



Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio

MIGUEL ANGEL DA SILVA CARNEIRO

Junho de 2016

ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS EM T COM ADERENTES DE ALUMÍNIO

Miguel Angel da Silva Carneiro

1090769

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO EXPERIMENTAL E NUMÉRICO DE JUNTAS ADESIVAS EM T COM ADERENTES DE ALUMÍNIO

Miguel Angel da Silva Carneiro

1090769

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

2016

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

Só foi possível a elaboração e conclusão desta dissertação com o apoio e contributo de várias pessoas e uma instituição, às quais gostaria de apresentar o meu mais sincero agradecimento.

Ao Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, meu Orientador Científico, pela dedicação e disponibilidade apresentada durante todo o tempo necessário para a realização deste trabalho. Foi uma pessoa imprescindível, insubstituível e incansável a quem sempre serei grato. Também lhe agradeço por disponibilizar o seu computador para os ensaios numéricos. Um grande agradecimento ao Instituto Superior de Engenharia do Porto que me acolheu, forneceu todo o material necessário para a fabricação das juntas e desta forma me deu oportunidade da realização deste trabalho.

Não menos importante, à minha família, por toda a dedicação, esforço, sentido de sacrifício e incentivo demonstrado ao longo destes anos. Sem eles eu não teria alcançado os meus objetivos académicos.

PALAVRAS CHAVE

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

RESUMO

Nos dias de hoje, a ligação adesiva de estruturas complexas que não poderiam ou não seriam tão fáceis de ser fabricadas numa só peça é cada vez mais usual. As juntas adesivas têm vindo a substituir muitos outros métodos de ligação, como por exemplo ligações aparafusadas, rebitas ou soldadas, devido às vantagens de facilidade na sua fabricação, resistência superior e capacidade de unir materiais diferentes. Por esta razão as juntas adesivas têm vindo a ser aplicadas cada vez mais em várias indústrias como aeroespacial, aeronáutica, automóvel, naval e calçado. O tipo de adesivo a usar em determinada aplicação é principalmente escolhido consoante as suas características mecânicas e o tipo de resposta pretendida às solicitações impostas. Como exemplo de adesivo resistente e frágil existe o Araldite® AV138. Por outro lado, o adesivo Araldite® 2015 é menos resistente, mas apresenta maior ductilidade e flexibilidade. Além dos adesivos Araldite® comerciais, existem adesivos de poliuretano que combinam características de elevada resistência com características de grande ductilidade e flexibilidade, como por exemplo o Sikaforce® 7752.

Esta dissertação tem como objetivo estudar experimentalmente e numericamente, através de modelos de dano coesivo (MDC), o comportamento de diferentes configurações de junta em T quando sujeitas a solicitações de arrancamento. Consideram-se os adesivos anteriormente mencionados para testar as juntas sob diferentes tipos de adesivos. A junta em T é constituída por 2 aderentes em L de alumínio e um aderente base também em alumínio, unidos por uma camada de adesivo. Experimentalmente é feito um estudo da resistência da junta com a variação da espessura dos aderentes em L (t_{P2}). Com a análise numérica são estudadas as distribuições de tensões, evolução do dano, modos de rotura e resistência. Além disso, realizou-se um estudo numérico da existência ou não de adesivo de preenchimento na zona da curvatura dos aderentes em L nas tensões e na resistência da junta. Mostrou-se que a variação da geometria nos aderentes em L, a presença de adesivo de preenchimento e o tipo de adesivo têm uma influência direta na resistência de junta. Os ensaios experimentais validaram os resultados numéricos e permitiram concluir que os MDC são uma técnica precisa para o estudo das geometrias das juntas em T.

KEYWORDS

Finite Element Method, cohesive zone models, fracture mechanics, structural adhesive, adhesive joints, T joints, mechanical tests.

ABSTRACT

Nowadays, adhesive bonding of complex structures that could not or would not be so easy to be manufactured in one piece is becoming increasingly common. Adhesive joints have been replacing many other joining methods, such as bolted, welded or riveted joints due to the advantages of ease of manufacture, superior strength and ability to join different materials. For this reason, adhesive joints have been increasingly applied in various industries such as aerospace, aeronautic, automotive, marine and footwear. The type of adhesive to use in a particular application is chosen mainly according to its mechanical characteristics and type of response to the imposed loads. The adhesive Araldite® AV138 is an example of strong but brittle adhesive. On the other hand, the adhesive Araldite® 2015 is less strong, but it has higher ductility and flexibility. Beyond the commercial Araldite® adhesives, polyurethane adhesives exist that combine high strength with high ductility and flexibility, such as the adhesive Sikaforce® 7752.

This thesis aims to experimentally and numerically study, by cohesive zone models (CZM), the behavior of different configurations of T joints when subjected to peel loads. The aforementioned adhesives are considered to test the joints with different adhesives. The T joint is composed by 2 L shaped aluminium adherends and a flat aluminium adherent, bonded by an adhesive layer. Experimentally, a joint strength study is performed considering different L shape adherends' thickness (t_{p2}). With the numerical analysis, the stress distributions, damage evolution, failure modes and strength are studied. Additionally, a purely numerical study compared the behavior of the joints with or without adhesive filling at the curvature of the L shaped adherends regarding the stress distributions and joint strength. It was shown that the geometry variation of the L parts, the presence of filler adhesive and the type of adhesive have a direct influence on the joint strength. The experimental tests validated the numerical results and showed that CZM are an accurate technique for the study of T joints.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	<i>Two dimensions</i>
3D	<i>Three dimensions</i>
ACDM	<i>Alternate Continuum Damage Mechanics</i>
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
BS	<i>British Standards</i>
CFRP	<i>Carbon-fiber-reinforced polymer</i>
Cr	Crómio
Cu	Cobre
CZM	<i>Cohesive zone model</i>
EF	Elementos finitos
EMAA	<i>Ethylene –co–methacrylic acid</i>

EPI	Emulsão de polímero de isocianato
EPX	Resina epóxida
Fe	Ferro
FF	Fenol – formaldeído
FRF	Fenol - resorcinol – formaldeído
FRP	<i>Fiber-reinforced plastic</i> (plásticos reforçados a fibra)
ISO	<i>International Standard Organization</i>
MDC	Modelos de dano coesivo
MF, MUF	Melamina e melamina-uréia-formaldeído
Mg	Magnésio
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
Mn	Manganês
pH	Potencial Hidrogeniônico
PUR	Poliuretanos
PVC	<i>Polyvinyl chloride</i>
RF	Resorcinol – formaldeído
Si	Silício
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>

Ti	Titânio
----	---------

UF	Uréia-formaldeído
----	-------------------

Zn	Zinco
----	-------

Lista de Símbolos

B (mm)	Largura da junta
----------	------------------

d (mm)	Diâmetro dos pinos
----------	--------------------

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_A (mm)	Altura dos aderentes em L, a partir do raio de encurvadura
------------	--

L_O (mm)	Comprimento do adesivo
------------	------------------------

L_T (mm)	Comprimento dos aderentes base entre limites de encastramento
------------	---

ρ	Densidade
--------	-----------

P (N)	Força resistente da junta
---------	---------------------------

$P_{máx}$ (N)	Força máxima resistente da junta
---------------	----------------------------------

R (mm)	Raio de curvatura dos aderentes em L
----------	--------------------------------------

t_A (mm)	Espessura de adesivo
t_n^0 (Pa)	resistência coesiva à tração
t_{P1} (mm)	Espessura dos aderentes base
t_{P2} (mm)	Espessura dos aderentes em L
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 do adesivo
γ_f (%)	Deformação de rotura ao corte
ε_f (%)	Deformação de rotura à tração
σ_e (Pa)	Tensão de cedência à tração
σ_f (Pa)	Tensão de rotura à tração
σ_y (Pa)	Tensão normal segundo a espessura ou de arrancamento
σ_y/σ_{med}	Tensão de arrancamento normalizada para as juntas em T
τ_f (Pa)	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy} (Pa)	Tensão de corte
τ_{xy}/σ_{med}	Tensão de corte normalizada para as juntas em T
τ_y (Pa)	Tensão de cedência ao corte
$\delta_{m\acute{a}x}$ (mm)	Deslocamento associado à força máxima resistente da junta

δ_n^0 (mm)	deslocamento correspondente à resistência coesiva à tração
δ_s^0 (mm)	deslocamento correspondente à resistência coesiva ao corte
δ (mm)	Deslocamento associado à solicitação de tração da junta
ν	Coefficiente de Poisson

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- IMAGENS REPRESENTATIVAS DE: (A) INSETO <i>TORTOISE BEETLE (HEMISPHAEROTA CYANEA)</i> [5] E (B) MACROMOLÉCULA LIGNINA [6].	7
FIGURA 2 - ESQUEMA DA DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES PARA DIFERENTES ESPESSURAS DE ADESIVO [7].	11
FIGURA 3 - CURVAS $P-\delta$ PARA JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COM DIFERENTE ESPESSURA DO ADESIVO.....	11
FIGURA 4 - MÉTODO DE PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS BASEADO NA CEDÊNCIA DO ADESIVO E DO ADERENTE [9].....	12
FIGURA 5 - JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES COM UM FILETE DE ADESIVO.	12
FIGURA 6 - DIFERENTES GEOMETRIAS DE JUNTA COM O OBJETIVO DE MELHORAR A RESISTÊNCIA DAS JUNTAS: (A) DE SOBREPOSIÇÃO COM CHANFRO EXTERIOR, (B) COM CHANFRO INTERNO (<i>SCARF JOINT</i>) E (C) EM DEGRAU [7].	13
FIGURA 7 - COMPONENTES DO AVIÃO <i>HAVILLAND COMET</i> QUE UTILIZAM JUNTAS ADESIVAS NA SUA CONSTRUÇÃO [10].	14
FIGURA 8 - ESQUEMA DE COLAGEM DAS LONGARINAS DO AVIÃO <i>HAVILLAND COMET</i> : (A) COLAGEM DA LONGARINA À PELE, (B) REFORÇO DE COLAGEM DA LONGARINA E (C) REFORÇO DA BORDA DE COLAGEM À PELE [10].	14
FIGURA 9 - ESQUEMA DE COLAGEM EM VOLTA DAS JANELAS DO AVIÃO <i>HAVILLAND COMET</i> : (D) DUPLA ADESÃO À PELE, (E) REFORÇO DE ADESÃO À PELE, (F) ADESÃO DE PELE EXTRA DE REFORÇO E (G) MOLDURA DA JANELA [10].	15
FIGURA 10 - ZONAS DE APLICAÇÃO DO ADESIVO NO BMW SÉRIE 7 [11].	16
FIGURA 11 - ESQUEMA DOS VÁRIOS CONSTITUINTES A UNIR NUM SAPATO [10].	17
FIGURA 12 - ESQUEMA DE CARREGAMENTO DE TRAÇÃO [13].	19
FIGURA 13 - ESQUEMA DE CARREGAMENTO DE COMPRESSÃO [13].	19
FIGURA 14 – ESQUEMAS DE CARREGAMENTO: (A) CORTE, (B) CLIVAGEM E (C) ARRANCAMENTO [13]...	20
FIGURA 15 - EXEMPLOS DE SOLICITAÇÃO NO ADESIVO: (A) SOLICITAÇÃO COM TENSÃO T_{xy} PRESENTE E (B) SOLICITAÇÃO COM TENSÃO σ_y PRESENTE [12].	21
FIGURA 16 - ESQUEMA DE MOMENTO FLETOR EXISTENTE EM JUNTA ADESIVA [12].	22
FIGURA 17 - EXEMPLO DE CARREGAMENTO QUE JUNTA T PODE ESTAR SUJEITA [12].	22
FIGURA 18 – JUNTA ADESIVA COM ROTURA COESIVA [7].	23
FIGURA 19 - JUNTA ADESIVA COM ROTURA ADESIVA [7].	23
FIGURA 20 - JUNTA ADESIVA COM ROTURA MISTA [7].	23
FIGURA 21 - JUNTA ADESIVA COM ROTURA DO ADERENTE [7].	23
FIGURA 22 - EXEMPLO DE JUNTAS TOPO A TOPO [7].	24
FIGURA 23 - EXEMPLOS DE JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO [14].	24

FIGURA 24 - EXEMPLOS DE JUNTAS DE TIRA [14].....	25
FIGURA 25 - EXEMPLOS DE JUNTAS CILÍNDRICAS: (A) JUNTAS PARA VARÕES E (B) JUNTAS PARA TUBOS [14].....	25
FIGURA 26 - EXEMPLOS DE JUNTAS EM T [7].	26
FIGURA 27 - EXEMPLOS DE JUNTAS DE CANTO [7].	26
FIGURA 28 – CONFIGURAÇÕES DE REFORÇOS PARA MINIMIZAR: (A) O ARRANCAMENTO E (B) A CLIVAGEM [14].....	27
FIGURA 29 - DIVISÃO DOS TIPOS DE ADESIVOS DEPENDENDO DO SEU DESEMPENHO [7].	28
FIGURA 30 – DESCONTINUIDADE DE TENSÕES: (A) NA PROXIMIDADE DE UMA PONTA DE FENDA E (B) NUM CANTO REENTRANTE.	33
FIGURA 31 – LEIS COESIVAS: (A) TRIANGULAR E EXPONENCIAL E (B) TRAPEZOIDAL [31].	34
FIGURA 32 - 4 TIPOS DE ENSAIOS DE ARRANCAMENTO: (A) ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE JUNTA EM T COM ADERENTES FLEXÍVEIS, (B) ENSAIO DE ARRANCAMENTO PARA ADERENTE RÍGIDO E ADERENTE FLEXÍVEL, (C) ENSAIO <i>CLIMBING DRUM</i> E (D) ENSAIO DE ARRANCAMENTO <i>FLOATING ROLLER</i> [36].	37
FIGURA 33 - EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO DA DESCOLAGEM DAS JUNTAS PARA CADA CATEGORIA [36].....	38
FIGURA 34 - ESQUEMA COM DIMENSÕES DA JUNTA L EM ESTUDO [37].	39
FIGURA 35 - DIFERENTES MODOS DE APLICAÇÃO DAS CARGAS [37].	40
FIGURA 36 - DIMENSÕES DA JUNTA USADA NO TESTE EXPERIMENTAL [37].	40
FIGURA 37 - ESQUEMA DA ESTRUTURA EM L EM ESTUDO [38].	41
FIGURA 38 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA POSIÇÃO DOS MEDIDORES DE TENSÃO AO LONGO DA JUNTA [38].....	41
FIGURA 39 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DA JUNTA T [39].	42
FIGURA 40 – JUNTAS EM T INSPIRADAS NA NATUREZA E COM GEOMETRIA CONVENCIONAL: (A) 25%, (B) 50% E (C) 75% DE EMBEBIMENTO [39].	43
FIGURA 41 – CARACTERÍSTICAS DAS JUNTAS: (A) ESQUEMA DE DIMENSÕES ESCOLHIDAS PARA ESTUDO DA JUNTA E (B) FILETE DE ADESIVO USADO PARA REFORÇO DA JUNTA [1].	44
FIGURA 42 - ESQUEMA DO MODELO DE: (A) PINO UNITÁRIO E (B) PINOS APLICADO A UMA ESCALA MAIOR [3].	45
FIGURA 43 - ESQUEMA DE COMPORTAMENTO DO PINO CONFORME A SITUAÇÃO DE SOLICITAÇÃO [3]. ..	46
FIGURA 44 - DIMENSÕES E ESQUEMA DE MONTAGEM DA JUNTA EM T [40].	47
FIGURA 45 - COMPORTAMENTO DA FORÇA APLICADA VS. DESLOCAMENTO PARA JUNTA EM T COM E SEM EMAA [40].	47
FIGURA 46 - ESQUEMA DE PRODUÇÃO DA JUNTA EM T [2].	50
FIGURA 47 - ESQUEMA DE MONTAGEM E DIMENSÕES USADAS PARA REALIZAÇÃO DE TESTE DA JUNTA EM T [2].	50
FIGURA 48 – JUNTA EM T: (A) DIMENSÕES (MM) E (B) VÁRIOS COMPONENTES DA JUNTA [41].	51
FIGURA 49 – CURVAS P - δ PARA CADA TIPO DE JUNTA EM T [41].	52

FIGURA 50 - CURVAS $P-\delta$ PARA CADA TIPO DE JUNTA EM T APÓS REPARAÇÃO [41].	52
FIGURA 51 - ZONA DE INÍCIO DE ROTURA E PROPAGAÇÃO [42].	53
FIGURA 52 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA JUNTA EM T [43].	54
FIGURA 53 - ESQUEMA DA GEOMETRIA DAS JUNTAS T E ORIENTAÇÃO DAS CAMADAS DE LAMINADO [44].	56
FIGURA 54 - MODOS DE ROTURA NAS JUNTAS [44].	57
FIGURA 55 - CURVAS $P-\delta$ DA JUNTA EM T [44].	57
FIGURA 56 - ESQUEMA DA JUNTA T EM CAUSA COM AS DIMENSÕES E MODO DE SOLICITAÇÃO [45].	58
FIGURA 57 - IMAGEM ILUSTRATIVA DA JUNTA T EM CAUSA APÓS ROTURA TOTAL [45].	59
FIGURA 58 - CURVAS $\Sigma-E$ DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 [47].	64
FIGURA 59 - CURVAS $\Sigma-E$ DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [30].	65
FIGURA 60 - ADESIVO ARALDITE® AV138 [46].	66
FIGURA 61 - FORMATO COMERCIAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015 DE 50 ML [13].	67
FIGURA 62 - CURVAS $\Sigma-E$ DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [30].	67
FIGURA 63 - ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [46].	69
FIGURA 64 - CURVAS $\Sigma-E$ DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [51].	69
FIGURA 65 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA GEOMETRIA DE JUNTA EM T.	70
FIGURA 66 - PRENSA MANUAL USADA NA DOBRAGEM DOS ADERENTES EM L.	72
FIGURA 67 - CHAPAS NORMALIZADAS DE 0,2 MM DE ESPESSURA COLADAS AO ADERENTE BASE.	72
FIGURA 68 - ADESIVO ARALDITE® 2015 APLICADO EM "ZIG-ZAG" NO ADERENTE BASE.	73
FIGURA 69 - EXEMPLO DE JUNTAS COM ADERENTES EM L COM $T_{p2}=1$ MM: (A) COM ARALDITE® 2015 E (B) COM ARALDITE® AV138.	73
FIGURA 70 - REMOÇÃO DOS EXCESSOS DE ADESIVO: (A) ANTES E (B) DEPOIS DA OPERAÇÃO MANUAL.	74
FIGURA 71 - USO DO MANDRIL PARA REMOÇÃO DE FILETES DE ADESIVO.	74
FIGURA 72 - ASPETO DE JUNTA PRONTA PARA TESTE.	75
FIGURA 73 - IMAGEM REPRESENTATIVA DE: (A) MÁQUINA DE ENSAIOS SHIMADZU AG-X 100 E (B) ENCASTRAMENTO DO PROVETE NA BASE E SOLICITAÇÃO À TRAÇÃO NA VERTICAL.	75
FIGURA 74 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=1$ MM.	77
FIGURA 75 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=2$ MM.	77
FIGURA 76 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=3$ MM.	78
FIGURA 77 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=4$ MM.	78
FIGURA 78 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=1$ MM.	79
FIGURA 79 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=2$ MM.	80

FIGURA 80 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=3$ MM.	80
FIGURA 81 - CURVAS $P-\delta$ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=4$ MM.	81
FIGURA 82 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=1$ MM.	82
FIGURA 83 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=2$ MM.	82
FIGURA 84 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=3$ MM.	83
FIGURA 85 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=4$ MM.	83
FIGURA 86 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=1$ MM.	84
FIGURA 87 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=2$ MM.	84
FIGURA 88 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=3$ MM.	84
FIGURA 89 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=4$ MM.	85
FIGURA 90 - VALORES EXPERIMENTAIS DE $P_{MÁX}$ OBTIDOS NAS JUNTAS COLADAS COM OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015.....	85
FIGURA 91 - ESQUEMA DO MODELO DA JUNTA EM T COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO.	87
FIGURA 92 - ESQUEMA DO MODELO DA JUNTA EM T SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO.	88
FIGURA 93 - IMAGEM DO <i>SOFTWARE</i> ABAQUS® REFERENTE ÀS PARTIÇÕES DEFINIDAS DA JUNTA: (A) COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO E (B) SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO.	88
FIGURA 94 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA APLICADAS AOS MODELOS.	89
FIGURA 95 - MALHA REFINADA PARA: (A) ANÁLISE DE RESISTÊNCIA E (B) ANÁLISE DE TENSÕES.....	90
FIGURA 96 - MDC 2D COM LEI TRIANGULAR [31].	91
FIGURA 97 - COMPRIMENTO NORMALIZADO DO ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA A JUNTA COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO.	95
FIGURA 98 - COMPRIMENTO NORMALIZADO DO ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA A JUNTA SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO.	95
FIGURA 99 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ARALDITE® AV138)...	96
FIGURA 100 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ARALDITE® 2015). ..	97
FIGURA 101 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (SIKAFORCE® 7752). ..	97
FIGURA 102 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ARALDITE® AV138)..	99
FIGURA 103 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ARALDITE® 2015). ...	99
FIGURA 104 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (SIKAFORCE® 7752)..	100

FIGURA 105 - TENSÕES T_{XY} PARA JUNTA EM T COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ARALDITE® AV138).	101
FIGURA 106 - TENSÕES T_{XY} PARA JUNTA EM T COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ARALDITE® 2015).	101
FIGURA 107 - TENSÕES T_{XY} PARA JUNTA EM T COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (SIKAFORCE® 7752).	102
FIGURA 108 - TENSÕES T_{XY} PARA JUNTA EM T SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ADESIVO ARALDITE® AV138).	103
FIGURA 109 - TENSÕES T_{XY} PARA JUNTA EM T SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (ARALDITE® 2015).	104
FIGURA 110 - TENSÕES T_{XY} PARA JUNTA EM T SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO (SIKAFORCE® 7752).	104
FIGURA 111 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 NO INSTANTE DE $P_{MÁX}$, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{P2} .	106
FIGURA 112 - PROCESSO DE ROTURA DA JUNTA COLADA COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=1$ MM NO MOMENTO EM QUE SE ATINGIU $P_{MÁX}$.	107
FIGURA 113 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 QUANDO É ATINGIDO SDEG=1 PELA PRIMEIRA VEZ EM QUALQUER ZONA DA JUNTA, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{P2} .	107
FIGURA 114 – ROTURA TOTAL DA JUNTA COLADA COM ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=1$ MM.	108
FIGURA 115 -EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=1$ MM.	109
FIGURA 116 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=2$ MM.	109
FIGURA 117 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=3$ MM.	110
FIGURA 118 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=4$ MM.	110
FIGURA 119 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 NO INSTANTE DE $P_{MÁX}$, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{P2} .	111
FIGURA 120 - PROCESSO DE ROTURA DA JUNTA COLADA COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=1$ MM NO MOMENTO EM QUE SE ATINGIU $P_{MÁX}$.	112
FIGURA 121 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 QUANDO É ATINGIDO SDEG=1 PELA PRIMEIRA VEZ EM QUALQUER ZONA DA JUNTA, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{P2} .	113
FIGURA 122 - ROTURA TOTAL DA JUNTA COLADA COM ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=1$ MM.	113
FIGURA 123 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=1$ MM.	114
FIGURA 124 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=2$ MM.	115

