EF), em função do adesivo utilizado.

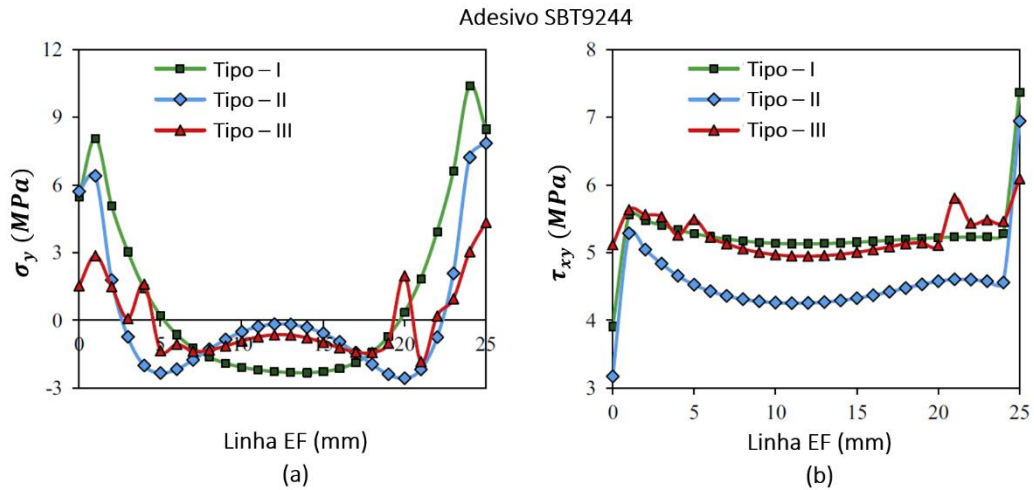


Figura 57 – Comparação da distribuição de tensões da camada adesiva ao longo da linha EF para juntas ligadas com o adesivo SBT9244: (a) tensões  $\sigma_y$  e (b) tensões  $\tau_{xy}$  [70]

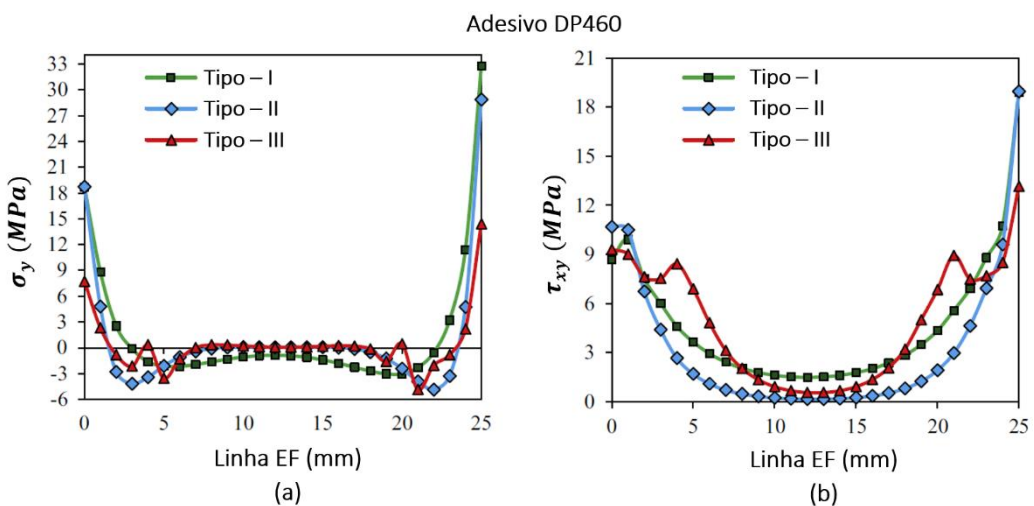


Figura 58 – Comparação da distribuição de tensões da camada adesiva ao longo da linha EF para juntas ligadas com o adesivo DP460: (a) tensões  $\sigma_y$  e (b) tensões  $\tau_{xy}$  [70]

Uma primeira análise dos gráficos apresentados na Figura 57 e Figura 58 permite observar que os pontos críticos, isto é, os locais onde há maior concentração de tensões, situam-se nas extremidades das zonas de sobreposição, com o ponto F a registar o pico de tensão mais elevado.

Referente ao adesivo BBT9244, a Figura 57 (a) revela que as tensões  $\sigma_y$  assumem o seu valor máximo juntas as suas extremidades, e diminuem à medida que avançam para o centro da junta, onde assumem valores negativos (compressão).

Devido ao efeito formado pelo carregamento excêntrico, as tensões  $\sigma_y$  nas JSS (Tipo I) são bastante elevadas. A minimização desse efeito em juntas com um degrau (Tipo II) e em juntas com três degraus (Tipo III) leva à diminuição das tensões na região central da colagem, onde se registam valores quase nulos. Além disso, as juntas com três degraus (Tipo III) possuem reduzidos valores de tensão  $\sigma_y$  em zonas próximas das extremidades de sobreposição. Este é um fator importante, dado que é um local propício ao aparecimento de fendas que podem levar à rotura da ligação.

Relativamente às tensões  $\tau_{xy}$  que se desenvolve ao longo do  $L_0$ , a Figura 57 (b) mostra que estas atingem o seu valor máximo no ponto F e o mínimo no ponto E. Ao relacionar os valores de tensões obtidos pelas JSS (Tipo I) e pelas juntas com um degrau (Tipo II) verifica-se, que esta última, regista uma ligeira descida do pico de tensões junto à aresta da zona de sobreposição e uma descida abrupta das tensões ao longo do plano de colagem. As juntas com três degraus (Tipo III) apresentam uma distribuição mais homogénea das tensões  $\tau_{xy}$  ao longo da junta.

No que diz respeito ao adesivo DP460, a Figura 58 (a) e a Figura 58 (b) mostram os gráficos da distribuição das tensões  $\sigma_y$  e de corte, respetivamente.

Igualmente ao que se verifica na utilização do adesivo dúctil (SBT942), também neste caso o pico máximo das tensões  $\sigma_y$  se situa no ponto F. Esta tensão diminui à medida em que se direciona para a região central assumindo, em alguns casos, valores nulos. Observa-se também, que o pico destas tensões diminui conforme se aumenta o número de degraus na junta.

Nas juntas ligadas com o adesivo rígido, as tensões  $\tau_{xy}$  desenvolvidas não apresentam distribuição homogénea ao longo do  $L_0$ . Em todas as configurações utilizadas estas tensões atingem o valor máximo no ponto F e o mínimo na região central da zona de colagem (centro da linha EF). Nas juntas com três degraus (Tipo III), os picos de tensões  $\tau_{xy}$  observados nas extremidades nos outros casos deslocam-se para zonas mais interiores da ligação.

Face aos resultados obtidos através do método numérico e do estudo experimental, nota-se que a implementação de degraus em juntas adesivas aumenta a sua resistência, comparativamente às JSS. Este comportamento deve-se à diminuição das tensões  $\tau_{xy}$  e das tensões  $\sigma_y$ .

## 2.4 Modelação de juntas em material compósito

Para estudar, experimental e numericamente, juntas em material compósito é essencial ter conhecimento do comportamento deste material assim como as suas principais características. Neste subcapítulo serão abordadas algumas das suas especificidades e trabalhos publicados na área.

### 2.4.1 Especificidades das juntas em material compósito

Os metais apresentam propriedades mecânicas iguais para todas as direções de sollicitação (i.e., propriedades isotrópicas), ao contrário dos materiais compósitos, em que as propriedades mecânicas de um laminado dependem da direção em que se está a sollicitar (i.e., propriedades ortotrópicas). A resistência de um laminado resulta da sequência de empilhamento, ou seja, as fibras podem ser empilhadas com ângulos diferentes em cada camada para conferir as propriedades pretendidas à junta em qualquer uma das direções [15].

Experimentalmente, quando ensaiada uma junta adesiva com aderentes em material compósito à tração, pode também ocorrer uma rotura interlaminar, para além das roturas já mencionadas no capítulo 2.1.3. Isto acontece quando a resistência coesiva do adesivo é superior a resistência entre camadas, dando origem à delaminação e, consequentemente, à rotura da junta [71].

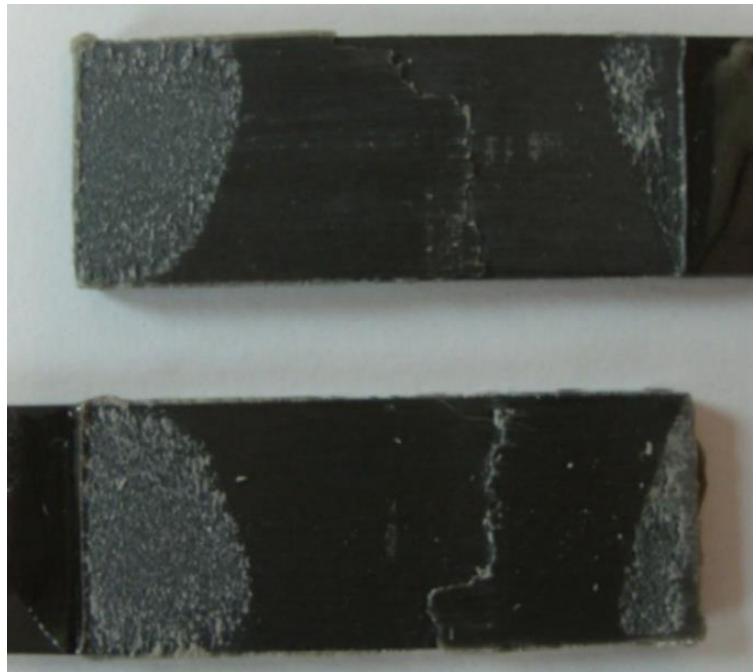


Figura 59 – Rotura interlaminar de uma junta ligada com o adesivo AV138 e com  $L_0$  de 40 mm [72]

Na modelação numérica de juntas em material compósito, também é necessária especial atenção às diferenças das propriedades em relação aos metais. Como um laminado apresenta diferentes valores de resistência mecânica para cada direção, é fundamental caracterizar cada um deles nas direções principais. A Tabela 4 mostra as variáveis elásticas necessárias para definir a plasticidade de um metal e de um material compósito.

Tabela 4 – Variáveis necessárias para definir a plasticidade de um metal vs. de um material compósito (1 representa a direção das fibras, 2 representa a direção transversa e 3 representa a direção fora do plano)

Material			
Metal	Compósito		
$E$	$E_1$	$\nu_{12}$	$G_{12}$
$\nu$	$E_2$	$\nu_{13}$	$G_{13}$
-	$E_3$	$\nu_{23}$	$G_{23}$

Para que o método numérico seja preciso na previsão da resistência e modo de rotura da junta, é crucial inserir a possibilidade de ocorrer uma rotura interlaminar do modelo em estudo. Uma das possibilidades para este efeito consiste na utilização de MDC. Para este efeito é colocada uma camada coesiva próxima da interface entre o aderente e o adesivo com propriedades coesivas que simulam a resistência entre camadas do laminado, o que permite a previsão de uma eventual delaminação (Figura 60).

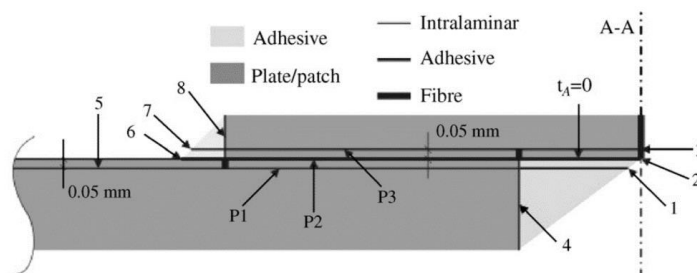


Figura 60 – Ilustração da zona de sobreposição de uma junta adesiva com camada interlaminar [44]

#### 2.4.2 Exemplos de trabalhos publicados na área

Neste subcapítulo são apresentados alguns dos trabalhos científicos publicados, referentes a juntas em material compósito.

O estudo realizado por Neto et. [72] pretendia caracterizar o modo de falha e a resistência de JSS em material compósito com diferentes adesivos e  $L_0$ , assim como validar diferentes métodos de previsão.

Para este caso, foram usados aderentes fabricados a partir compósito unidirecional pré-impregnado de carbono-epóxico, com 16 camadas empilhadas a  $0^\circ$ . Para a comparação de resultados utilizaram-se dois adesivos, o adesivo Araldite® AV138 e o Sikaforce® 7888.

A Figura 61 mostra os valores de  $P_{max}$  obtidos experimentalmente para cada um dos adesivos, em função do  $L_0$ . Conforme se observa, para ambos os casos, à medida que se

aumenta a sobreposição, aumenta também o valor da força a que se dá a rotura da junta. Com este ensaio foi possível concluir que no adesivo dúctil (Sikaforce 7888) ocorreu um rotura coesiva no adesivo em todos os  $L_0$  contrariamente ao adesivo frágil (AV138), para o qual a partir da sobreposição de 30 mm se registou rotura interlaminar do aderente.

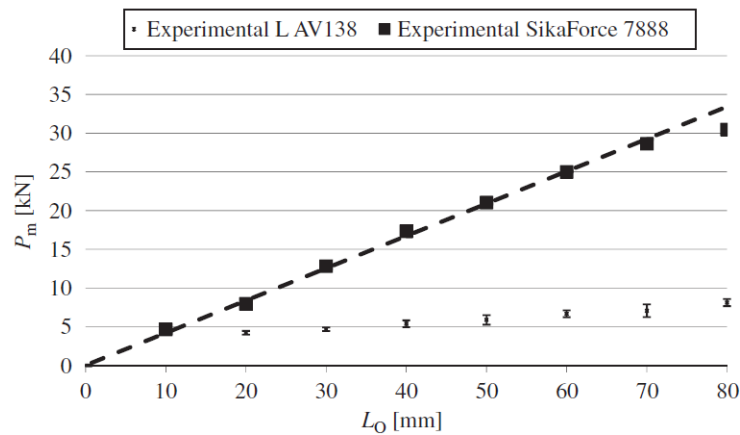


Figura 61 – Forças máximas registradas experimentalmente em JSS para o Araldite® AV138 e Sikaforce® 7888 [72]

Para cada adesivo foram usados métodos analíticos e numéricos para prever a resistência que estes conferem às juntas. No caso do adesivo frágil o modelo analítico de Hart-Smith [73] conseguiu prever a força de rotura do adesivo através das tensões  $\sigma_y$  (Figura 62). O método numérico utilizado (modelo de dano coesivo) obteve valores satisfatórios para este adesivo, contrariamente ao que se observou no adesivo dúctil, onde não se registou a mesma precisão (Figura 63). Provavelmente, isto aconteceu porque foi usado um modelo de dano triangular e o adesivo dúctil apresenta um comportamento com a forma de um trapézio. Contudo, os modelos numéricos utilizados são capazes de simular a falha inicial assim com a sua propagação observada nos ensaios experimentais.

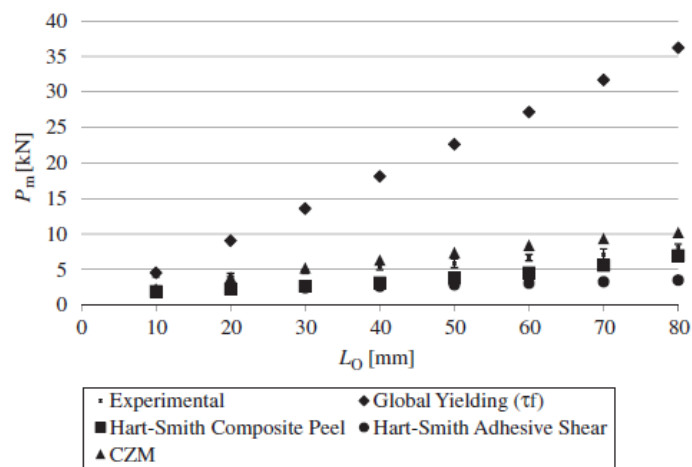


Figura 62 – Resultados experimentais vs. previsões analíticas para o Araldite® AV138 [72]

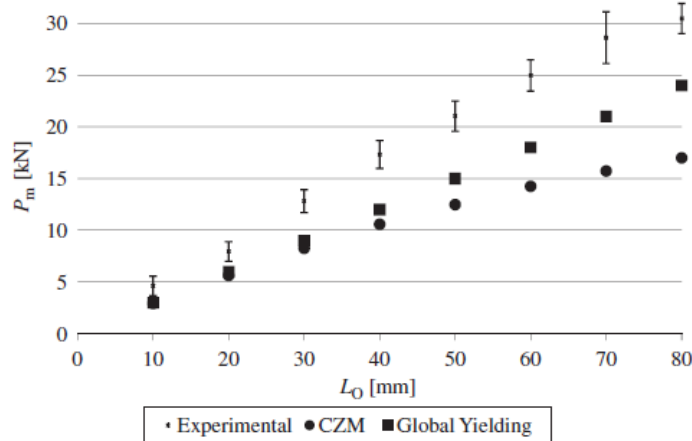


Figura 63 – Resultados experimentais vs previsões numéricas para o Sikaforce® 7888 [72]

Também no âmbito das juntas adesivas em material compósito, Ribeiro et al. [74] estudaram, numérica e experimentalmente, JSS com defeitos centrados na camada adesiva para diferentes valores de  $L_0$  e adesivos. Na Figura 64 (a) e na Figura 64 (b) está esquematizado o *layout* dos defeitos introduzidos nas juntas para  $L_0$  de 25 e 50 mm, respetivamente.

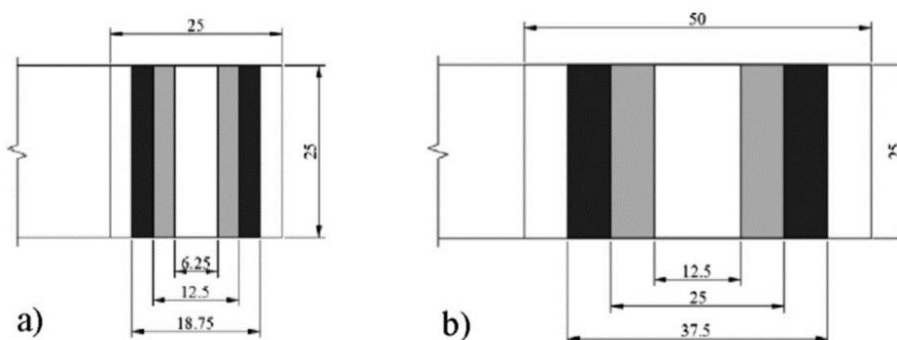


Figura 64 – Layout dos defeitos na juntas (a)  $L_0=25$  e (b)  $L_0=50$  mm [74]

Para estudar a influência do tipo adesivo na resposta das juntas com defeito, usaram-se dois adesivos com propriedades diferentes, o adesivo Araldite® AV138 que apresenta um comportamento frágil e o adesivo Sikaforce® 7752 com comportamento dúctil. Em relação às tensões  $\tau_{xy}$  desenvolvidas ao longo do  $L_0$ , a Figura 65 (a) mostra que, para juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, o aumento da percentagem da área do defeito até aos 50% não se traduz num aumento significativo do pico da tensão  $\tau_{xy}$  na extremidade da junta. Apenas para juntas com 75% de defeito se observa um acréscimo relevante do pico de tensão. Contrariamente a este caso, a Figura 65 (b) revela que quando utilizado o adesivo dúctil (Sikaforce® 7752) com o aumento de área defeituosa, existe sempre um aumento do pico da tensão junto à extremidade associada.

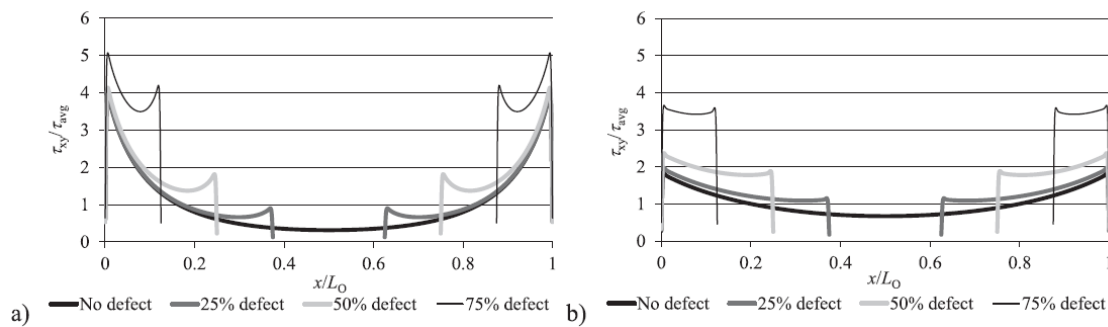


Figura 65 – Distribuição da tensão  $\tau_{xy}$  normalizada a meio da camada adesiva em função da percentagem de área defeituosa (a) para juntas ligadas com Araldite® AV138 (b) para juntas coladas com Sikaforce® 7752 [74]

Conclui-se assim que a presença de um defeito centrado na camada adesiva (em juntas tipicamente pouco carregadas) não é tão preponderante para a resistência da junta em adesivos frágeis ao invés do que acontece em adesivos dúcteis.

A Figura 66 apresenta dois exemplos em que mostram a relação entre os valores obtidos pelo modelo de dano coesivo (MDC) e os registados experimentalmente. A técnica MDC foi precisa a prever a força máxima em juntas com o Araldite® AV138, onde apresentou um desvio máximo em relação ao resultados experimentais de 7,2% (Figura 66 (a)). Por outro lado, este desvio aumenta para 25,7% quando aplicado a juntas fabricadas com o Sikaforce® 7752 (Figura 66 (b)).

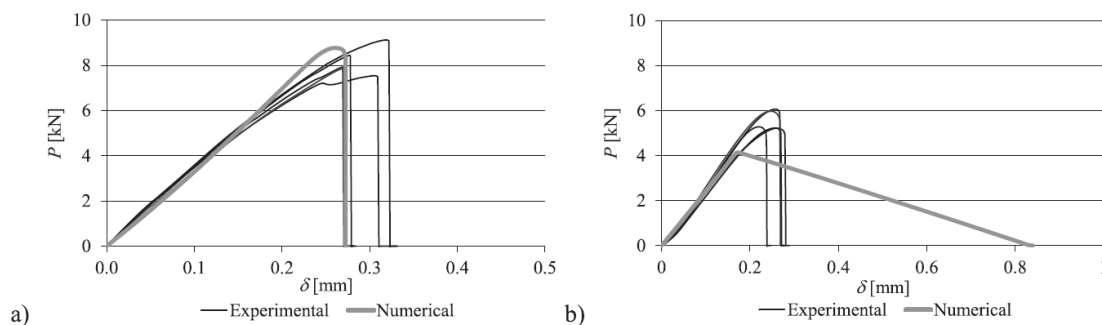


Figura 66 – Curvas P- $\delta$  obtidas experimental e numericamente (a) para juntas sem defeito com o Araldite® AV138 e  $L_0=25$  mm e (b) para juntas sem defeito com o Sikaforce® 7752 e  $L_0=50$  mm [74]

Como foi referido anteriormente, uma das muitas vantagens do uso de juntas adesivas é a capacidade para ligar aderentes de materiais dissimilares. Dado este facto, Ribeiro et al. [75] estudaram o comportamento de juntas adesivas com aderentes de alumínio e PRFC ligados com um adesivo frágil (XNR6823) e um adesivo dúctil (XNR6852) para diferentes valores de  $L_0$ . Para isso efetuaram um ensaio experimental e recorreram ao método EF, juntamente com o método do modelo de dano coesivo para uma análise detalhada das tensões, que permite comparar a sua distribuição em diferentes planos (Figura 67) e  $L_0$ .

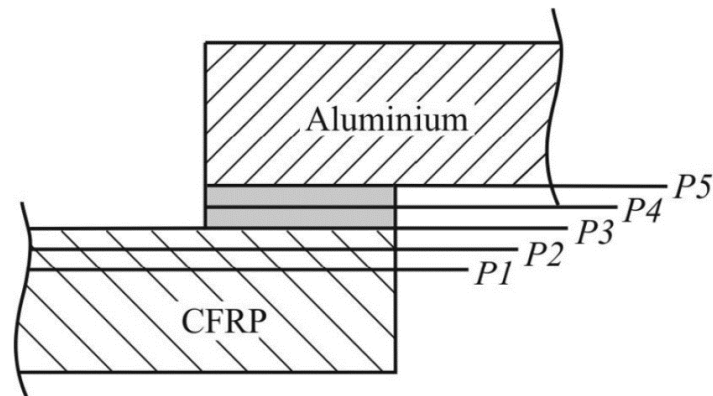


Figura 67 – Planos considerados para análise das distribuições de tensões [75]

A Figura 68 apresenta as distribuições das tensões  $\sigma_y$  e das tensões  $\tau_{xy}$  para os diferentes planos representados na Figura 67 e  $L_0=10$  mm.

Analisando os gráficos fornecidos, observa-se que as distribuições das tensões  $\sigma_y$  para os planos P1 e P2 são similares às obtidas para as tensões  $\tau_{xy}$ , ou seja, o plano P2 apresenta picos de tensões mais altos nas extremidades da sobreposição, dado que é o plano mais próximo da camada de adesivo, mas regista tensões mais baixas para  $x/L_0 < 0$ , uma vez este plano está mais próximo da superfície livre do aderente que o plano P1.

A distribuição das tensões nos planos P3, P4 e P5 documentam um comportamento típico de juntas adesivas, e devem ser responsáveis pela falha coesiva no adesivo, desde que a resistência interlaminar do compósito seja superior à do adesivo.

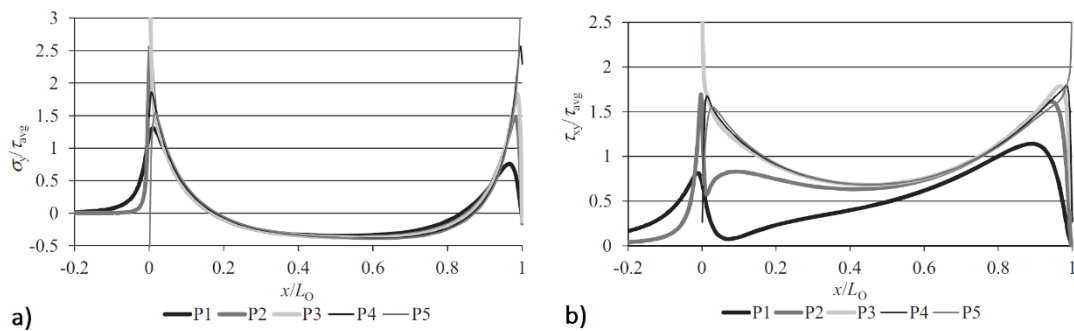


Figura 68 – Distribuição (a) das tensões  $\sigma_y$  e (b) das tensões  $\tau_{xy}$  para os diferentes planos e para  $L_0=10$  mm [75]

De seguida, a Figura 69 (a) e Figura 69 (b) fornece a comparação entre os valores de força máxima admitida ( $P_m$ ) registados no ensaio experimental e os obtidos numericamente em função do  $L_0$  para as juntas com XNR6823 e XNR6852, respetivamente. Para as juntas ligadas com o adesivo XNR6823 observou-se que em todos os  $L_0$  utilizados a rotura ocorreu sempre no plano P2. Isto deve-se às propriedades mecânicas de corte e arrancamento do compósito serem inferiores às do adesivo. A falha interlaminar do compósito para as juntas ligadas com o adesivo XNR6823 explica o facto de haver uma melhoria muito reduzida dos valores de  $P_m$  com o aumento do  $L_0$ .

As juntas ligadas com o adesivo XNR6852 apresentaram uma rotura coesiva na camada adesiva, o que se traduziu num aumento linear da  $P_m$  em função do aumento do  $L_0$ . Este adesivo apresenta propriedades mecânicas de corte e de arrancamento inferiores ao anterior, o que pode explicar o aumento de carga das juntas.

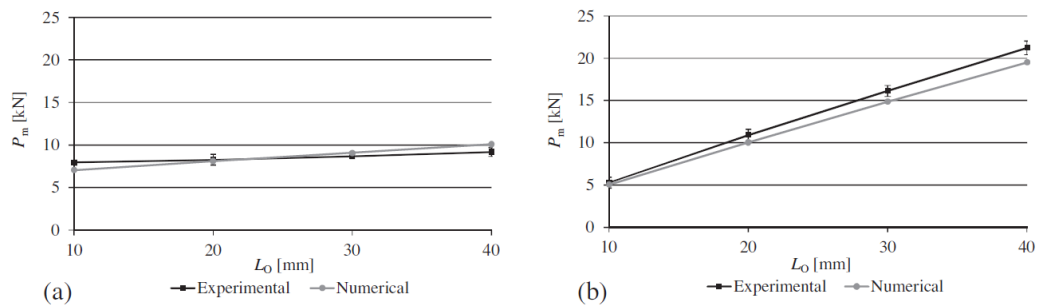


Figura 69 – Valores experimentais e numéricos da  $P_m$  em função do  $L_0$  para juntas adesivas com o adesivo (a) XNR6823 e (b) XNR6852 [75]



# DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Trabalho experimental

Neste subcapítulo será abordado o trabalho experimental realizado por Silva [76] para a validação dos resultados da presente dissertação. Primeiramente é feita uma apresentação detalhada dos materiais utilizados para o fabrico das juntas ensaiadas, onde se especifica as suas principais características mecânicas. Posteriormente são especificadas as dimensões geométricas das juntas em questão assim como as várias etapas do respetivo processo de fabrico. Para garantir uma amostragem que confira um grau de confiança satisfatório ao estudo, foram fabricados 5 provetes para cada geometria em análise. Por último, em último lugar, são definidas as condições de ensaio e apresentados os resultados obtidos no que concerne aos modos de rotura, curvas  $P-\delta$ , resistência das juntas e respetiva análise e comentário de resultados.

#### 3.1.1 Materiais utilizados

Nesta secção é realizada uma apresentação detalhada dos materiais utilizados no trabalho experimental, mais concretamente no que se refere ao material dos substratos e adesivos.

##### 3.1.1.1 Substratos

Os provetes foram produzidos a partir da liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida como liga estrutural da série 6000, com magnésio e silício como principais elementos de liga, como mostra a Tabela 5.

Tabela 5 – Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [77]

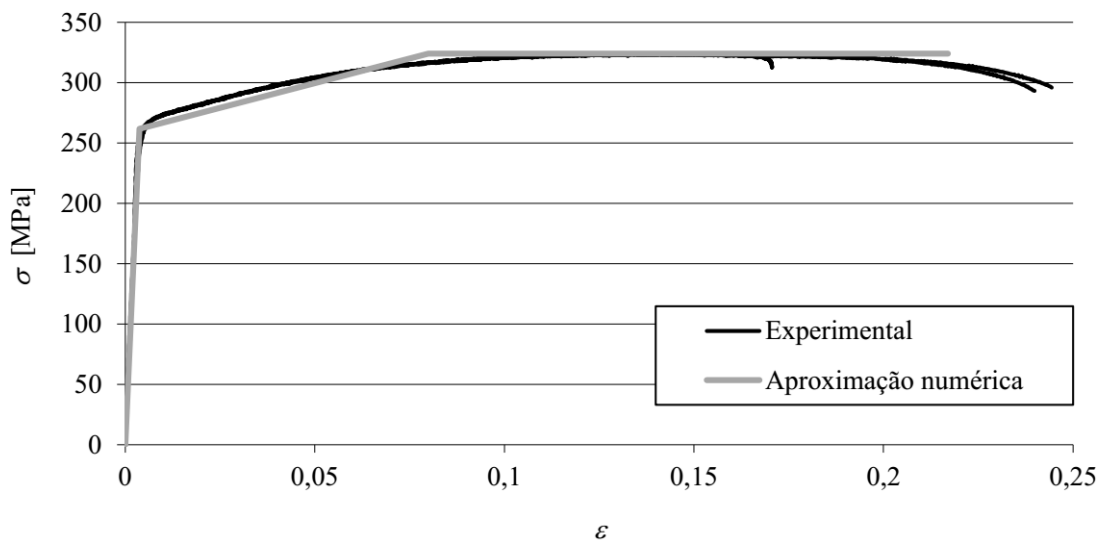
	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
% Mínimo	0,70	0,60	0,40	0	0	0	0	0	----
% Máxima	1,30	1,20	1,00	0,50	0,25	0,20	0,10	0,05	Resto

A sua ampla utilização deve-se a propriedades como a elevada resistência à tração (mínimo de 300 MPa, especificado pelo fabricante), obtida através do envelhecimento artificial a uma temperatura de aproximadamente 180°C (Tabela 6).

Tabela 6 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651; dados do fabricante [77]

Espessura [mm]	Tensão de rotura mínima [MPa]	Tensão de cedência 0,2% mínima [MPa]	Alongamento mínimo [%]	Dureza Brinell	Módulo de elasticidade [GPa]
3,00	300	255	9	91	70

Campilho et al. [60] caracterizaram esta liga de alumínio à tração, de acordo com a norma ASTM E8M [78], onde registaram as seguintes propriedades:  $E=70,07 \pm 0,83$  GPa,  $\sigma_y=261,67 \pm 7,65$ , tensão de rotura ( $\sigma_f$ ) de  $324,00 \pm 0,16$  MPa e deformação de rotura à tração ( $\epsilon_f$ ) de  $21,70 \pm 4,24\%$ . A Figura 70 mostra as curvas de tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) desta liga e respetiva aproximação numérica.

Figura 70 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW 6082-T651 [60]

### 3.1.1.2 Adesivos

Todos os adesivos utilizados nos ensaios são de bi-componente (resina + endurecedor), dois de base epóxico e um de base de poliuretano. Os três adesivos apresentam uma viscosidade baixa, o que facilita a sua deposição nas superfícies a ligar, permitindo variar facilmente a espessura de adesivo e colmatar alguma falta de planeza dos substratos [77].

#### 3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138 (Figura 72), fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência (Figura 71 e Tabela 7), e é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [79].

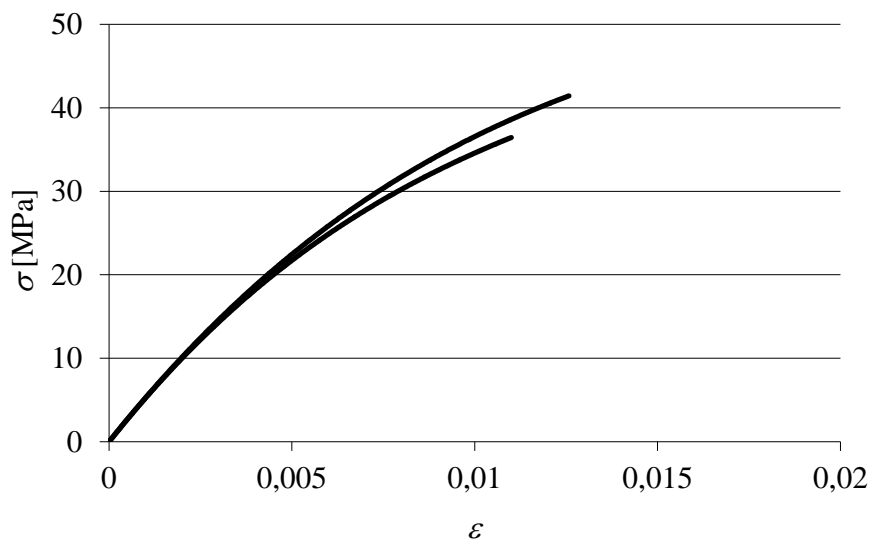


Figura 71 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [79].

Este adesivo de base epóxico, termoendurecível, é composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 72). Este adesivo é fornecido em duas embalagens e, como tal, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes, utilizando uma balança digital. A relação de mistura utilizada neste adesivo é de 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de  $\pm 5\%$ . Este adesivo apresenta-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis [77].



Figura 72 – Adesivo Araldite® AV138 [77]

Tabela 7 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [79, 80].

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

<sup>a</sup> Valores estimados na referência [80]; <sup>b</sup> Valores do fabricante

### 3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo estrutural Araldite® 2015, igualmente fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pela baixa contração, comportamento moderadamente dúctil e alta resistência ao corte e à clivagem. É um adesivo de base epóxido, termoendurecível, composto por dois componentes e fornecido em cartucho (Figura 73). Este adesivo é composto por resina e endurecedor, e aplica-se com uma pistola manual, o que permite de forma simples e fácil aplicar o adesivo com recurso a um bico que mistura os dois componentes em quantidades iguais. Apresenta-se como uma pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente.



Figura 73 – Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml [77]

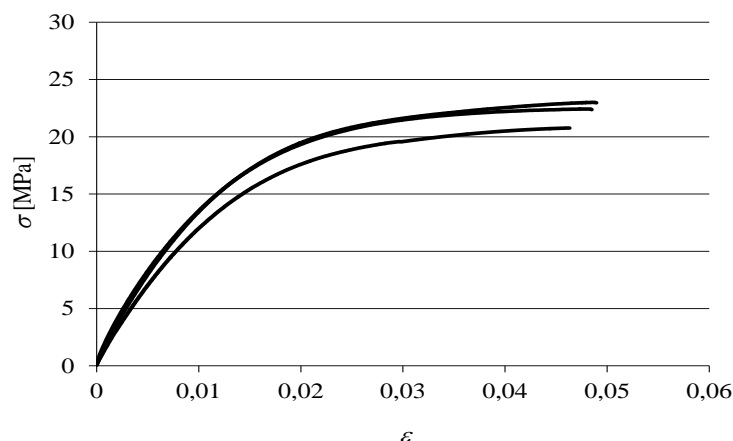


Figura 74 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [79].

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona ou isopropanol (para plásticos), a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 74 [79].

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensão. A Tabela 8 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo [79].

Tabela 8 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [79].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, $E$ [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, $\nu^a$	0,33
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	$14,6 \pm 1,3$
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	$17,9 \pm 1,8$
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	$43,9 \pm 3,4$
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$

<sup>a</sup> Valores do fabricante

### 3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo estrutural Sikaforce® 7752 é fornecido pela empresa Sika® em dois componentes separados, e caracteriza-se pela sua base de poliuretano estrutural tixotrópico (Figura 75). A sua resina polioli com cargas e endurecedor de base isocianato possui uma baixa emissão de gases e perdas voláteis, e oferece uma boa resistência a altas temperaturas [77].



Figura 75 – Adesivo Sikaforce® 7752 [77]

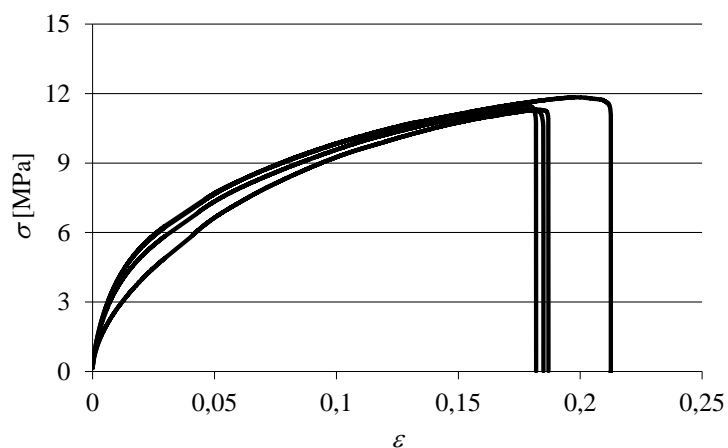


Figura 76 – Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [81].

O Sikaforce® 7752 é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, com grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas. Este adesivo encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. As curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 76 [81]. Na Tabela 9 são indicados os principais valores das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo.

Tabela 9 – Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [81].

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, $E$ [GPa]	$0,49 \pm 0,09$
Coefficiente de Poisson, $\nu^a$	0,30
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de rotura à tração, $\epsilon_f$ [%]	$19,18 \pm 1,40$
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	$5,16 \pm 1,14$
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	$10,17 \pm 0,64$
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	$54,82 \pm 6,38$
Tenacidade à tração, $G_{Ic}$ [N/mm]	$2,36 \pm 0,17$
Tenacidade ao corte, $G_{IIc}$ [N/mm]	$5,41 \pm 0,47$

<sup>a</sup> Valores do fabricante

### 3.1.2 Geometria das juntas

A junta adesiva em estudo com geometria em degrau encontra-se representada esquematicamente na Figura 77.

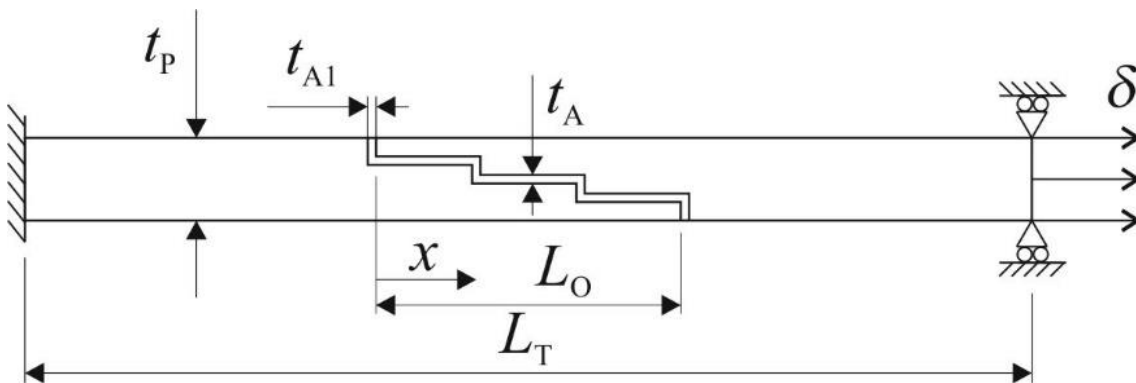


Figura 77 – Esquema representativo da geometria de junta em degrau e respetivas condições fronteira [76]

Na Tabela 10 definem-se os parâmetros de cota presentes na Figura 77 para as 4 configurações de junta contempladas no presente estudo.

Tabela 10 – Parâmetros usados na geometria de junta [76]

Parâmetro	Valor
Número de degraus ( $N$ )	3
Espessura do substrato ( $t_p$ )	3 mm
Espessura de adesivo longitudinal ao carregamento ( $t_A$ )	0,2 mm
Espessura de adesivo transversal ao carregamento ( $t_{A1}$ )	0,2 mm
Comprimento de sobreposição ( $L_0$ )	12,5; 25; 37,5 e 50 mm
Comprimento total do provete ( $L_T$ )	170 mm

### 3.1.3 Processo de fabrico

Nesta secção descreve-se o processo de fabrico das juntas em degrau estudadas nesta dissertação, contemplando as seguintes etapas:

- Corte dos substratos;
- Maquinagem dos degraus;
- Preparação superficial dos substratos (após maquinagem);
- Preparação dos adesivos (mistura dos componentes);
- Colagem das juntas e cura dos adesivos;
- Acabamento pós-cura das juntas.

#### ○ Corte dos substratos

A primeira etapa do processo de fabrico da junta consistiu no corte em comprimento dos substratos usados na sua construção a partir de um perfil retangular extrudido da liga de alumínio AW 6082-T651.

Conforme mencionado anteriormente, neste trabalho foi prevista a realização de 5 provetes por adesivo e valor de  $L_0$  de forma a garantir uma amostragem satisfatória para aferições pós-experimentais. Na Tabela 11 estão apresentados os comprimentos de corte definidos em função de  $L_0$ .

Tabela 11 – Comprimento de corte dos substratos [76]

Comprimento de sobreposição – $L_0$ (mm)	Comprimento Substrato (mm)
12,5	91,25
25,0	97,5
37,5	103,75
50,0	110

### ○ Maquinagem dos degraus

A segunda etapa do fabrico das juntas consistiu na maquinagem dos degraus numa das extremidades dos substratos previamente cortados. Esta operação foi realizada na oficina mecânica do ISEP, na fresadora universal Gambin<sup>SA</sup> modelo 1m (Figura 78), cujos parâmetros de trabalho se encontram definidos na Tabela 12.



Figura 78 – Maquinagem dos degraus na Fresadora GambinSA modelo 1m [76]

Tabela 12 – Parâmetros de maquinagem (operação fresagem) [76]

Parâmetro	Valor
Avanço	100 mm/min
Velocidade rotação	1120 rot/min

Na Figura 79 apresenta-se um esquema de cotagem genérico para maquinagem dos degraus nos substratos em função de  $L_0$ .

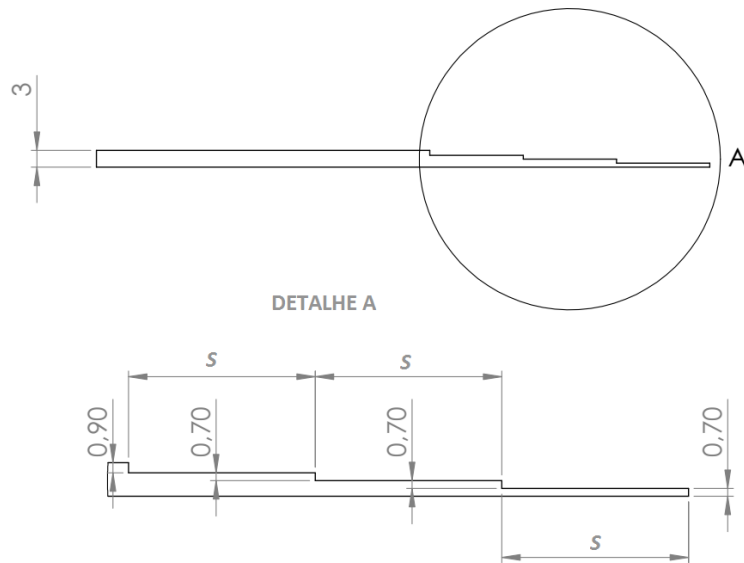


Figura 79 – Esquema de cotagem para efeito de maquinagem [76]

#### ○ Preparação superficial dos substratos

A terceira etapa do procedimento de fabrico das juntas consiste na preparação superficial dos substratos. Inicialmente nesta fase submete-se a região de colagem dos substratos a uma limpeza superficial cuidada pelo processo passivo mecânico de lixagem (Figura 80). Este método de preparação tem com o propósito a remoção das *weak boundary layers* (i.e., óxidos e revestimentos), que apresentam fraca coesão ou que não aderem ao substrato ou ao adesivo com resistência suficiente, que comprometem a resistência da junta. No final do processo, pretende-se a remoção das *weak layers* bem como alteração da topografia da superfície dos substratos, conferindo uma rugosidade uniforme. Esta etapa não só proporciona uma melhor molhagem das superfícies por parte do adesivo, como também contribui para uma melhor ancoragem do mesmo.

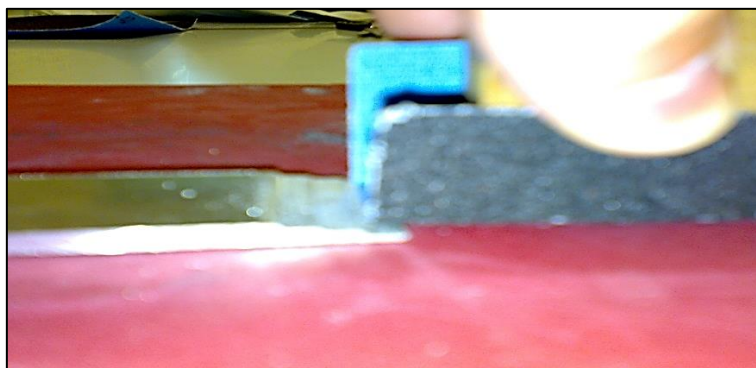


Figura 80 – Pormenor da operação de lixagem da superfície do substrato [76]

Posteriormente ao tratamento dos substratos por processo de lixagem, estes são sujeitos a uma limpeza manual com acetona, que tem como objetivo remover partículas

solidas deixadas pelo processo de preparação superficial precedente, bem como eliminar vestígios oleosos das superfícies que vão receber adesivo.

Na Figura 81 apresenta-se um conjunto de substratos após conclusão do processo de tratamento superficial.



Figura 81 – Aspeto da superfície dos substratos após tratamento superficial [76]

#### ○ **Preparação dos adesivos**

De uma forma geral, no processo de produção das juntas a divergência de procedimento deve-se ao modo de preparação, aplicação e cura dos adesivos em estudo: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

De facto, para cada adesivo são seguidas técnicas de preparação diferentes devido às suas características, as quais se passam a definir para cada adesivo:

Para o Araldite® AV138, a preparação da mistura consiste numa proporção de resina/endurecedor de 10 g/4 g. Esta mistura é mexida manualmente até à homogeneização do adesivo. Após a mistura do adesivo, este é aplicado manualmente com recurso a uma espátula sobre a região de colagem.

Por outro lado, a aplicação do adesivo Araldite® 2015, fornecido em bisnagas 50 ml + 50 ml, é realizado através do uso de uma pistola manual de pressão onde a mistura dos componentes é assegurada pelo bico de mistura da própria embalagem. A aplicação na zona de colagem é feita seguindo padrão de zig-zag (Figura 82).

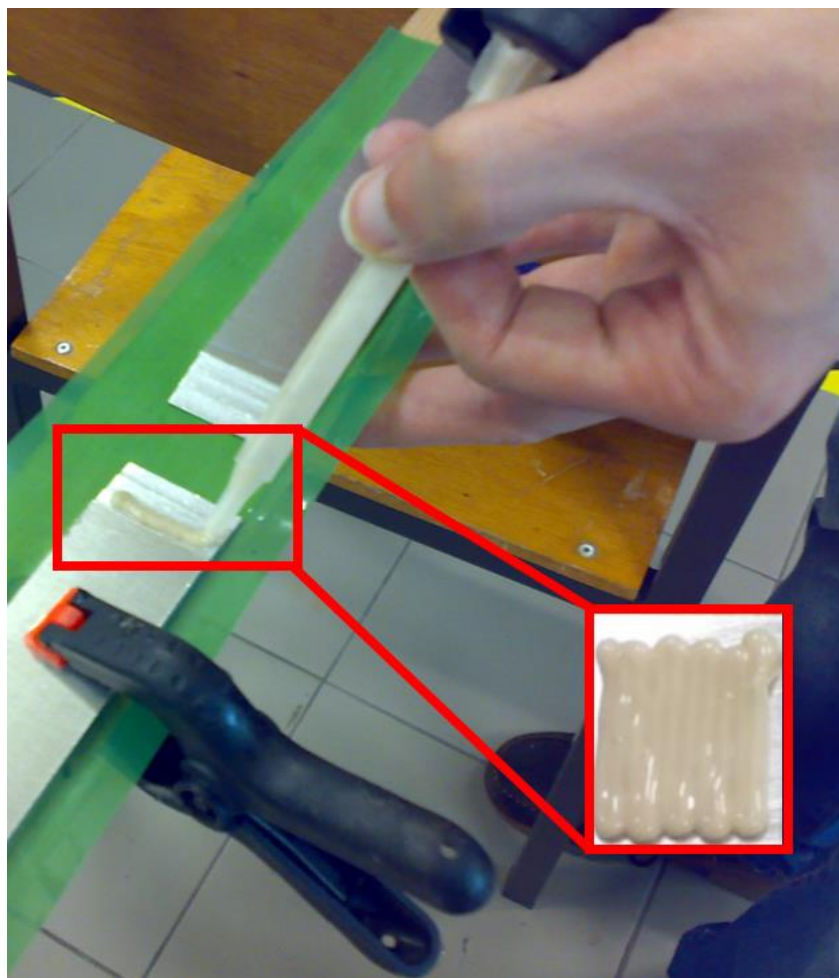


Figura 82 – Pormenor de aplicação adesivo Araldite® 2015 [76]

O Sikaforce® 7752 L60 é um adesivo constituído por dois componentes, fornecido em duas embalagens separadas, uma de resina e outra de endurecedor (Figura 75). A mistura de resina/endurecedor é feita na razão de peso de 5 g/1 g, respetivamente. Após a pesagem e colocação dos componentes num recipiente para a mistura, deve-se proceder à mesma manualmente, durante tempo suficiente para se obter uma mistura homogénea do adesivo. A sua aplicação é realizada através da utilização de uma espátula, que permite espalhar o adesivo sobre a região de colagem.

#### ○ Colagem das juntas e cura dos adesivos

Seguidamente ao trabalho preparatório dos substratos e dos adesivos, procedeu-se à colagem das juntas. Inicialmente começou-se por dispor os substratos sobre régua de madeira com aplicação entre estes de uma folha de politetrafluoretileno (PTFE), que evita a colagem entre ambos.

Os adesivos são aplicados na região de colagem de um dos substratos, conforme se ilustra na Figura 82, e seguidamente procede-se à apresentação do substrato que se sobrepõe para fecho da junta. Esta operação é realizada com especial cuidado de forma

a garantir o correto posicionamento e o alinhamento longitudinal entre substratos. De modo a garantir pressão constante durante processo de cura do adesivo foram aplicados grampos na zona de colagem (Figura 83).