FIGURA 125 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{P_{MÁX}}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=3$ MM.....	115
FIGURA 126 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{P_{MÁX}}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=4$ MM.....	116
FIGURA 127 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NO INSTANTE DE $P_{MÁX}$, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{P2}	118
FIGURA 128 - PROCESSO DE ROTURA DA JUNTA COLADA COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=1$ MM NO MOMENTO EM QUE SE ATINGIU $P_{MÁX}$	118
FIGURA 129 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 QUANDO É ATINGIDO SDEG=1 PELA PRIMEIRA VEZ EM QUALQUER ZONA DA JUNTA, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{P2}	118
FIGURA 130 - ROTURA TOTAL DA JUNTA COLADA COM ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=1$ MM.	119
FIGURA 131 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{P_{MÁX}}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=1$ MM.....	120
FIGURA 132 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{P_{MÁX}}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=2$ MM.....	120
FIGURA 133 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{P_{MÁX}}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=3$ MM.....	121
FIGURA 134 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\delta/\delta_{P_{MÁX}}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COLADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=4$ MM.....	121
FIGURA 135 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=1$ MM.	123
FIGURA 136 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=2$ MM.	124
FIGURA 137 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=3$ MM.	124
FIGURA 138 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=4$ MM.	125
FIGURA 139 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=1$ MM.....	126
FIGURA 140 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=2$ MM.....	126
FIGURA 141 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=3$ MM.....	127
FIGURA 142 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS PARA AS JUNTAS COLADAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{P2}=4$ MM.....	127
FIGURA 143 - VALORES NUMÉRICOS DE $P_{MÁX}$ PARA OS 4 VALORES DE T_{P2} , NAS JUNTAS COM E SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO, ARALDITE® AV138.....	129

FIGURA 144 - VALORES NUMÉRICOS DE $P_{MÁX}$ PARA OS 4 VALORES DE T_{P2} , NAS JUNTAS COM E SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO, ARALDITE® 2015.	130
FIGURA 145 - VALORES NUMÉRICOS DE $P_{MÁX}$ PARA OS 4 VALORES DE T_{P2} , NAS JUNTAS COM E SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO, SIKAFORCE® 7752.	131
FIGURA 146 – VALORES DE $P_{MÁX}$ OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE PELAS JUNTAS COLADAS COM OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015.	133

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - EXEMPLO DO TIPO DE ADESIVOS USADOS NO SAPATO DA FIGURA 11 [10].	17
TABELA 2 - PROPRIEDADES DAS JUNTAS EM ESTUDO E SUA EFICIÊNCIA DE REPARAÇÃO [40].	48
TABELA 3 - COMPARAÇÃO DOS VALORES OBTIDOS PARA JUNTA T CONVENCIONAL E JUNTA T BIO INSPIRADA. OS VALORES QUE ESTÃO ENTRE PARENTESES SÃO REFERENTES AO DESVIO PADRÃO ENTRE AS 6 JUNTAS TESTADAS [43].	55
TABELA 4 - NÚMERO DE PROVETES ENSAIADOS [44].	56
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 [46].	63
TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651; DADOS DO FABRICANTE [46].	64
TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [30, 49].	66
TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [30].	68
TABELA 9 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [51].	70
TABELA 10 - PARÂMETROS USADOS NA GEOMETRIA DE JUNTA.	71
TABELA 11 - DEFINIÇÕES DE INCREMENTAÇÃO NO SOFTWARE ABAQUS®.	90
TABELA 12 - PARÂMETROS COESIVOS EM TRAÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO ARALDITE® AV138 COM $T_A=0,2$ MM.	93
TABELA 13 - PARÂMETROS COESIVOS EM TRAÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO DE ARALDITE® 2015 COM $T_A=0,2$ MM.	93
TABELA 14 - PARÂMETROS COESIVOS EM TRAÇÃO E CORTE PARA UMA CAMADA DE ADESIVO SIKAFORCE® 7752 COM $T_A=0,2$ MM.	94
TABELA 15 - AUMENTOS PERCENTUAIS DAS RESISTÊNCIAS OBTIDAS NUMERICAMENTE PARA AS JUNTAS COM $T_{p2}=2, 3$ E 4 MM RELATIVAMENTE ÀS JUNTAS COM $T_{p2}=1$ MM.	132
TABELA 16 – AUMENTO DA RESISTÊNCIA EM % DAS JUNTAS COM ADESIVO DE PREENCHIMENTO EM COMPARAÇÃO COM AS JUNTAS SEM ADESIVO DE PREENCHIMENTO.	132

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização.....	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	7
2.1	Ligações adesivas	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas	13
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	19
2.1.4	Configurações possíveis de junta	24
2.1.5	Adesivos estruturais	27
2.1.5.1	Tipos de adesivos estruturais.....	28
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	30
2.2.1	Modelos analíticos	30
2.2.2	Métodos numéricos	31
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	31
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	32
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	34
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	35
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido.....	35
2.3	Juntas adesivas sujeitas a esforços normais	36
2.3.1	Ensaio de caracterização ao arrancamento	36
2.3.2	Juntas em L.....	39
2.3.3	Juntas em T.....	42
3	DESENVOLVIMENTO	63
3.1	Trabalho experimental	63
3.1.1	Materiais utilizados	63
3.1.1.1	Aderentes.....	63
3.1.1.2	Adesivos.....	65
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	65
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	66
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752	68
3.1.2	Geometria das juntas	70

3.1.3	Processo de fabrico	71
3.1.4	Ensaio das juntas	75
3.1.5	Resultados obtidos	76
3.1.5.1	Curvas P- δ	76
3.1.5.2	Modos de rotura	81
3.1.5.3	Resistência das juntas	85
3.2	Trabalho numérico	86
3.2.1	Condições da análise numérica	87
3.2.2	Modelo de dano coesivo	91
3.2.2.1	Modelo de dano triangular	91
3.2.2.2	Determinação das propriedades coesivas	92
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	94
3.2.3.1	Tensões de arrancamento	95
3.2.3.2	Tensões de corte.....	100
3.2.4	Estudo da variável de dano	105
3.2.4.1	Araldite® AV138.....	105
3.2.4.2	Araldite® 2015	111
3.2.4.3	Sikaforce® 7752	116
3.2.5	Previsão do comportamento.....	122
3.2.5.1	Curvas P- δ	122
3.2.5.2	Resistência das juntas com e sem adesivo de preenchimento.....	128
3.2.5.3	Comparação entre a resistência numérica e experimental das juntas.....	133
4	CONCLUSÕES	137
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	143

INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização do relatório

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A popularidade das juntas adesivas tem vindo a aumentar cada vez mais ao longo dos tempos devido a numerosas vantagens que estas têm em relação a outros métodos de ligação existentes (parafusos, rebites, soldadura, etc.). Os adesivos são mais indicados quando não é recomendável proceder à perfuração da superfície, quando os aderentes são finos e flexíveis ou as superfícies a ligar são irregulares. Estes têm uma aplicação muito vasta nas indústrias de construção, automóvel, naval, calçado, elétrica e aeroespacial. Hoje em dia o seu uso tem vindo a aumentar, com o evoluir dos estudos das suas propriedades e possíveis aplicações. O uso deste tipo de ligação é frequente na produção de estruturas de forma complexa, que não poderiam ou não seriam tão fáceis de produzir numa só peça, de modo que a união estrutural seja teoricamente tão resistente como o material de base. A resistência de uma ligação adesiva depende de vários fatores, como por exemplo os parâmetros geométricos, materiais utilizados na ligação (denominados de aderentes) e as próprias características do adesivo. Apesar destas vantagens, a aplicação de ligações adesivas por vezes não é possível ou é mesmo inapropriada. Os adesivos normalmente são divididos em 2 grandes grupos, adesivos estruturais e não estruturais. Resumidamente, um adesivo é estrutural quando a carga necessária para separar as duas superfícies coladas é elevada, de tal modo que o adesivo providência a força principal da estrutura. Os adesivos não estruturais englobam borrachas sintéticas e colas de contacto. Existem vários tipos de união de juntas adesivas. As juntas mais conhecidas são as juntas de sobreposição. No entanto, existem outros tipos de juntas, como por exemplo as juntas topo a topo, juntas com tira (*strap joint*), juntas cilíndricas, juntas de canto, juntas de “reforços” e juntas em T.

Na previsão de resistência de juntas adesivas podem-se usar várias técnicas, divididas em 2 grandes grupos, modelos analíticos e numéricos. Como modelos numéricos destacam-se a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura, modelos de dano coesivo (MDC), mecânica do dano e o método de elementos finitos (EF) estendido. No entanto, os MDC são a técnica mais utilizada atualmente para a previsão da resistência de juntas adesivas. Por outro lado, um dos tipos de juntas que tem bastante aplicação real é a junta em T, por exemplo em aplicações navais (união de painéis com o casco [1] e ligação do casco em compósito de fibra de vidro com os painéis anti inundações [2]) e aplicações aeronáuticas (painéis das asas, secções da fuselagem [3]). Como tal, é bastante relevante o estudo aprofundado e a avaliação dos MDC para a previsão de resistência de este tipo de juntas.

1.2 Objetivos

Esta dissertação consiste num estudo experimental e numérico do comportamento de uma junta adesiva em T entre aderentes de alumínio solicitada à tração. Para o estudo numérico será feita uma análise através de MDC incorporados em modelos de EF usando o *software* ABAQUS®.

A junta adesiva em T em estudo consiste numa base de alumínio colada a dois aderentes em L também de alumínio, sobrepostos de costas entre eles. São consideradas 4 configurações de junta, com 4 diferentes espessuras para os aderentes em L (t_{p2}), de 1, 2, 3 e 4 mm. Consideram-se também 3 tipos de adesivos: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Refere-se que, experimentalmente, apenas se consideraram os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

O estudo numérico é suportado por uma análise de tensões de arrancamento (σ_y) e de corte (τ_{xy}) e uma análise da variável de dano dos elementos coesivos. De seguida, é ainda estudado numericamente o efeito do preenchimento com adesivo da cavidade criada entre os dois aderentes em L devido ao raio de curvatura. Este estudo tem como objetivo decidir se o uso de preenchimento total do adesivo na área de colagem dos aderentes em L com a base é vantajoso em termos de resistência mecânica. É também realizada uma discussão acerca dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos e respetiva explicação em função das análises de tensão e de dano. Finalmente, é efetuada a comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ numéricos e experimentais para aferir a capacidade dos MDC em prever a resistência das juntas em T.

1.3 Organização do relatório

Este trabalho foi organizado por 4 capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada uma contextualização ao tema abordado, seguida dos objetivos propostos e apresentação da organização do relatório.

O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica, na qual se descrevem as bases necessárias sobre ligações adesivas relevantes para o trabalho em questão. É feita uma caracterização das juntas adesivas, onde são expostas vantagens e desvantagens deste tipo de ligações, seguida de variados exemplos de aplicação destas nas várias indústrias. Também são apresentados os possíveis esforços e modos de roturas que podem existir em juntas adesivas, bem como as configurações possíveis destas. Neste capítulo são ainda definidos e enumerados os vários exemplos de adesivos estruturais conhecidos. Além disso, apresentam-se os principais métodos analíticos e numéricos de previsão de resistência comumente utilizados em ligações adesivas. Por fim, neste capítulo são

descritos os vários tipos de ensaios de caracterização ao arrancamento que as juntas adesivas podem estar sujeitas e é feita uma referência detalhada a estudos anteriormente realizados sobre juntas em L e em T.

O terceiro capítulo é dividido entre o trabalho experimental e numérico. No trabalho experimental são referidos os materiais constituintes das juntas e é feita uma descrição pormenorizada de todas as propriedades mais relevantes destes, para estudo e análise de resultados obtidos experimentalmente. É também descrito o processo de fabrico envolvido na produção das juntas, bem como a geometria e condições nas quais as juntas foram testadas. Após a descrição do trabalho experimental em si são apresentados os resultados de resistência e as curvas força-deslocamento ($P-\delta$), seguidos de uma análise pormenorizada destes resultados para cada caso de junta em estudo. No trabalho numérico são expressas as devidas condições de análise numérica, o MDC utilizado, é realizada uma análise bidimensional (2D) de tensões σ_y e τ_{xy} das juntas para as diferentes condições geométricas, é apresentado um estudo da variável de dano durante o processo de rotura e efetuada a previsão do comportamento das juntas quanto à sua resistência para cada tipo de geometria de junta. Com isto, é feita uma comparação entre os valores de resistência obtidos numericamente e experimentalmente, com vista a saber se o método de previsão proposto pode ser aplicado para previsão de resistência destas juntas.

No final apresenta-se o quarto capítulo, onde são apresentados os resultados e conclusões finais deste projeto. São ainda apresentadas propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

- 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas
- 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas
- 2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas
- 2.1.4 Configurações possíveis de junta
- 2.1.5 Adesivos estruturais

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

- 2.2.1 Modelos analíticos
- 2.2.2 Métodos numéricos

2.3 Juntas adesivas sujeitas a esforços normais

- 2.3.1 Ensaio de caracterização ao arrancamento
- 2.3.2 Juntas em L
- 2.3.3 Juntas em T

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

A natureza está repleta de aplicações de mecanismos de adesão e adesivos naturais. Certos tipos de rochas e minerais têm tomado forma através da ação de forças de adesão entre os elementos de grão constituintes, como por exemplo, os arenitos que são usados na construção de edifícios e outras estruturas. Sem estes tipos de rochas e arenitos, não seria possível a construção de habitações como as que existem hoje em dia. A vida em si seria impossível sem a absorção de superfícies orgânicas. Dá-se como exemplo as secreções de crustáceos nos mexilhões, que permitem a sua ligação a quase todos os substratos e são resistentes ao ambiente marinho, o que põe à prova este tipo de ligações. Os cientistas continuam fascinados com as excelentes características adesivas que estes crustáceos oferecem, além da durabilidade e tenacidade das suas ligações sob condições desfavoráveis. Um outro exemplo é o caso de um inseto com o nome *tortoise beetle* (*Hemisphaerota cyanea*) (Figura 1 a) que, quando se sente ameaçado, expele uma substância nas patas, que o faz agarrar à superfície em que se encontra e suportar forças de 60 vezes o seu peso durante 2 minutos [4]. Outro exemplo é a lignina ou lenhina, que é uma macromolécula tridimensional amorfa (Figura 1 b) encontrada nas plantas terrestres, associada à celulose, cuja função é conferir impermeabilidade e resistência mecânica.

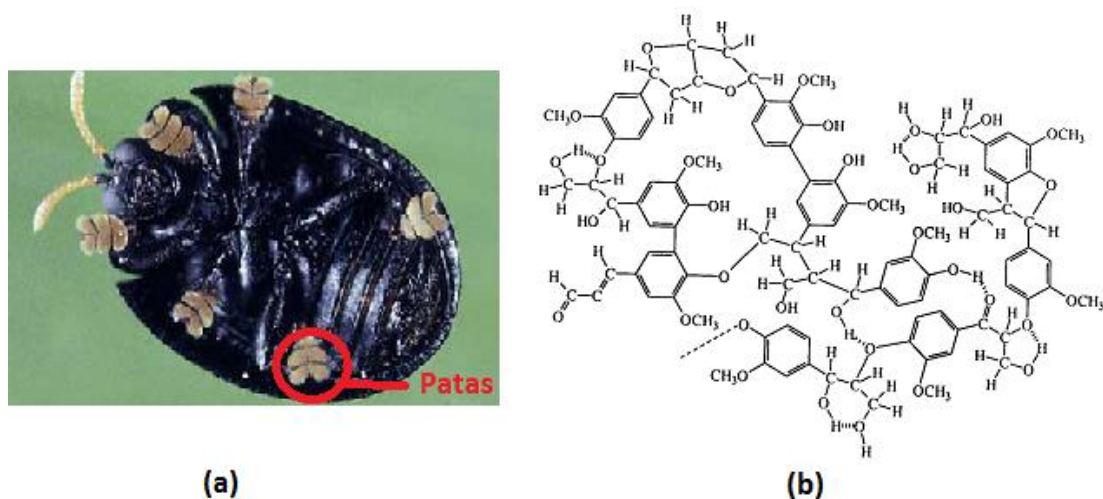


Figura 1- Imagens representativas de: (a) inseto *tortoise beetle* (*Hemisphaerota cyanea*) [5] e (b) macromolécula lignina [6].

A escolha do método de ligação deve sempre ser feita com cuidado e de maneira apropriada. Existem vários tipos de ligação entre materiais, como as ligações mecânicas;

ligações por soldadura; ligações por aquecimento induzido; ligações através da fricção; ligações por solvente e ligações através de adesivos.

É importante referir como se define uma junta adesiva. Uma junta adesiva é constituída por várias partes. Existem os substratos que são os dois materiais que se pretende unir. Nestes substratos, quando é necessário, são preparadas as superfícies de colagem do adesivo, sendo estas definidas como aderentes. O conjunto dos substratos colados através do adesivo forma a junta adesiva.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Desde os tempos mais remotos, a humanidade tem recorrido à união de materiais para obtenção de produtos com determinada finalidade de utilização. A ligação de materiais permite obter estruturas mais complexas do que aquelas que têm de ser obtidas a partir de uma peça única, o que traz uma vantagem no que se refere ao transporte destas. As ligações mecânicas são um tipo de ligação ainda muito usado hoje em dia e escolhido quando a aplicação não permite o uso de ligações adesivas, em termos de funcionamento ou custo de projeto. Nas ligações mecânicas são usados vários tipos de fixadores mecânicos, como por exemplo parafusos, rebites ou pregos. Estas têm um elevado número de vantagens que as tornam vantajosas para a sua aplicação. O uso destas, nalguns casos, não requiere preparação de superfície, mas é necessário proceder a uma perfuração da superfície antes da fixação, sendo esta uma desvantagem a favor das ligações adesivas. O uso de diferentes materiais para unir vários componentes tem sido usado desde a pré-história até à atualidade, com vista a obter uma maior eficácia e eficiência dos produtos. Ao longo do tempo a sofisticação dos métodos de união tem incluído uma grande variedade de fixadores mecânicos, numerosos métodos de soldadura e o uso de adesivos, vedantes, cimentos, argamassas e outros ligantes para juntar e segurar vários componentes. Os métodos de ligação mecânica, como ligações aparafusadas, rebitadas ou mesmo soldadas têm vindo a ser substituídos pelas juntas adesivas. Existem várias vantagens que as juntas adesivas apresentam relativamente às ligações mecânicas, tais como [7]:

- Os adesivos possibilitam a junção de aderentes com diferentes geometrias, tamanhos e composições;
- O processo de fabrico não induz deformações permanentes, descoloração dos aderentes nem alteração geométrica (por exemplo cordões de soldadura nas juntas soldadas);
- São eficazes em materiais diferentes com pontos de fusão dissimilares;
- Distribuem a carga sobre uma área ampla em vez de uma área concentrada;
- Resistem à flexão e vibração, e têm capacidade de isolamento acústico;

- Não obrigam à realização de furos ou outras alterações geométricas que potenciam concentrações de tensões consideráveis;
- Não produzem deformação nos materiais, eliminam o uso de processos como rebarbar as superfícies, reduzindo o custo de produção;
- Permitem a ligação fácil de componentes com superfícies irregulares;
- Aumentam a resistência ao impacto e fadiga, aumentando o ciclo de vida do produto;
- Permitem a redução do custo de união pela eliminação da necessidade de parafusos, porcas ou rebites;
- Formam uma vedação que pode proteger a junta de corrosão.

No entanto existem também alguns inconvenientes associados ao uso das juntas adesivas, tais como [7]:

- A cura pode demorar algum tempo;
- Necessidade de preparação da superfície;
- As juntas não conseguem ser separadas facilmente;
- Dificuldades no controlo de qualidade, já que testes não destrutivos estão dificilmente disponíveis;
- Resistência limitada a altas temperaturas;
- Resistência e durabilidade dependentes das condições de processamento;
- Flamabilidade e toxicidade de alguns adesivos;
- Tempo de vida limitado de alguns adesivos;
- Fraca resistência à propagação de fendas de alguns adesivos;
- Fraca resistência ao arrancamento.

Em termos de resistência de uma junta adesiva, deve-se ter em conta que a resistência de um adesivo e a resistência da junta são conceitos distintos. Os principais fatores que influenciam a resistência de uma junta adesiva são os seguintes [7]:

- **Propriedades mecânicas dos materiais envolvidos**

De um modo geral a resistência da junta aumenta com:

- Propriedades mecânicas do adesivo

Os adesivos mais tenazes e flexíveis têm em geral uma menor resistência mecânica. No entanto, a tensão média de rotura numa junta com este tipo de adesivos é usualmente superior.

O módulo de elasticidade de um adesivo tem consequências na distribuição das tensões ao longo do adesivo. Quanto maior a rigidez do adesivo, menos uniforme é a distribuição de tensões ao longo deste, o que pode reduzir a resistência da junta.

A resistência à fadiga é também uma propriedade importante na resistência mecânica de uma junta. Este tipo de resistência é geralmente menor para adesivos frágeis.

➤ Ductilidade do adesivo

De um modo geral, os adesivos de ductilidade elevada têm uma resistência mecânica inferior. No entanto, a ductilidade dos adesivos é benéfica para a resistência de uma junta adesiva na medida em que os adesivos mais dúcteis são menos sensíveis à propagação de fendas que os adesivos frágeis. De facto, os adesivos dúcteis permitem a redistribuição das tensões na camada de adesivo quando a sua tensão limite é atingida, ao invés de ocorrer a rotura imediata do adesivo, o que resulta numa resistência da junta superior.

➤ Flexibilidade do adesivo

A flexibilidade de um adesivo está também relacionada com a ductilidade deste. Na construção de juntas, a utilização de adesivos muito dúcteis pode originar juntas mais resistentes do que aquelas que utilizam adesivos menos dúcteis. Isto é possível devido à flexibilidade desses adesivos, que permite uma boa capacidade de deformação plástica e elevada resistência ao arrancamento.