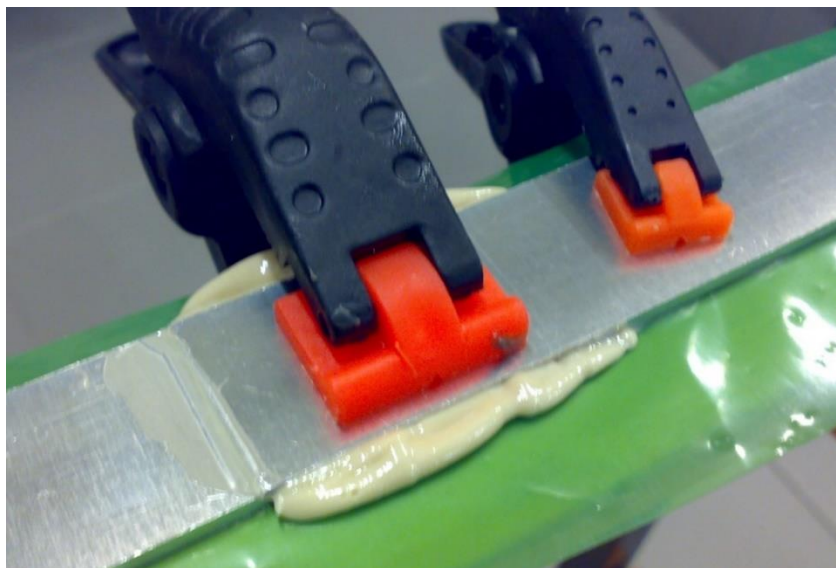


Figura 83 – Aspecto da junta após a sua montagem [76]

Pela observação da Figura 83 é constatado que, no ato de colagem da junta, o excesso de adesivo aplicado na região de colagem é expulso para os bordos dos provetes, que é necessário remover

- **Acabamento pós-cura das juntas**

Após cura total é necessário executar o acabamento final dos provetes, eliminando por completo os excessos de adesivo depositados nas arestas exteriores, que influenciam a resistência da junta em análise, que se pretende aferir com rigor.

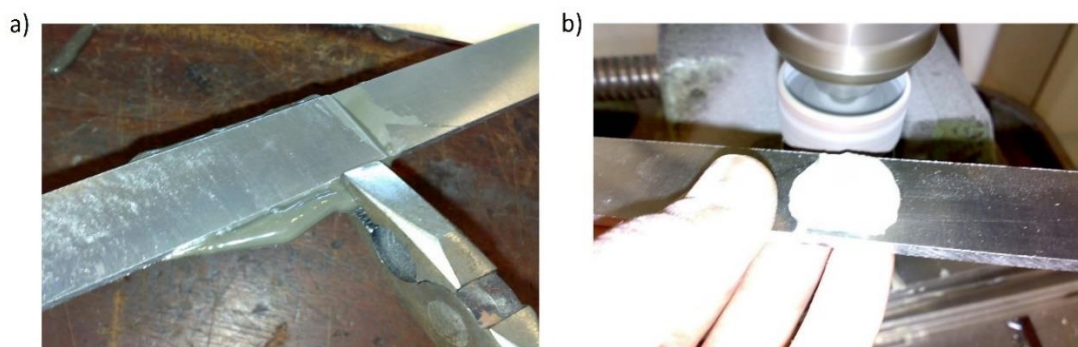


Figura 84 – Acabamentos pós cura com a) remoção dos excessos de adesivos mais salientes e b) acabamento final dos provetes com mó abrasiva [76]

Para esse efeito, recorre-se a um alicate para a remoção dos excessos de maior dimensão (Figura 84 a)) e de seguida procede-se ao acabamento por mó abrasiva (Figura 84 b)). A Figura 85 mostra o aspeto final de um provete pronto para ensaio.

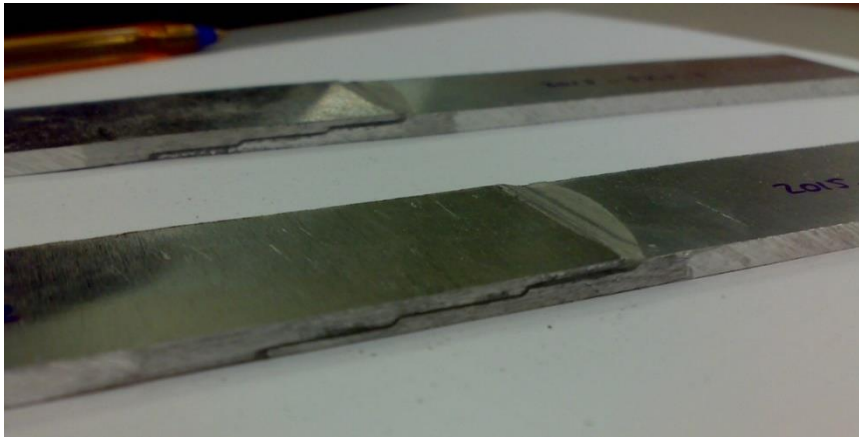


Figura 85 – Aspeto de um provete pronto a ensaiar [76]

#### 3.1.4 Ensaio das juntas

O ensaio das juntas realizou-se no laboratório de ensaios tecnológicos do ISEP na máquina de ensaios de tração Shimadzu AG-X 100 (Figura 86), onde as juntas foram solicitadas à tração. A célula de carga utilizada tem capacidade de 100 kN.



Figura 86 – Máquina Shimadzu – Autograph AG-X [76]

Para realização dos ensaios foi definida uma velocidade de solitação constante de 0,5 mm/min, em que o deslocamento imposto às juntas é realizado sempre até que ocorra a rotura da ligação, ou seja, até que ocorra separação total dos aderentes.

### 3.1.5 Resultados obtidos

Após a realização dos testes experimentais é necessário que os resultados obtidos estejam organizados de forma a permitir a sua análise. Para cada adesivo e valor de  $L_0$  obtiveram-se vários gráficos representativos do comportamento dos diversos provetes ensaiados. Neste subcapítulo são analisadas as curvas  $P-\delta$ , os modos de rotura de todos os provetes ensaiados, a resistência das juntas em função de  $L_0$  e é feita a análise dos resultados.

#### 3.1.5.1 Curvas $P-\delta$

Nesta secção são apresentadas as curvas  $P-\delta$  obtidas separadamente por tipo de adesivo e valor de  $L_0$ . A Figura 87 apresenta as curvas  $P-\delta$  registadas nos ensaios dos provetes com  $L_0=12,5$  mm, ligados com o adesivo Araldite® AV138.

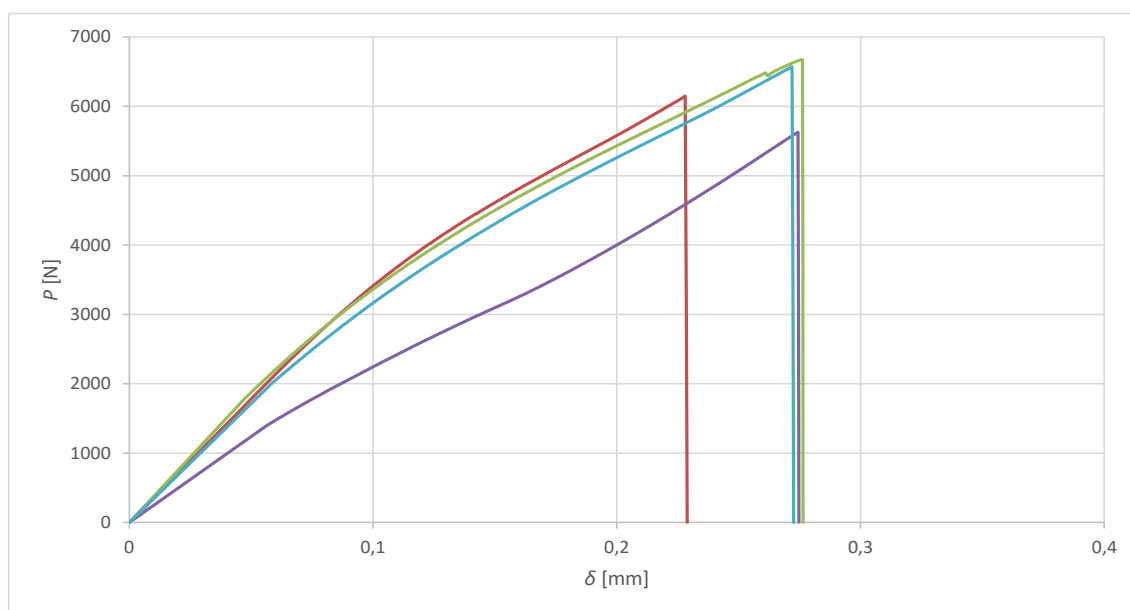


Figura 87 – Curvas  $P-\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm [76]

A partir da análise das curvas  $P-\delta$  das juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 verifica-se que existe um bom acordo entre elas, no que diz respeito ao valor de  $P_{m\acute{a}x}$ .

As juntas apresentam um comportamento elástico até que se atinja  $P_{m\acute{a}x}$ . O comportamento elástico caracteriza-se por uma evolução aproximadamente linear dos valores de  $P$  em relação a  $\delta$  até se atingir a rotura total do adesivo. Na Figura 87, as curvas  $P-\delta$  dos cinco provetes ensaiados apresentam uma variação substancial no que concerne aos deslocamentos. Suspeita-se que a má preparação das juntas e alguma

divergência na geometria dos provetes devido à maquinagem dos degraus tenha influenciado os valores de deslocamento. No entanto, verifica-se que os deslocamentos de rotura que se evidenciaram foram baixos, o que demonstra o carácter frágil do adesivo Araldite® AV138, que não permite plastificação dos aderentes de alumínio. Em conclusão, com o aumento do  $L_0$ , verifica-se o aumento dos valores de resistência das juntas, acompanhados com aumento do valor de deslocamento.

A Figura 88 representa as curvas  $P-\delta$  dos ensaios de provetes de juntas ligadas com adesivo Araldite® 2015, para o  $L_0=37,5$  mm.

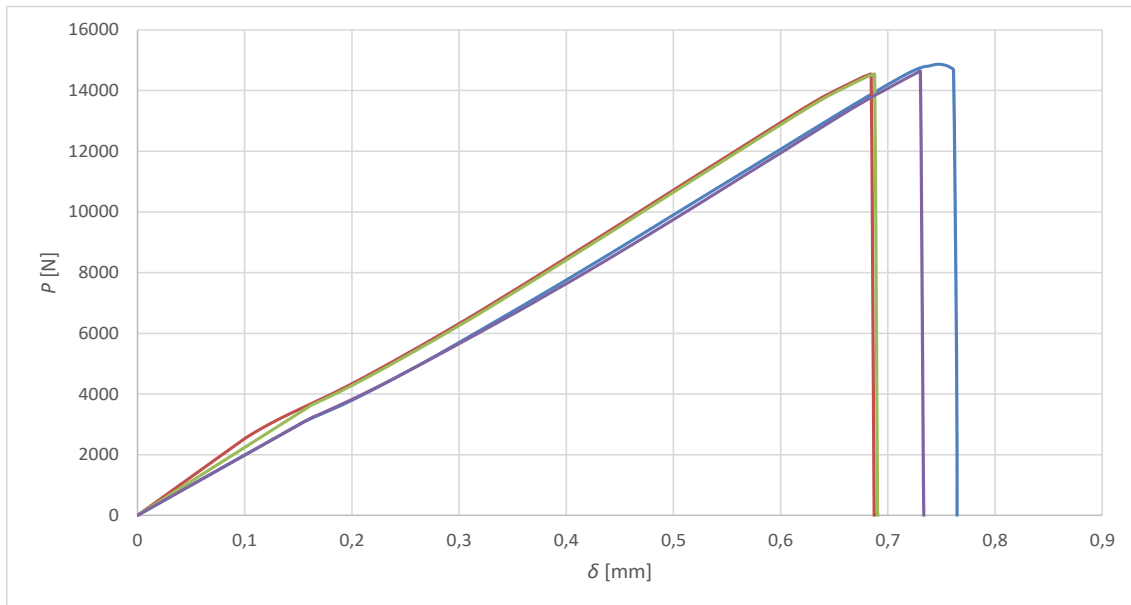


Figura 88 – Curvas  $P-\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm [76]

Tal como acontece nas curvas  $P-\delta$  registadas nas juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, também para as juntas ligadas com o Araldite® 2015 se obteve um comportamento elástico até à proximidade de  $P_{máx}$ , região em que se observa uma ligeira plastificação na curva  $P-\delta$  devido à ductilidade do adesivo. Para este caso, contrariamente ao anterior, verifica-se que houve uma variação dos deslocamentos menos significativa.

Por último, a Figura 89 mostra as curvas  $P-\delta$  das juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e com um  $L_0=50$ . Devido à menor resistência e maior ductilidade do adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se claramente a ocorrência da transição elasto-plástica do adesivo no domínio de forças atingidas nos ensaios. Após a plastificação do adesivo, as juntas comportam-se de forma praticamente linear até à rotura.

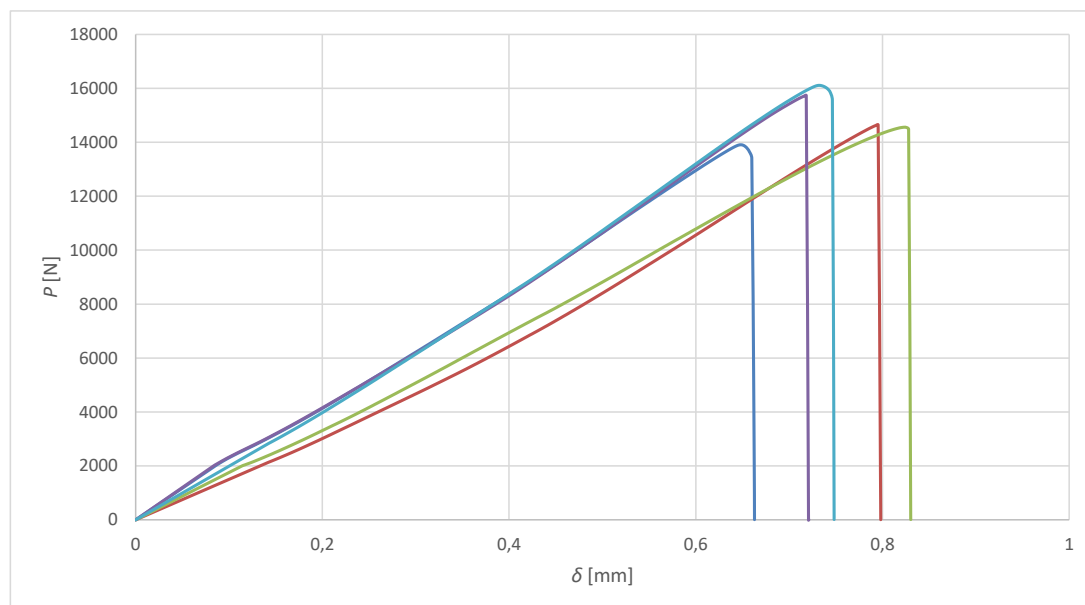


Figura 89 – Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=50$  mm [76]

### 3.1.5.2 Modos de rotura

De seguida são apresentados os modos de rotura das juntas ensaiadas, das quais foram mostradas anteriormente as suas curvas  $P$ - $\delta$ . A Figura 90 representa os modos de rotura dos provetes de juntas ligadas com Araldite® AV138, e para o  $L_0=12,5$  mm.



Figura 90 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm [76]

Pela observação da Figura 90, é possível concluir que os modos de rotura para as 5 juntas ligadas com Araldite® AV138 e com  $L_0=12,5$  mm foram semelhantes. A presença de adesivo em ambos os aderentes, representa uma rotura coesiva, o que mostra que a ligação entre o adesivo e os aderentes é mais forte do que a resistência interna do

próprio adesivo. Este modo de rotura resulta de uma boa preparação das superfícies dos aderentes

A Figura 91 mostra os modos de rotura das juntas ligadas com Araldite® 2015, e para o  $L_0=37,5$  mm.

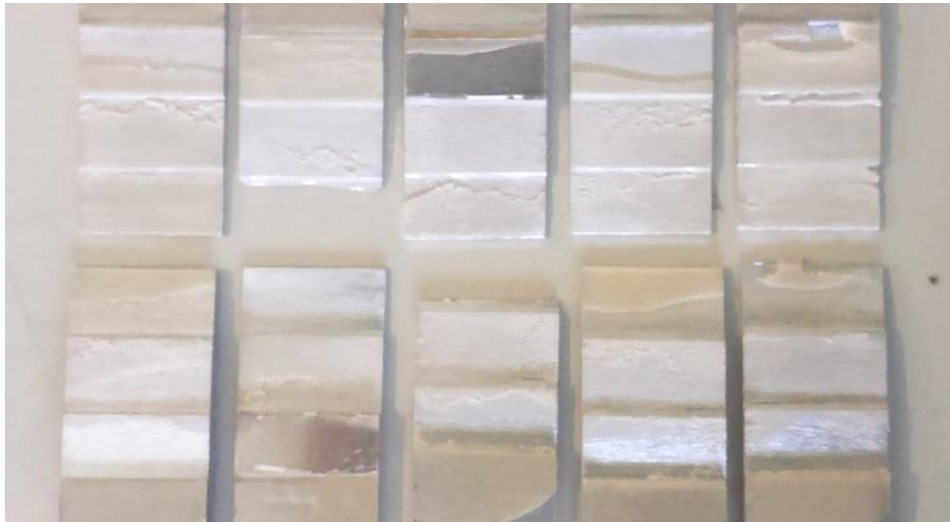


Figura 91 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm [76]

Pela análise da Figura 91 verifica-se que, tal como nas juntas ligadas com Araldite® AV138, também em juntas onde se utilizou o Araldite® 2015 obtiveram-se roturas coesivas. Nestes provetes as porções de adesivo nas superfícies de ambos os aderentes foram semelhantes, o que é indicativo de uma rotura perfeitamente coesiva.

Na Figura 92 são apresentados os modos de rotura para juntas ligadas com Sikaforce® 7752, em que o  $L_0=50$  mm.



Figura 92 – Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=50$  mm [76]

Na Figura 92 é visível a presença de adesivo em ambos os provetes que constituem a junta, dado isto pode-se concluir que também as juntas ligadas com adesivo Sikaforce® 7752 apresentam roturas coesivas. Neste caso, tal como nos modos de rotura verificados nas juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, constata-se que as porções de adesivo nas superfícies de ambos os aderentes foram semelhantes, o que é indicativo de uma rotura perfeitamente coesiva.

### 3.1.5.3 Resistência das juntas

Anteriormente apenas foram apresentados os resultados para um valor de  $L_0$  para cada um dos adesivos. Neste subcapítulo são apresentados os valores de  $P_{máx}$  obtidos experimentalmente para todos os  $L_0$  utilizados. No mínimo, foram sempre considerados 4 provetes para calcular as médias e o desvio padrão de cada configuração de junta [77].

A Figura 93 representa o valor médio e respetivo desvio padrão dos valores experimentais de  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. A partir da análise gráfica da Figura 93 é possível concluir que, independentemente do adesivo,  $P_{máx}$  aumenta com o aumento de  $L_0$ . Naturalmente pode ser inferido que o tipo de adesivo e  $L_0$  têm efeito preponderante nos valores de  $P_{máx}$ , conforme é demonstrado pelos resultados obtidos nos ensaios experimentais. Igualmente, é possível constatar que a evolução da resistência em função de  $L_0$  é aproximadamente linear independentemente do adesivo.

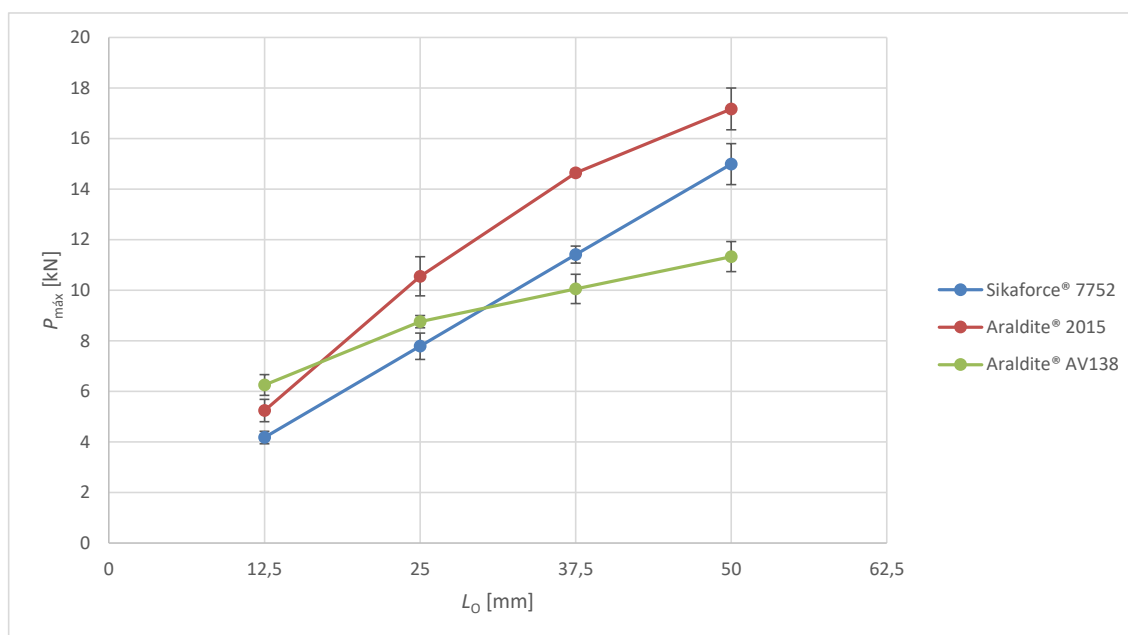


Figura 93 – Valores experimentais de  $P_{máx}$  das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 em função do valor de  $L_0$  [76]

Analisando o desempenho das juntas coladas com Araldite® AV138, verifica-se que  $P_{máx}$  aumenta com o aumento do  $L_0$ , embora o incremento de resistência não seja tão evidente em comparação com os resultados demonstrados com os restantes adesivos.

De facto, o aumento percentual de  $P_{m\acute{a}x}$  no intervalo de valores em que  $L_0$  foi testado foi de 81,2% para o Araldite® AV138, 227,6% para o Araldite® 2015 e 259,0% para o Sikaforce® 7752.

Em relação ao adesivo Araldite® AV138, o seu comportamento frágil é demonstrado pela inexistência de plastificação e redistribuição de tensões após se atingir o valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , sendo que a rotura de ligação ocorre instantaneamente. Quando se procede à comparação dos resultados experimentais de resistência por adesivo e  $L_0$ , verifica-se que o Araldite® AV138 é mais eficiente para o menor  $L_0$  (6,2 kN), enquanto os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 apresentam pior desempenho, verificando-se uma diminuição do valor de  $P_{m\acute{a}x}$  de 16,1 e 33,2%, respetivamente.

Com o aumento de  $L_0$ , os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 progressivamente aumentam o seu desempenho, apresentando melhore comportamento em relação ao adesivo Araldite® AV138. Tal facto pode-se explicar pela ocorrência de plastificação do adesivo antes de rotura da ligação, que permite a redistribuição de tensões na camada adesiva, que contribui para o aumento da resistência das juntas.

Pela observação do gráfico da Figura 93, verifica-se que o adesivo Araldite® 2015 apresenta um melhor desempenho dentro dos três adesivos em ensaio para  $L_0 \geq 25$  mm. Na realidade,  possível constatar que, para  $L_0 = 25$  mm, o adesivo Araldite® 2015 apresenta um valor de resistência de 10,6 kN, enquanto os restantes adesivos atingem menores valores de resistência. Percentualmente verifica-se uma diminuição de 16,9% no caso do Araldite® AV138 e 26,2% para o Sikaforce® 7752 no valor médio de  $P_{m\acute{a}x}$ .

Para  $L_0 = 37,5$  mm o adesivo Araldite® 2015 continua a demonstrar melhor desempenho que os restantes adesivos, com valor apurado de  $P_{m\acute{a}x} = 14,6$  kN. No que respeita aos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos para os restantes adesivos, verifica-se uma diminuição de 31,3% no caso do Araldite® AV138 e 22,1% no caso do Sikaforce® 7752.

Como seria de esperar, para  $L_0 = 50$  mm, o adesivo Araldite® 2015 exibe melhor resultado em termos de  $P_{m\acute{a}x}$  (17,2 kN), ultrapassando largamente o desempenho dos restantes adesivos em estudo.

No que diz respeito ao comportamento do adesivo Sikaforce® 7752, é importante referir que, de acordo com os resultados obtidos, este adesivo apresenta o maior aumento de resistência com o aumento de  $L_0$  dentro dos três adesivos em análise. Igualmente,  possível constar, pela análise gráfica da Figura 93 uma evolução perfeitamente linear dos valores de resistência em função  $L_0$ . Este comportamento está relacionado com a ductilidade extremamente elevada deste adesivo, que permite a plastificação completa da camada de adesivo e, conseqentemente, um valor de  $P_{m\acute{a}x}$  praticamente proporcional a  $L_0$ .

Em suma, e de acordo com resultados obtidos,  possível concluir que os melhores desempenhos são obtidos com a utilização de adesivos dúcteis para  $L_0$  maiores. Em

relação aos desvios encontrados, em termos percentuais os maiores valores registados face ao valor referência por adesivo foram de 6,6% para o adesivo Araldite® AV138 ( $L_0=12,5$  mm), 8,5% para o adesivo Araldite® 2015 ( $L_0=12,5$  mm) e 6,7% para o adesivo Sikaforce® 7752 ( $L_0=25$  mm), o que revela boa repetibilidade dos testes.

### 3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo serão apresentadas as condições da análise numérica e o respetivo MDC triangular utilizado. De seguida, são expostos os resultados do estudo das tensões  $\sigma_x$  e  $\tau_{xy}$  ao longo da camada adesiva, assim como o estudo da variável de dano dos elementos coesivos do adesivo e os modos de rotura das juntas. Relativamente ao estudo da resistência das juntas, são apresentados os valores numéricos obtidos e a respetiva análise dos mesmos. Por último, é feita uma comparação com resultados obtidos experimentalmente de juntas em degrau com aderentes de alumínio, JSS e JSD, obtido experimentalmente no trabalho de Silva [76].

#### 3.2.1 Condições da análise numérica

Para a realização da análise numérica foi escolhido o *software* Abaqus® versão 2017. O facto de este *software* se basear no método de EF e permitir a utilização de um módulo integrado de MDC que possibilita a simulação do dano e a previsão da resistência das juntas adesivas, influenciaram a sua seleção.

Para a realização dos testes numéricos através deste *software* é necessário criar um modelo correspondente às juntas em estudo. Seguidamente é apresentado detalhadamente o procedimento efetuado em cada módulo do programa para a elaboração do modelo pretendido.

- Módulo “Part”

O primeiro passo consiste em desenhar os limites exteriores da junta e de seguida, com o recurso às partições, fazer as divisões necessárias para que o modelo teórico se assemelhe ao modelo físico e sejam obtidas previsões fidedignas. O uso de partições é essencial para a criação dos degraus, das camadas de adesivo e das camadas interlaminares. Na modelação da camada de adesivo foi necessário a remoção das parcelas de adesivo localizados entre os segmentos horizontais e verticais da camada adesiva, realizada através da função *remove faces* presente no *software*. Isto deveu-se aos conflitos produzidos aquando da realização dos testes dadas as limitações de posicionamento dos elementos coesivos. Posto isto, na Figura 94 está representado o desenho gerado para a análise numérica.

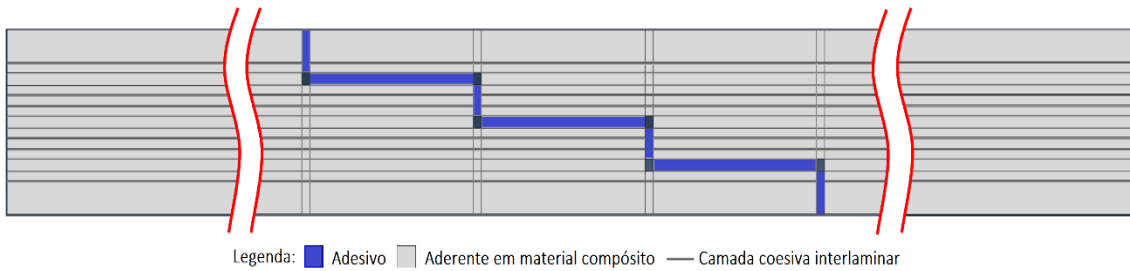


Figura 94 – Modelo da junta em degrau criado no módulo “Part” do software Abaqus®

Este módulo permite também fazer alterações à geometria dos aderentes para que sejam obtidas as juntas com os diferentes  $L_0$  abordadas no estudo. Isto é conseguido através da alteração da cotagem da dimensão “S”, apresentada na Figura 95 .

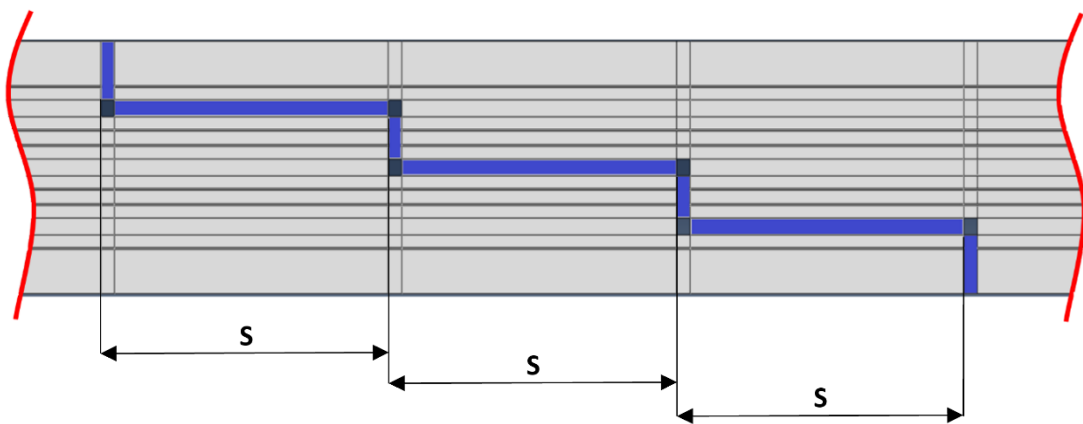


Figura 95 – Imagem do software Abaqus® que mostra a dimensão variável para alteração do  $L_0$

- Módulo “Property”

Neste modulo é possível associar diferentes propriedades a cada uma das partições criadas anteriormente. A Figura 96 mostra as propriedades elásticas introduzidas referente aos aderentes.

Elastic				
Type: Engineering Constants				
<input type="checkbox"/> Use temperature-dependent data				
Number of field variables: 0				
Moduli time scale (for viscoelasticity): Long-term				
<input type="checkbox"/> No compression				
<input type="checkbox"/> No tension				
Data				
E1	E2	E3	Nu12	Nu13
109000	8819	8819	0.342	0.342
Nu23	G12	G13	G23	
0.38	4315	4315	3200	

Figura 96 – Propriedades elásticas inseridas no Abaqus® referentes aos aderentes

De seguida foram definidas as propriedades mecânicas do adesivo, ou seja, as propriedades elásticas, o mecanismo de dano e sua evolução, como mostra a Figura 97.

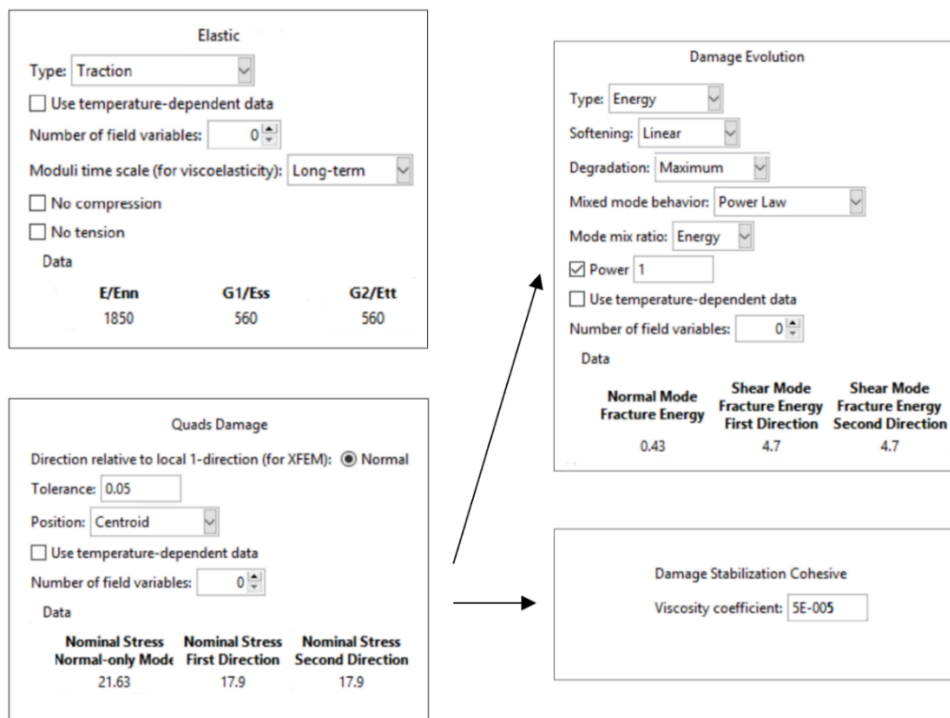


Figura 97 – Propriedades mecânicas utilizadas no módulo “Part” do Abaqus® referentes ao adesivo

Como foi anteriormente explicado, existe a necessidade de inserir camadas interlaminares próximas dos degraus. Dado isto, torna-se obrigatório parametrizar as suas propriedades mecânicas. Como a camada interlaminar tem caráter coesivo, foram inseridas as mesmas componentes no comportamento do material que na camada adesiva, em que apenas diferem os valores das propriedades apresentadas na Figura 98.

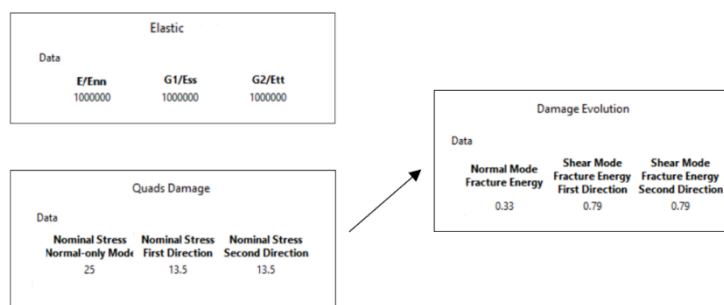


Figura 98 – Propriedades mecânicas utilizadas no módulo “Property” do Abaqus® referentes à camada interlaminar

O próximo passo, após a conclusão da configuração das propriedades dos materiais, é a atribuição de “assignment” às partições da junta. Os aderentes são considerados como uma secção do tipo sólida homogénea enquanto as camadas de adesivo e interlaminares, que são modeladas com propriedades coesivas, são consideradas secções do tipo coesivas.

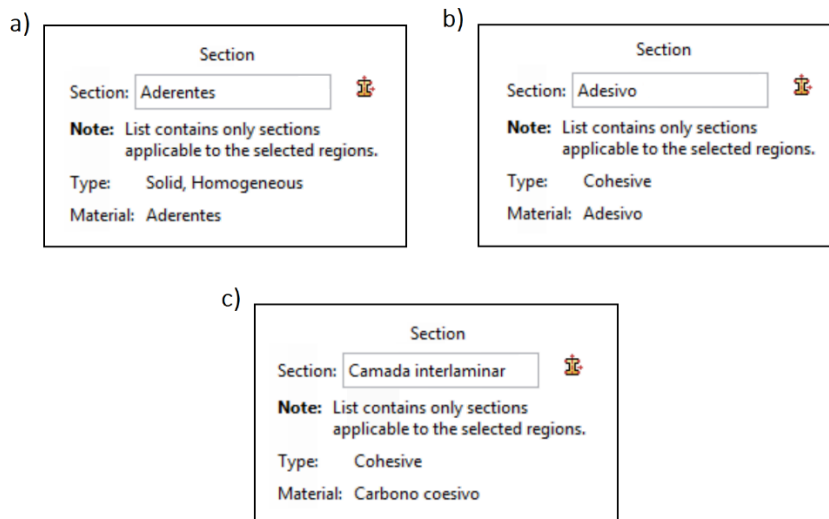


Figura 99 – Atribuição “assignment” a) aos aderentes, b) ao adesivo e c) as camadas interlaminares no módulo “Property” do Abaqus®

- Módulo “Step”

O *software* Abaqus® realiza os teste com base em incrementos, e para tal e necessário introduzir o número máximo de incrementos que o ensaio pode contar assim como o tamanho mínimo e máximo destes. A escolha da incrementação é um aspeto importante, dado que esta pode influenciar a exatidão dos resultados e também a duração dos testes. O limite máximo de incrementos deve ser extremamente elevado para que a análise não termine precocemente devido a atingir o número de incrementos permitidos. Relativamente à estipulação do tamanho mínimo, este deve ser suficientemente baixo para que o *software* não tenha problemas de convergência na zona de propagação de dano. Na Figura 100 são mencionados os valores utilizados na incrementação do presente estudo.

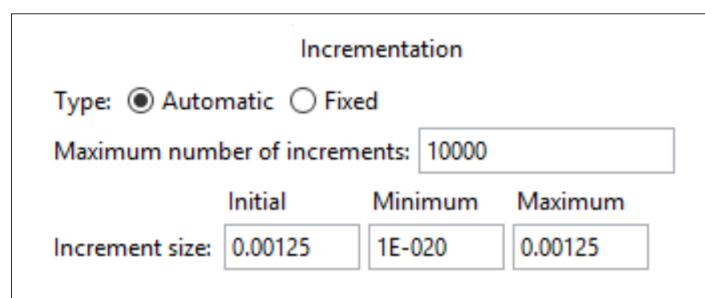


Figura 100 – Valores de incrementação utilizados no estudo definidos no *software* Abaqus®

- Módulo “Load”

Neste módulo são introduzidas as condições fronteira ao modelo. As condições definidas para este estudo consistiram no encastramento de um dos aderentes e na

aplicação de deslocamento ao outro aderente, em conjunto com restrição vertical, como apresentado na Figura 101.

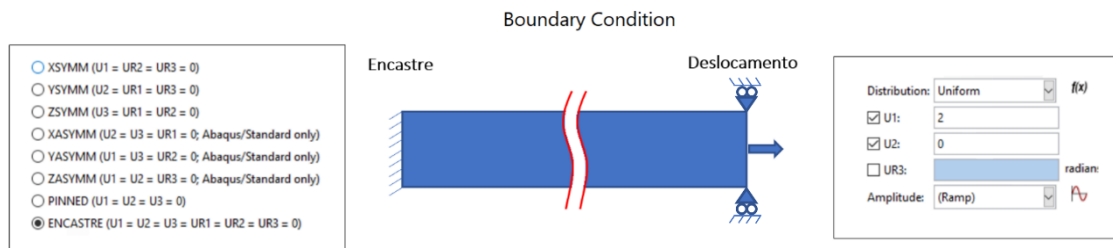


Figura 101 – Imagem referente às condições de encastramento e deslocamento da junta inseridas no *software* Abaqus®

- Módulo “Mesh”

Para efetuar os teste é necessário atribuir a malha ao modelo. Antes de estabelecer o tamanho da malha nos diferentes locais da junta, procedeu-se à definição do tipo de elemento de malha para cada componente. No caso do aderente foi definido como *Plane Strain*, enquanto as camadas interlaminares e adesivas foram definidas como *Cohesive*. Na Figura 102 estão apresentados os *Mesh Controls* utilizados para cada componente da junta.

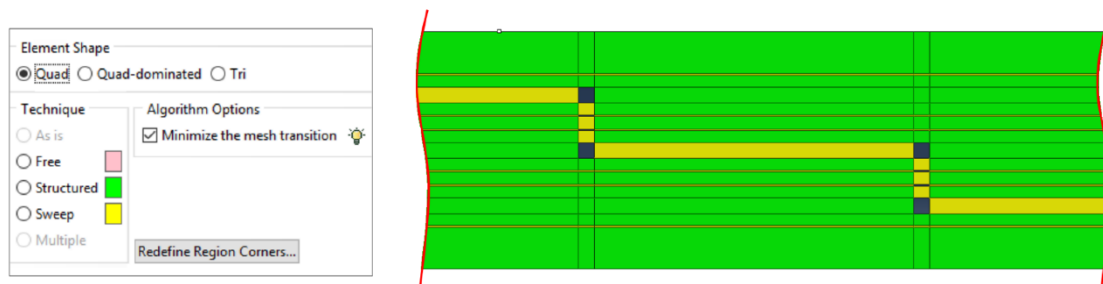


Figura 102 – Imagem referente aos *Mesh Controls* inseridos para cada componente da junta no *software* Abaqus®

Foram considerados dois tamanhos de malha diferentes, um para os modelos de propagação de dano por MDC e outro para a análise de tensões. Para o primeiro caso foi utilizado um tamanho de elementos na zona de sobreposição de  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ , enquanto para a análise de tensões foi usada uma malha mais refinada em que o tamanho na zona de sobreposição foi de  $0,02 \times 0,02 \text{ mm}^2$ . Este refinamento deve-se à intenção de capturar os grandes gradientes de tensões ao longo dessa região. Em ambos os casos, existe um refinamento crescente desde o fim da zona de sobreposição até as extremidades dos aderentes. No *software* Abaqus® isto é conseguido através da opção do *bias ratio*. Deste modo, a extremidade livre de cada substrato apresenta uma malha pouco refinada, dado que é uma zona sem interesse para o estudo em questão. Na Figura 103 estão apresentados os parâmetros definidos para o *bias ratio*, e também é

possível observar que as *seeds* apresentam maior refinamento com o aproximar da zona central da junta.

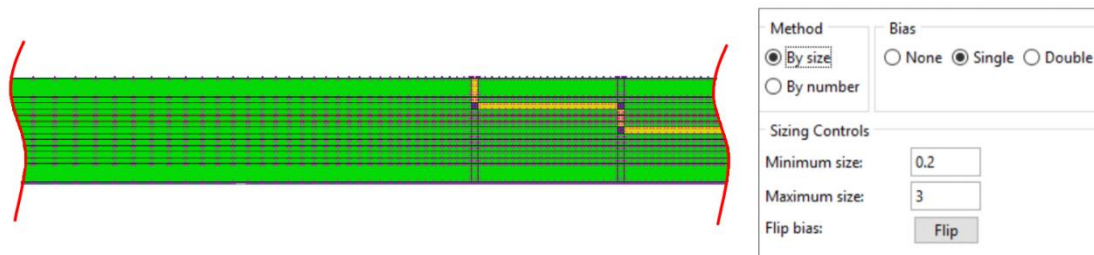


Figura 103 – Imagem das *seeds* com os parâmetros do *bias ratio* inseridos no software Abaqus®

A Figura 104 e a Figura 105 mostram as juntas com as malhas usadas para o estudo de resistência e de tensões, respetivamente, onde é visível a diferença da sua dimensão na zona central em comparação com a extremidade da junta.

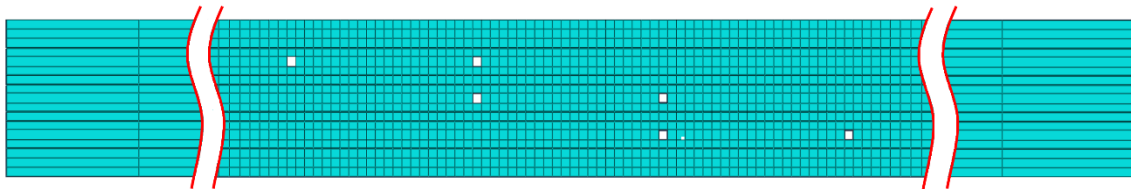


Figura 104 – Ilustração da malha usada no modelo para o estudo numérico da resistência

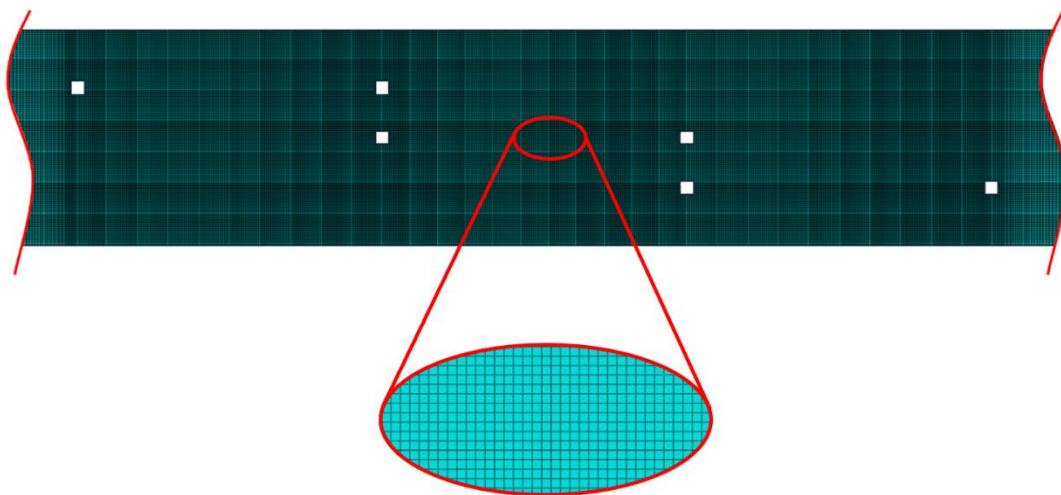


Figura 105 – Ilustração da malha usada no modelo para o estudo numérico das tensões

- Módulo “*Job*”

Este módulo é responsável pela realização dos testes. Para os modelos de propagação de dano por MDC, em que se pretende analisar a sua resistência, os testes decorrem até o estudo estar completo, de modo que ocorra a rotura total da junta. No caso dos

modelos para a análise de tensões o ensaio foi parado após o primeiro incremento, visto que se pretendia extrair as tensões no domínio elástico do carregamento.

Status: Completed

Step	Increment	Att	Severe Discon Iter	Equil Iter	Total Iter	Total Time/Freq	Step Time/LPF	Time/LPF Inc
1	813	1	0	1	1	0.995977	0.995977	0.00125
1	814	1	0	1	1	0.997227	0.997227	0.00125
1	815	1	0	1	1	0.998477	0.998477	0.00125
1	816	1	0	1	1	0.999727	0.999727	0.00125
1	817	1	0	1	1	1	1	0.000273438

Figura 106 – Imagem da janela disponível no módulo “Job” do software Abaqus® para acompanhar os incrementos realizados no ensaio numérico

- Módulo “Visualization”

O último passo do estudo no software Abaqus® é a visualização de resultados. Neste módulo é possível acompanhar o comportamento da junta ao longo do deslocamento imposto (Figura 107). O módulo “Visualization” permite também retirar os valores de força e deslocamento impostos e obter as tensões através desses.

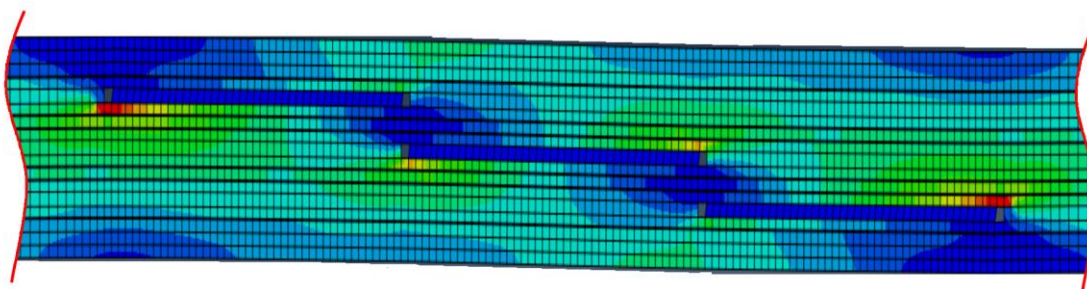


Figura 107 – Ilustração da tensão de von Mises para o incremento correspondente ao  $P_{máx}$

### 3.2.2 Modelo de dano coesivo

Como falado anteriormente, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e, subsequentemente, degradação das propriedades dos materiais até à rotura.

#### 3.2.2.1 Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular, ver Figura 108, assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva ( $\mathbf{K}$ ), que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos (subscritos  $n$  e  $s$ , respetivamente).

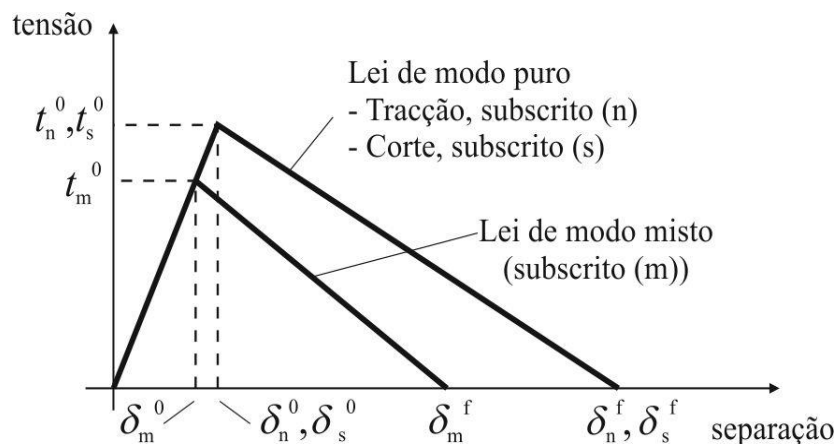


Figura 108 - MDC triangular implementado no *software* Abaqus®.

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

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por  $K_{nn} = E$ ,  $K_{ss} = G$  e  $K_{ns} = 0$ . A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões para iniciação do dano que se segue, por já ter sido provada a sua fiabilidade [82], sendo dado por:

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

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto ( $t_m^0$  na Figura 108), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma:

$$\frac{G_n}{G_n^c} + \frac{G_s}{G_s^c} = 1. \quad (3)$$

### 3.2.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte, é necessário conhecer  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_n^c$  e  $G_s^c$  (Figura 108). No passado, foram publicados alguns estudos que, por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [83, 84]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias, e propagação de fenda

tipicamente em modo misto, levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [85, 86]. Assim sendo, é necessária a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

### 3.2.2.2.1 Araldite® AV138

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138, foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [87]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaio de corte TAST para a definição de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ , respetivamente. Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de  $G_{nc}$  e  $G_{sc}$  para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com  $L_0=20$  mm), e as leis do adesivo foram estimadas de forma idêntica ao caso anterior, por ajuste das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas, com resultados bastante satisfatórios. Os valores de  $E$  e  $G$  foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST). Noutro trabalho [88], conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 13 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 13 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com uma espessura de 0,2 mm

$E$ [MPa]	4890	$G$ [MPa]	1560
$t_n^0$ [MPa]	39,45	$t_s^0$ [MPa]	30,2
$G_n^c$ [N/mm]	0,2	$G_s^c$ [N/mm]	0,38

### 3.2.2.2.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo para o Araldite® 2015 foram determinadas em trabalhos anteriores [89, 90], por um método inverso para a determinação de  $t_n^0$  e  $t_s^0$ . Nestes trabalhos é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de  $G_n^c$  e  $G_s^c$  através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de  $G_n^c$  ou  $G_s^c$  é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$ , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico

correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de  $t_n^0$  ou  $t_s^0$  é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 14 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto. Os valores de  $E$  e  $G$ , módulo de elasticidade em tensão e corte da camada de adesivo, respetivamente, foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST – *Thick adherend shear test*), respetivamente [91].

Tabela 14 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com uma espessura de 0,2 mm

$E$ [MPa]	1850	$G$ [MPa]	650
$t_n^0$ [MPa]	23,0	$t_s^0$ [MPa]	22,8
$G_n^c$ [N/mm]	0,43	$G_s^c$ [N/mm]	4,7

### 3.2.2.2.3 Sikaforce® 7752

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de  $G_s^c$  por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de  $t_s^0$  [92]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de  $t_s^0$  e  $G_s^c$  obtidos na referência [92], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efetuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tração, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de  $G_n^c$  foi obtido por ensaios de fratura DCB [93], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de  $t_n^0$  foi aproximado ao valor médio de resistência à tração de provetes maciços, ensaiados no mesmo trabalho [89]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solicitação à tração, o valor de  $t_n^0$  não tem influência digna de registo para variações de  $t_n^0$  até 25% do valor obtido por método inverso (variação nos dois sentidos) [89], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de  $E$  e  $G$  foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [93]. A Tabela 15 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752, numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 15 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com uma espessura de 0,2 mm

$E$ [MPa]	493,81	$G$ [MPa]	37,49
$t_n^0$ [MPa]	12,25	$t_s^0$ [MPa]	10,50
$G_n^c$ [N/mm]	2,36	$G_s^c$ [N/mm]	5,56

### 3.2.3 Modos de rotura numéricos

Com base na análise numérica da evolução do dano em função do valor de  $L_0$  e do tipo de adesivo usado é possível determinar o processo e o modo como se dá a rotura da junta. Na Figura 109 estão assinalados e identificados os locais preferenciais da ocorrência de dano na camada adesiva e, conseqüentemente, regiões prováveis de rotura.