• **Características geométricas da junta**

A geometria da junta tem também uma influência significativa na resistência de uma junta adesiva. De seguida descrevem-se os parâmetros geométricos mais relevantes característicos da geometria da junta.

➤ Espessura do adesivo

A espessura do adesivo é uma das características geométricas a considerar. Deve-se assim garantir uma espessura ótima para o adesivo (entre 0,1 e 0,5 mm), necessária à obtenção do melhor desempenho da junta. O aumento da espessura leva a uma distribuição mais uniforme das tensões ao longo do seu comprimento. Por outro lado, uma diminuição da espessura de adesivo provoca uma distribuição menos uniforme das tensões. Este comportamento está representado na Figura 2.

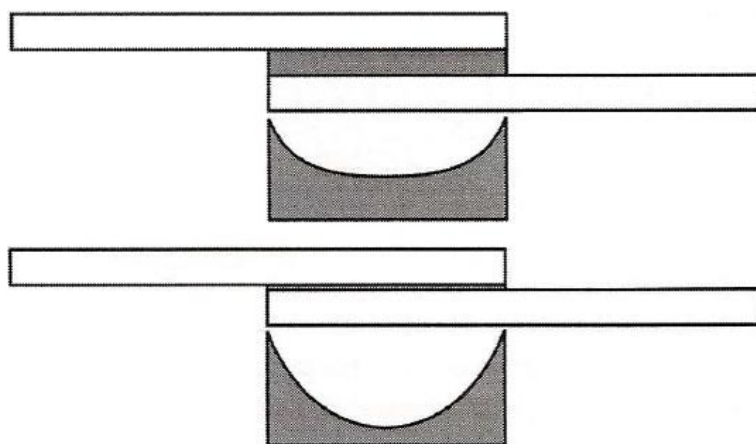


Figura 2 - Esquema da distribuição das tensões para diferentes espessuras de adesivo [7].

O aumento da espessura do adesivo pode provocar uma diminuição de resistência nas juntas. De facto, a plastificação localizada nas extremidades da sobreposição tem lugar para deslocamentos aplicados inferiores nas juntas de menor espessura de adesivo. Isto explica a menor resistência das juntas para espessuras de adesivo superiores [7]. Este comportamento é representado na Figura 3.

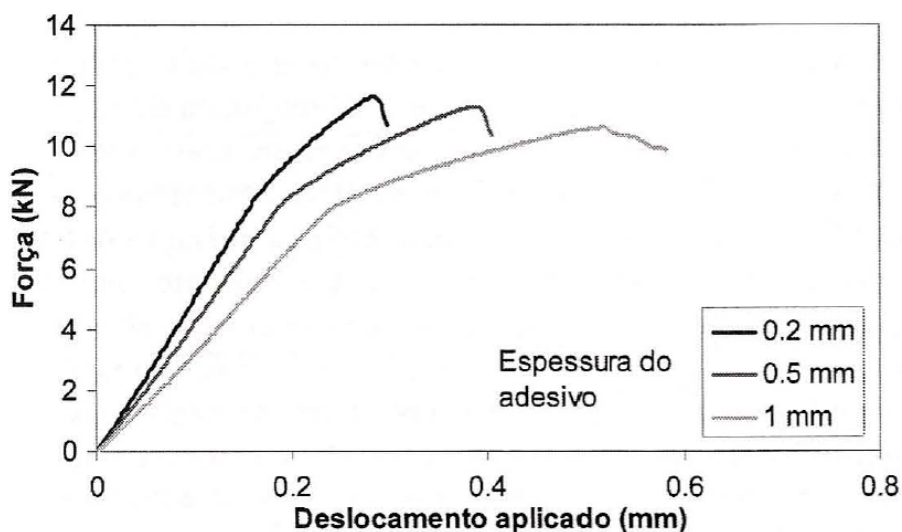


Figura 3 - Curvas $P-\delta$ para juntas de sobreposição simples com diferente espessura do adesivo

➤ Comprimento de sobreposição

O comprimento de sobreposição entre aderentes é outro parâmetro geométrico a ter em conta. Na construção de uma junta devem-se usar valores suficientemente elevados para o rácio entre o comprimento de sobreposição (l) e a espessura do aderente (t). A resistência da junta aumenta significativamente com l/t para valores pequenos deste

parâmetro. Todavia, a partir de determinados valores de l/t , o ganho de resistência é marginal e o peso do conjunto aumenta desnecessariamente [8]. Adams e Davies [9] propuseram uma metodologia simples para avaliar o efeito do comprimento de sobreposição na resistência das juntas coladas de sobreposição simples admitindo que quer o adesivo quer os aderentes possam sofrer deformação plástica. Estes autores aplicaram o modelo retratado na Figura 4 à previsão da resistência de juntas coladas de aço-epóxico, considerando três tipos de aço diferentes (alta, média e baixa resistência), e obtiveram boa concordância com os resultados experimentais.

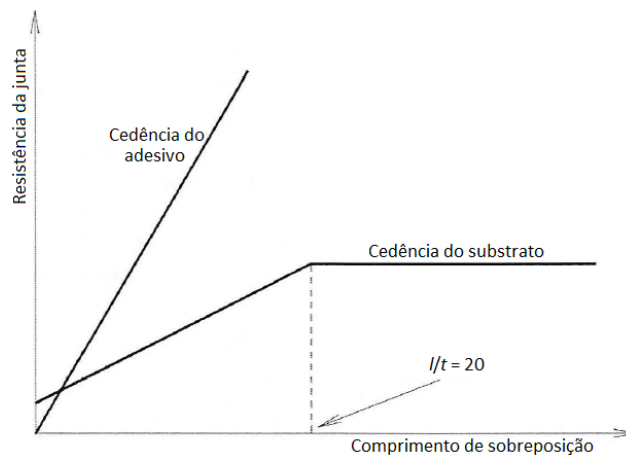


Figura 4 - Método de previsão da resistência de juntas baseado na cedência do adesivo e do aderente [9].

➤ Existência de filete no adesivo

Nos modelos numéricos de juntas adesivas normalmente assume-se que a extremidade do adesivo é quadrada. No entanto, na prática as juntas adesivas não apresentam essa geometria, a não ser que a junta seja maquinada de modo a que se aproxime da geometria teórica. Na realidade as extremidades do adesivo ficam com um filete de adesivo (Figura 5), devido ao excesso de adesivo que é expulso para fora da junta na altura de colagem dos aderentes.

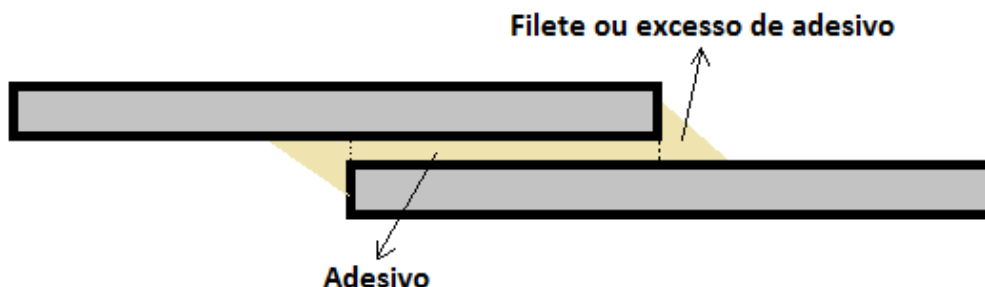


Figura 5 - Junta de sobreposição simples com um filete de adesivo.

A presença do filete de adesivo provoca uma redistribuição das tensões, aliviando os picos de tensão na extremidade do adesivo. Por sua vez, esta alteração conduz a um aumento da resistência da junta, especialmente na presença de adesivos frágeis.

➤ Geometria dos aderentes

A geometria dos aderentes pode ser alterada para promover o aumento de resistência da junta. Na Figura 6 estão representadas diferentes geometrias de juntas que têm como objetivo diminuir as concentrações de tensões nas extremidades da sobreposição.

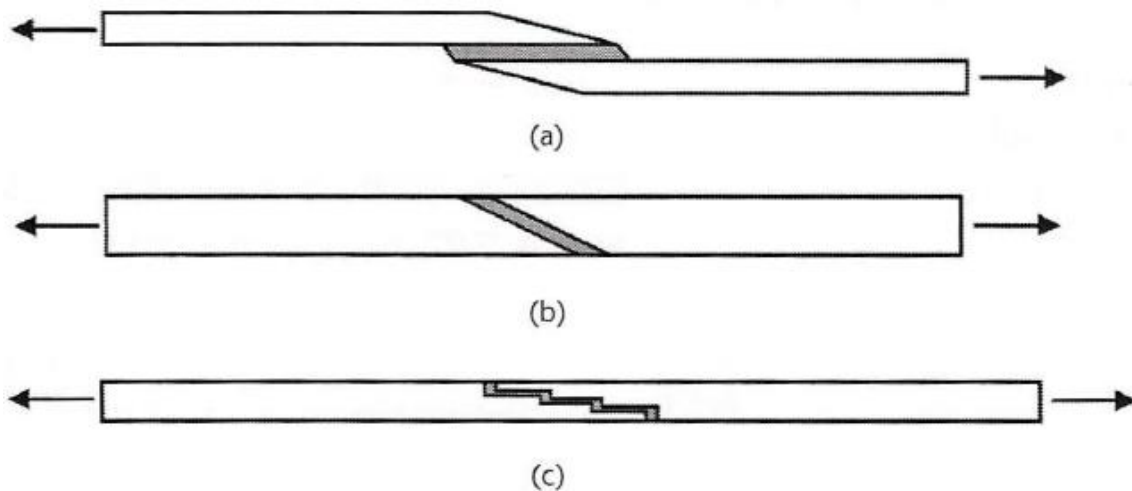


Figura 6 - Diferentes geometrias de junta com o objetivo de melhorar a resistência das juntas: (a) de sobreposição com chanfro exterior, (b) com chanfro interno (*scarf joint*) e (c) em degrau [7].

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Este subcapítulo apresenta os vários exemplos de aplicações de juntas adesivas em indústrias como aeronáutica, automóvel, calçado, entre outras.

- **Indústria Aeronáutica**

Desde há décadas que as ligações adesivas são usadas na indústria aeronáutica. Um bom exemplo de aeronave que usa adesivos na ligação dos seus diversos componentes é o *Havilland Comet*. A Figura 7 mostra os componentes do avião *Havilland Comet* que utilizam juntas adesivas na sua construção.

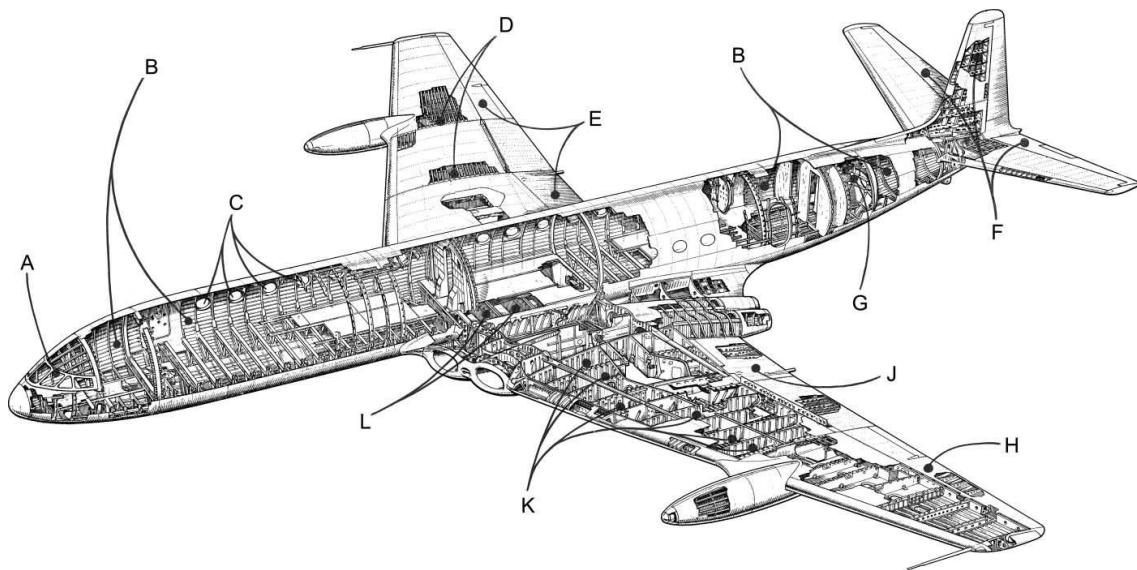


Figura 7 - Componentes do avião *Havilland Comet* que utilizam juntas adesivas na sua construção [10].

Na Figura 8 e Figura 9 estão representadas as juntas adesivas nas longarinas e em volta das janelas do avião *Havilland Comet*, respectivamente.

Estes tipos de aplicações são típicos das fuselagens dos aviões construídos nos finais de 1940 e inícios de 1950. Assim, para além do avião *Havilland Comet*, são também usados no *Havilland Dove* e *Heron*, *English Electric Canberra*, *Fokker F-27* e *F-28*, *Saab J 29* e *J35*, *Short Brothers Sperrin*, *SB 5*, *Sherpa* and *Seamew*, *Vickers Vanguard* e *Chance Vought F4* e *F7*.

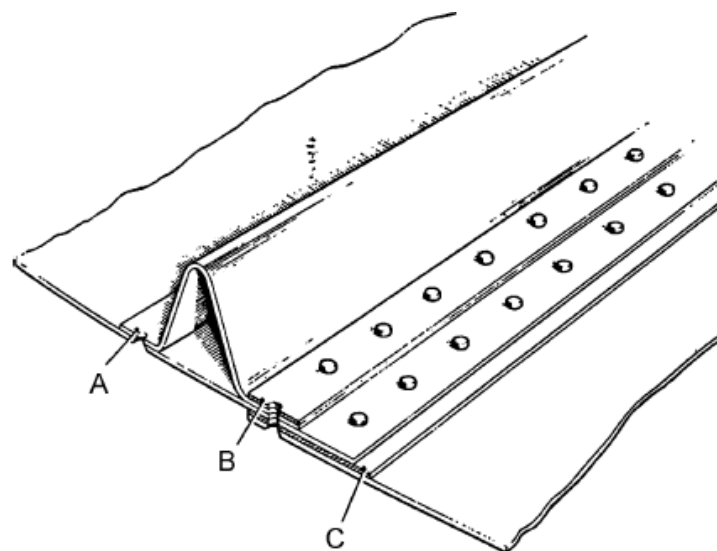


Figura 8 - Esquema de colagem das longarinas do avião *Havilland Comet*: (A) colagem da longarina à pele, (B) reforço de colagem da longarina e (C) reforço da borda de colagem à pele [10].

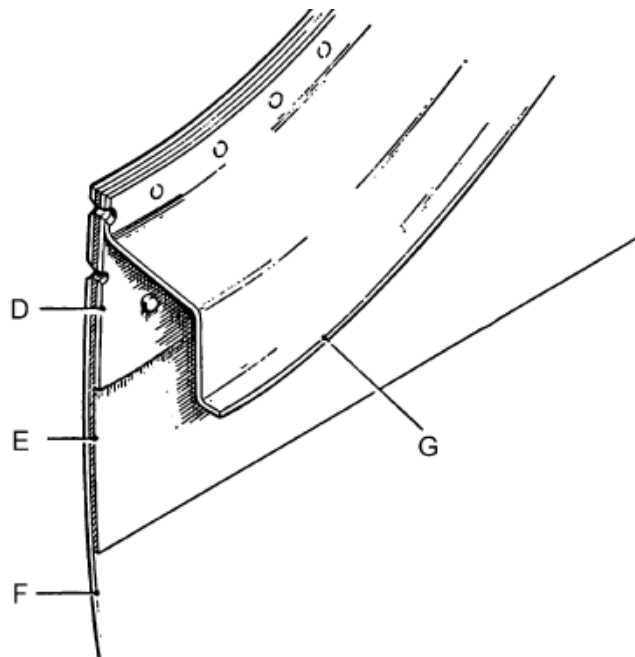


Figura 9 - Esquema de colagem em volta das janelas do avião *Havilland Comet*: (D) Dupla adesão à pele, (E) reforço de adesão à pele, (F) adesão de pele extra de reforço e (G) moldura da janela [10].

• Indústria Automóvel

O uso dos adesivos na indústria automóvel começou há cerca de 40 anos, para efeitos de selagem. Mais tarde, os adesivos passaram a ser usados de modo a prevenir a corrosão. Os primeiros adesivos estruturais foram usados no sentido de promover o aumento da rigidez do corpo do automóvel. Atualmente, os adesivos estão a ser usados como parte integrante da estrutura para efeitos de absorção de energia em situações de impacto. A tendência para o projeto de estruturas mais leves através da combinação de diferentes materiais, como aços de elevada rigidez, alumínio, ligas de magnésio, estruturas *sandwich* e plásticos reforçados a fibras, também potencia a utilização de adesivos estruturais pelos fabricantes de automóveis.

Hoje em dia os benefícios do uso de adesivos na construção das estruturas automóveis são:

- Processos robustos e seguros;
- Estrutura mais leve;
- Estruturas resistentes em caso de acidente;
- Melhor *design* de superfícies;
- *Design* modular.

Um exemplo de automóvel cujo o uso de juntas adesivas seja significativo é o Classe S coupé DaimlerChrysler [10], que apresenta mais de 100 m em juntas adesivas no corpo do automóvel. Outro exemplo [10] é o BMW série 7, que usa de mais de 10 kg de adesivo estrutural. Na Figura 10 estão representadas as zonas de aplicação do adesivo num BMW série 7. Este adesivo é aplicado juntamente com rebites auto perfurantes e permite a ligação de componentes de alumínio a aço.



Figura 10 - Zonas de aplicação do adesivo no BMW série 7 [11].

- **Indústria do Calçado**

Existem vários tipos de sapatos, como por exemplo, sapatos de desporto comuns e de alta competição, sapatos normalmente usados em trabalhos que podem por em risco a segurança do operador (denominados de calçado de segurança), sapatos comuns usados no dia a dia, entre outros. Dependendo do tipo de sapato, diferentes tipos de adesivo com características específicas são necessários. Durante o processo de fabrico, a colagem dos vários componentes do calçado comum não requer adesivos de elevada performance e durabilidade, pois estes apenas devem durar 5 anos no máximo. No entanto, o calçado de desporto de alta competição é extremamente exigente no que toca à redução do peso do sapato. Além de um reduzido peso, este tipo de calçado requer alta performance sob tensões de impacto e à flexão. Por outro lado, o calçado de segurança também é exigente nas ligações adesivas. Este tipo de calçado é usado na presença de solventes, sob condições de elevada temperatura e é sujeito a grandes esforços. Por esta razão pretende-se que o adesivo usado no seu fabrico tenha características específicas, de modo que tenha um período de vida elevado.

Na produção do calçado, não há dúvidas que a união entre a parte superior do calçado e a sola é a mais crítica. Quando a aderência entre a parte superior do sapato e a sola não é suficiente para que este cumpra as regras de qualidade exigidas, o sapato deve ser costurado.

Na Figura 11 pode-se observar um esquema dos vários componentes de um sapato, onde se pode ver as várias partes constituintes deste que precisam de ser unidas.

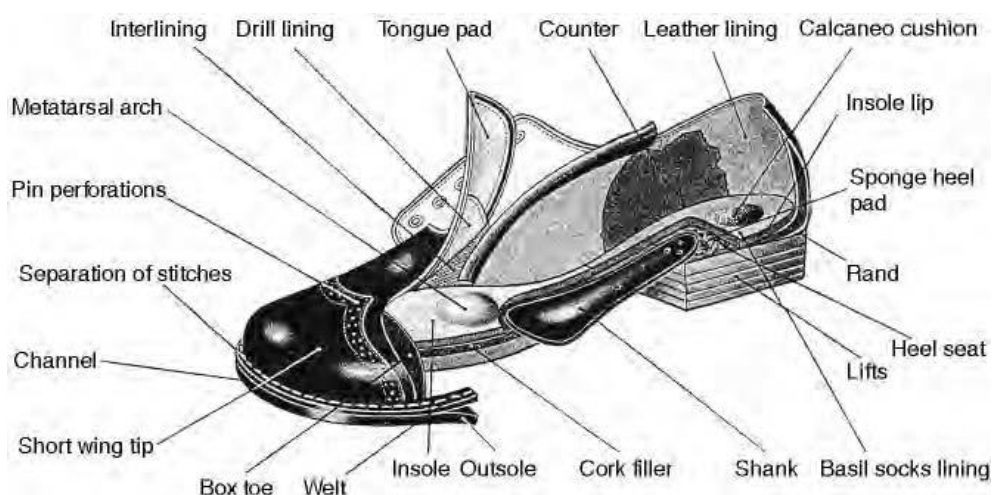


Figura 11 - Esquema dos vários constituintes a unir num sapato [10].

Para o sapato representado na Figura 11 são utilizados vários tipos de adesivos para cada tipo de operação de fabrico (Tabela 1)

Tabela 1 - Exemplo do tipo de adesivos usados no sapato da Figura 11 [10].

Tipo de operação no sapato	Tipo de Adesivo
Montagem	<i>Cement</i> (adesivo de borracha)
Cobertura lateral	<i>Polyurethane</i>
Ligação da lateral à sola	<i>Polyester hot-melt</i>
Ligação da “box toe”	<i>Polyamide hot-melt</i>
Ligação das almofadas	<i>Waterborne polyurethane</i>
Ligação das “lifts”	<i>Polyester hot-melt</i>
Ligação das “socks lining”	<i>Polychloroprene</i>
Ligação da parte superior à sola	<i>Polychloroprene</i>

- **Indústria da construção**

Na indústria da construção existem variadas aplicações, como por exemplo [10]:

- Colagem de aço ao alumínio

Na colagem do aço ao alumínio são usados diferentes tipos de adesivos, como *hot-melt*, adesivo de contacto, adesivo anaeróbico, adesivo acrílico, cianoacrilato, adesivo epóxico, adesivo poliuretano e adesivo de silano modificado.

- Adesivos para colagens de madeiras

A colagem de madeiras também é uma das aplicações muito usadas na indústria da construção [12]. Tem-se, como exemplo, os diferentes adesivos usados tradicionalmente para colagem de madeiras: adesivos naturais (colas animais e colas de caseína); resinas de formaldeídos (fenol – formaldeído (FF), uréia-formaldeído (UF), melamina (MF) e melamina-uréia-formaldeído (MUF), resorcinol – formaldeído (RF) e fenol - resorcinol – formaldeído (FRF)). Para além destes também podem ser usados poliuretanos (PUR), emulsão de polímero de isocianato (EPI) e resina epóxida (EPX).