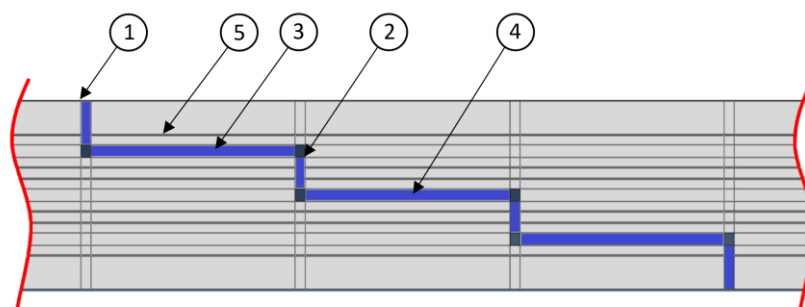


Figura 109 – Esquema referente localização e identificação das regiões preferenciais da ocorrência de rotura

Depois de um estudo da distribuição da variável de dano SDEG em todas as configurações para cada tipo de adesivo, foram registados na Tabela 16 os caminhos da rotura das várias juntas adesivas testadas (com base na identificação definida na Figura 109). Os locais de rotura separados com hífen correspondem a uma sequência e os entre parenteses retos a falhas em simultâneo.

Tabela 16 – Tabela dos modos de rotura numéricos

		12,5	25	37,5	50
AV 138		2-1-5-[3 e 4]	2-1-5-[3 e 4]	[1 e 2]-5-[3 e 4]	[1 e 2]-[5, 3 e 4]
2015	Caminho de rotura	[1 e 2]-5-[3 e 4]	1-2-5-[3 e 4]	1-2-5-[3 e 4]	1-2-5-[3 e 4]
7752		1-2-[3 e 4]	[1 e 2]-[3 e 4]	[1 e 2]-[3 e 4]	[1 e 2]-[3 e 4]

### 3.2.3.1 Araldite® AV138

No caso das juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 nos modelos com  $L_0=12,5$  e 25 mm apresentam o mesmo caminho até à rotura. O processo de fratura para juntas ligadas com este adesivo inicia-se nas transições dos degraus (2) e imediatamente a seguir nas extremidades de sobreposição (1), uma vez que os adesivos frágeis em juntas em degraus apresentam o maior pico de tensões nas transições de degraus (2). Como é possível observar na Figura 110 (a), em que mostra a variável de dano SDEG para o incremento em que é atingido o  $P_{m\acute{a}x}$ , a camada adesiva não se encontra submetida a dano contrariamente à camada interlaminar, onde se verifica a rotura. A Figura 110 (b) representa o instante em que a junta se encontra em fase de descarregamento com a falha do adesivo ao longo dos degraus (3 e 4). Dado isto, conclui-se que para  $L_0=12,5$  e 25 mm as juntas obtêm uma rotura interlaminar.

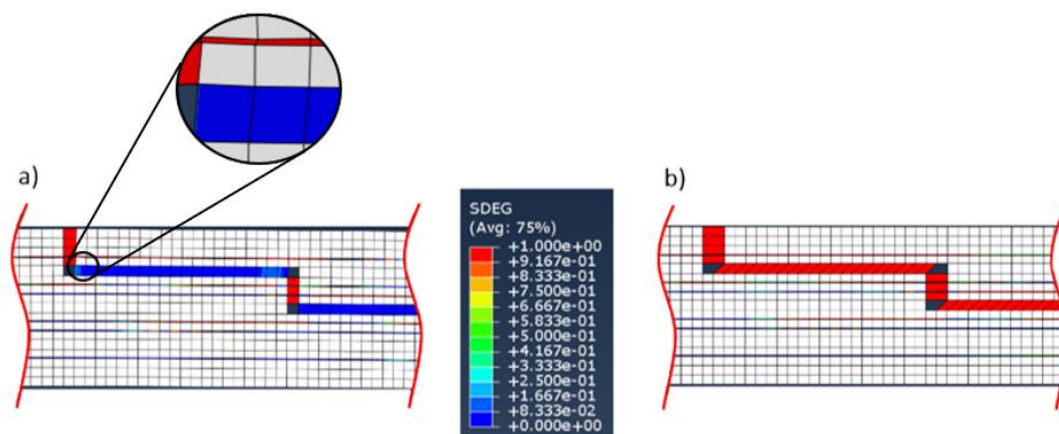


Figura 110 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante a) em que é atingido o  $P_{m\acute{a}x}$  b) em que ocorre a rotura em juntas adesivas ligadas com Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$  mm

Nos modelos com  $L_0=37,5$  e 50 mm o início da propagação do dano é semelhante às sobreposições analisadas anteriormente. Contudo, neste caso a falha nas extremidades de sobreposição (1) e nas transições dos degraus (2) ocorre no mesmo instante. Nas juntas com  $L_0=50$  mm verificou-se igualmente uma falha na camada interlaminar, mas contrariamente aos anteriores, a rotura não acontece ao longo de toda a camada adesiva. Com a observação da Figura 111 pode-se verificar que para o incremento em que é atingido o  $P_{m\acute{a}x}$  da junta, metade da camada adesiva localizada no degrau da extremidade não se encontra submetida a nenhum dano, enquanto a restante metade e o degrau central já está em fase de rotura. No local, onde o adesivo não regista valores de dano, verifica-se a rotura da camada interlaminar. Perante estes factos, pode-se afirmar que houve uma rotura interlaminar em simultâneo com um rotura adesiva.

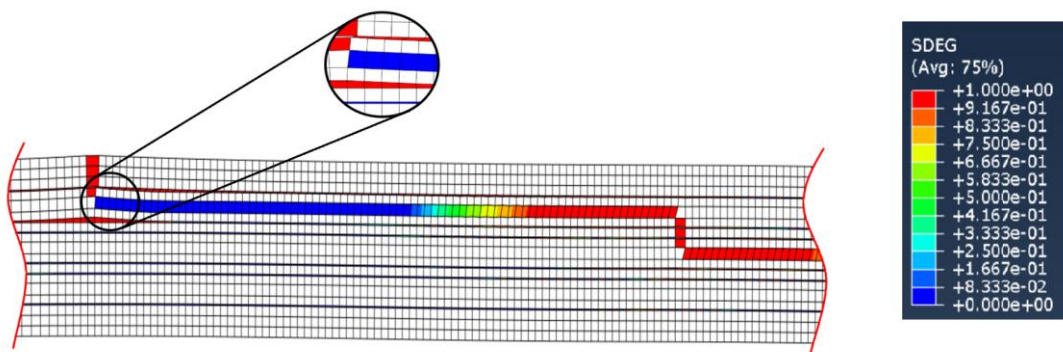


Figura 111 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que se atinge o  $P_{máx}$  das juntas adesivas ligadas com o Araldite® AV138 e  $L_0=50$  mm

### 3.2.3.2 Araldite® 2015

Em relação ao adesivo Araldite® 2015, o processo de rotura das juntas é semelhante em todas as configurações estudadas. A propagação do dano inicia-se na região (1), e de seguida propaga-se para a região (2). A Figura 112 mostra que, para o instante em que é atingido o  $P_{máx}$ , a camada adesiva apenas regista 60% do dano verificado na camada interlaminar, o que confirma a existência de uma falha na camada interlaminar.

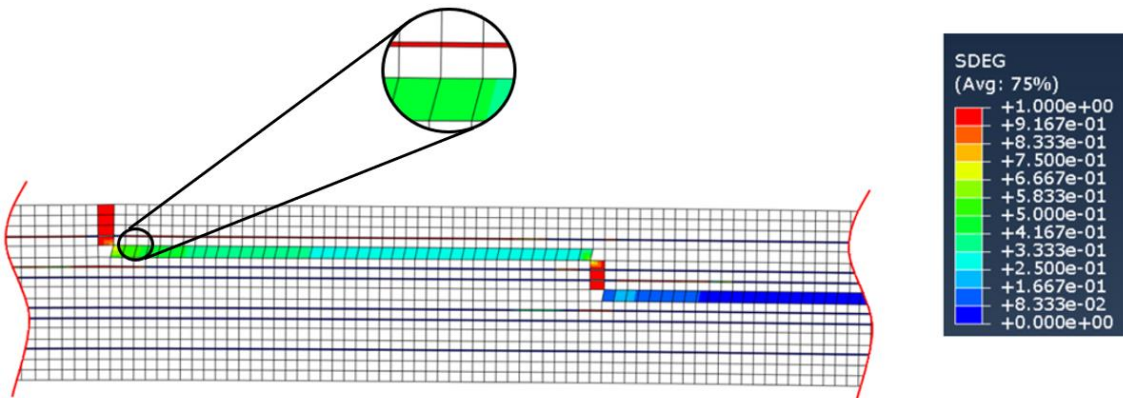


Figura 112 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que as juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm atingem o  $P_{máx}$

A Figura 113 mostra o descarregamento da junta após atingir o pico de  $P_{máx}$ , e também o instante em que se dá a rotura da camada adesiva nos degraus (3 e 4). Contudo, dado que o pico de  $P_{máx}$  foi definido pela ocorrência de falha na camada interlaminar, foram consideradas roturas interlaminares para todos os modelos de juntas analisados.

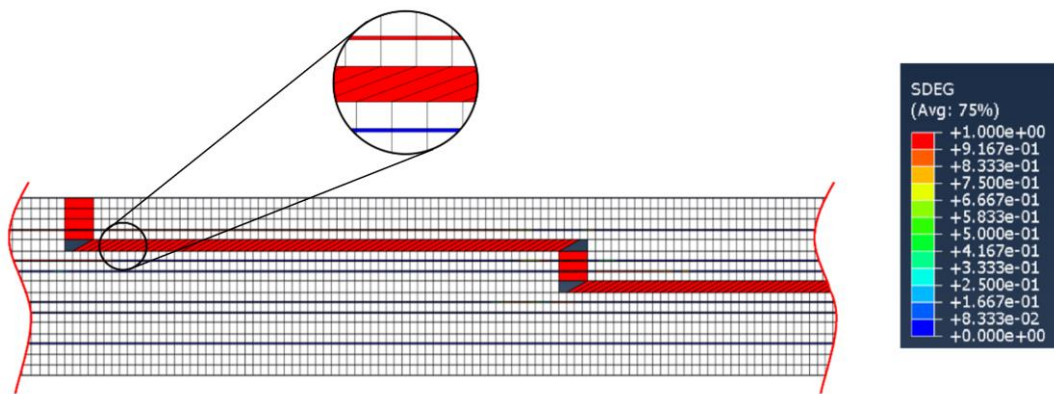


Figura 113 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Araldite® 2015 e  $L_0=37,5$  mm

### 3.2.3.3 Sikaforce® 7752

Nas juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 o processo de rotura é idêntico em todos os  $L_0$ , já que a fratura da junta tem início nas regiões (1) e (2) em simultâneo, com exceção na junta com  $L_0=12,5$  mm, em que ocorre primeiro a rotura nas extremidades de sobreposição (1) e posteriormente na transição dos degraus (2). Contrariamente aos adesivos analisados anteriormente, as juntas ligadas com o Sikaforce® 7752 não registam dano nas suas camadas interlaminares, independentemente do valor de  $L_0$ . Isto acontece uma vez que este adesivo tem propriedades mecânicas/rigidez significativamente inferiores ao restantes adesivos. A falha da junta decorre nas regiões (3) e (4) de um modo síncrono, em que se obtém uma rotura adesiva como se pode verificar através da Figura 114. Este adesivo apresenta também uma maior deformação da camada adesiva em comparação com o Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 dada a sua elevada ductilidade.

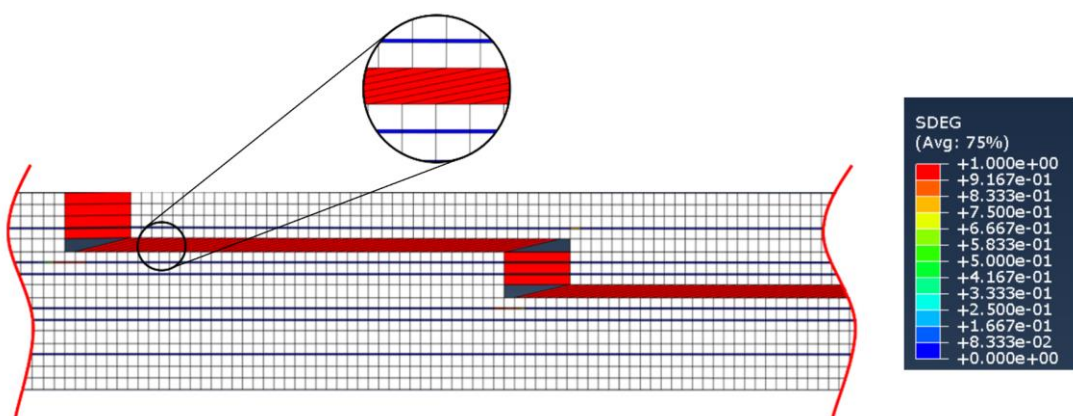


Figura 114 – Distribuição da variável de dano SDEG no instante em que ocorre a rotura das juntas adesivas ligadas com o Sikaforce® 2015 e  $L_0=25$  mm

### 3.2.4 Análise de tensões na junta

Neste capítulo é apresentada a distribuição das tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  ao longo da camada adesiva. Os gráficos representados possuem os valores das abcissas normalizados ( $x/L_0$ ), e por isso assumem valores entre  $0 \leq x/L_0 \leq 1$ . Os valores das tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  presentes ao eixo das coordenadas estão igualmente normalizados, neste caso pelas tensões médias ( $\sigma_y/\tau_{méd}$  e  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$ ).  $\tau_{méd}$  representa a média de  $\tau_{xy}$  ao longo da camada do adesivo para cada valor de  $L_0$ .

O esquema da junta apresentado na Figura 115 mostra a posição normalizada do início e do fim de cada degrau.

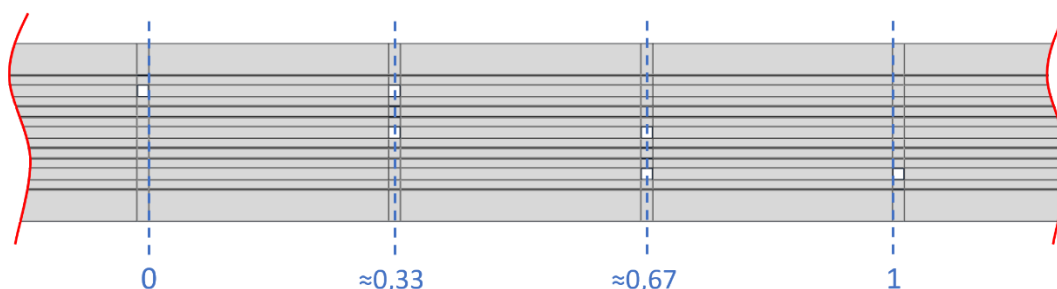


Figura 115 – Esquema do  $L_0$  normalizado no modelo numérico das juntas em degrau estudadas

O estudo das tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  na camada adesiva ao longo da zona de sobreposição é essencial para uma melhor compreensão dos resultados de  $P_{máx}$  obtidos na previsão de resistência das juntas, dado que estas tensões assumem um papel preponderante na rotura da ligação. As tensões são registadas numa fase inicial do ensaio, onde os aderentes e adesivos se encontram no domínio elástico.

#### 3.2.4.1 Tensões de arrancamento

No estudo da tensões  $\sigma_y$  realizado foram registados os diversos valores de  $\sigma_y/\tau_{méd}$  ao longo de  $x/L_0$ , para os vários tamanhos de sobreposição utilizados. Os gráficos da tensões  $\sigma_y$ , obtidos numericamente, estão representados desde a Figura 116 ate à Figura 118 e correspondem aos adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

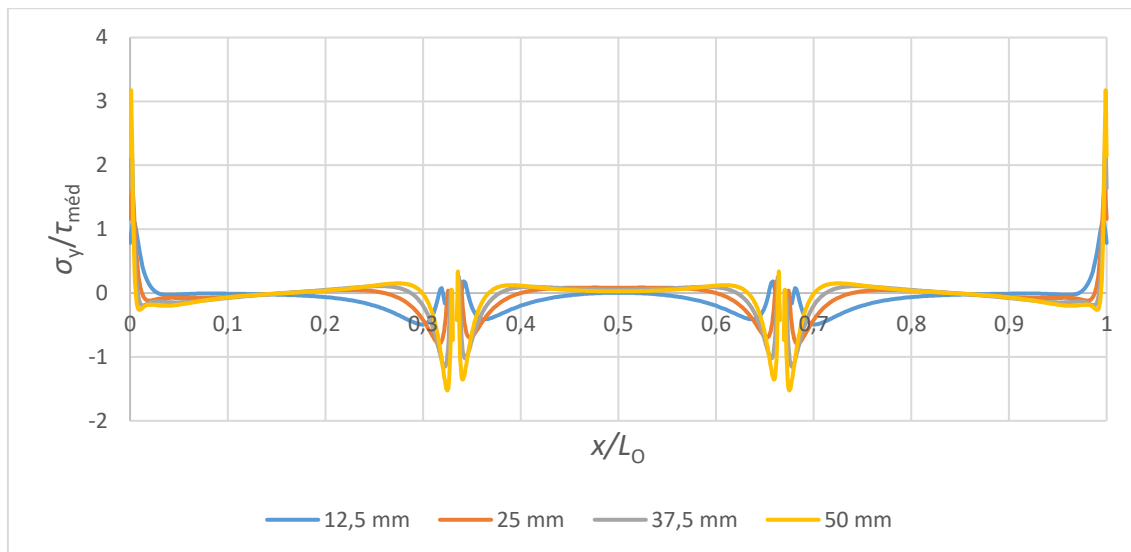


Figura 116 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de  $L_0$ .

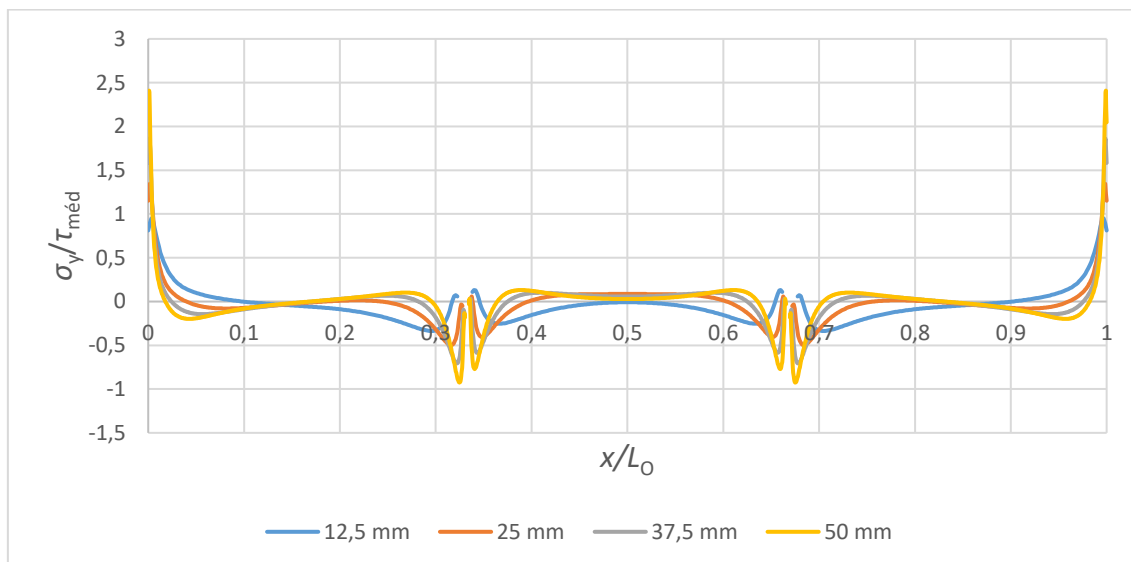


Figura 117 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de  $L_0$ .

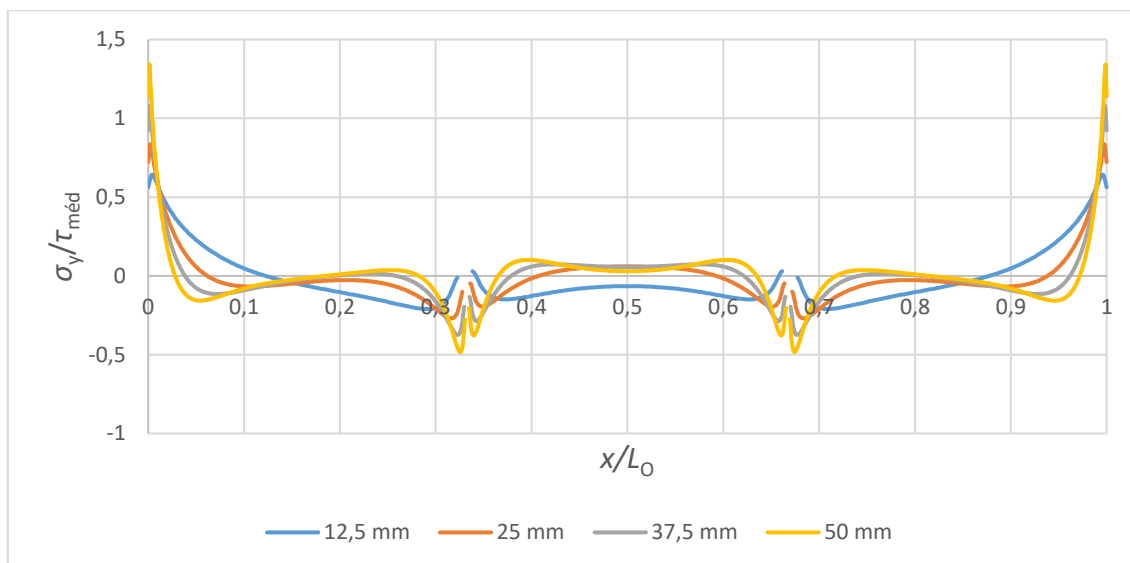


Figura 118 – Distribuição de tensões  $\sigma_y$  a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de  $L_0$ .

Com a análise da distribuição de tensões  $\sigma_y$ , pode-se verificar que na zona central dos degraus a tensão  $\sigma_y$  apresenta valores bastante inferiores à tensão  $\tau_{méd}$ , para todos os  $L_0$  usados no estudo. Contudo, nas extremidades de sobreposição e nas transições de degraus foram registados picos de tensões  $\sigma_y$ . No caso das posições  $x/L_0 \approx 0$  e  $1$  (nas extremidades de sobreposição), são desenvolvidas tensões positivas em que, dependendo do valor  $L_0$ , ultrapassam a tensão  $\tau_{méd}$ . Por outro lado, nas posições  $x/L_0 \approx 0,33$  e  $0,67$  (transições de degrau) as tensões  $\sigma_y$  são de caráter compressivo e com valor abaixo da tensão  $\tau_{méd}$ , com exceção das juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, em que para  $L_0 = 37,5$  e  $50$  mm ultrapassam esse valor. O facto de se desenvolverem picos de tensões positivas nas extremidades da ligação e picos de tensões negativas na zona central de sobreposição, originadas pelo momento fletor, promove a existência do fenómeno de arrancamento nas extremidades das juntas, prejudicando a resistência da junta.

De um modo geral, os picos de tensões  $\sigma_y$ , registados nas extremidades de sobreposição e nas transições de degraus aumentam gradualmente com o incremento do  $L_0$ . Este comportamento é típico de juntas adesivas [94] e ajuda a explicar o facto de, maioritariamente, a resistência das juntas não aumentar de um forma linear com aumento do  $L_0$ .