- **Industria naval**

Os materiais típicos usados na construção de cascos e pavimentos de navios são normalmente plásticos reforçados com fibras (PRF) [12]. Para além da ligação de componentes deste material, também se utiliza a ligação de PRF com outros materiais, como:

- PRF - (placa) madeira;
- PRF - PVC (espuma);
- PRF - metal (alumínio ou aço).

Como exemplos de aplicações estruturais tem-se:

- Quadros, reforços e anteparas dos painéis;
- Forros internos do casco;
- Ligação do convés ao casco;
- Itens de elevado peso como quilhas de lastro, rolamentos do leme, casco ou outras estruturas;
- Junção de painéis do casco;
- Ligação das janelas aos painéis.

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Os modos de carregamento fundamentais a que as juntas adesivas podem estar sujeitas são a tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento [7].

- **Tração** – este tipo de carregamento consiste na aplicação de forças perpendiculares ao plano da junta, produzindo esforços normais de tração ao longo da totalidade da junta. A Figura 12 representa esquematicamente este tipo de carregamento, bem como a distribuição típica de tensões, que se caracteriza por ser aproximadamente constante na zona interior da ligação com picos de tensão nas extremidades devido ao efeito de Poisson.

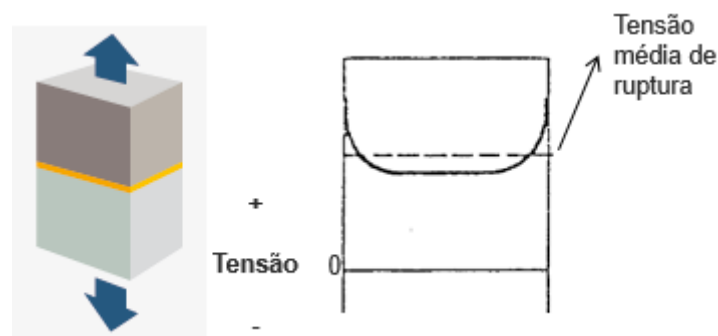


Figura 12 - Esquema de carregamento de tração [13].

- **Compressão** – tipo de carregamento em que as forças são aplicadas de forma a comprimir um aderente contra o outro, provocando tensões constantes ao longo do adesivo (Figura 13).

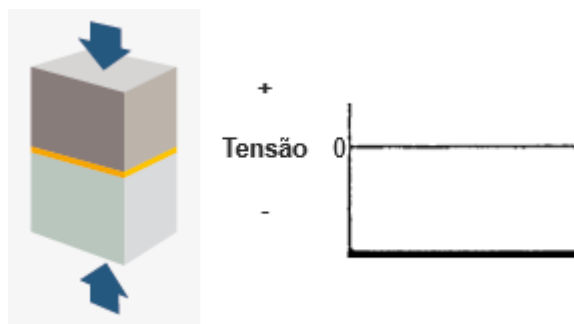


Figura 13 - Esquema de carregamento de compressão [13].

- **Corte** – carregamento caracterizado pela aplicação de forças no plano do adesivo, provocando o escorregamento entre os dois aderentes. Observa-se que as extremidades da junta ficam sujeitas a concentrações de tensões, enquanto a região central da junta pouco contribui para a sustentação da carga (Figura

14(a)). Esta distribuição está relacionada com o efeito da deformação diferencial dos aderentes na direção de solitação já que, em cada uma das extremidades da ligação, se observa que um dos aderentes apresenta uma deformação longitudinal elevada, enquanto o outro não se encontra carregado.

- **Clivagem** – este tipo de carregamento resulta da aplicação de forças na extremidade de uma junta rígida que tendem a separar os aderentes. As juntas sob clivagem ou arrancamento são muito menos resistentes do que aquelas sujeitas a corte porque a tensão está concentrada numa área muito pequena. Na Figura 14(b) está representada a distribuição de tensão no adesivo numa junta em clivagem. Toda a tensão fica localizada na extremidade da junta. Como tal, o adesivo na restante porção da ligação pouco contribui para a resistência da junta.
- **Arrancamento** – este tipo de carregamento consiste em forças aplicadas na extremidade de uma junta onde pelo menos um dos aderentes é flexível e pode deformar plasticamente (Figura 14(c)). As tensões σ_y são semelhantes às de clivagem, embora se apresentem mais concentradas na extremidade solicitada da junta. Por conseguinte, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem.

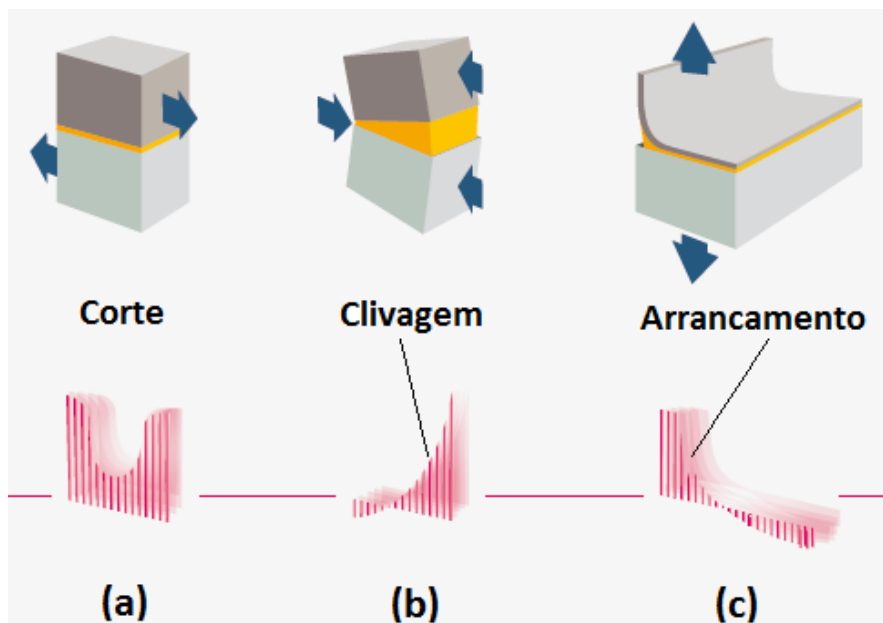


Figura 14 – Esquemas de carregamento: (a) corte, (b) clivagem e (c) arrancamento [13].

Muito importante neste estudo é referir os comportamentos do adesivo em resposta a um determinado carregamento mecânico. Na Figura 15 estão representados dois exemplos de solitações a que um adesivo pode estar sujeito e abaixo o seu respetivo comportamento de tensões ao longo do comprimento do adesivo.

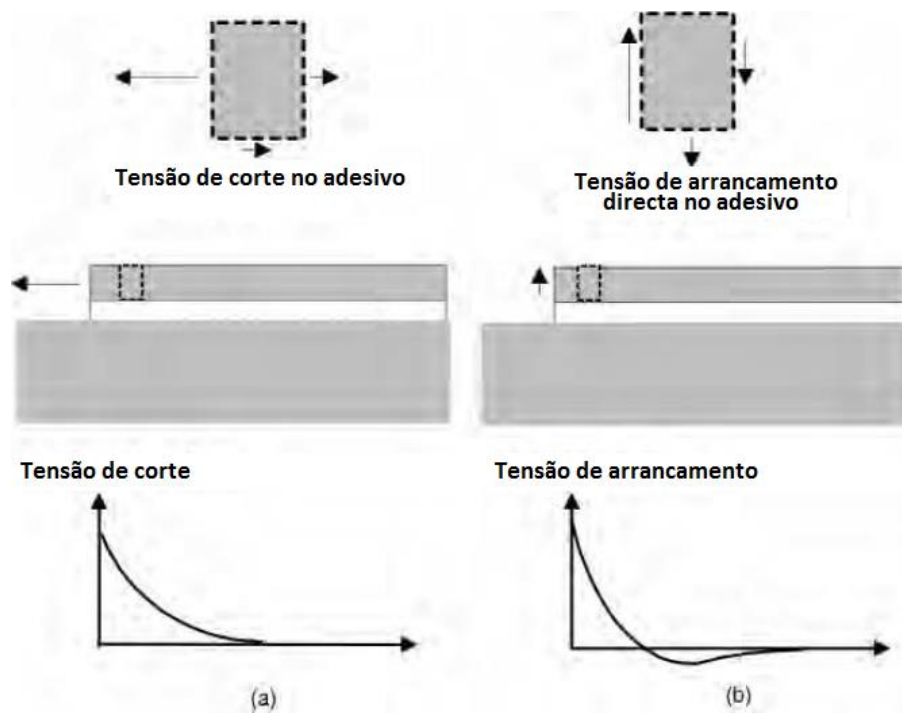


Figura 15 - Exemplos de solicitação no adesivo: (a) solicitação com tensão τ_{xy} presente e (b) solicitação com tensão σ_y presente [12].

No caso representado na Figura 15 (a), a junta é submetida ao corte. Esta solicitação tem como resposta um esforço de corte na camada adesiva. Analisando o comportamento das tensões τ_{xy} representado no gráfico, verifica-se que a tensão diminui gradualmente desde a extremidade livre do adesivo para a zona interior da camada do adesivo.

Na Figura 15 (b), a junta é submetida ao arrancamento. Este tipo de carregamento induz tensões σ_y no adesivo. Analisando a distribuição de tensões correspondente, verifica-se uma diminuição das tensões desde um valor máximo de arrancamento desde a extremidade da ligação, passando por um ligeiro pico de compressão até as tensões σ_y se tornarem nulas.

Quando se analisam juntas adesivas sujeitas a carregamentos arbitrários, deve-se ter em conta 3 tipos de carregamentos: força de arrancamento, força de corte e momento de flexão (Figura 16).

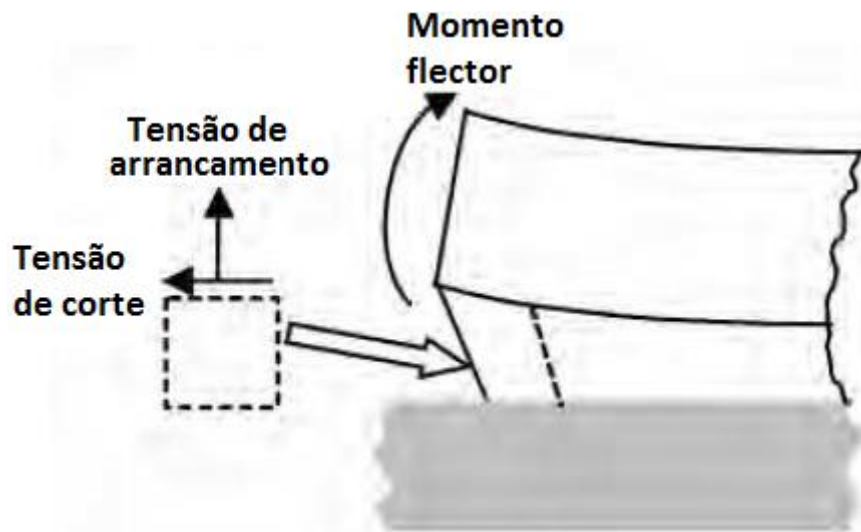


Figura 16 - Esquema de momento fletor existente em junta adesiva [12].

Através da análise da Figura 16 verifica-se que, quanto existe um momento fletor em juntas adesivas, são geradas tensões τ_{xy} e σ_y .

Na Figura 17 está representada uma junta em T, carregada em ambos os aderentes em L, com forças de corte e momentos fletores iguais e em sentidos opostos.

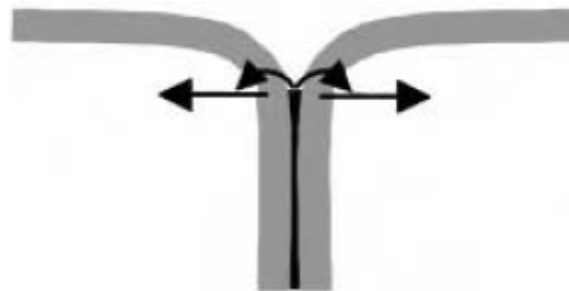


Figura 17 - Exemplo de carregamento que junta T pode estar sujeita [12].

No tipo de carregamento representado na Figura 17, os momentos fletores e as forças de corte induzidas em ambos os aderentes em L produzem tensões σ_y na mesma direção. No entanto, o momento fletor e a força de corte apresentam sentidos opostos em cada um dos aderentes em L, o que faz com que não haja tensões τ_{xy} .

As juntas adesivas, ao estarem sujeitas aos diferentes tipos de carregamento anteriormente mencionados, podem sofrer vários tipos de rotura. Os principais tipos de rotura [14] possíveis de ocorrer são os seguintes:

- **Rotura Coesiva** – Acontece quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte que a resistência interna do adesivo. Após rotura verifica-se que ambas as

superfícies estão cobertas por adesivo (Figura 18). Este tipo de rotura é o que se pretende quando queremos que esta ocorra apenas no adesivo de modo a que não danificar os aderentes.

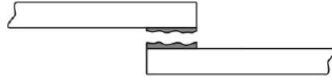


Figura 18 – Junta adesiva com rotura coesiva [7].

- **Rotura Adesiva** – Acontece na interface de um dos aderentes. Após rotura verifica-se que apenas uma das superfícies contém adesivo (Figura 19). Neste tipo de rotura os aderentes não são danificados. Ocorre nos casos em que a preparação dos aderentes para colagem não foi a ideal. A presença de contaminantes nos aderentes na altura de colagem também é propícia para que ocorra este tipo de rotura.

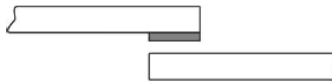


Figura 19 - Junta adesiva com rotura adesiva [7].

- **Rotura Mista** – Caracteriza-se como sendo uma mistura do que acontece na rotura adesiva com a rotura coesiva (Figura 20). Neste tipo de rotura os aderentes não são danificados. As causas que podem provocar rotura mista podem ser a má limpeza parcial ou falta de homogeneização na mistura do adesivo.



Figura 20 - Junta adesiva com rotura mista [7].

- **Rotura do Aderente** – Acontece quando a rotura se dá no aderente (Figura 21). Neste tipo de rotura os aderentes são danificados. Ocorre quando a resistência da ligação excede a resistência dos aderentes.



Figura 21 - Junta adesiva com rotura do aderente [7].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Existem diferentes configurações possíveis de juntas adesivas. De seguida são apresentadas e descritas as configurações mais usuais em aplicações reais [14].

➤ Juntas topo a topo

Este tipo de juntas adesivas não suporta esforços de flexão pois estes induzem clivagem no adesivo. Para reduzir a possibilidade de ocorrer rotura na junta por clivagem podem-se fazer modificações aos aderentes das juntas, como mostrado na Figura 22.

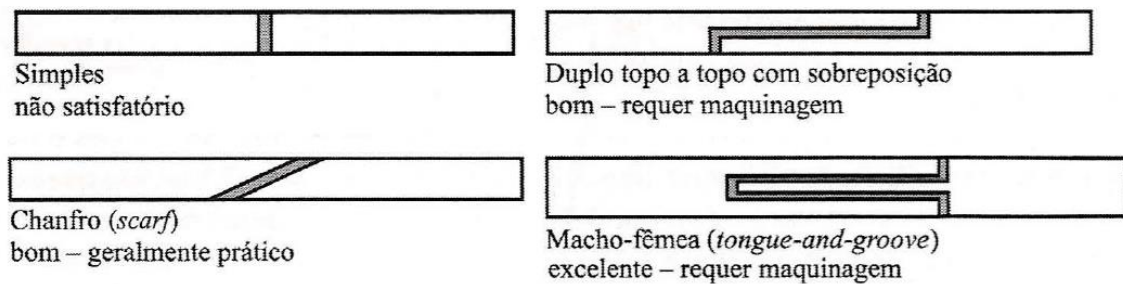


Figura 22 - Exemplo de juntas topo a topo [7].

➤ Juntas de sobreposição

São as mais comuns devido à facilidade de execução e a solicitarem o adesivo maioritariamente ao corte. No entanto, as forças transmitidas não são colineares, o que introduz tensões σ_y significativas nas extremidades da sobreposição. Para diminuir este efeito podem-se fazer algumas modificações às juntas, como mostrado na Figura 23.

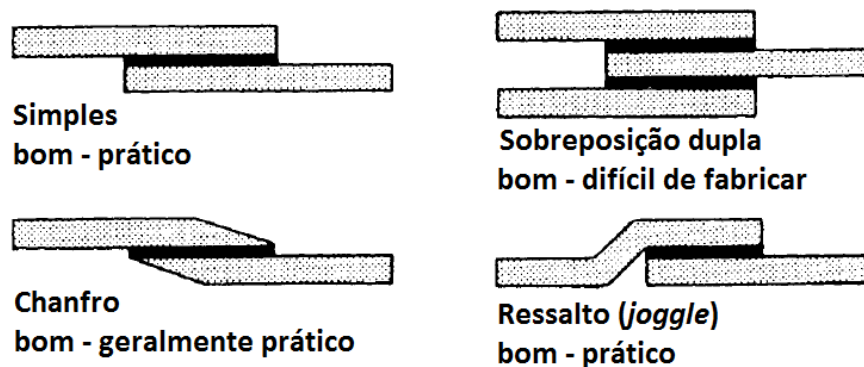


Figura 23 - Exemplos de juntas de sobreposição [14].

➤ Juntas de tira (*strap joint*)

São apresentadas na Figura 24 várias configurações de juntas de tira. Tal como na junta de sobreposição simples, a junta de tira simples é sujeita a esforços de arrancamento. A junta de tira dupla reduz o momento-fletor e é por isso preferível. As tiras com chanfro e as juntas macho-fêmea (*recessed*) são as mais eficientes, mas requerem maquinagem dos aderentes.

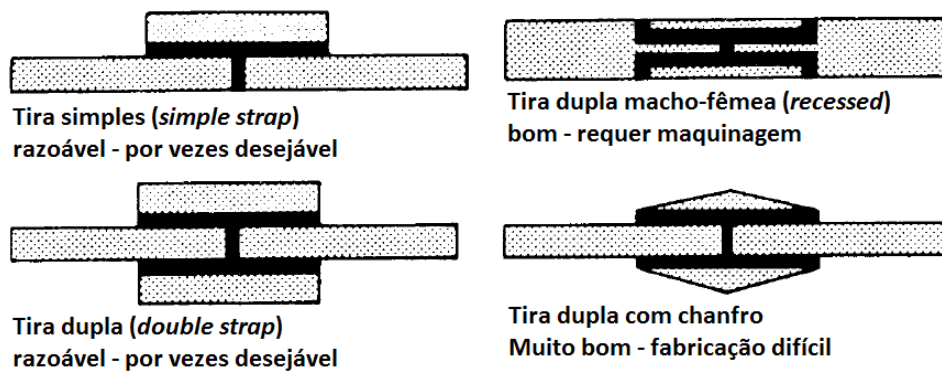


Figura 24 - Exemplos de juntas de tira [14].

➤ Juntas cilíndricas

São habitualmente utilizadas na ligação de varões e tubos. São mais vantajosas relativamente às topo-a-topo pois, para além de diminuírem o efeito de arrancamento, também promovem uma área resistente maior. Estão representados na Figura 25 alguns exemplos deste tipo de junta.

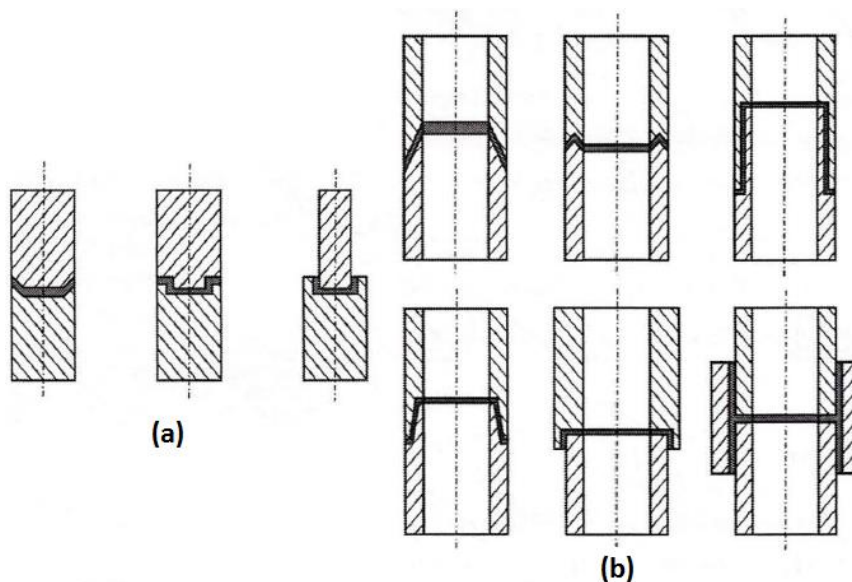


Figura 25 - Exemplos de juntas cilíndricas: (a) juntas para varões e (b) juntas para tubos [14].

➤ Juntas em T

Este tipo de junta é caracterizado por uma orientação tipicamente perpendicular dos dois componentes (ângulo de 90°). O carregamento pode ser transverso (T) ou normal (N). O objetivo principal é a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo. Na Figura 26 estão representados alguns exemplos de juntas em T.

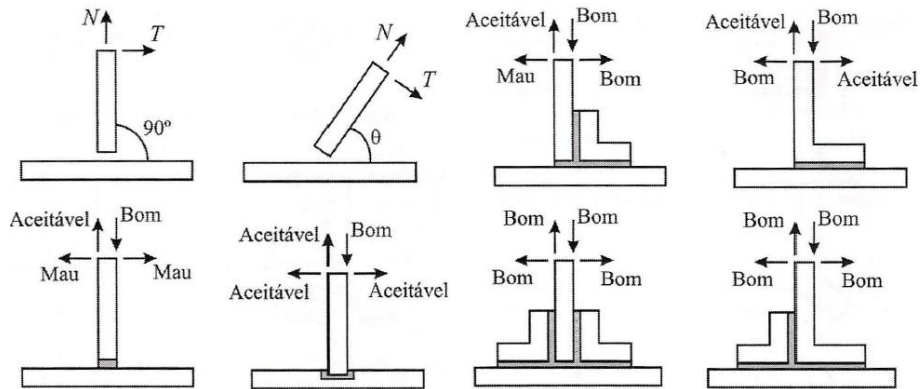


Figura 26 - Exemplos de juntas em T [7].

➤ Juntas de canto

Este tipo de junta é semelhante às juntas em T, neste caso com a diferença da ligação ser efetuada nas extremidades dos aderentes. Na Figura 27 apresentam-se as soluções habitualmente utilizadas para diminuir o efeito de arrancamento no adesivo.

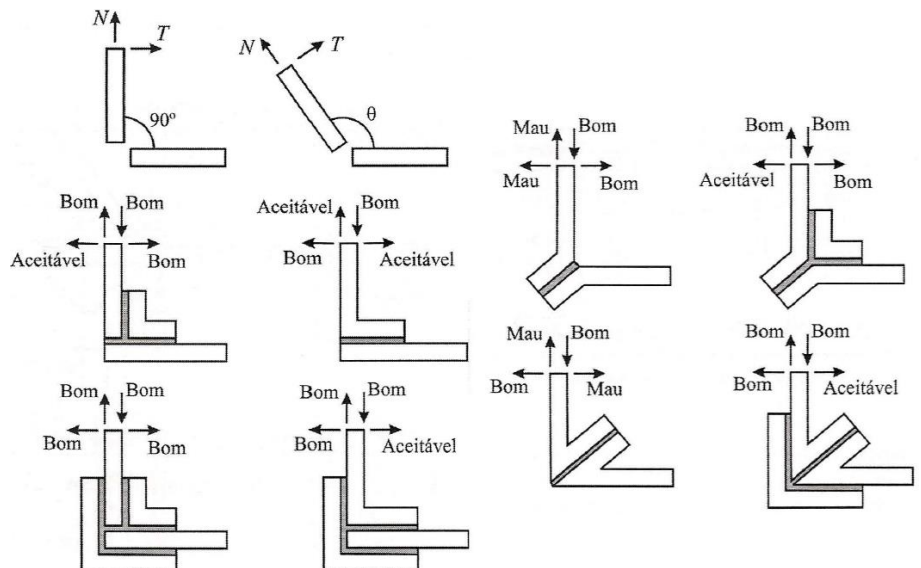


Figura 27 - Exemplos de juntas de canto [7].

➤ Juntas de reforço

A solicitação à tração de juntas entre aderentes finos e componentes espessos introduz geralmente tensões σ_y , como mostrado na Figura 28 (a). Também na Figura 28 (a) se apresentam soluções alternativas que permitem a diminuição das tensões σ_y . É também uma prática comum a colagem de reforços sobre aderentes finos com o objetivo de aumentar a sua rigidez. Todavia, nestes casos, as solicitações de flexão podem eventualmente induzir clivagem no adesivo. Na Figura 28 (b) apresentam-se algumas soluções para diminuir a clivagem de juntas reforçadas. Consegue-se melhorar a resistência às forças de flexão aumentando a área colada, a flexibilidade do rebordo e a rigidez da base.

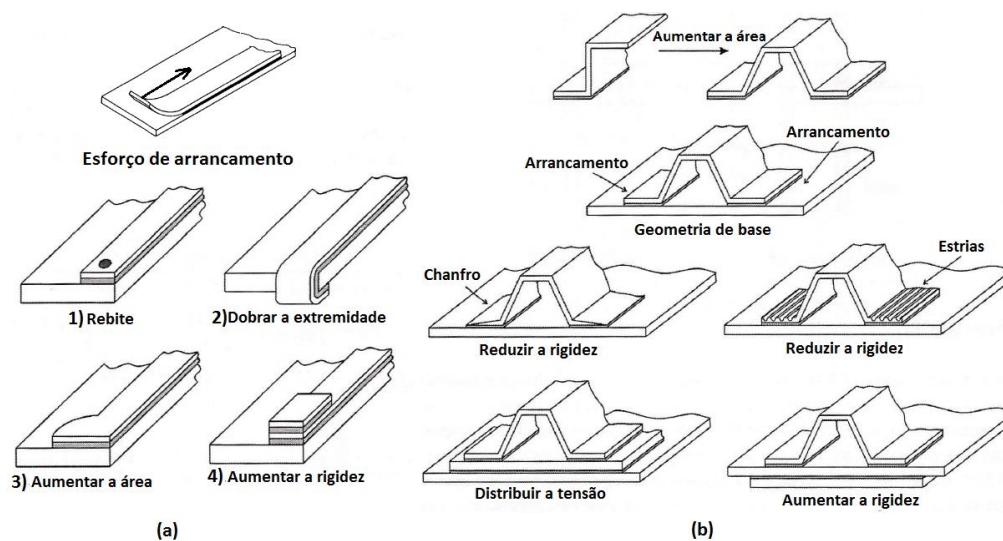


Figura 28 – Configurações de reforços para minimizar: (a) o arrancamento e (b) a clivagem [14].

2.1.5 Adesivos estruturais

Existe uma grande variedade de adesivos, bem como diversos critérios para os agrupar. Os adesivos podem ser classificados segundo a sua natureza, tipo de estrutura molecular, composição química, entre outros critérios. Normalmente os adesivos caracterizam-se segundo o seu desempenho, dividindo-se em dois grupos distintos, os estruturais e não estruturais. Os adesivos estruturais apresentam elevados valores de resistência mecânica e são normalmente utilizados em ligações de materiais de elevada resistência, tais como madeiras, compósitos e metais, permitindo uma resistência média ao corte da ligação adesiva superior a 6,9 MPa à temperatura ambiente [15]. São também conhecidos como um material que não sofre fluência sob ação de cargas bastante elevadas. Os adesivos estruturais são geralmente utilizados em ambientes com

condições adversas e são sujeitos a solicitações significativas e em juntas que necessitem de elevada durabilidade [15].

Os adesivos estruturais consistem em composições adesivas que são normalmente utilizados em aplicações permanentes de alta resistência [16]. Esta divisão está representada na Figura 29.

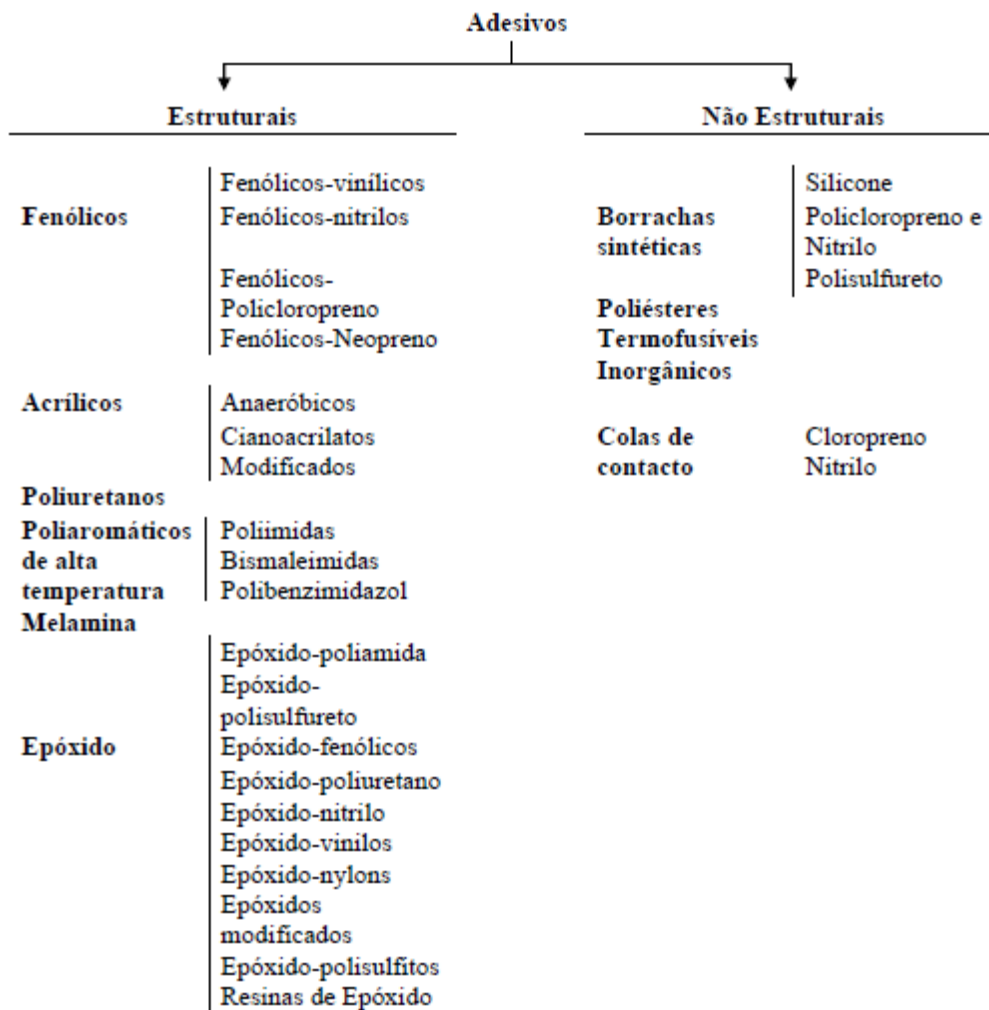


Figura 29 - Divisão dos tipos de adesivos dependendo do seu desempenho [7].

2.1.5.1 Tipos de adesivos estruturais

No conjunto de adesivos estruturais existentes, são os **Epóxidos** que se destacam a nível de uso comercial devido às suas características mecânicas e químicas superiores aos demais [7, 17]. São muito utilizados na indústria automóvel, aeronáutica, de construção e madeiras. Caracterizam-se sobretudo pela baixa densidade, elevada resistência ao

arrancamento e sobretudo elevada resistência ao corte. Permitem diferentes formulações, uma vez que estão disponíveis diversas resinas e endurecedores. São comercializados em diferentes formas, desde líquida de baixa viscosidade até sólida, ou mesmo em filmes. O processo de cura de um adesivo epóxico só com um componente ocorre geralmente a uma temperatura de 120°C devido ao facto do catalisador estar inativo à temperatura ambiente. Para adesivos com dois componentes a cura pode ser efetuada a partir dos 5°C sendo que, com o aumento da temperatura, se observa a diminuição do tempo de cura. O tempo necessário para se processar a cura total poderá variar entre 10 a 15 minutos até vários dias. Geralmente a cura não necessita de aplicação de pressão, bastando apenas o seu posicionamento entre as peças a serem coladas. Importante ainda salientar que as propriedades dos epóxidos podem ser modificadas e melhoradas com a inclusão de outras resinas, como a poliamida, polisulfito, fenólica, nitrilo, nylon, entre outras.

Os adesivos **Fenólicos** são muito utilizados pela indústria. São comercializados igualmente numa diversidade de formas, têm um custo relativamente baixo, possuem elevada resistência a altas temperaturas e agentes ambientais e elevada estabilidade dimensional e durabilidade. O seu processo de cura deverá ser realizado a elevadas temperaturas, e utilizados aderentes algo porosos ou aplicada pressão durante a cura, de modo a evitar a retenção de vapor de água na junta e respetivo aparecimento de vazios na zona de colagem. As principais desvantagens são a baixa resistência à corrosão e impacto. Geralmente, para melhorar a sua resistência face aos problemas apresentados, estes adesivos são combinados a resinas vinílicas ou elastómeros (nitrilos ou policloropreno) e curados a quente sob pressão.

Também muito utilizados pela indústria mecânica, os adesivos **Acrílicos** são vulgarmente divididos em acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados. Os **Acrílicos Anaeróbicos** apresentam uma resistência mecânica próxima de um epóxico, boa resistência a solventes e uma temperatura de utilização até 150°C. São curados à temperatura ambiente, de fácil manuseamento e utilizados sobretudo na fixação de peças estriadas, roscadas, rolamentos, peças de geometria cilíndrica e na colagem de diversos materiais tais como poliolefinas, nylon, cloreto de vinilo, entre outros. Os **Acrílicos Cianoacrilatos** são denominados por adesivos instantâneos, supercola ou cola tudo, uma vez que permitem colagens muito rápidas. Apresentam uma elevada resistência à tração, embora sejam bastante frágeis e muito fracos ao arrancamento. O processo de cura depende de fatores como humidade, acidez-basicidade (pH) e espessura da junta adesiva. A humidade é um dos principais responsáveis pelo processo de cura, sendo que o aumento do teor de humidade promove uma maior rapidez de cura. Têm uma vasta gama de aplicações, embora sejam maioritariamente usados em bricolage. Por último, os **Acrílicos Modificados** são alterados de modo a possuírem boa

resistência ao arrancamento e ao impacto, permitindo ligações resistentes mesmo com uma preparação menos cuidada das superfícies de ligação. São muito resistentes à humidade, e permitem variadíssimas aplicações, mas são menos resistentes quando sujeitos a temperaturas elevadas.

Os adesivos **Poliuretanos** resultam da reação entre um poliálcool ou poliéster-poliálcool com isocianato. Possuem como características mais relevantes uma boa flexibilidade e elevada resistência ao arrancamento, abrasão, choques e vibrações. Apresentam ainda bom comportamento em condições ambientais severas e têm uma temperatura de serviço entre -200 a 80°C. Têm uma elevada resistência ao corte (na ordem dos 20 MPa). O seu processo de cura ocorre à temperatura ambiente ou a elevadas temperaturas. Devido à sua boa molhabilidade e flexibilidade, os poliuretanos aderem de forma eficaz a polímeros que geralmente são complicados de colar.

Os adesivos de **Poliimida** ou adesivos **Poliaromáticos de elevada temperatura**, tal como o nome indica, são os adesivos que melhor comportamento apresentam a elevadas temperaturas ($\geq 200^\circ\text{C}$). Estes adesivos são bastante caros e difíceis de manusear durante o fabrico das juntas, estando disponíveis no mercado sob a forma de líquidos e filmes. São geralmente utilizados em aplicações de baixo peso sujeitas a temperaturas mais elevadas, como chips, eletroímãs e outros componentes eletrónicos. A sua cura é naturalmente mais difícil e problemática pois requer períodos elevados com ciclos de pressão e temperaturas altas.

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

No passado, as técnicas de previsão de resistência de ligações adesivas eram sobretudo utilizadas em estruturas de maior responsabilidade. No caso geral, as juntas adesivas eram sobredimensionadas dada a falta de informação e conhecimento sobre modelos de previsão. Com o passar dos anos foram-se desenvolvendo técnicas analíticas e numéricas para previsão de resistência cada vez mais refinadas, o que permitiu a utilização mais generalizada destas ferramentas.

2.2.1 Modelos analíticos

Volkersen [18] e Goland e Reissner [19] foram os primeiros exploradores de um vasto número de métodos analíticos para obter as distribuições de tensões em estruturas adesivas. O primeiro modelo analítico, denominado modelo de Volkersen, foi desenvolvido nos anos 30 para juntas adesivas de sobreposição simples. Este modelo considera os materiais como sendo totalmente elásticos e que a deformação do adesivo ocorre apenas em corte. Os modelos analíticos tornam-se mais complexos se o adesivo

apresentar deformação plástica, na ligação de aderentes em material compósito ou ainda de diferentes materiais. As simplificações em termos de geometria, solicitações e condições fronteira, bem como a previsão da resistência da junta colada baseada em critérios de tensões ou deformações, fazem com que nos dias atuais estes estudos analíticos sejam substituídos por análises numéricas [20].

2.2.2 Métodos numéricos

Atualmente estão disponíveis técnicas avançadas de modelação que garantem previsões precisas do processo de rotura das juntas adesivas, superando as limitações das abordagens anteriores. De um modo geral, os danos estruturais podem ocorrer por microfissuras ao longo de um volume finito ou uma região interfacial, reduzindo a transferência de carga. Uma simulação de EF com base numa modelação sólida contínua gera indevidamente plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo de mecânica do dano pode simular dano nos EF pela redução das cargas transferidas. Como resultado, torna-se possível a simulação passo-a-passo do dano e da fratura num caminho pré-definido ou arbitrariamente dentro de uma região [21]. Este é ainda um campo inovador sob intenso desenvolvimento, no sentido de obter técnicas mais precisas de modelação, métodos de estimativa de parâmetros de materiais fiáveis e simples, aumento de robustez e eliminação de problemas de convergência [22]. As técnicas de modelação do dano podem ser locais ou contínuas. Dentro da modelação de dano local, o dano ocorre numa linha ou superfície (análise a duas dimensões (2D) ou a três dimensões (3D), respetivamente), que simula uma rotura interfacial entre materiais, por exemplo, entre a ligação adesiva e o aderente, a fratura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Pela modelação contínua, o dano estende-se por uma área ou volume finitos (análise 2D ou 3D, respetivamente), para simular uma rotura ou para modelar uma fratura coesiva do adesivo. Os MDC são a técnica englobada na mecânica do dano com maior aplicação a juntas adesivas.

Os métodos numéricos que podem ser utilizados hoje em dia para a previsão da resistência das juntas adesivas são: a mecânica dos meios contínuos, mecânica da fratura, MDC (enquadráveis na mecânica do dano) e o método de EF estendido.

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Numa análise da mecânica dos meios contínuos os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos por modelos analíticos ou por EF, são geralmente usados em critérios de rotura para estimar a resistência da junta. Esta é atingida quando os valores máximos obtidos por critérios de tensão ou deformação

atingem os valores limites dos materiais. Como exemplos de critérios, referem-se o Critério da Tensão Normal Máxima ou o Critério da Tensão de Corte Máxima. A mecânica dos meios contínuos foi rapidamente aplicada para juntas em aplicações estruturais após a disponibilização do método de EF e programação em computador [23]. Todavia, esta técnica tem uma limitação intrínseca, uma vez que as estruturas ligadas com adesivos são propensas a tensões localizadas nas extremidades das regiões de sobreposição, devido às arestas vivas. Como resultado, na análise de estruturas ligadas com adesivos pelo método de EF, a tensão nestas zonas aumenta com o refinamento da malha e não se consegue obter convergência, dando previsões dependentes da malha [20]. Ao longo dos anos, foram introduzidas melhorias a esta técnica de modelação, tais como a definição de critérios mais complexos de tensões ou deformações para diferentes materiais e mecanismos de fratura, ou combinação com modelos de meios contínuos mais realistas, mas ainda assim a dependência da malha continua sem solução.

2.2.2.2 *Mecânica da fratura*

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os materiais são contínuos. Como tal, a análise de estruturas com defeitos ou dois materiais ligados com cantos reentrantes por esta técnica não é a mais adequada. De facto, a mecânica dos meios contínuos não fornece nenhuma solução para o estado de tensão nestas regiões singulares. As fendas são os defeitos mais comuns em estruturas para os quais foram desenvolvidas as técnicas da mecânica da fratura. Nestas técnicas, é bem aceite que as tensões são singulares (infinitas) na extremidade da fenda.

A Figura 30 (a) mostra o estado de tensão na proximidade da extremidade de uma fenda numa placa de dimensões infinitas, dado pela mecânica dos meios contínuos. Fisicamente, as tensões σ_e no ponto A devem ser finitas (ao invés de infinitas como prevê a Mecânica da Fratura). No entanto, as tensões σ_e na zona da fenda e longe da extremidade da fenda (ponto B da Figura 30 (a)) são nulas devidas às superfícies livres. Como tal, existe uma descontinuidade de tensões σ_e no ponto A não ser que σ_e seja 0. Uma distribuição de tensões deste tipo não pode ser acomodada pela mecânica dos meios contínuos, já que esta requer que as tensões sejam contínuas. Como resultado, as tensões na extremidade da fenda não ficam definidas (tornando-se infinitas).

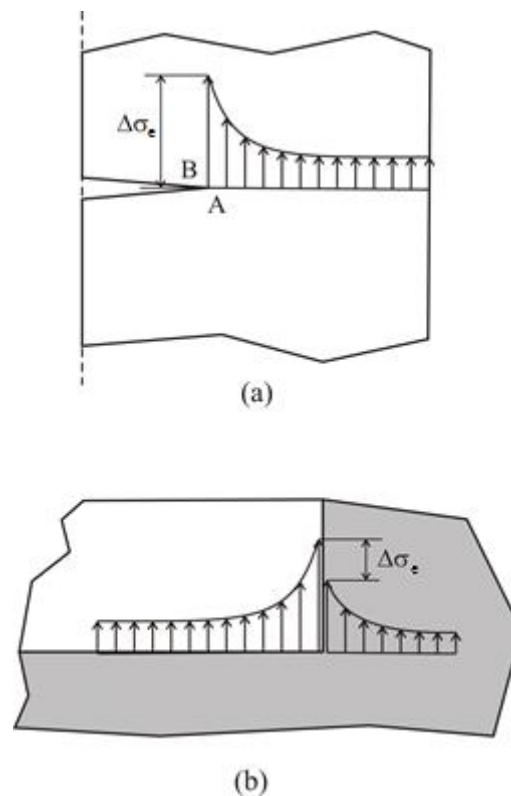


Figura 30 – Descontinuidade de tensões: (a) na proximidade de uma ponta de fenda e (b) num canto reentrante.

Uma vez que as fendas são dos defeitos mais comuns em estruturas, para analisar o seu comportamento desenvolveu-se o método da mecânica da fratura. Este considera que as tensões calculadas usando o modelo da mecânica dos meios contínuos são infinitas na extremidade de uma fenda. Estas tensões são infinitas sempre que o ângulo da fenda é inferior a 180° . Este resultado foi descoberto por Williams [24] para as tensões singulares num entalhe. Este argumento é igualmente aplicável para as tensões singulares em dois materiais colados entre si com um canto reentrante (Figura 30 (b)). A mecânica da fratura tem sido aplicada nos últimos anos, com sucesso, em muitos problemas de engenharia. Muitos estudos que lidam com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação e o respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura [25] em vez dos fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda se propaga numa interface ou perto dela. Contudo, a fratura de juntas adesivas ocorre usualmente em modo misto por causa das diferenças de propriedades entre os diferentes materiais e do campo de tensões complexo. Os critérios de rotura em condições de modo misto são idênticos aos critérios clássicos de rotura, embora deva ser introduzido o conceito de superfície ou envelope de fratura para lidar com a mixicidade do carregamento.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação em computador das técnicas baseadas na Mecânica da Fratura Linear Elástica teve um grande sucesso há algumas décadas, mas estas encontram-se limitadas ao comportamento elástico dos materiais. Além disso, os adesivos dúcteis atualmente existentes desenvolvem zonas plásticas que podem ser maiores do que a espessura dos aderentes. Os MDC foram desenvolvidos no final da década de 1950 / início da década de 1960 [26] para descrever o dano sob cargas estáticas na zona de processo coesiva à frente da extremidade da fenda. Os MDC foram amplamente testados, desde então, para simular a iniciação e propagação de fendas em problemas de rotura coesiva, interfacial ou delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [27]. Estes elementos podem ser facilmente incorporados numa análise de EF para modelação do comportamento da rotura em vários materiais, incluindo juntas adesivas [28]. O princípio base dos MDC é que uma ou mais regiões ou interfaces de rotura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas, em que se possibilita o crescimento do dano pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. Isto é possível pela definição de leis de tração-separação para a modelação de interfaces ou regiões finitas. As leis de tração-separação são tipicamente construídas por relações lineares em cada uma das fases de carregamento [29], embora se possa definir uma ou mais fases de forma diferente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais [30]. A Figura 31 mostra 3 tipos de lei que podem ser utilizadas nos elementos coesivos: triangular, trapezoidal e linear-exponencial. As leis coesivas mais comumente utilizadas no âmbito das ligações adesivas são as leis triangular e trapezoidal.