#### 3.2.4.2 Tensões de corte

Relativamente às tensões  $\tau_{xy}$ , são apresentados desde a Figura 119 à Figura 121 os gráficos relativos à distribuição das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  em função do  $L_0$ , para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

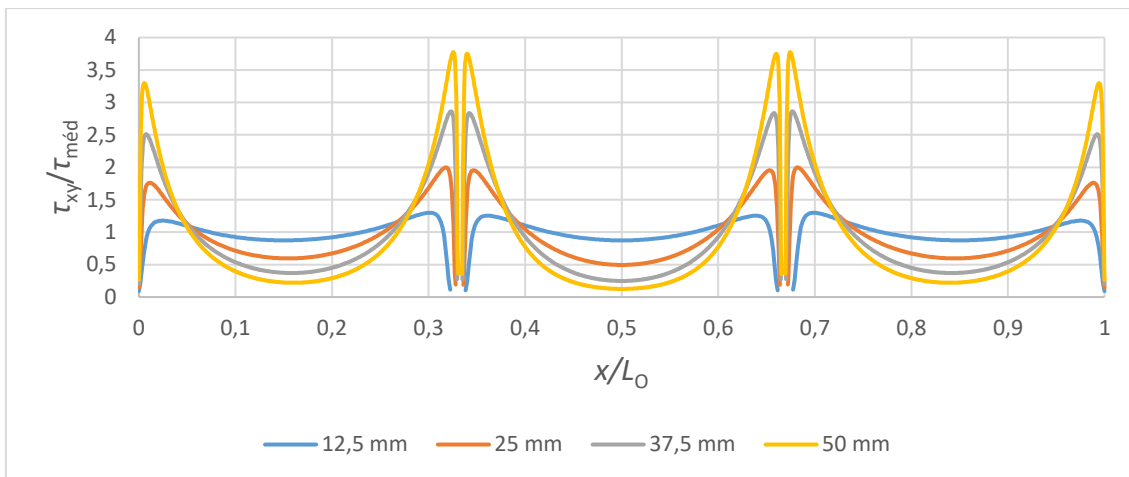


Figura 119 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo Araldite® AV138 em função de  $L_o$

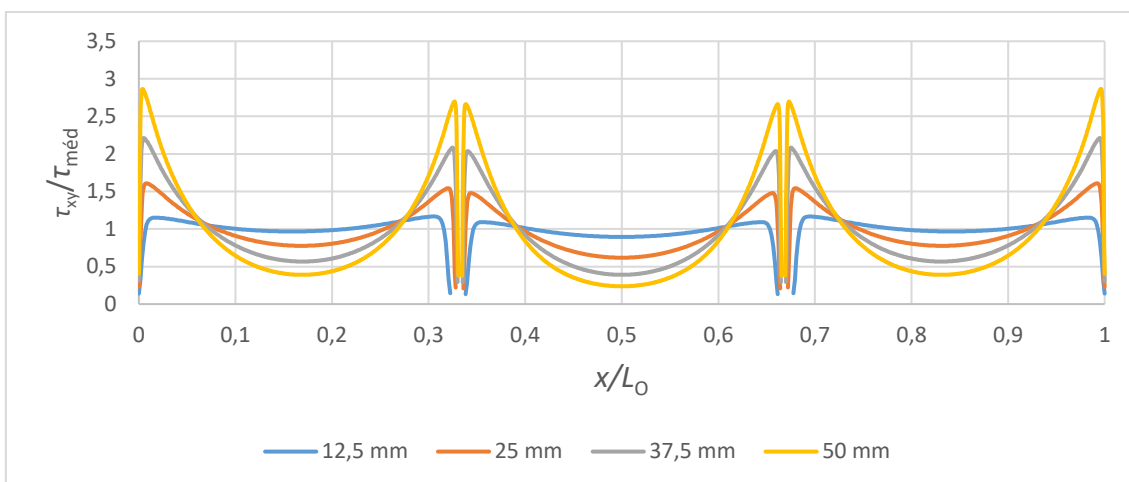


Figura 120 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo Araldite® 2015 em função de  $L_o$

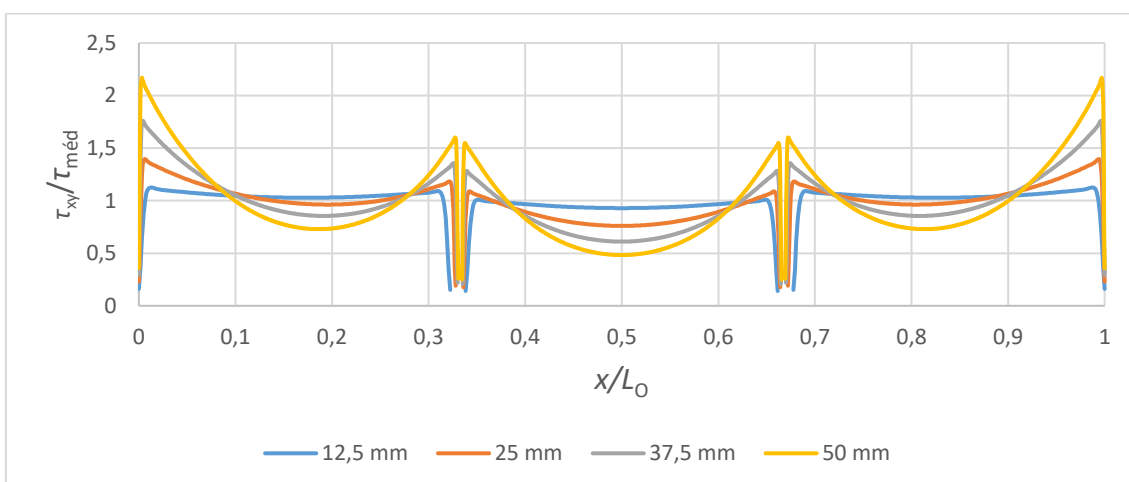


Figura 121 – Distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  a meio da espessura do adesivo Sikaforce® 7752 em função de  $L_o$

Numa análise preliminar da distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  para os três adesivos utilizados, é possível verificar que os picos registados nas extremidades de  $L_0$  e nas transições entre degraus aumentam conforme a ampliação de  $L_0$ , devido ao crescente gradiente de deformação. No caso do adesivo frágil, o Araldite® AV138, os picos de tensão  $\tau_{xy}$  nas posições  $x/L_0 \approx 0,33$  e  $0,67$  (transições de degrau) apresentam um valor mais elevado que nas posições  $x/L_0 \approx 0$  e  $1$  (nas extremidades de sobreposição). O oposto ocorre em juntas ligadas com adesivos dúcteis em que os picos de maior valor são registados na extremidade da sobreposição, este comportamento tem maior evidência na distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  do adesivo Sikaforce® 7752. Com a análise individual de cada degrau pode-se observar que a distribuição de corte em cada degrau é semelhante à verificada numa JSS, ou seja, picos de tensão nos extremos da ligação e tensões residuais na zona central da junta [95]. Esta distribuição deve-se ao efeito de deformação diferencial dos aderentes ao longo de  $L_0$ , dado que cada um dos aderentes se deformam longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da sobreposição. Dado isto, dois aderentes em sobreposição, com comportamentos opostos no que respeita à deformação, originam picos de tensões  $\tau_{xy}$  em ambas as extremidades de sobreposição.

Geralmente, a rotura das juntas adesivas ocorre nas extremidades de sobreposição, dado que é o local com maior concentrações das tensões  $\tau_{xy}$  e por ser uma zona favorável ao aparecimento de tensões  $\sigma_y$ . Este fenómeno não tem tanta influência em juntas ligadas com adesivos dúcteis, visto que as propriedades deste tipo de adesivos permitem a sua plastificação, ou seja, após atingir o seu limite elástico continuam a aumentar transmissão de carga até atingir o limite de ductilidade (limite plástico) [96].

### 3.2.5 Estudo da variável do dano

Neste subcapítulo é dado a conhecer o estudo da variável de dano SDEG realizado para o instante em que as juntas atingem o  $P_{m\acute{a}x}$ . Desta forma, foi analisado o estado de dano ao longo da camada adesiva e da camada interlaminar, para o incremento em que é obtido o  $P_{m\acute{a}x}$ , em função de  $L_0$  para todos os adesivos em questão.

Como foi demonstrado no ponto 3.2.3.1, em juntas ligadas com o Araldite® AV138 e com  $L_0=12,5$  e  $25$  mm, foram verificadas roturas interlaminares. O gráfico da Figura 122 mostra que no instante em que é atingido o  $P_{m\acute{a}x}$  a camada adesiva não se encontra danificada, com exceção de uns picos muito pouco significativos nas zonas de transição dos degraus.

Outro facto que comprova a existência de rotura interlaminar nas juntas mencionadas é a distribuição da variável SDEG ao longo da camada interlaminar próxima do degrau da extremidade, ou seja, para valores de  $x/L_0$  entre  $0$  e, aproximadamente,  $0,33$ . Na Figura 123 está apresentada essa distribuição, onde é possível verificar que, para juntas

com  $L_0=12,5$  e 25 mm, a camada interlaminar registam valores de dano muito próximos de 1.

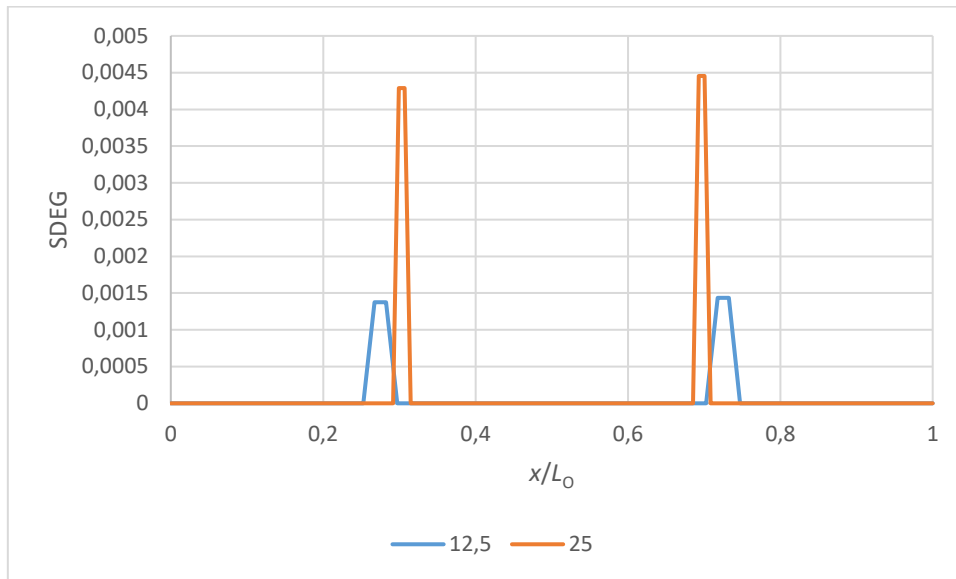


Figura 122 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com  $L_0=12,5$  e 25 mm

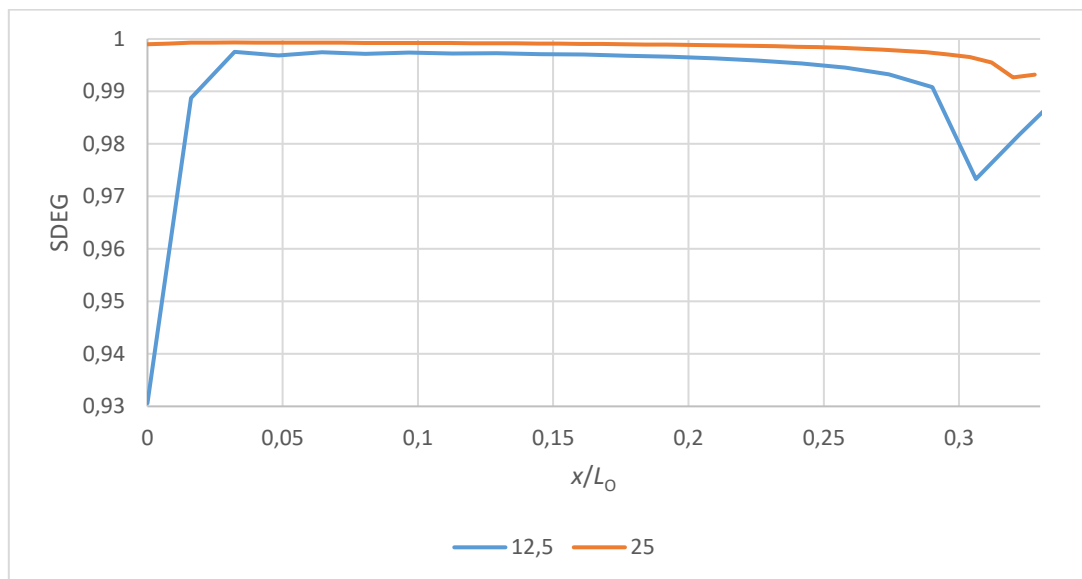


Figura 123 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com  $L_0=12,5$  e 25 mm

Em relação às juntas com  $L_0=37,5$  e 50 mm ligadas com o mesmo adesivo foi registada uma rotura interlaminar e adesiva em simultâneo. Os dados do gráfico apresentado na Figura 124 confirmam a rotura do adesivo próximo das zonas de sobreposição de degrau, onde se registam valores de dano na camada adesiva de 1. Também é possível observar que o adesivo Araldite® AV138 tem um transição repentina entre os elementos

coesivos não danificados e danificados, devido à falta de capacidade deste adesivo para de plastificar.

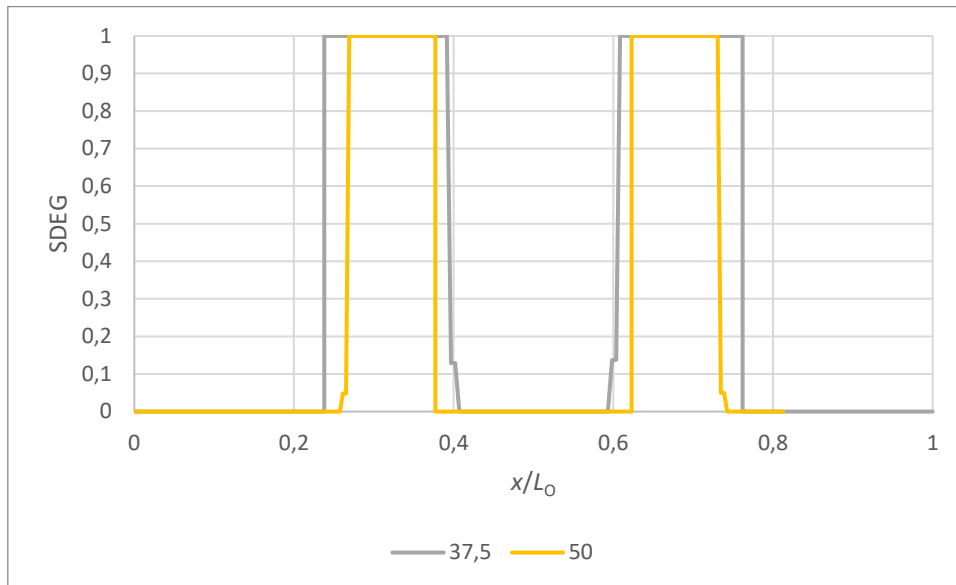


Figura 124 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com  $L_0=37,5$  e 50 mm

Por outro lado, através distribuição da variável SDEG ao longo da camada interlaminar adjacente ao degrau da extremidade, verifica-se que o dano é muito próximo de 1 em toda a sua extensão. Ainda que ligeiramente e pouco significativo, o valor do dano tem maiores valores na zona do degrau próxima da extremidade. Visto isto, o estudo da variável do dano valida a existência de uma rotura interlaminar e adesiva de uma forma simultânea.

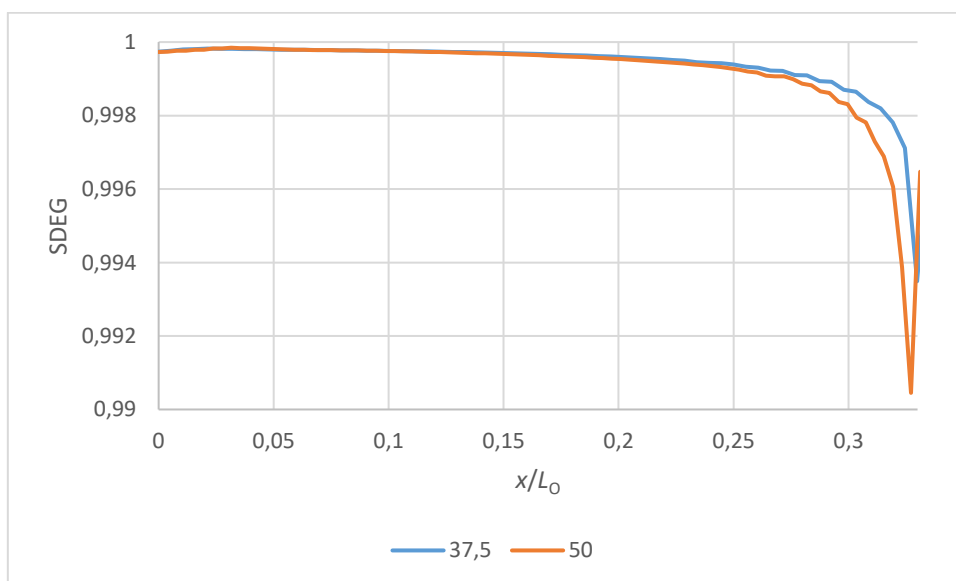


Figura 125 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e com  $L_0=37,5$  e 50 mm

Com a diminuição da rigidez do adesivo utilizado, a evolução do dano torna-se mais uniforme no que diz respeito à sua distribuição ao longo de  $L_0$ , uma vez que a camada adesiva tem capacidade de sofrer deformações plásticas antes da ocorrência da rotura total da junta.

O fenómeno enunciado pode ser observado na Figura 126, onde estão representadas as curvas da distribuição da variável de dano SDEG, ao longo da camada adesiva, em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 para cada  $L_0$ , registadas no incremento em que é atingido o  $P_{m\acute{a}x}$ . Neste caso pode-se verificar que apenas existe uma ligeira variação do dano imposto ao adesivo localizado na face dos degraus das extremidades de sobreposição, comprovando a uniformização do dano pela camada adesivo. Em contrapartida, no degrau interior é de notar a ausência de dano na sua região central devido às baixas tensões desenvolvidas neste local.

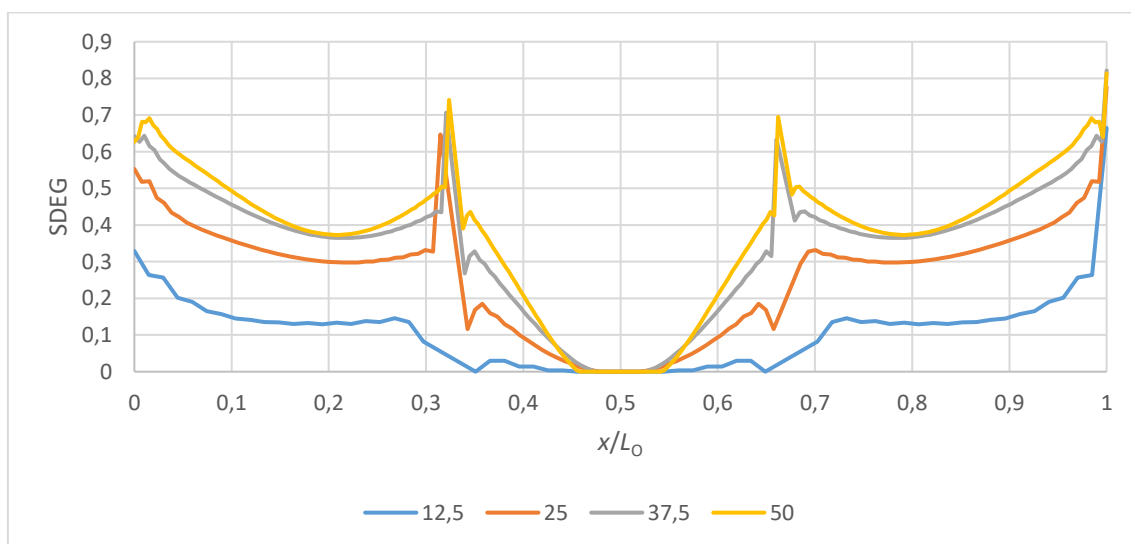


Figura 126 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do  $L_0$

Para além de se obter uma melhor distribuição do dano para este adesivo registam-se, igualmente ao adesivo Araldite® AV138, roturas interlaminares. A Figura 127 mostra que, independentemente do  $L_0$  da juntas em análise, o dano presente na camada interlaminar próxima do degrau da extremidade apresenta valores muito próximos de 1. Tal como no adesivo Araldite® AV138, este estudo comprova os modos de rotura analisados no ponto 3.2.3.2 para o adesivo Araldite® 2015, ou seja, roturas interlaminares para todos os valores de  $L_0$ .

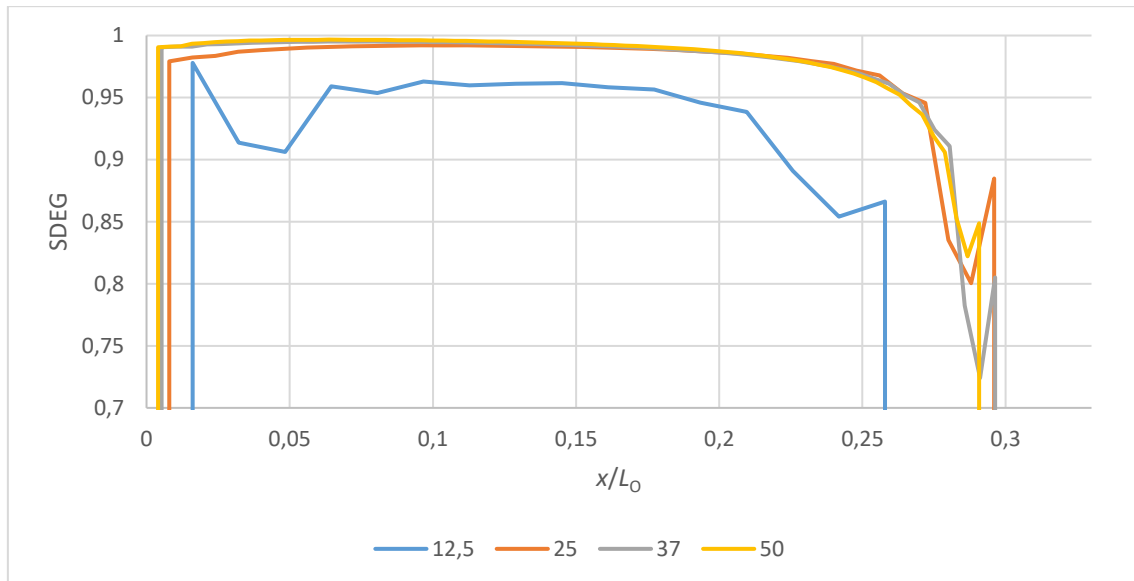


Figura 127 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de  $P_{máx}$  em juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 em função do  $L_0$

Dado que o adesivo Sikaforce® 7752 é o adesivo, entre os utilizados no estudo, com maior ductilidade, também é o que tem mais capacidade de sofrer maiores deformações plásticas. Este facto é responsável pela grande uniformização do valor de dano ao longo da camada de adesivo. Como se pode observar na Figura 128, os picos dos valores de dano registados neste adesivo são significativamente inferiores aos verificados nos restantes adesivos. As propriedades mecânicas inferiores deste adesivo resultam numa capacidade de carga mais reduzida, o que também contribui para a presença de baixos valores de dano na camada adesiva.

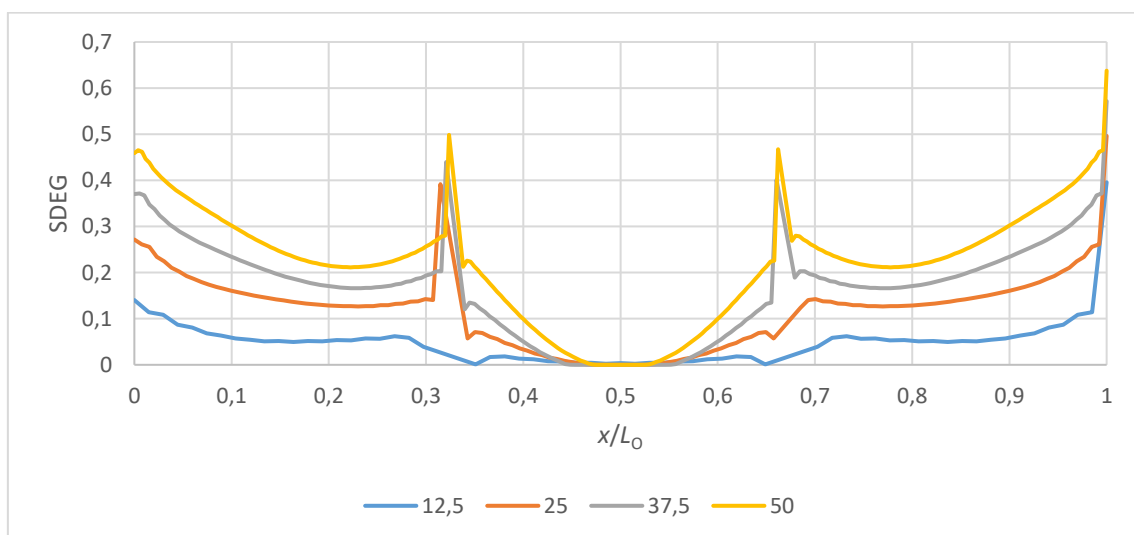


Figura 128 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada adesiva no instante de  $P_{máx}$  em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função do  $L_0$

Contrariamente aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, este adesivo não regista valores de dano na camada interlaminar, como se pode verificar no gráfico da Figura 129. Este efeito traduz-se em roturas coesivas do adesivo para todas as juntas ligadas com o Sikaforce® 7752, independentemente do valor de  $L_0$ , tal como foi explicado no ponto 3.2.3.3.

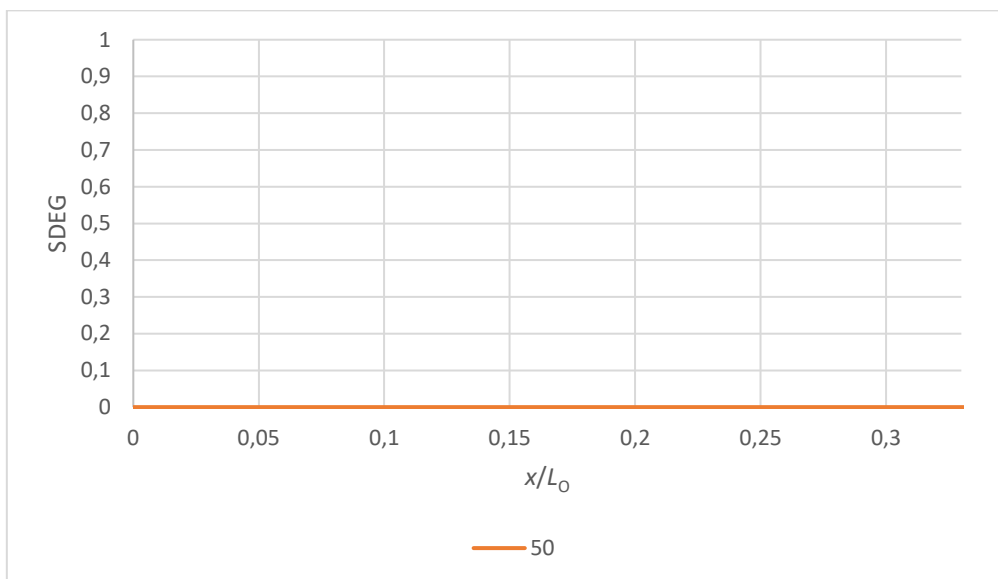


Figura 129 – Distribuição da variável de dano SDEG ao longo da camada interlaminar no instante de  $P_{m\acute{a}x}$  em juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e com  $L_0=50$

### 3.2.6 Previsão da resistência

Seguidamente são apresentadas as curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente através da previsão de resistência pelo MDC, para cada um dos valores de  $L_0$  das juntas estudadas. A evolução dos valores de  $P_{m\acute{a}x}$  com o aumento do  $L_0$  também é analisada neste subcapítulo.

As curvas  $P-\delta$  numéricas das juntas adesivas ligadas com Araldite® AV138, para os respetivos valores de  $L_0$ , estão representadas na Figura 130. Pela análise do gráfico pode-se concluir que as juntas apresentam uma rotura típica de adesivos rígidos, ou seja, uma rotura frágil, uma vez que não apresentam deformação plástica após atingir  $P_{m\acute{a}x}$ . Também é possível verificar que, para todos os  $L_0$ , as juntas apresentam uma evolução linear semelhante durante a deformação elástica.