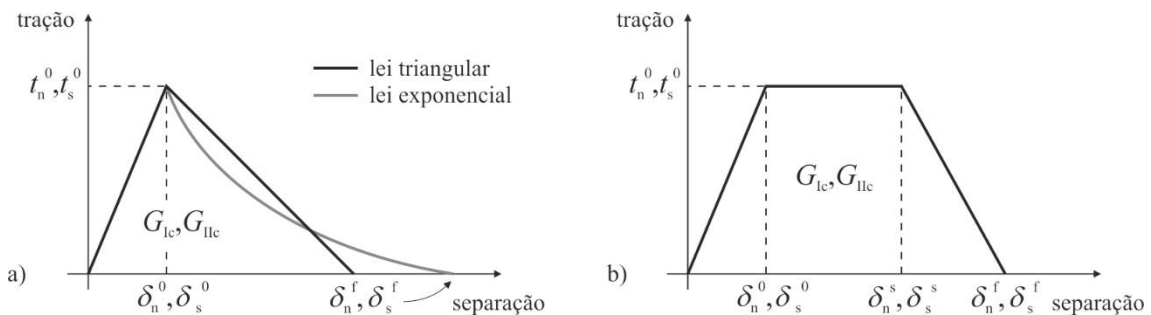


Figura 31 – Leis coesivas: (a) triangular e exponencial e (b) trapezoidal [31].

As leis dos MDC são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos, e estas podem ligar nós sobrepostos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, ou podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contacto para simular uma camada fina (por exemplo, uma ligação adesiva). Os MDC

proporcionam uma propagação macroscópica de dano definida pela resposta das leis de tração-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. A propagação das fendas é baseada nas energias de rotura. Os MDC permitem então modelar a evolução da resistência e amaciamento até à rotura, o que permite ter em conta a degradação progressiva das propriedades do material.

2.2.2.4 Mecânica do dano

Nas técnicas da mecânica do dano é estabelecido um parâmetro de dano para estudar a resposta que os materiais oferecem na presença de dano. Este conceito aplica-se a colagens adesivas finas ou laminados em compósito, para representar a severidade de dano no material durante a solicitação. Esta variável de dano pode ser usada numa lei de evolução de dano para modelar dano antes da existência de uma fenda e a propagação do dano. As variáveis de dano podem ser definidas em dois grandes grupos: (1) variáveis que preveem a quantidade de dano através da redefinição das propriedades do material constituinte e (2) variáveis ligadas a uma definição física de um tipo de dano específico, como porosidades ou áreas com micro fendas.

Hua et al. [32] propôs um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha com o objetivo de prever a resistência de juntas adesivas após deterioração ambiental. Foram estudadas juntas com um adesivo dúctil (Hysol® EA9321) para diferentes cenários de deterioração ambiental. O estudo foi realizado introduzindo um parâmetro de dano baseado nos deslocamentos na equação constitutiva do material danificado que é dependente da humidade, e que foi calibrado pelo teste *Mixed-Mode Flexure* (MMF) em provetes envelhecidos. O parâmetro de dano permitiu obter uma função linear do comportamento do material na ausência de dano, dando um valor reduzido das tensões dependendo do deslocamento plástico equivalente em vez da deformação para garantir resultados independentes da malha. A implementação deste conceito requereu a definição de um comprimento equivalente ligado a cada ponto de integração dos elementos sólidos. O deslocamento plástico equivalente foi calculado através da energia de rotura como o trabalho de fratura da tensão de cedência após o início do dano.

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos Extendido

O Método de EF Extendido é uma melhoria recente do método de EF para modelar o crescimento de dano em estruturas. O método utiliza leis de dano para a previsão da fratura baseadas na resistência dos materiais em maciço para a iniciação de dano e em deformações para a rotura (definido como G_{Ic}), em vez dos valores de resistência coesiva à tração/corte (t_n^0/t_s^0) ou deslocamentos correspondentes à resistência coesiva à

tração/corte (δ_n^0/δ_s^0) utilizados nos MDC. O Método de EF Extendido tem a vantagem, em relação aos MDC, de a fenda não necessitar de seguir um caminho pré-definido. De facto, as fendas podem-se propagar livremente dentro de uma região do material sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades, ou que haja a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda durante a análise [33]. Este método é uma extensão à modelação convencional por EF, cujas características fundamentais foram referenciadas no final dos anos 90 por Belytschko e Black [34]. O Método de EF Extendido baseia-se no conceito de partição da unidade e pode ser implementado no método de EF tradicional através da introdução de funções locais de enriquecimento para os deslocamentos nodais perto da fenda, para permitir o seu crescimento e a separação entre as faces da fenda [35]. Devido ao crescimento de dano, a extremidade da fenda modifica continuamente a sua posição e orientação em função das condições de carga e da geometria da estrutura, simultaneamente com a criação das funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos EF na proximidade da extremidade da fenda.

2.3 Juntas adesivas sujeitas a esforços normais

As juntas adesivas são invariavelmente sujeitas a tensões normais. Estas tensões normais podem ter mais ou menos preponderância na rotura conforme a geometria e tipo de sollicitação. As juntas em T e em L são muito semelhantes entre elas, e os carregamentos aplicados costumam resultar em sollicitações maioritariamente de arrancamento. Este tipo de juntas é tipicamente caracterizado pela orientação perpendicular dos aderentes (90°) embora esta possa ser diferente de 90° . O seu carregamento pode ser efetuado segundo a direção normal ou transversa.

2.3.1 Ensaios de caracterização ao arrancamento

O ensaio de arrancamento envolve uma grande deformação dos aderentes [36]. Neste ensaio, dois aderentes flexíveis são ligados entre si e depois separados através da aplicação de uma sollicitação de arrancamento. Se as espessuras dos aderentes forem idênticas, a configuração do provete assemelha-se a um T. Esta geometria tem vindo a ser usada e é normalizada por várias organizações, como a ASTM, BS e ISO. Estes testes são normalmente realizados a velocidade constante. Também permitem medir a resistência ao arrancamento, definida como a força média necessária para propagar a fenda de uma dada distância dividida pela largura da junta. Neste processo, a zona do pico de carga necessária para iniciar a propagação da rotura é propositadamente omitida da determinação da média dos valores. Alternativamente, estes testes podem muitas vezes ser considerados como testes de fratura, levando a uma análise da

mecânica da fratura. A análise da mecânica da fratura envolve a propagação de uma fenda, em vez de uma medida de uma resistência à rotura. Na presença de propagação da fenda a velocidade constante, a fenda propaga-se a uma velocidade que corresponde a metade do carregamento aplicado à junta. Durante a propagação da fenda, a força exercida pela amarra móvel da máquina de ensaios estende-se por 2 vezes a distância da descolagem enquanto os 2 aderentes se aproximam do alinhamento do carregamento. Assim, as energias aparentes de arrancamento, consideradas como as energias necessárias para criar descolagem de uma área unitária, são numericamente o dobro da resistência da junta em T. Estas energias aparentes de arrancamento são frequentemente referidas como as forças de adesão: a quantidade de energia medida pela máquina de ensaios para haver descolamento. Em alguns exemplos de solitações de arrancamento, a energia plástica é considerável e condiciona a deformação dos aderentes arrancados. A energia associada à descolagem da junta é frequentemente menor que a energia de arrancamento aparente. Esta energia adicional dissipada afeta as forças de arrancamento medidas da mesma maneira. Isto significa que nos ensaios de arrancamento a juntas em T, como em outras configurações de junta, os resultados são altamente dependentes da espessura e características de cedência dos aderentes.

Quando ambos os aderentes são suficientemente flexíveis para permitir que as partes não ligadas se dobrem perpendicularmente à parte ligada da junta, o teste de arrancamento em T é vantajoso. Os aderentes flexíveis são frequentemente suficientemente finos para serem fixos por garras comuns, existentes na maioria dos laboratórios. Não é necessário um dispositivo separado para fixar um dos lados do provete, como é necessário para os testes de arrancamento a 90° , *floating roller* (Figura 32d), *climbing drum* (Figura 32 c) ou *German wheel*, por exemplo.

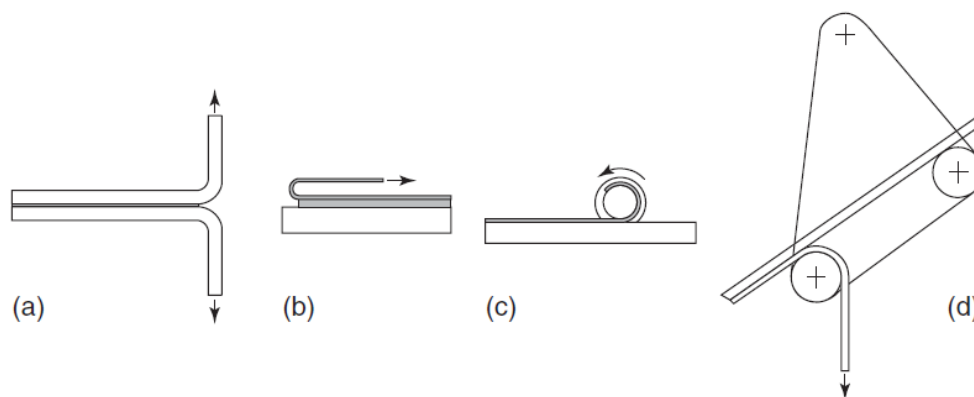


Figura 32 - 4 tipos de ensaios de arrancamento: (a) ensaio de arrancamento de junta em T com aderentes flexíveis, (b) ensaio de arrancamento para aderente rígido e aderente flexível, (c) ensaio *climbing drum* e (d) ensaio de arrancamento *floating roller* [36].

Os aderentes do teste de arrancamento em T têm espessura reduzida para permitir medir a capacidade de adesão com uma quantidade relativamente pequena de material de aderentes, reduzindo assim o custo das matérias primas associadas. Para além disso, aderentes relativamente flexíveis podem reproduzir juntas reais ligadas por adesivos como painéis de automóveis. Estes fatores combinados fazem com que o ensaio de arrancamento em T seja muito popular hoje em dia.

Talvez mais do que para muitos outros testes, o comportamento da junta de arrancamento em T e respetivos resultados dos ensaios dependem bastante da configuração específica que o provete assume durante o ensaio. Alterando a espessura ou a tensão de cedência dos aderentes, bem como o nível de adesão, é possível alterar radicalmente a configuração deformada do provete, a força de descolamento necessária, os procedimentos de análise relevantes e a interpretação dos resultados.


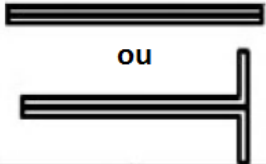
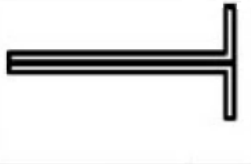



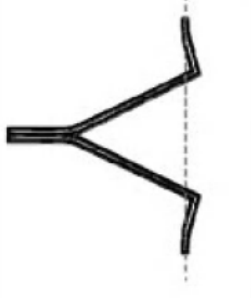
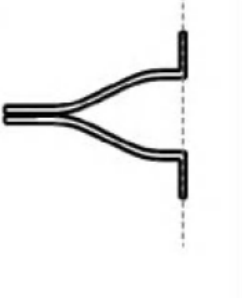
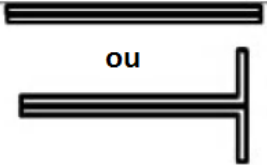

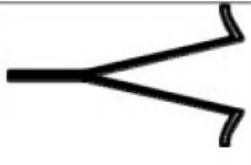

	Categoria 1	Categoria 2	Categoria 3	Categoria 4
Antes da descolagem				
Durante descolagem				
Após descolagem				

Figura 33 - Evolução do comportamento da descolagem das juntas para cada categoria [36].

As configurações resultantes podem ser divididas em quatro categorias diferentes, cada uma com a sua própria análise e interpretação. Estas categorias são as seguintes (Figura 33):

- **Categoria 1:** os aderentes deformam-se elasticamente; ocorre descolagem auto-semelhante;
- **Categoria 2:** ocorre deformação plástica dos aderentes; atingida descolagem auto-semelhante;
- **Categoria 3:** ocorre deformação plástica dos aderentes; não atingida descolagem auto-semelhante;
- **Categoria 4:** deformação elástica dos aderentes; descolagem auto-semelhante não atingida.

2.3.2 Juntas em L

Neste capítulo descrevem-se com algum detalhe alguns dos trabalhos científicos mais relevantes relativos a juntas em L. Li et al. [37] focaram-se no estudo de uma junta adesiva em L com aderentes em aço. Na Figura 34 pode-se ver um esquema da junta em estudo com as respetivas dimensões usadas.

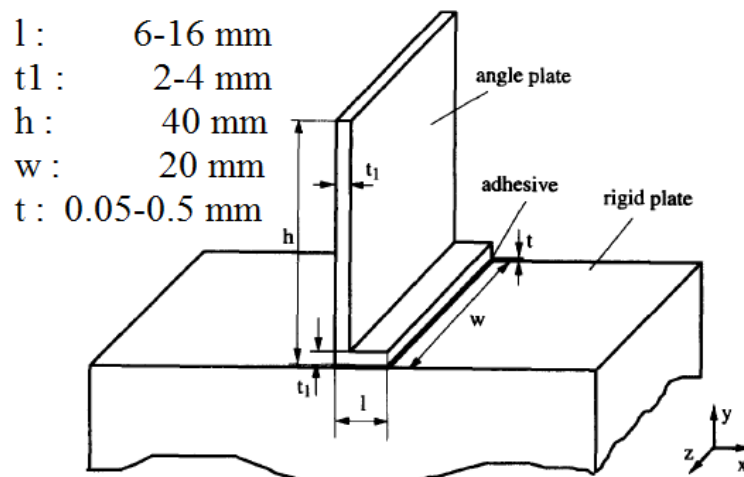


Figura 34 - Esquema com dimensões da junta L em estudo [37].

Consideraram-se valores de 6, 8, 10, 12, 14 e 16 para o comprimento de ligação l , mantendo uma espessura de adesivo t de 0,2 mm. Para os valores de espessura de aderente em L, consideraram-se 2 e 4 mm. O estudo foi realizado com 3 modos de aplicação das cargas à junta (P_x , P_y e M), como representado na Figura 35.

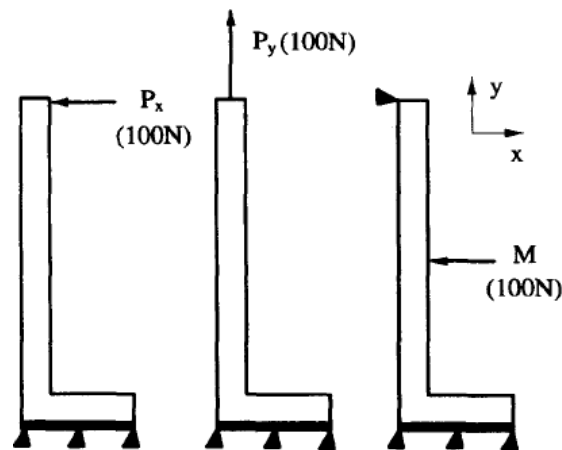


Figura 35 - Diferentes modos de aplicação das cargas [37].

Após uma análise de EF usando o programa ABAQUS®, foram analisadas as tensões σ_x , σ_y e τ_{xy} ao longo do adesivo. Observou-se que o aumento da espessura dos aderentes reduz a tensão máxima no adesivo. No entanto, aumenta o valor das tensões no final do comprimento de ligação, à exceção da carga P_y . Experimentalmente foram realizados testes com aplicação do modo de carga P_x , onde se usou uma junta com as dimensões esquematizadas na Figura 36. Ao longo do adesivo foram introduzidos 7 extensómetros para estimar as tensões.

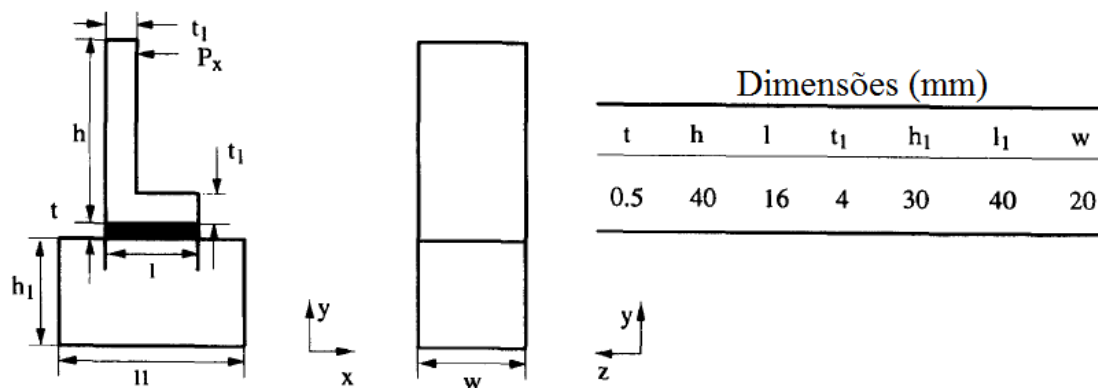


Figura 36 - Dimensões da junta usada no teste experimental [37].

Os testes experimentais permitiram concluir que, para os modos de carga P_x e M , a máxima concentração de tensões ocorre na extremidade do adesivo oposta à curvatura do componente em L. Este resultado leva a concluir que o início de propagação de rotura ocorre nessa zona. No entanto, no caso do modo de aplicação de carga P_y , as máximas concentrações das tensões verificam-se na extremidade do adesivo próxima da curvatura do componente em L, e o começo da propagação de rotura ocorreu nessa mesma zona. Para o caso do modo de carregamento M , os resultados foram

semelhantes aos verificados no modo de carregamento P_x , mas com valores de tensão inferiores.

O trabalho de Zhang et al. [38] consistiu num estudo de uma junta em L constituída por um componente em L de alumínio, colado a uma base em material compósito reforçado com fibras de carbono. Foi usado o adesivo estrutural J-135 de espessura 0,2 mm. Foram realizadas simulações numéricas por EF através do programa ABAQUS®. Na Figura 37 está representado um esquema da junta com as respetivas dimensões.

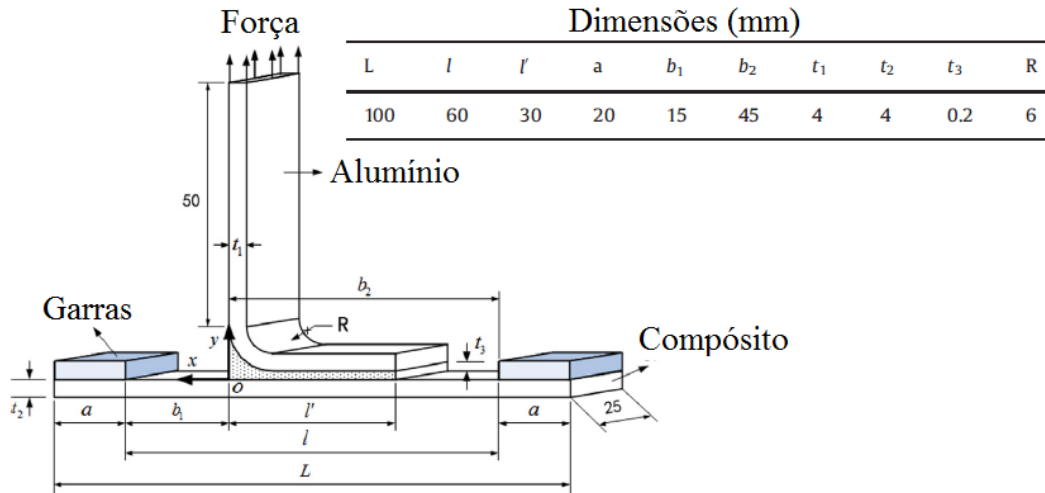


Figura 37 - Esquema da estrutura em L em estudo [38].

Como condições fronteira, considerou-se a aplicação de um deslocamento vertical na extremidade livre do aderente em L e o encastramento das extremidades do aderente em compósito. No sentido de estimar a tensão ao longo dos aderentes foram colados extensómetros nas juntas, como se pode ver na Figura 38.

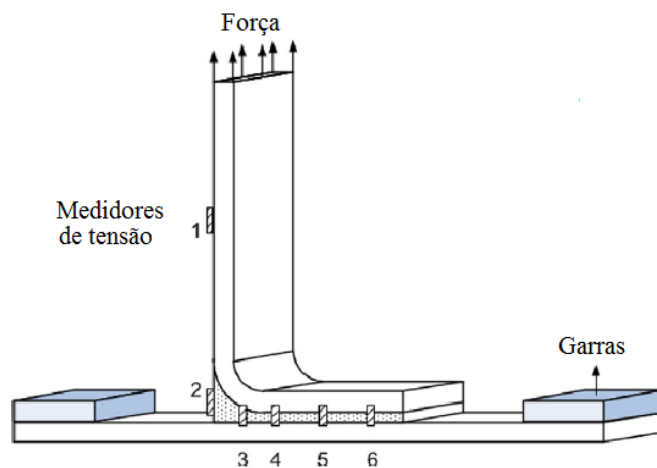


Figura 38 - Esquema representativo da posição dos medidores de tensão ao longo da junta [38].

Verificou-se que a concentração máxima de tensões ocorreu na zona de início do adesivo (posição 2 na Figura 38), comprovando o facto de esta ser uma zona crítica no que toca a concentração de tensões. Pela comparação entre os dados experimentais e numéricos concluiu-se que o método de EF permitiu modelar de forma precisa e obter resultados semelhantes aos verificados experimentalmente.

2.3.3 Juntas em T

Neste capítulo descrevem-se com algum detalhe alguns dos trabalhos científicos mais relevantes relativos a juntas em T. O trabalho de Burns et al. [39] consiste na análise de uma junta em T constituída por compósitos de resina epóxida impregnada com fibras de carbono, considerando uma estratégia de projeto inspirada na natureza (ligação entre os ramos e tronco de árvores). Esta teve uma cura em autoclave a 180°C durante 2 horas a uma pressão de 690 kPa com uma orientação de laminado (+/- 45, 0/90, +/- 45, 0/90)_s. A geometria e dimensões da junta em causa são as representadas na Figura 39.

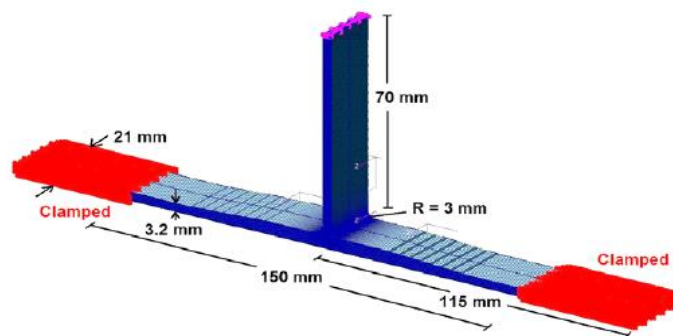


Figura 39 – Geometria e dimensões da junta T [39].

Foram considerados provetes com 3 condições de embebimento do componente em T no componente retilíneo da junta (25, 50 e 75% da espessura deste último). Para cada uma destas condições considerou-se um número de camadas de compósito proporcional à percentagem de embebimento. Para além deste facto compararam-se os resultados obtidos com juntas com o mesmo número de camadas do compósito, mas sem embebimento no componente retilíneo, como se pode ver na Figura 40.

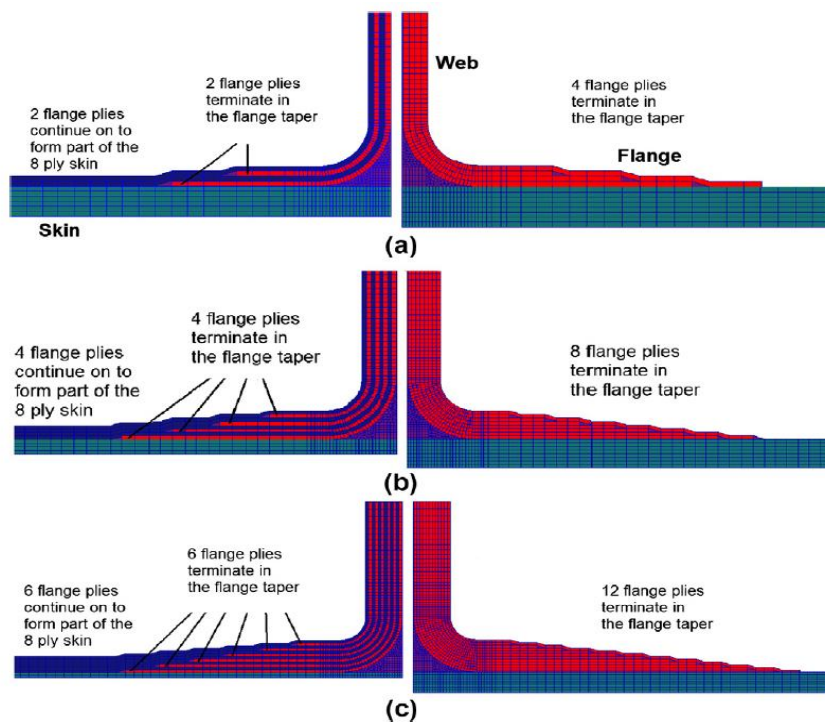


Figura 40 – Juntas em T inspiradas na natureza e com geometria convencional: (a) 25%, (b) 50% e (c) 75% de embebedimento [39].

Testaram-se 8 amostras para cada geometria de junta, usando uma máquina de ensaios com célula de carga de 50 kN. Consideraram-se 2 tipos de carregamento: (1) carregamento de tração na extremidade livre do componente em T a uma velocidade constante de 1mm/min e (2) e carregamento de flexão, pela aplicação de uma força transversal ao componente em T, aplicada na sua extremidade livre a uma velocidade de 3 mm/min. O trabalho apresentado permitiu concluir que a aplicação deste design estrutural baseado na natureza em juntas adesivas em T trouxe algumas vantagens como o aumento da ductilidade, aumento da energia absorvida até à carga de pico e a melhoria na tolerância ao dano, o que permitiu reduzir a possibilidade de rotura frágil catastrófica da junta em T.

Di Bella et al. [1] realizaram diversos testes a diferentes juntas em T para aplicações navais. Estas foram criadas por duas placas *sandwich* iguais com 500 mm de comprimento e 40 mm de largura. Foram estudadas 3 configurações diferentes com 2 tipos de empilhamento das camadas de reforço e com o adesivo metacrilato Adekit A 310 NF. Os 2 tipos de empilhamento usados foram de 0/90° e +45/-45°.

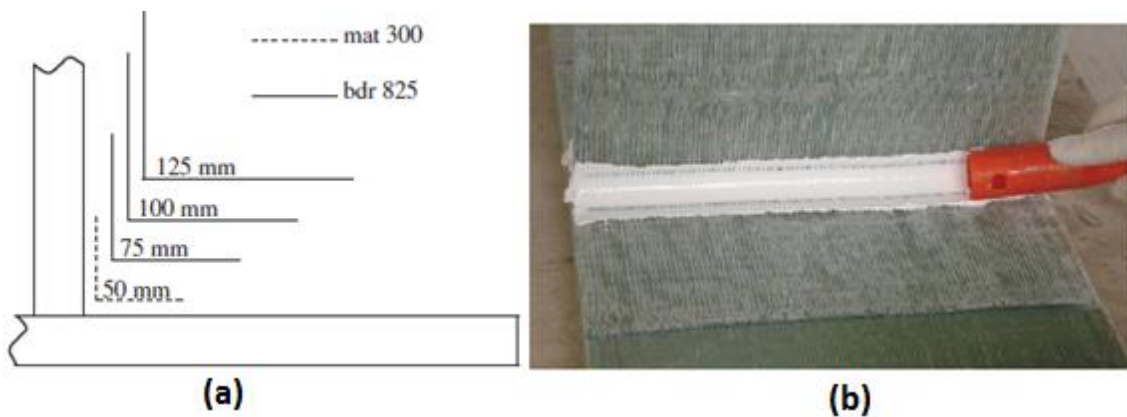


Figura 41 – Características das juntas: (a) esquema de dimensões escolhidas para estudo da junta e (b) filete de adesivo usado para reforço da junta [1].

Na Figura 41 (a) está representada a sequência de estratificação laminar da estrutura, em que a primeira camada (mat 300) consiste numa manta de fibras dispostas com orientação aleatória que vai aderir às camadas subsequentes (bdr 825), que consistem num tecido de fibras com orientação $0/90^\circ$ ou $+45/-45^\circ$. Na Figura 41 (b) é representada a terceira configuração de junta na qual foi usado um filete de adesivo para reforço da união. Para além destas juntas em T foram também construídos 2 tipos de juntas. Uma das juntas em T (caso 1) consistiu na colagem de duas placas *sandwich* em fibra de vidro com núcleo em PVC. O outro tipo de junta T (caso 2) consistiu na colagem de uma placa *sandwich* em fibra de vidro a uma placa *sandwich* em madeira com núcleo de balsa.

As juntas foram solicitadas a um esforço de tração com velocidade de 5 mm/min. Os resultados obtidos foram comparados com uma análise por EF realizada no Ansys® para um estudo do comportamento destas juntas. Após uma análise dos resultados obtidos numericamente e experimentalmente foram retiradas variadas conclusões para todos os casos de junta. No caso da junta C1 com orientação de fibras ($0/90^\circ$), observou-se início de rotura no núcleo da estrutura *sandwich*, seguido de rotura simultânea da estrutura de *sandwich* e da união dos aderentes da junta. Quanto ao caso da junta com orientação ($\pm 45^\circ$), esta apresentou um comportamento semelhante com os mesmos valores de força para o início de rotura (cerca de 4000 N). A orientação das fibras para o caso 1 não influencia o comportamento da junta face à solicitação. Na junta C1 com o filete de adesivo registou-se rotura do laminado superior do aderente base, seguida da rotura do adesivo de união da junta. A rotura no aderente demonstra que a adesão da junta foi bastante eficaz. No caso da junta C2 com orientação de fibras ($0/90^\circ$) e ($\pm 45^\circ$) obteve-se o mesmo comportamento face à solicitação imposta. Não ocorreu rotura do aderente em *sandwich*, mas sim na zona de interface entre o aderente de madeira e a placa de laminado do aderente em *sandwich*. A junta C2 com filete de adesivo teve início de rotura no aderente em *sandwich*, seguida de rotura na interface entre a base e o

aderente em madeira e também do adesivo em filete. A rotura ocorreu sempre no aderente base. Além disso, as forças resistentes foram semelhantes às observadas nos outros casos de junta tipo C2. O uso do método de EF demonstrou ser coerente com os resultados obtidos experimentalmente e fiável para uma análise pormenorizada em qualquer posição/secção da estrutura solicitada.

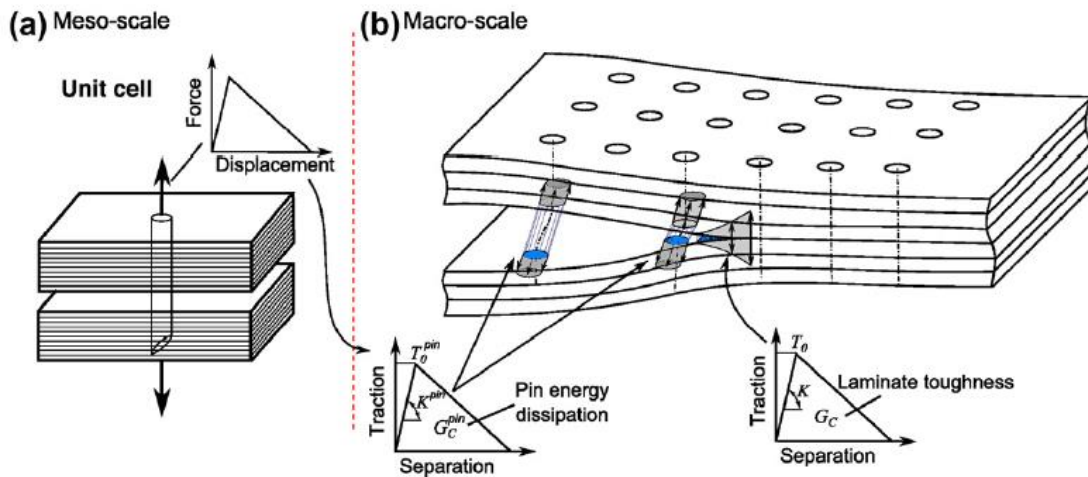


Figura 42 - Esquema do modelo de: (a) pino unitário e (b) pinos aplicado a uma escala maior [3].

O objetivo do trabalho de Bianchi et al. [3] foi desenvolver uma modelação aproximada de EF para analisar as propriedades estruturais e roturas por delaminação de uma junta em T em compósito reforçada com pinos, sujeita a um esforço de tração. Foram considerados vários modelos para estudar o efeito da inserção de pinos de reforço numa junta em compósito. O primeiro modelo (Figura 42 (a)) é constituído por um único pino e uma porção do laminado à volta deste, a partir do qual se estudou a relação entre a força exercida sobre o pino e a deslocação deste. Os deslocamentos permitiram estudar a relação entre o pico de tensão e a separação do laminado (delaminação). A partir do modelo unitário (Figura 42 (a)) foi criado outro modelo para estudar o comportamento a uma escala maior, que seria aplicado a diversas localizações dos pinos ao longo da junta. Este novo modelo (Figura 42 (b)) estudou a relação do esforço de tração e separação do laminado.

A partir dos modelos esquematizados na Figura 42 foram analisadas as tensões de cisalhamento no plano perpendicular ao plano de rotura (Modo I) e as tensões de cisalhamento ao longo do plano de rotura (Modo II). Com o estudo do Modo II analisou-se o comportamento do pino quando começa a ocorrer a delaminação do compósito. Na Figura 43 está representado um modelo sistemático do comportamento de um único pino em Modo II.

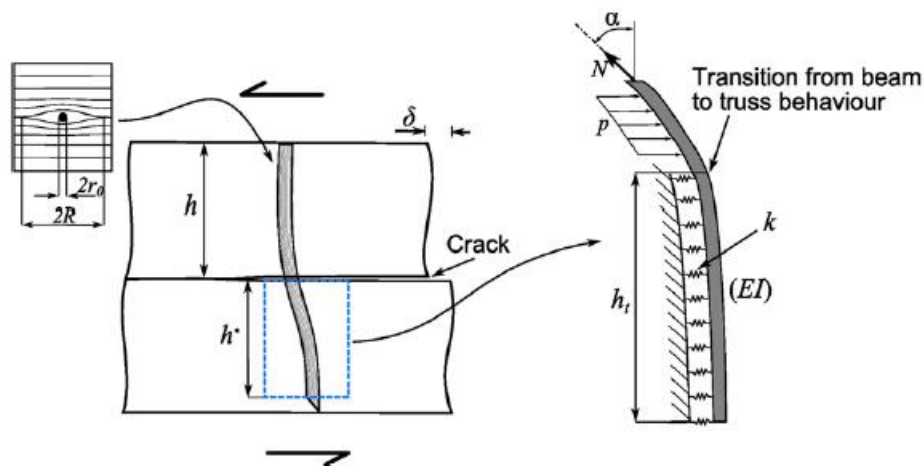


Figura 43 - Esquema de comportamento do pino conforme a situação de solicitação [3].

Outro fator importante a ter em causa foi a tensão residual na interface pino/laminado devido à temperatura de cura elevada do laminado. Para calibrar as propriedades do elemento coesivo do adesivo usado na colagem da junta T criou-se outro modelo, mas agora sem pinos de reforço. Paralelamente, foram realizados testes com juntas construídas com fitas de pré-impregnado de carbono/epóxico (“T700 carbon/epoxy prepreg tape”), resultando em laminados com a orientação $(90/0/90/0/90)_s$ e 0,125mm de espessura de cada camada. As juntas foram tracionadas a uma velocidade de 1 mm/min. Registou-se na junta sem pinos uma carga máxima de 1656 N e rotura na linha de simetria da junta em T (Modo I) e delaminação entre o aderente em L e o aderente inferior (Modo I/II). Nas juntas com pinos a carga máxima foi de 3800 N, mais do dobro da junta sem pinos, pelo que se verificou que houve uma melhoria significativa das propriedades mecânicas. Estes resultados foram confirmados pelo modelo de EF aplicado, tendo-se concluído com este estudo que o modelo desenvolvido é capaz de se aplicar a juntas T com pinos. O modelo também permitiu analisar a relação entre a força exercida e deformação para Modo I ou Modo II.

O trabalho de Yang et al. [40] consistiu no estudo da resistência à tração de uma junta em T. Foram analisadas várias propriedades da junta com diferentes configurações de reforço interno e estudou-se a resistência da junta quando reparada após rotura. As juntas em T foram construídas por duas secções de laminado em L constituído por pré-impregnado de epóxico reforçado a fibras de carbono com sequência de empilhamento de $(90/0^0)_s$. As juntas em T foram comparadas com juntas nas quais se fez a adição de filamentos termoplásticos de *ethylene-co-methacrylic acid* (EMAA). Os filamentos de EMMA foram dispostos em secções retangulares ao longo do comprimento e altura da junta. As dimensões da junta e disposição dos filamentos estão representadas na Figura 44.

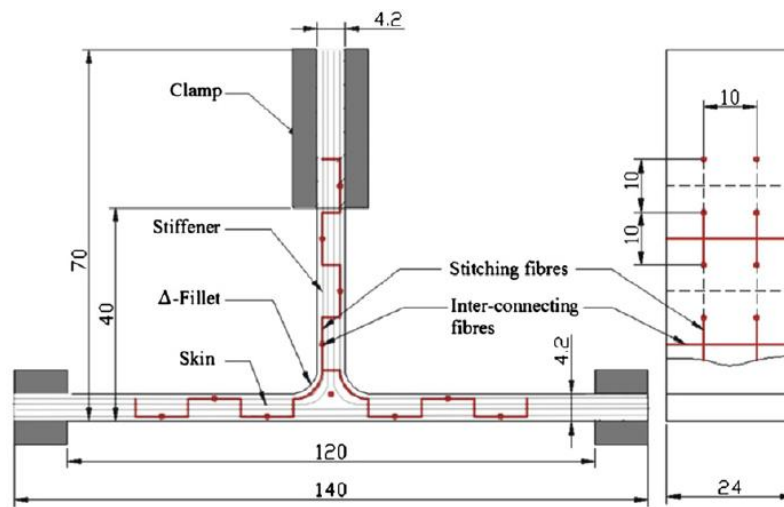


Figura 44 - Dimensões e esquema de montagem da junta em T [40].

Realizaram-se testes de tração nas juntas em T normais (sem adição de filamentos) e nas juntas com os filamentos. A velocidade de teste foi constante (1 mm/min) até atingir 50 mm de deslocamento, ponto em que ocorreu o fenómeno de delaminação (separação dos aderentes). Após se verificar a delaminação da junta com os filamentos, esta foi reparada colando novamente os aderentes com secções de EMAA de 1,5 mm de diâmetro e aquecidas num forno a 150°C durante 2 horas. Este processo de aquecimento foi necessário para ativar termicamente o processo de reparação. Após a reparação da junta foi novamente realizado outro teste nas mesmas condições e novamente feita outra reparação. Na Figura 45 está representado o comportamento da junta com e sem EMAA.

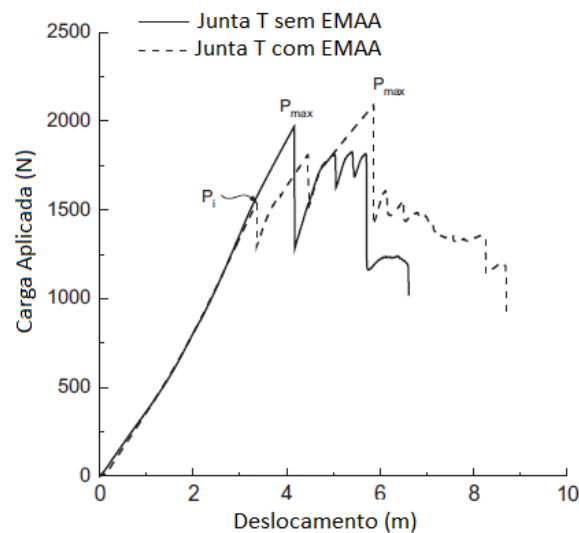


Figura 45 - Comportamento da força aplicada vs. deslocamento para junta em T com e sem EMAA [40].

Tabela 2 - Propriedades das juntas em estudo e sua eficiência de reparação [40].

Parâmetro	Junta/laminado	Valor
Rigidez	Junta sem EMAA	504 (± 15) kN/m
	Junta com EMAA (Antes da reparação)	500 (± 30) kN/m
	Junta com EMAA (Após 1ª reparação)	315 (± 63) kN/m
	Junta com EMAA (Após 2ª reparação)	267 (± 44) kN/m
Carga máxima	Junta sem EMAA	1781 (± 172) N
	Junta com EMAA (Antes da reparação)	1844 (± 275) N
	Junta com EMAA (Após 1ª reparação)	1288 (± 210) N
	Junta com EMAA (Após 2ª reparação)	1250 (± 250) N
Energia absorvida	Junta sem EMAA	6,2 ($\pm 2,0$) J
	Junta com EMAA (Antes da reparação)	7,6 ($\pm 3,0$) J
	Junta com EMAA (Após 1ª reparação)	4,4 ($\pm 1,0$) J
	Junta com EMAA (Após 2ª reparação)	5,7 ($\pm 1,5$) J
Resistência de delaminação	Junta sem EMAA	320 (± 30) J/m ²
	Junta com EMAA (Antes da reparação)	90 (± 30) J/m ²
	Junta com EMAA (Após 1ª reparação)	1120 (± 00) J/m ²
	Junta com EMAA (Após 2ª reparação)	300 (± 80) J/m ²

A partir da análise do comportamento das juntas foram obtidos os valores de rigidez, carga máxima, energia absorvida e resistência de delaminação (Tabela 2). A rigidez representada na Tabela 2 foi obtida a partir da evolução linear (elástica) das curvas $P-\delta$. A carga máxima corresponde ao pico máximo das curvas representadas na Figura 45. A energia absorvida foi medida a partir da área total abaixo das curvas representadas na Figura 45. A resistência de delaminação corresponde à energia inelástica e elástica necessária para que ocorra a ruptura total do laminado. Concluiu-se que a aplicação dos filamentos de carbono epóxico termoplástico é benéfica a nível da dureza interlaminar e permite uma reparação com bons resultados. Após a reparação da junta verificou-se um aumento de tenacidade (definido pela energia absorvida) de cerca de 20% sem que tal afetasse a rigidez e a força máxima absorvida. Este aumento de tenacidade após a reparação ocorreu devido ao facto de as secções de colagem formarem uma ponte de tração ao longo da zona de delaminação dentro da junta. A presença de EMAA permitiu uma recuperação parcial das propriedades de rigidez, carga máxima exercida até ruptura e energia absorvida em mais de 50 %. No entanto, não foi possível a completa recuperação das propriedades da junta após reparação, devido ao facto de não se conseguir uma molhagem total do adesivo nas superfícies aderentes ao longo de toda a superfície de delaminação.

No trabalho de Trask et al. [2] realizou-se um estudo do comportamento de uma junta em T de compósito solicitada à tração. A junta foi fabricada pela ligação de um aderente base e dois aderentes em L. O material escolhido para a construção da junta foi uma fita de carbono epóxico pré-impregnado unidirecional (“Hexcel’s IM7 - 8552 carbon epoxy unidirectional pre-preg tape”), considerando a sequência de empilhamento de $(60/0/-60/0)_{3s}$. Na Figura 46 estão representadas as várias fases usadas na construção das juntas em T. A primeira fase consistiu na criação da base retilínea. A segunda fase de fabrico constou na criação de uma estrutura curvilínea em resina de poliéster (denominada de *deltoid*), que preenche o espaço deixado livre entre os dois aderentes em L e o aderente retilíneo devido ao raio de curvatura dos primeiros. O *deltoid* foi construído à medida com o uso de cilindros com dimensões específicas e posteriormente colado à base fabricada na fase 1. A fase 2 compreendeu ainda a criação dos dois aderentes em L. Os aderentes em L são constituídos por várias camadas sobrepostas com diferentes orientações, perfazendo um compósito com a sequência de empilhamento $(\pm (45)_2/0_7 / (90)_4/0_3)$. A terceira fase de fabrico consistiu na ligação dos 2 aderentes em L com o *deltoid* e a base e preparação da junta em T para cura em autoclave. Por fim, a quarta fase de fabricação consistiu na remoção da junta em T do autoclave e preparação para ensaio.