No que diz respeito ao aumento da resistência da junta com o alongamento do  $L_0$ , foi registado um aumento percentual de 59,4, 52,6 e 39,4% da capacidade de carga entre as juntas com  $L_0=12,5$  e 25 mm, 25 e 37,5 mm e 37,5 e 50 mm, respetivamente. Com a análise dos dados apresentados é perceptível uma diminuição da percentagem a que a resistência aumenta a cada intervalo de  $L_0$ . Este facto é explicado pela distribuição de tensões ao longo da camada adesiva. Como o adesivo Araldite® AV138 tem

propriedades de rigidez elevadas, apresenta grandes concentrações de tensões nas extremidades de sobreposição e nas transições de degraus. A presença destes picos de tensões é típica em juntas adesivas ligadas com adesivos frágeis. Com a análise do gráfico da Figura 119, relativo às tensões  $\tau_{xy}$ , pode-se verificar que para os intervalos  $L_0=12,5$  e 25 mm, 25 e 37,5 mm e 37,5 e 50 mm, têm um aumento percentual de 53,9, 66,3 e 70,2%, respetivamente. Quanto às tensões  $\sigma_y$  (Figura 116), estas sofrem um aumento semelhante às tensões  $\tau_{xy}$ , em que para os mesmos intervalos registam um aumento em 49,9, 65,0 e 67,3%, respetivamente. O aumento das tensões  $\tau_{xy}$  e das tensões  $\sigma_y$ , entre os valores  $L_0$ , provocam a redução do aumento percentual da resistência a cada intervalo de sobreposição.

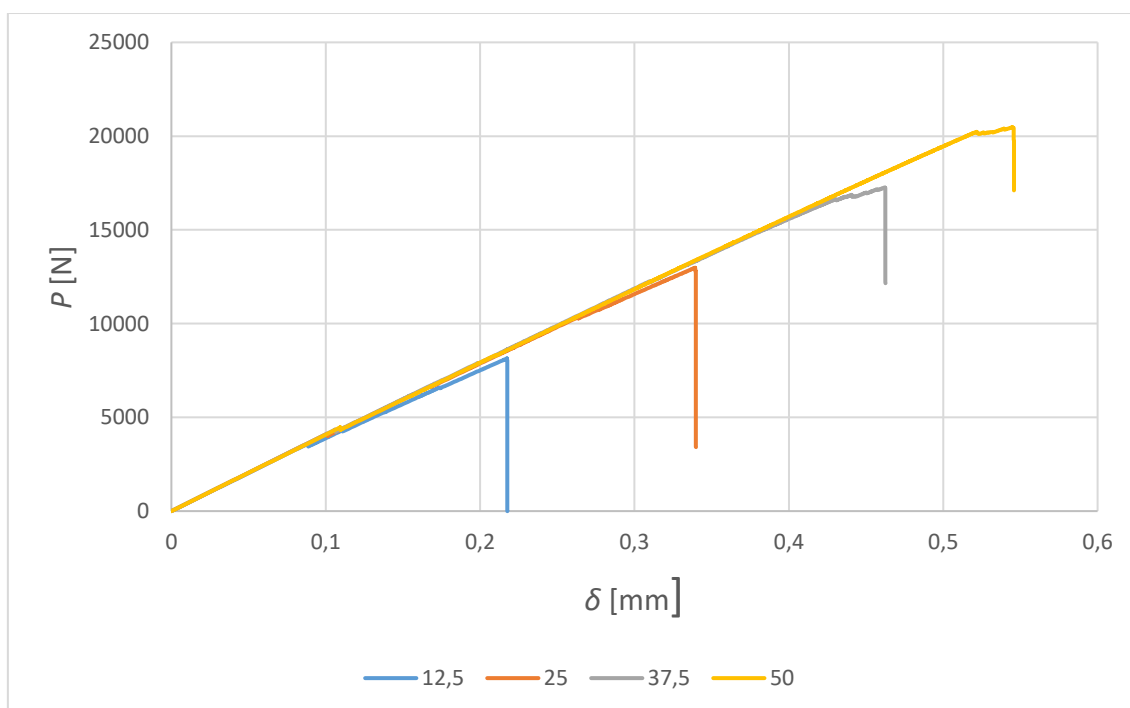


Figura 130 – Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas de juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 e  $L_0=12,5$ , 25, 37,5 e 50 mm

Relativamente às juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015, a Figura 131 apresenta as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numericamente, para todos os valores de  $L_0$  considerados no estudo.

Este adesivo possui valores das propriedades de rigidez e de deformação intermédios em relação aos adesivos Araldite® AV138 e Sikaforce® 7752 (comparação entre a Tabela 7, Tabela 8 e Tabela 9), este facto é comprovado pela forma a que se dá a rotura da junta, dado que apresenta deformação plástica após atingir o  $P_{máx}$ .

Para este caso, o aumento percentual da resistência foi de 100,7, 99,1 e 97,7% para os intervalos  $L_0=12,5$  e 25 mm, 25 e 37,5 mm e 37,5 e 50 mm, respetivamente. É de notar que neste adesivo a diferença do aumento percentual da resistência apenas diminui 3,0% entre o primeiro e último intervalo de  $L_0$  enunciados, valor significativamente

inferior ao registado para o adesivo Araldite® AV138, onde se obteve uma diferença de -20,0%.

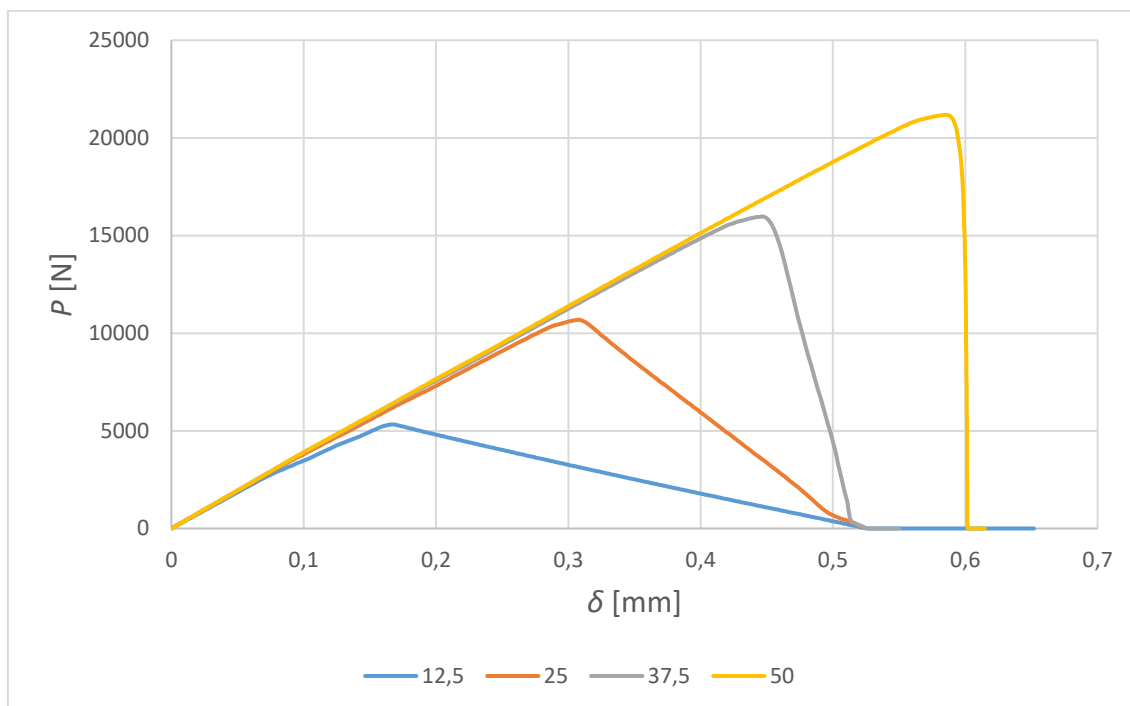


Figura 131 – Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas de juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015 e  $L_0=12,5, 25, 37,5$  e  $50$  mm

Contrariamente ao adesivo Araldite® AV138, a distribuição das tensões desenvolvidas nas juntas ligadas com Araldite® 2015, é uma das razões para que haja uma diminuição da taxa de aumento de resistência muito reduzida a cada intervalo de  $L_0$ . Uma vez que o adesivo Araldite® 2015 tem propriedades de rigidez menores que o adesivo Araldite® AV138, apresenta uma melhor distribuição de tensões ao longo da camada adesiva. Em consequência disso, apresenta aumentos percentuais de tensões a cada intervalo de  $L_0$  inferiores em comparação com o adesivo frágil testado. Este facto resulta numa diminuição de 24,1% do pico máximo para juntas com  $L_0=50$  mm ligadas com Araldite® 2015, relativamente ao Araldite® AV138. Com isto é possível concluir que, para além do Araldite® 2015 ter menores propriedades mecânicas, apresenta melhor relação entre o aumento de resistência e o aumento de  $L_0$ , uma vez que para  $L_0=50$  mm atinge um valor de  $P_{\text{máx}}$  superior.

O Sikaforce® 7752 é o adesivo mais dúctil e flexível usado no estudo, o que leva a um registo de grande deformação plástica na zona da camada adesiva. Este facto pode ser observado na Figura 132, onde estão representadas graficamente as curvas  $P$ - $\delta$  resultantes do trabalho numérico realizado de juntas em degrau, para os valores de  $L_0=12,5, 25, 37,5$  e  $50$  mm abordados na presente dissertação.

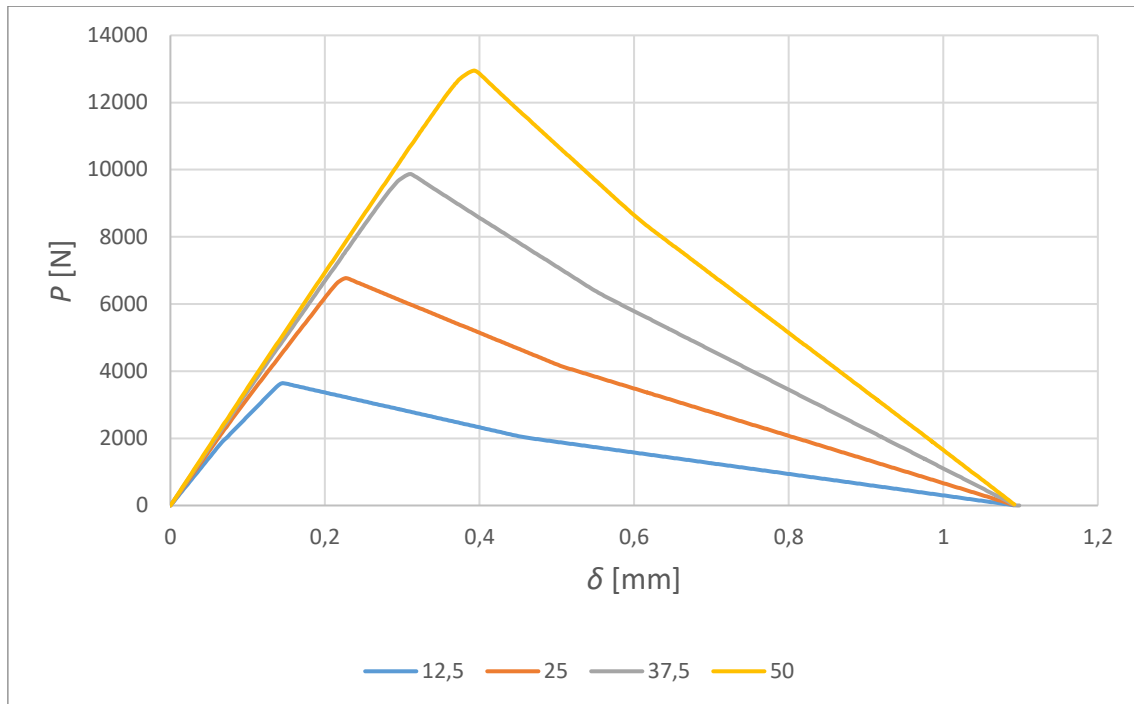


Figura 132 – Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas de juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 e  $L_0=12,5, 25, 37,5$  e  $50$  mm

Dado que as propriedades mecânicas deste adesivo são bastante inferiores aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, também a resistência das juntas apresenta valores significativamente menores. Em média, o adesivo Sikaforce® 7752 regista valores de  $P_{m\acute{a}x}$  inferiores em 46,2% comparativamente ao adesivo Araldite® AV138 e inferiores em 35,8% em relação ao Araldite® 2015.

No que diz respeito à evolução da resistência das juntas fabricadas com o adesivo Sikaforce® 7752 com o aumento de  $L_0$ , verifica-se que entre os valores de  $L_0=12,5$  e  $25$  mm,  $25$  e  $37,5$  mm e  $37,5$  e  $50$  mm há um aumento de 85,8, 84,9 e 84,7%, respetivamente, do valor de  $P_{m\acute{a}x}$  registado. Quando comparados estes resultados com os do adesivo Araldite® 2015 observa-se que o Sikaforce® 7752 tem um menor aumento percentual para os intervalos definidos, e apresenta uma diferença entre eles de apenas 1,1%, face à diferença de 3,0% obtida para o adesivo Araldite® 2015. O facto deste adesivo suportar reduzidas cargas e a rotura ser puramente adesiva, ou seja, não se verificam valores de dano SDEG na camada interlaminar, contribui para uma diferença tão diminuta entre o aumento de resistência nos vários intervalos de  $L_0$ .

Em relação aos três adesivos utilizados, as juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 são as que apresentam menores aumentos das tensões, a nível percentual, para cada um dos  $L_0$ . Isto deve-se a capacidade de uniformização das tensões ao longo da camada adesiva, como é típico em adesivos de grande ductilidade. Os reduzidos aumentos de, em média, 27,0, 35,0 e 38,6% das tensões nos intervalos  $L_0=12,5$  e  $25$  mm,  $25$  e  $37,5$  mm e  $37,5$  e  $50$  mm, constituem outro dos motivos para que o aumento da resistência

seja praticamente constante em todos os  $L_0$  analisados. Em comparação com os restantes adesivos, o Sikaforce® 7752 apresenta picos de tensões de valores inferiores em 49,5 e 33,4% em relação aos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, respetivamente, o que é demonstrativo da sua elevada ductilidade.

Para resumir e comparar a resistência das juntas ligadas com os vários adesivos, são apresentados na Figura 133 os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos numericamente para cada adesivo em função de  $L_0$ . É possível observar que o adesivo Sikaforce® 7752 regista uma resistência significativamente inferior aos restantes adesivos para todos os valores de  $L_0$ , uma vez que também apresenta propriedades mecânicas bastantes inferiores. Para juntas com  $L_0$  igual ou inferior a 37,5 mm, o adesivo Araldite® AV138 foi o que apresentou maior resistência. Contudo, a diferença entre os valores de  $P_{m\acute{a}x}$  deste adesivo e do Araldite® 2015 regista uma redução com o aumento de  $L_0$ , e para juntas com  $L_0=50$  mm o adesivo Araldite® 2015 atinge um valor de  $P_{m\acute{a}x}$  superior. Este fenómeno deve-se à ausência de capacidade de plastificação do Araldite® AV138, que é um adesivo frágil, associado aos maiores picos de tensões para  $L_0$  elevados.

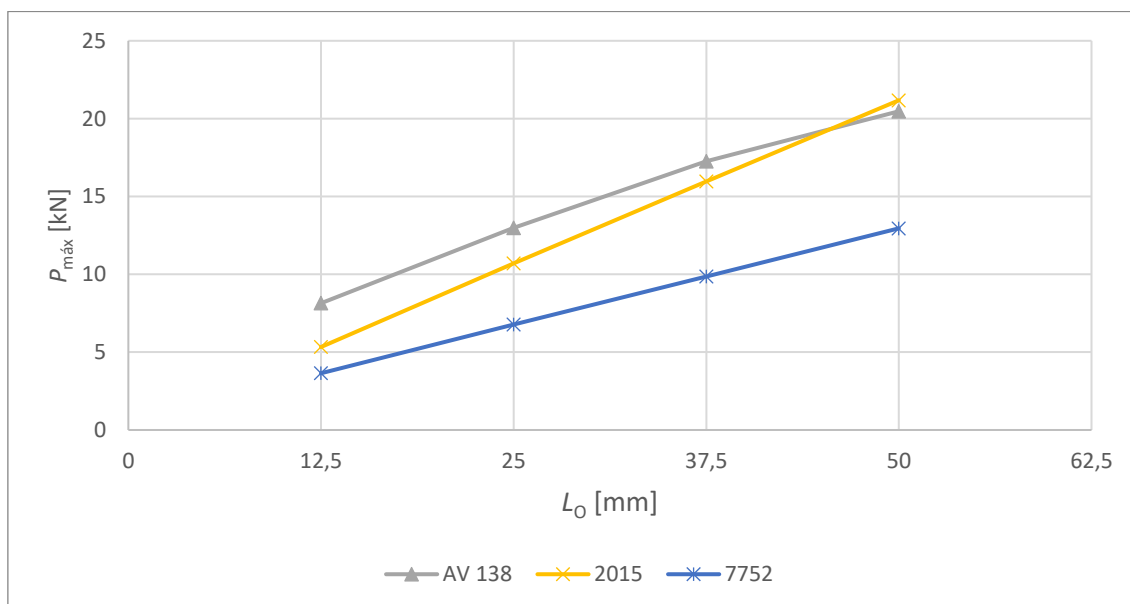


Figura 133 – Valores de  $P_{m\acute{a}x}$  obtidos numericamente para juntas em degrau em função do adesivo

### 3.2.7 Comparação com juntas em degrau com aderentes de alumínio

Neste capítulo serão analisados e comparados os valores da  $P_{m\acute{a}x}$  de juntas em degrau com aderentes em PRFC obtidos numericamente na presente dissertação, com os valores os de  $P_{m\acute{a}x}$  registados no trabalho experimental realizado por Silva [76], referente a juntas em degrau com aderentes em alumínio.

Numa análise preliminar do gráfico de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para o adesivo Araldite® AV138, apresentado na Figura 134, verifica-se as juntas fabricadas com aderentes em PRFC revelam maior resistência. Em termos percentual e para valores de para  $L_0=12,5$

mm, a junta de material compósito regista mais 30,1% de resistência comparativamente com as juntas com aderentes em alumínio. Esta diferença tende a ampliar-se com o aumento da sobreposição. Para  $L_0=50$  mm existe uma evidente e significativa melhoria da capacidade de carga da junta em PRFC, comprovado pelo facto de a diferença de  $P_{m\acute{a}x}$  alcançar os 81%.

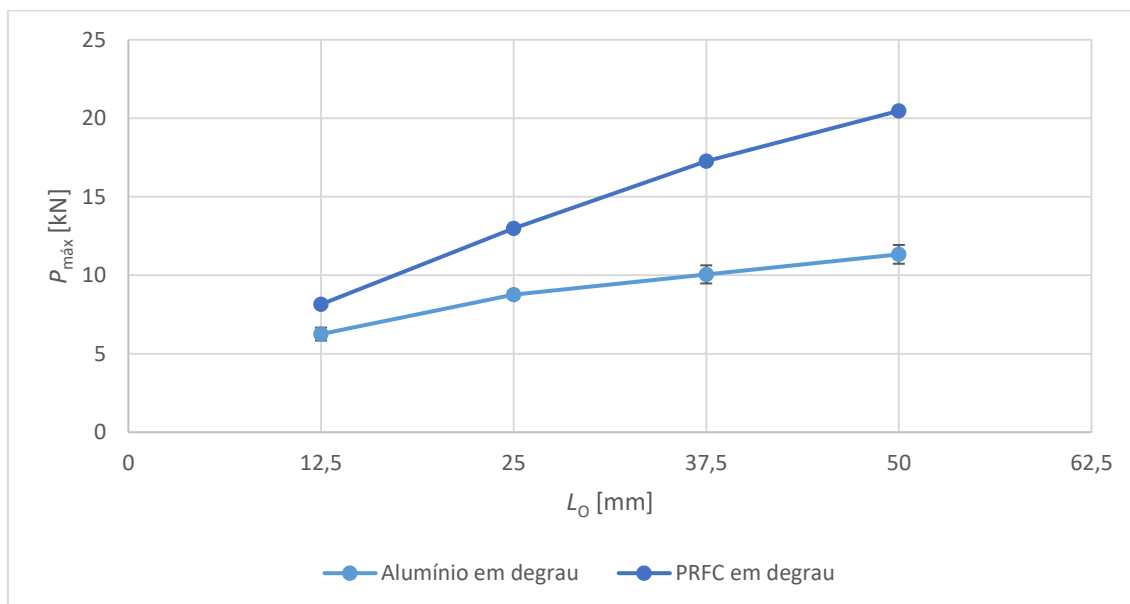


Figura 134 –  $P_{m\acute{a}x}$  em função de  $L_0$  para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138

A diferença bastante significativa registada neste adesivo deve-se aos materiais dos substratos utilizados. Uma vez que o PRFC tem uma rigidez muito superior ao alumínio, este apresenta menor taxa de deformação diferencial ao longo da sobreposição. Como o adesivo Araldite® AV138 é altamente frágil, ou seja, muito suscetível a deformações, incorre num desempenho inferior em juntas com aderentes de alumínio. Na Figura 135 pode-se observar a distribuição de tensões  $\tau_{xy}$  ao longo da camada adesiva para juntas com aderentes de alumínio e PRFC com  $L_0=50$ mm, onde se verifica que as tensões desenvolvidas nas juntas fabricadas com PRFC são significativamente inferiores às registadas nas juntas com aderentes de alumínio.

Relativamente às juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015, a Figura 136 mostra uma diferença menos expressiva entre as juntas de material compósito e alumínio, contrariamente ao adesivo analisado anteriormente. Para os valores de  $L_0=12,5$  e 25 mm as juntas apresentam capacidade de carga idêntica, em que existe apenas uma desigualdade de 1,9 e 1,1% favorável às juntas com aderentes em PRFC. A partir de  $L_0=25$  mm as juntas de material compósito seguem um comportamento linear, o que provoca uma divergência da reta relativa à  $P_{m\acute{a}x}$  da restante junta em estudo. Este desvio torna-se mais expressivo para  $L_0=50$  mm e deve-se ao facto de alumínio começar a plastificar aumentando as tensões no adesivo, o que leva a uma rotura prematura da

junta. A elevada rigidez do PRFC não permite que os aderentes se deformem, traduzindo-se numa maior rigidez para os mesmos valores de carga.

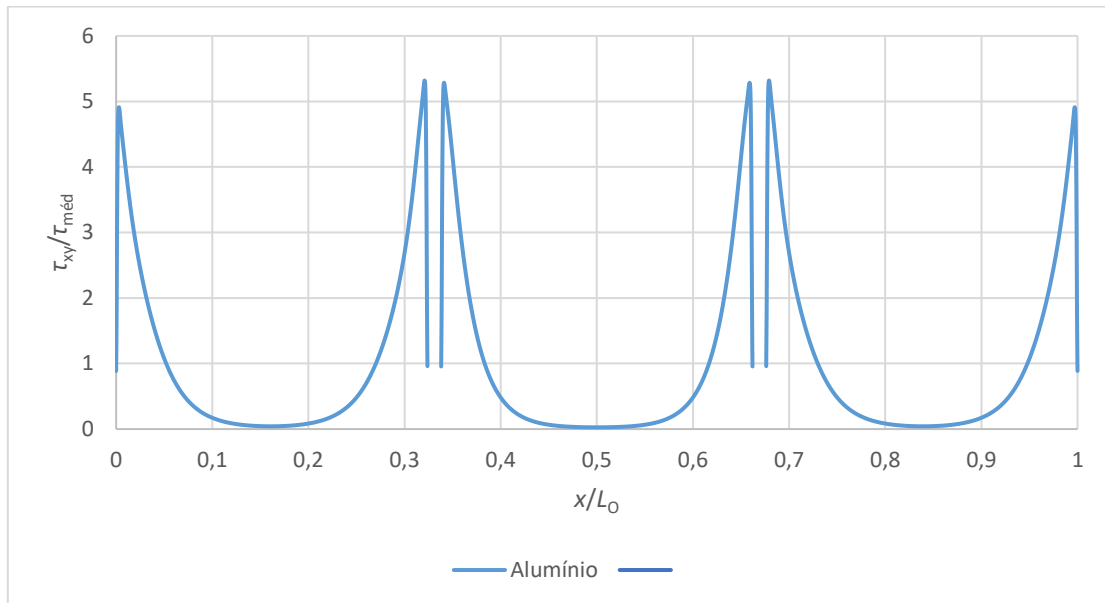


Figura 135 – Comparação das tensões  $\tau_{xy}/\tau_{méd}$  em juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138 e  $L_0=50\text{mm}$

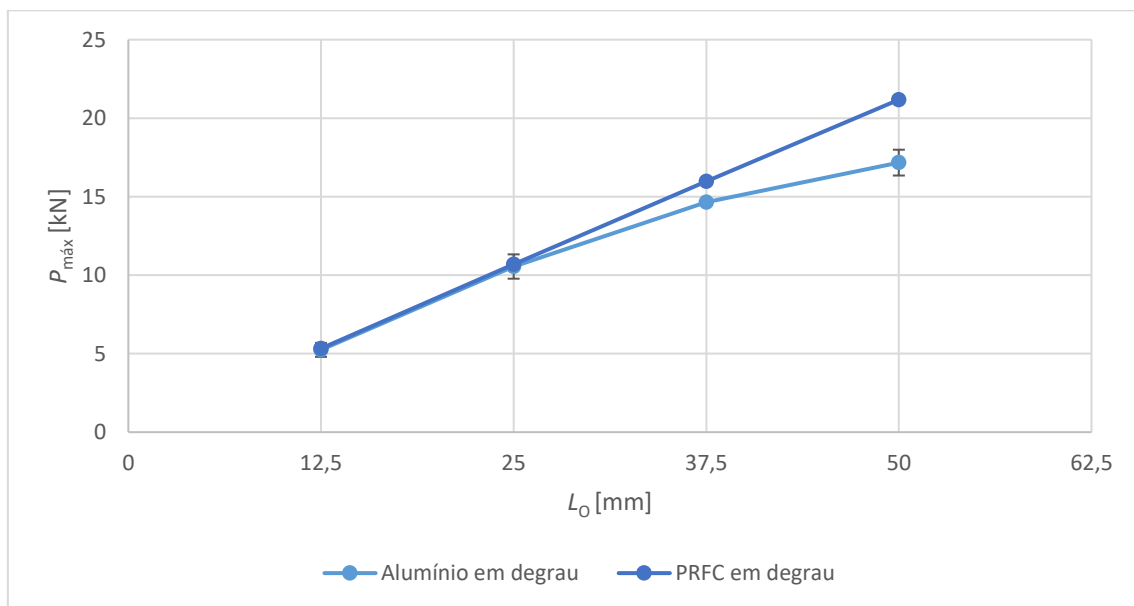


Figura 136 –  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015

Por último, o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta para todos os valores de  $L_0$  uma resistência inferior em juntas com aderentes de material compósito contrariando as tendências registadas nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 7752, como se pode verificar no gráfico da Figura 137. Em relação à diferença de resistência entre as juntas fabricadas com diferentes materiais, as juntas em PRFC possuem uma capacidade de carga inferior em 12,8% para o valor de  $L_0=12,5$  em comparação com as juntas em

alumínio. Esta diferença percentual entre as duas juntas adesivas mantém-se praticamente constante dado que, para os valores de  $L_0=25, 37,5$  e  $50$  mm, os desvios obtidos foram de 13,0, 13,5 e 13,9%, respetivamente.

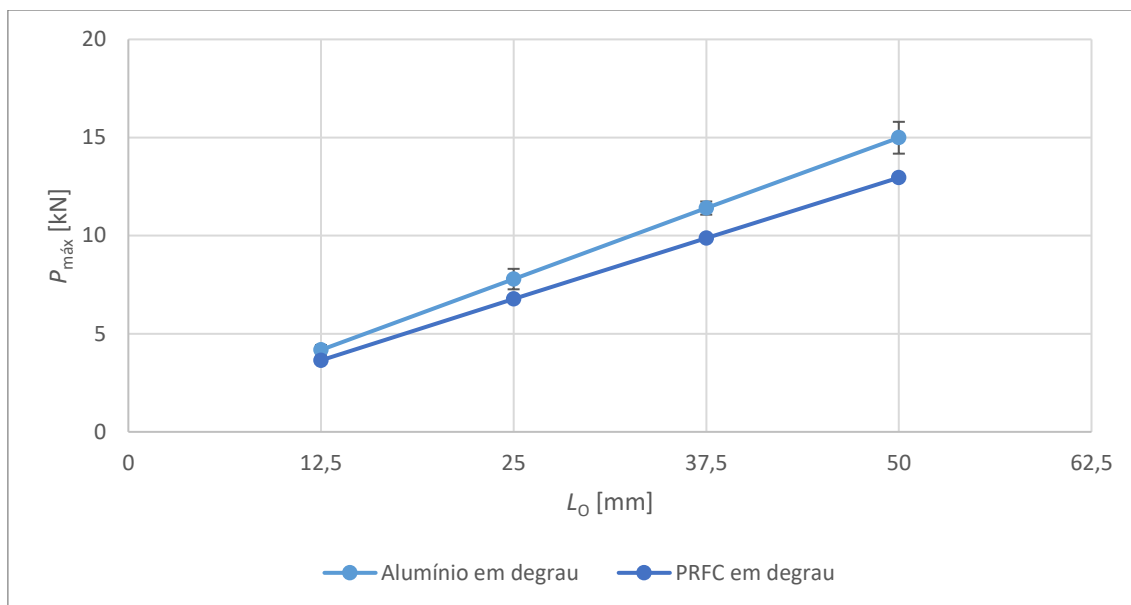


Figura 137 –  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752

### 3.2.8 Comparação com juntas de sobreposição simples e dupla

Do mesmo modo que o capítulo anterior, também neste serão analisados e comparados os valores numéricos da  $P_{máx}$  obtidos para juntas em degrau com aderentes em PRFC com os valores de resistência de JSS e JSD resultantes dos trabalhos experimentais levados a cabo por Carvalho et al.[97, 98].

Com a observação do gráfico da Figura 138, onde estão apresentados os valores de  $P_{máx}$  para juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, verifica-se que as juntas em degrau registam valores de resistência entre os obtidos em JSS e JSD, para  $L_0=12,5$  e  $25$  mm. Contrariamente ao que acontece em JSD, a capacidade de carga das juntas em degrau em função de  $L_0$  segue um comportamento linear. Em consequência disso, para valores de  $L_0 \geq 37,5$ , os  $P_{máx}$  atingidos nos ensaios de juntas em degrau são superiores ao registados em JSD. Em relação às outras configurações, as JSS têm uma resistência significativamente inferior, uma vez que estes tipos de juntas apresentam picos elevados na distribuição de tensões. Este fenómeno tem mais evidencia no desempenho de adesivos frágeis como é o caso do Araldite® AV138. A nível percentual, para  $L_0=12,5$  e  $25$  mm, as juntas em degrau exibem uma resistência superior em 50,1 e 90,2% relativamente às JSS e inferior em 32,9 e 18,8% em comparação com as JSD. Como foi referido, as juntas em degrau com  $L_0 \geq 37,5$  apresentam maior capacidade de carga que as JSD, registando 21% mais resistência para  $L_0=50$ .

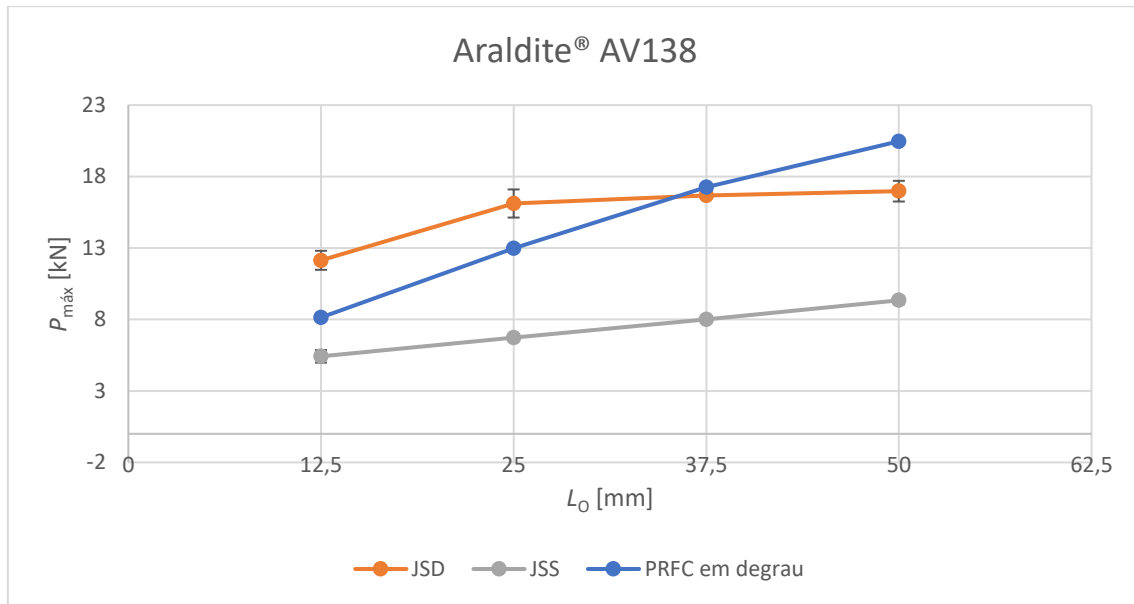


Figura 138 –  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  para juntas em degrau ligadas com o Araldite® AV138

Com a análise do gráfico da Figura 139, verifica-se que, para o adesivo Araldite® 2015, a diferença de resistência entre as juntas em degrau e JSS é significativamente inferior em comparação com as observadas no adesivo Araldite® AV138. Isto deve-se ao adesivo Araldite® 2015 apresentar maior ductilidade, e conseqüentemente ser menos suscetível aos picos de tensões das JSS. Este facto é mais notório para tamanhos de sobreposição reduzidos, uma vez que se regista uma diferença na resistência de apenas 1,0 e 13,2% para valores de  $L_0=12,5$  e 25 mm, respetivamente. À medida que se aumenta o valor de  $L_0$ , a diferença de resistência entre as juntas em degrau e as JSS amplia gradualmente, e atinge 39% para  $L_0=50$  mm. Em relação às JSD, estas têm um melhor comportamento quando comparadas com as outras configurações, dado que obtêm valores de  $P_{máx}$  superiores para todos os  $L_0$ . Para  $L_0=12,5$  e 25 mm, as juntas em degrau apresentam 53% menos resistência que as juntas em degrau. Contudo, entre  $L_0=25$  e 50 mm as JSD apenas aumentam a sua capacidade de carga em 6,0%. Este aumento mínimo deve-se à deformação do alumínio para os valores de carga atingidos, o que causa uma rotura prematura do adesivo. Para os mesmos valores de carga, o PRFC não apresenta grandes deformações devido à sua elevada rigidez, e as tensões desenvolvidas são menores. Por este motivo, e dado que as juntas em degrau demonstram um comportamento linear no aumento da resistência, a diferença entre estas duas configurações reduz. Para  $L_0=50$  mm as JSD registam um valor de  $P_{máx}$  inferior em 17,1%.

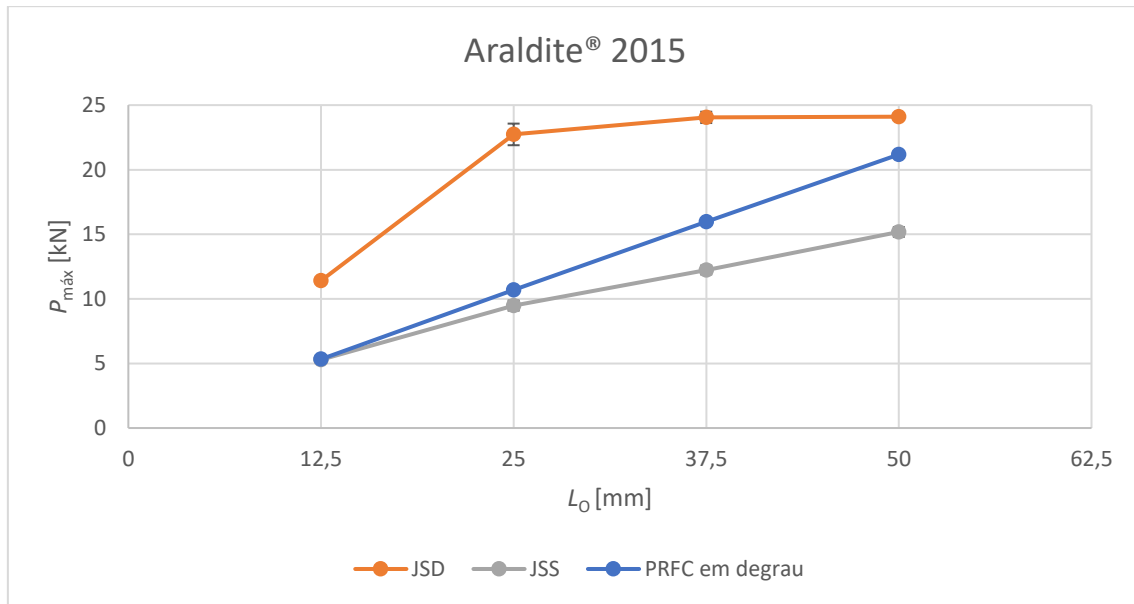


Figura 139 –  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  para juntas em degrau ligadas com o Araldite® 2015

Acerca das juntas ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752, o gráfico da Figura 140 mostra que os resultados verificados nas juntas em degrau e nas JSS são muito próximos. Este facto, explicado anteriormente, é mais explícito neste adesivo devido à sua grande ductilidade. Nestas duas configurações observa-se que, para  $L_0=12,5$  mm, é obtido aproximadamente o mesmo valor de  $P_{máx}$ , enquanto para  $L_0=50$  mm as juntas em degrau apresentam uma resistência inferior em cerca de 10,1%. Comparativamente às JSD, as juntas em degrau revelam menor resistência em, sensivelmente, 50,5% para todos os  $L_0$ .

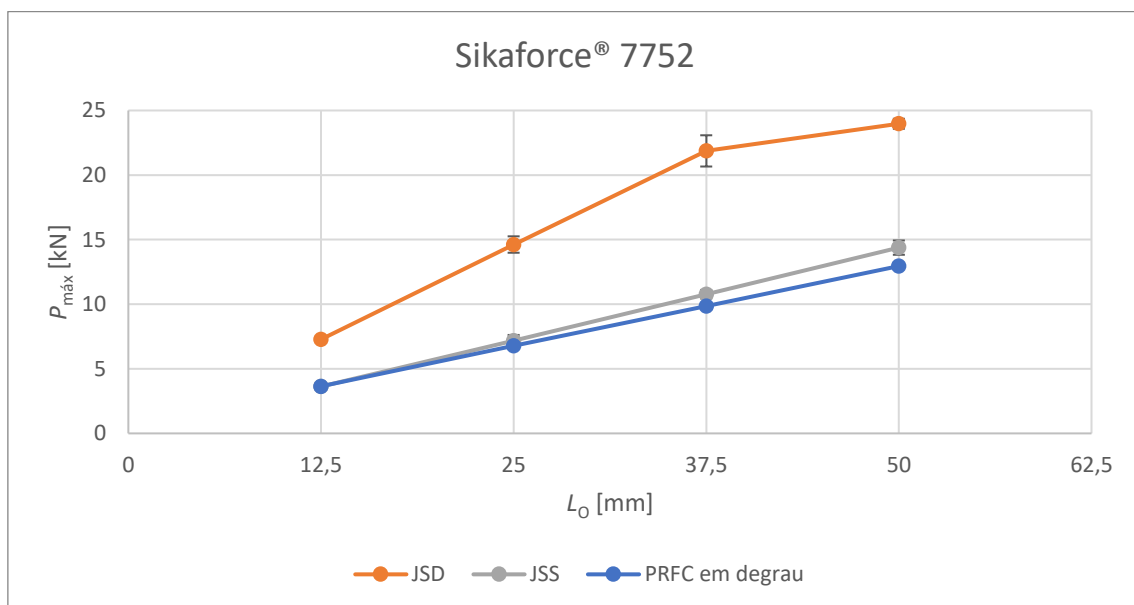


Figura 140 –  $P_{máx}$  em função de  $L_0$  para juntas em degrau ligadas com o Sikaforce® 7752



# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

O principal objetivo da presente dissertação foi estudar por análise numérica o comportamento de juntas em degrau fabricadas com aderentes de PRFC, solicitadas à tração. No trabalho desenvolvido foi estudado o desempenho de juntas com este tipo de configuração, onde foi analisada a influência da variação do valor de  $L_0$  e da rigidez do adesivo na resistência das juntas. Os resultados foram também comparados com os valores obtidos experimentalmente no trabalho realizado por Silva [76], relativos a juntas com aderentes de alumínio.

Relativamente ao estudo numérico, foi efetuada a análise de tensões, análise de dano e a previsão de resistência das juntas em degrau com o recurso ao método de EF, utilizando o *software* Abaqus®.

Pela observação da distribuição das tensões  $\sigma_y$  é possível verificar que, para todos os valores de  $L_0$ , as tensões  $\sigma_y$  registam valores significativamente inferiores à tensão  $\tau_{méd}$ , à exceção dos picos de tensão positivos nas extremidades da zona de sobreposição e dos picos de tensão negativos nas transições de degraus originados pelo momento fletor criado. Com a comparação dos gráficos da distribuição das tensões  $\sigma_y$  conclui-se que, quanto menor for a rigidez do adesivo utilizado, mais baixos são os valores de pico de tensões. Por este motivo, nos adesivos rígidos as tensões aumentam de forma abrupta nas extremidades da sobreposição, enquanto nos adesivos dúcteis esse aumento é mais gradual e por uma maior área.

No que diz respeito à distribuição de tensões  $\tau_{xy}$ , verifica-se que existem picos de tensão nas extremidades de  $L_0$  e nas transições de degraus, independentemente do adesivo usado, que tomam maiores valores com o aumento de  $L_0$ . No caso do adesivo flexível, os picos de tensão verificados nas transições de degraus são significativamente mais baixos do que os desenvolvidos na extremidade de  $L_0$ . Com o aumento da rigidez do adesivo usado, é possível observar que estes valores se aproximam, e no caso do adesivo Araldite® AV138 os picos de tensão gerados nas transições de degraus chegam a ultrapassar o valor do pico da extremidade da sobreposição.

Dada esta análise, pode-se concluir que a rotura das juntas adesivas ocorre, geralmente, nas extremidades de sobreposição, uma vez que neste local existem grandes concentrações das tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$ .

A análise da variável de dano SDEG permitiu compreender melhor o processo de rotura dos adesivos utilizados. Através deste estudo foi possível concluir que, para os adesivos

Araldite® AV138 e Araldite® 2015, a rotura foi essencialmente interlaminar em todas as juntas, enquanto para as juntas ligadas com o Sikaforce® 7752 a rotura foi puramente coesiva no adesivo. Também foi possível verificar que no adesivo frágil a transição do estado de dano se dá de uma forma abrupta, contrariamente aos adesivos com maior ductilidade, que apresentam uma transição mais suave.

Relativamente à resistência, verificou-se que nas juntas ligadas com o Sikaforce® 7752 os valores de  $P_{máx}$  obtidos foram muito inferiores aos restantes adesivos, independentemente do  $L_0$ , devido às suas fracas propriedades mecânicas. Por outro lado, o adesivo Araldite® AV138 registou os maiores valores de  $P_{máx}$  entre  $L_0=12,5$  e  $37,5$  mm. Contudo, devido à ausência de capacidade de plastificação deste adesivo, os picos de tensão aumentam significativamente com o aumento do  $L_0$ . Derivado deste fenómeno, para o maior  $L_0$  utilizado (i.e.,  $L_0=50$  mm), o adesivo Araldite® 2015 apresenta maior resistência comparativamente ao Araldite® AV138.

A comparação dos resultados obtidos nas juntas em degrau com aderentes de PRFC com os das juntas com aderentes em alumínio permitiu concluir que a utilização do material compósito no fabrico de juntas adesivas se traduz num aumento significativo da resistência, quando estas são ligadas com um adesivo rígido. Este comportamento deve-se à rigidez do PRFC ser bastante superior à do alumínio, o que leva a uma menor taxa de deformação ao longo de  $L_0$ , favorável a adesivos suscetíveis a deformações. No caso do adesivo Araldite® 2015, este fenómeno só é evidente para valores de  $L_0$  superiores a  $37,5$  mm, não só porque este adesivo apresenta menor rigidez, mas também porque os valores de carga atingidos causam a plastificação do alumínio, induzindo a rotura prematura. Por sua vez, o adesivo Sikaforce® 7752 regista valores muito próximos para todos os valores de  $L_0$ , dado que este adesivo é muito dúctil e os fenómenos referidos não têm tanta influência.

Relativamente à comparação com JSS e JSD, mais uma vez o adesivo rígido apresenta maior resistência para valores de  $L_0$  elevados, pelas mesmas razões anteriormente mencionadas. Porém, para valores de  $L_0$  reduzidos, as JSD apresentam valores de tensão mais baixos, e por sua vez, maior resistência. No caso do adesivo Araldite® 2015, os valores de  $P_{máx}$  das juntas em degrau encontram-se entre os obtidos em JSS e JSD, independentemente do  $L_0$ . Por último, as juntas em degrau e JSS ligadas com o adesivo Sikaforce® 7752 registam valores de  $P_{máx}$  muito reduzidos e significativamente próximos. Contrariamente ao que acontece nos outros adesivos, a resistência das JSD é bastante superior à obtida em JSS e juntas em degrau.

Como trabalhos futuros, são sugeridos os seguintes:

- Ensaio e análise experimental de juntas em degrau com aderentes de PRFC;
- Estudo do desempenho de adesivos frágeis com aderentes de diferente rigidez;
- Variação do número de degraus e respetivo efeito na distribuição de tensões e resistência da junta.

# REFERÊNCIAS



## 5 REFERÊNCIAS

1. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Amesterdão, Holanda: Elsevier.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhaes, and M.F.S. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
3. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*. 1997, Munique, Alemanha: Hanser Publishers.
4. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Berlim, Alemanha Springer Science & Business Media.
5. Wu, S., *Polymer interface and adhesion*. 1982, New York: Marcel Dekker.
6. *DIN EN 923 Adhesives: Terms and definitions*. 2015: British Standards Institution.
7. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill.
8. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
9. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. Vol. 1. 2005, Amesterdão, Holanda: Elsevier.
10. *Sika Portugal - Produtos Construção e Indústria, SA*. [cited 2018 Maio]; Available from: [https://prt.sika.com/content/portugal/main/pt/solutions\\_products.html](https://prt.sika.com/content/portugal/main/pt/solutions_products.html).
11. Landrock, A.H. and S. Ebnesajjad, *Adhesives technology handbook*. 2008, Norwich, NY: William Andrew.
12. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
13. *ASTM D5573: Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber-Reinforced-Plastic (FRP) Joints*. 2012: ASTM International.
14. Yarusso, D., *Adhesion Science and Engineering—The Mechanics of Adhesion, edited by DA Dillard and AV Pocius*. 2002, Amesterdão, Holanda: Elsevier.
15. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005, Porto: Publindústria.
16. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.
17. Adams, R.D. and N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. 9(3): p. 185-196.
18. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. 4(2): p. 65-78.

19. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
20. Panigrahi, S.K. and B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
21. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
22. 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.
23. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the Seismological Society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
24. 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.
25. 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.
26. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
27. 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.
28. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
29. Duan, K., X. Hu, and Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
30. da Silva, L.F.M.C., R.D.S.G., *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011, Berlim, Alemanha: Springer.
31. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
32. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
33. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
34. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
35. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, and R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.

36. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
37. Alfano, G. and M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
38. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
39. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
40. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
41. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
42. de Moura, M., et al., *Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
43. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
44. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
45. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10-11): p. 2224-2230.
46. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
47. Daudeville, L. and P. Ladevèze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*. Composite Structures, 1993. **25**(1-4): p. 547-555.
48. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
49. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools*. 2001: Springer Berlin Heidelberg.
50. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
51. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.

52. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
53. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(7): p. 1073-1090.
54. Hua, Y., et al., *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(6): p. 302-313.
55. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(6): p. 990-1007.
56. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008, Hoboken, Nova Jersey, EUA: Wiley.
57. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
58. Moës, N., J. Dolbow, and T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
59. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
60. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
61. Adams, R. and J. Harris, *The influence of local geometry on the strength of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1987. **7**(2): p. 69-80.
62. You, M., et al., *A numerical and experimental study of adhesively bonded aluminium single lap joints with an inner chamfer on the adherends*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(1): p. 71-76.
63. Golewski, P. and T. Sadowski, *Investigation of the effect of chamfer size on the behaviour of hybrid joints made by adhesive bonding and riveting*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**: p. 174-182.
64. Raphael, C. *Variable-adhesive bonded joints (Stresses in ordinary lap joint compared to variable adhesive joint)*. in *Structural adhesives bonding, Symposium, Stevens Inst. of Tech, Hoboken, N. J.* 1966.
65. Srinivas, S., *Analysis of Bonded Joints*. 1975, National aeronautics and space administration Hampton Va Langley Research Center.
66. Pires, I., et al., *Performance of bi-adhesive bonded aluminium lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. **23**(3): p. 215-223.
67. Da Silva, L.F. and R. Adams, *Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2007. **27**(3): p. 216-226.
68. Ganesh, V. and T. Choo, *Modulus graded composite adherends for single-lap bonded joints*. Journal of composite materials, 2002. **36**(14): p. 1757-1767.

69. Ichikawa, K., Y. Shin, and T. Sawa, *A three-dimensional finite-element stress analysis and strength evaluation of stepped-lap adhesive joints subjected to static tensile loadings*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 464-470.
70. Akpınar, S., *The strength of the adhesively bonded step-lap joints for different step numbers*. Composites Part B: Engineering, 2014. **67**: p. 170-178.
71. R. Koloor, S.S. and M.N. Tamin, *Mode-II interlaminar fracture and crack-jump phenomenon in CFRP composite laminate materials*. Composite Structures, 2018. **204**: p. 594-606.
72. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
73. Hart-Smith, L., *Design methodology for bonded-bolted composite joints*. 1983, McDonnell Aircraft Co St. Louis Mo.
74. Ribeiro, F.M.F., et al., *Strength and damage growth in composite bonded joints with defects*. Composites Part B: Engineering, 2016. **100**: p. 91-100.
75. Ribeiro, T.E.A., et al., *Damage analysis of composite–aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Composite Structures, 2016. **136**: p. 25-33.
76. Silva, J.O.S., *Estudo de juntas adesivas em degrau: Análise experimental e numérica por Modelos de Dano Coesivo*. 2018, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
77. Azevedo, J.C.S.A., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Noched Flexure (ENF)*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
78. *ASTM E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. 2004, ASTM International: West Conshohocken, PA.
79. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
80. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**(0): p. 96-101.
81. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
82. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
83. Pocius, A., *Adhesion and Adhesives Technology, An introduction: The chemistry and physical properties of elastomer-based adhesives*. 2002, Hansen Gardner Publications, Inc., Maplewood.
84. Gonçalves, J., et al., *Application of interface finite elements to three-dimensional progressive failure analysis of adhesive joints*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2003. **26**(5): p. 479-486.
85. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.

86. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
87. Campilho, R., et al., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
88. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
89. De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.
90. De Moura, M., R. Campilho, and J. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
91. Marques, E. and L.F. da Silva, *Joint strength optimization of adhesively bonded patches*. The Journal of Adhesion, 2008. **84**(11): p. 915-934.
92. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, ISEP: Porto.
93. Darwish, S. and A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **105**(3): p. 221-229.
94. Reis, P.N.B., F.J.V. Antunes, and J.A.M. Ferreira, *Influence of superposition length on mechanical resistance of single-lap adhesive joints*. Composite Structures, 2005. **67**(1): p. 125-133.
95. Mortensen, F. and O.T. Thomsen, *Simplified linear and non-linear analysis of stepped and scarfed adhesive-bonded lap-joints between composite laminates*. Composite Structures, 1997. **38**(1): p. 281-294.
96. Nunes, S., et al., *Comparative failure assessment of single and double lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**(7-9): p. 610-634.
97. Carvalho, U.T.F. and R.D.S.G. Campilho, *Validation of pure tensile and shear cohesive laws obtained by the direct method with single-lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2017. **77**: p. 41-50.
98. Carvalho, U.T.F. and R.D.S.G. Campilho, *Application of the direct method for cohesive law estimation applied to the strength prediction of double-lap joints*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016. **85**: p. 140-148.