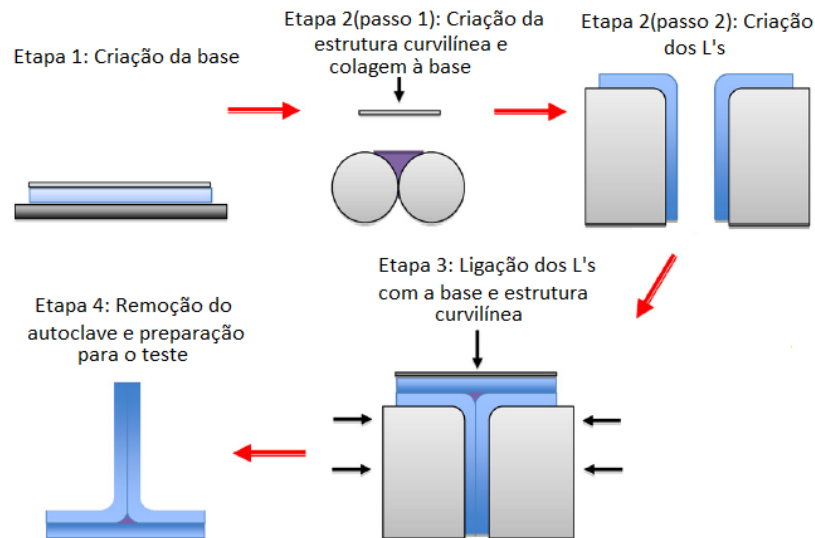


Figura 46 - Esquema de produção da junta em T [2].

Foram consideradas as seguintes dimensões: 80 mm de altura total, 130 mm de comprimento e 20 mm de largura. Estas juntas foram solicitadas à tração a velocidade constante (1 mm/min) e fixas na base por dois rolos cilíndricos em alumínio, como está representado na Figura 47.

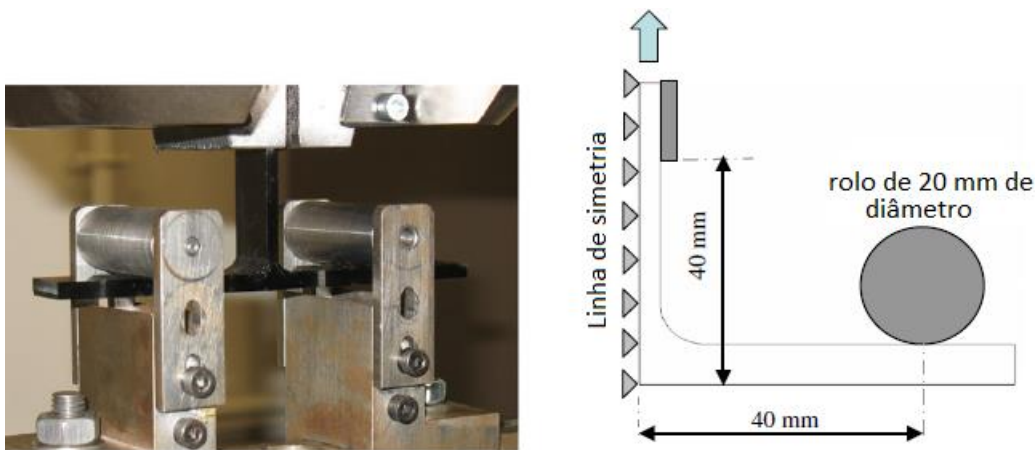


Figura 47 - Esquema de montagem e dimensões usadas para realização de teste da junta em T [2].

Verificou-se que todas as juntas tiveram um comportamento de rotura semelhante. O início de rotura verificou-se na superfície curvilínea do aderente em L e propagou-se ao longo da camada a 90°. Quanto à carga máxima, para a estrutura nominal esta foi de cerca de 1330 N, para as juntas com área 26 % abaixo da nominal foi de 1296 N e para as restantes juntas com área 46 % abaixo da nominal foi de 891 N. Concluiu-se assim que uma redução na área curvilínea pode ser tolerada até certo ponto. No entanto, um

aumento significativo das variações no processo de produção das juntas em T pode levar a reduções significativas de resistência.

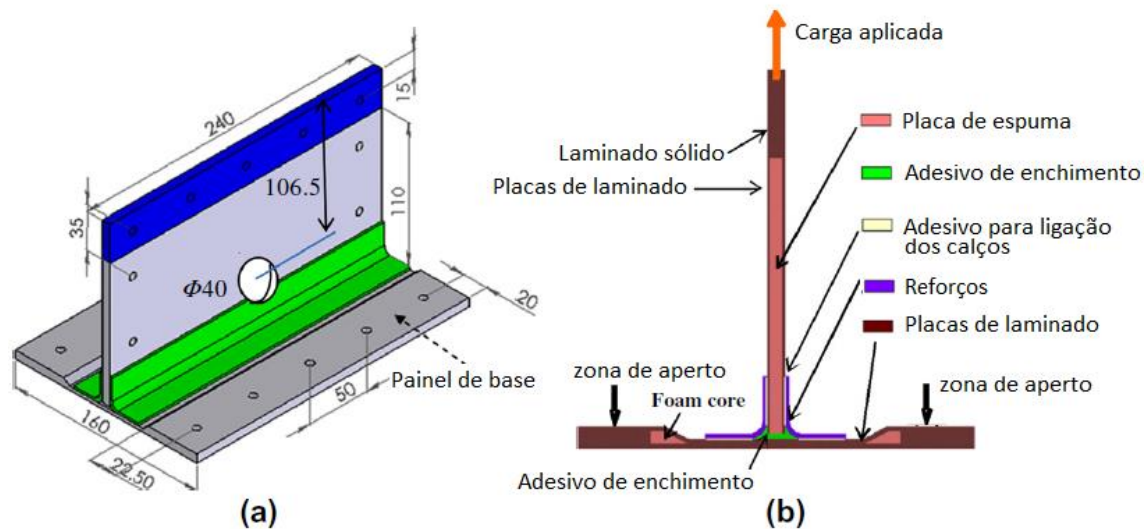


Figura 48 – Junta em T: (a) Dimensões (mm) e (b) vários componentes da junta [41].

No trabalho de Guo e Morishima [41] estudaram-se dois tipos de junta em T construídas em compósito. Uma junta tem um corte circular com 40 mm de diâmetro (Figura 48 a). A outra junta é idêntica à primeira, embora sem o corte circular. A junta é produzida em estrutura *sandwich*. Tanto a base como a altura da junta têm um núcleo com 5 mm de espessura em espuma. A estrutura em *sandwich* para a altura da junta fabricou-se com duas placas de laminado. Cada placa de laminado de 1 mm de espessura foi constituída por 4 camadas, em fibra de carbono-epóxico pré-impregnado (MTM46/HTS) com orientação $(\pm 45)_s$. A base da junta, de 2 mm de espessura, é composta por 8 camadas em fibra de carbono epóxico pré-impregnado com orientação $(\pm 45/0/90)_s$. Consideraram-se os adesivos Hysol EA 9394, Hysol EA 9396 e ACG MTA 240 para as diferentes ligações da junta. A Figura 48(b) representa os vários componentes que formam a junta em T. Nas juntas foram aplicados extensómetros de rosetas para obter as deformações.

Foram testadas 3 juntas sem o corte cilíndrico (P_a ; P_b ; P_c) e 2 juntas com o corte cilíndrico (P_d ; P_e). Foi também feito um estudo numérico usando o método de EF. Neste modelo foi definida uma base suportada por um aperto com 5 parafusos na superfície da zona de aperto representada na Figura 48(b). Considerou-se uma análise da rotura nos reforços, no adesivo de ligação dos calços e no adesivo de preenchimento, considerados como locais críticos. Aplicando no modelo numérico vários defeitos verificados durante a fabricação da junta, obteve-se um decréscimo significativo da carga máxima

suportada. Além disso, obteve-se uma diminuição da carga máxima de 18% para a estrutura com corte cilíndrico, em relação à estrutura sem corte cilíndrico. Comparam-se os resultados experimentais com os resultados obtidos no método de EF. Na Figura 49 estão representadas as curvas P - δ das juntas até à rotura.

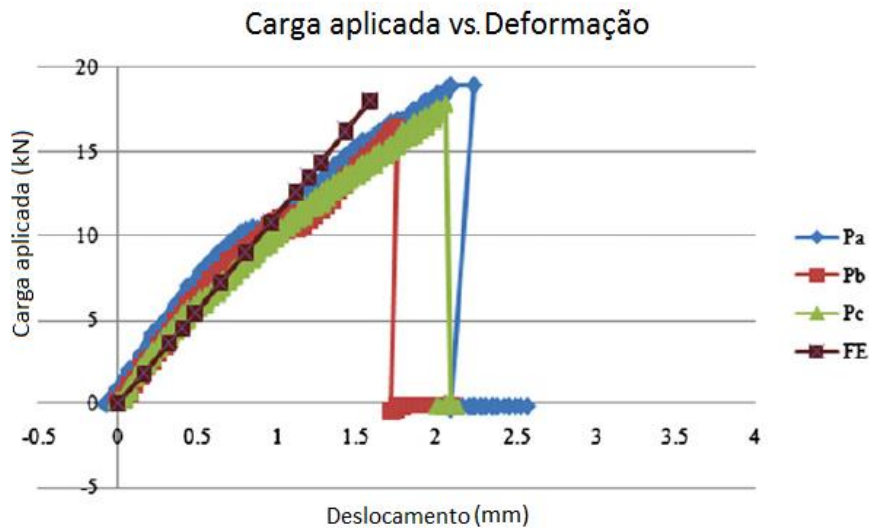


Figura 49 – Curvas P - δ para cada tipo de junta em T [41].

As 3 juntas sem o corte cilíndrico foram reparadas após se ter realizado o teste experimental. A reparação das juntas permitiu estudar a eficiência de reparação. Na reparação foi considerado o adesivo 3M 7823 pois os reforços da junta P_a danificaram-se durante a reparação no procedimento de limpeza. Na reparação das juntas não foi usado o adesivo de enchimento representado a verde na Figura 48 b. Os resultados obtidos após reparação das juntas estão representados na Figura 50.

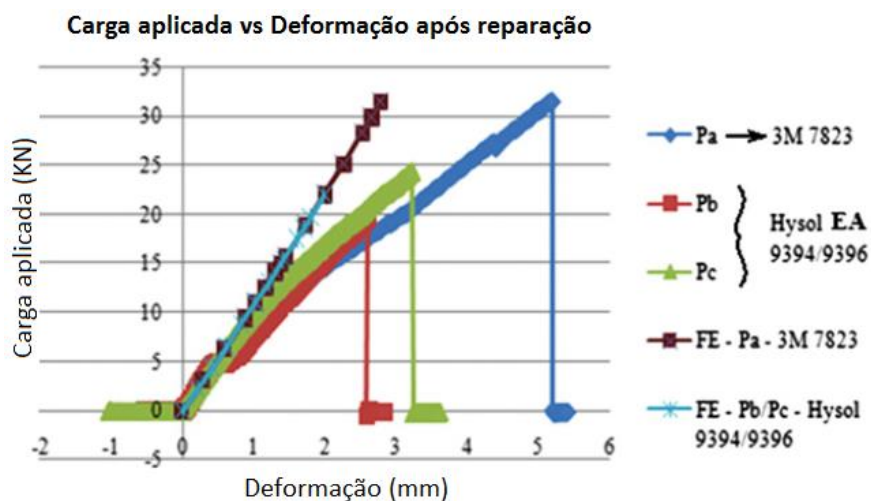


Figura 50 - Curvas P - δ para cada tipo de junta em T após reparação [41].

Concluiu-se que a junta com corte cilíndrico teve um decréscimo de 25 % da carga máxima comparando com a junta sem o corte cilíndrico. Para o modelo numérico de EF verificou-se uma diferença de cerca de 14 % na carga máxima em comparação com os resultados obtidos experimentalmente. No caso das juntas reparadas obteve-se experimentalmente melhorias significativas, compreendidas entre 16% e 37% para carga máxima até rotura total, tendo estes resultados uma diferença entre os resultados do método de EF e experimentais de cerca de 10% e 0,6%, respetivamente.

No trabalho de Hélénon et al. [42] realizou-se um estudo experimental e numérico, através do método de EF, de uma junta em T sujeita a um esforço de tração. Definiu-se como material uma fita de carbono epóxico pré-impregnado unidirecional. A junta consistiu na união de dois aderentes em L e uma plataforma base, com a presença de um componente, definido como *deltoid*, que preenche o espaço vazio entre os aderentes em L e o aderente base, devido à curvatura dos aderentes em L. Estes últimos foram produzidos através da sobreposição de camadas com as orientações de fibra ($\pm 45_2 / 0_7 / 90_4 / 0_3$). O aderente base foi produzido a partir da sobreposição de camadas com as orientações de fibra $(60/0/-60/0)_{3s}$. Quanto ao *deltoid*, este foi produzido através de camadas unidireccionais a 90° . A carga máxima sustentada pelas juntas varia com a área do *deltoid*. Esta variação deve-se às anomalias dimensionais verificadas durante a produção. O início de propagação de rotura verificou-se na camada a 90° do aderente em L. Concluiu-se que esta é a camada com menos resistência em resposta ao esforço de tração solicitado. Na Figura 51 está representada em pormenor a zona de rotura e a propagação desta ao longo da camada com orientação de fibras a 90° , definida a vermelho.

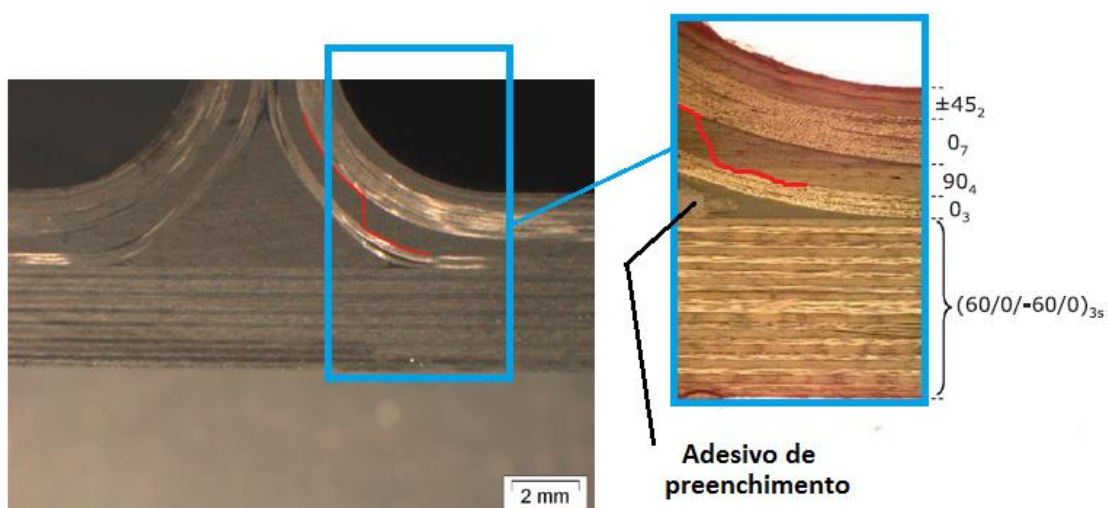


Figura 51 - Zona de início de rotura e propagação [42].

Também se realizou um estudo numérico usando o método de EF, utilizando o *software* ABAQUS®. As condições de teste no modelo numérico foram otimizadas e aproximadas às condições experimentais. Obtiveram-se resultados experimentais e numéricos semelhantes. Concluiu-se que, neste tipo de junta em T, para obter resultados fiáveis é necessária uma refinação da malha apropriada. Resumidamente, obtiveram-se previsões de rotura precisas independentemente do refinamento da malha na aresta livre dos provetes.

O trabalho de Burns et al. [43] consistiu na melhoria do comportamento de uma junta em T em compósito, no que se refere à carga de rotura. Para isso o estudo baseou-se na ligação de um ramo de uma árvore. Assim, foi analisada em pormenor a estrutura filamentar constituinte da ligação de um ramo de uma árvore. Esta estrutura foi considerada uma estrutura auto-otimizada no que se refere a uma condição de resistência uniforme, com a mais adequada densidade e orientação das fibras constituintes. Uma das vantagens desta estrutura é que não existem zonas com tensões internas de maior tendência à rotura. Por outro lado, também toda a estrutura é definida de tal maneira que não existem espaços vazios, o que leva a que este tipo de ligação seja a mais eficiente relativamente ao peso. Na Figura 52 está representado um esquema da junta em T, as suas condições de solicação e condições de aperto definidas.

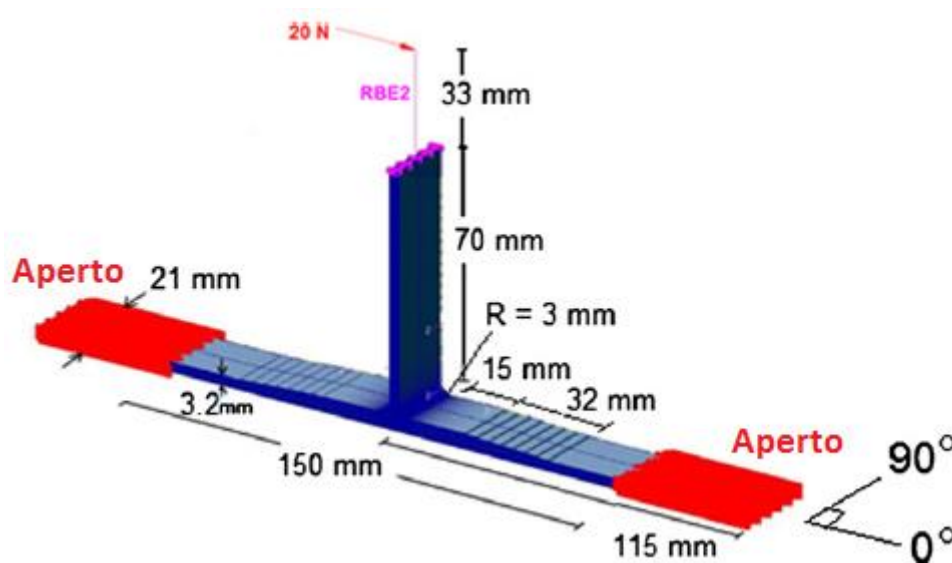


Figura 52 - Esquema representativo da junta em T [43].

O ângulo de inclinação da flange de reforço foi estabelecido como sendo de 5°. O programa escolhido para efetuar uma análise através do método de EF foi o *software* ABAQUS®. Como esperado, as tensões máximas verificaram-se nos locais de curvatura

da junta devido ao momento fletor induzido. Após o estudo numérico foram construídos e ensaiados 6 provetes. Na Tabela 3 é feita uma comparação das propriedades obtidas experimentalmente, para estruturas de uma junta em T convencional e baseada no ramo da árvore.

Tabela 3 - Comparação dos valores obtidos para junta T convencional e junta T bio inspirada. Os valores que estão entre parênteses são referentes ao desvio padrão entre as 6 juntas testadas [43].

Propriedades da junta	Junta T convencional	Junta T bio inspirada	Porcentagem de variação (%)
Rigidez (N/mm)	8,380 (0,850)	8,940 (0,720)	7
Carga na 1ª falha (N)	85 (13,100)	120 (14,4)	41
Deslocamento na 1ª falha (mm)	8,880 (0,930)	11,400 (1,150)	28
Energia elástica de deformação (J)	361 (84)	634 (122)	75

Verificou-se que a junta em T bio inspirada apresenta uma carga de rotura superior e uma energia elástica de deformação também superior à junta T convencional. Concluiu-se que esta otimização de junta em T bio inspirada é flexível e pode ser aplicada para aumentar a resistência e a absorção da energia elástica de deformação de juntas em T sujeitas a outros tipos de sollicitação.

No trabalho de Park et al. [44], o objetivo foi testar o efeito do diâmetro e densidade de pinos de reforço em juntas em T reforçadas na direção “z” (direção da espessura), sob um esforço de tração. O método *z-pinning* é uma técnica que envolve a inserção de um pequeno pino de metal ou em compósito pré-curado, para que todas as camadas deste laminado fiquem ligadas através de uma ligação mecânica. Este método consiste em provocar o derretimento da resina junto aos pinos aplicando vibração ultrassônica diretamente nos pinos, pelo que assim os pinos conseguem ser facilmente posicionados nos pré-impregnados. Para verificar a influência dos pinos no ensaio de tração nas juntas em T foram usadas três densidades diferentes ($\rho=0,5\%$, $2,0\%$, $4,0\%$), considerando pinos com $0,5$ mm de diâmetro. Adicionalmente foram usados três diâmetros diferentes ($d=0,280$, $0,500$ e $0,700$ mm) com uma densidade constante de $2,0\%$. Na Figura 38 está representado um esquema da junta T com as dimensões usadas.

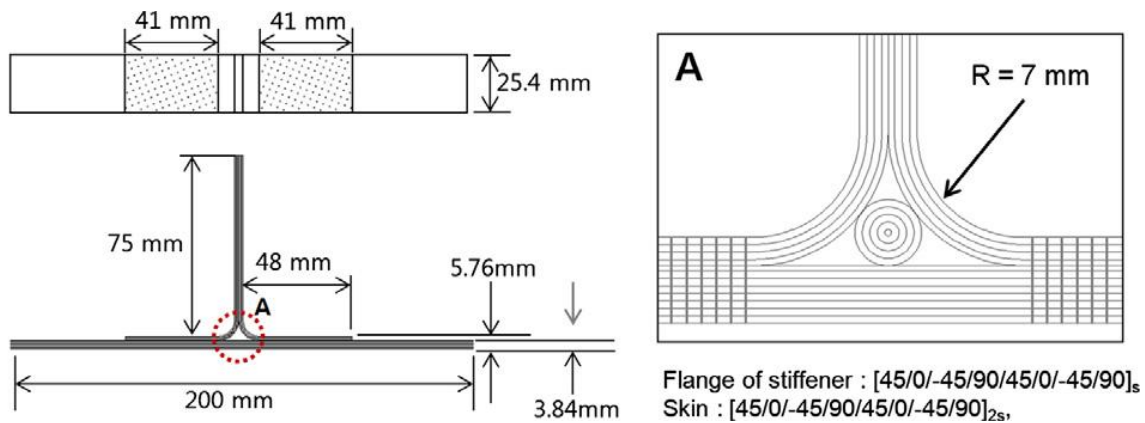


Figura 53 - Esquema da geometria das juntas T e orientação das camadas de laminado [44].

O número de provetes ensaiados encontra-se na Tabela 4. Os ensaios foram realizados com uma base de fixação para as juntas. Os testes foram realizados numa máquina de ensaios *Instron* 5582 com uma célula de carga de 100 kN e com uma velocidade de ensaio de 1,5 mm/min. O ensaio continuou após o dano inicial até à falha catastrófica da estrutura. Na Figura 54 estão representados os dois modos de rotura que se obtiveram nas juntas e o seu comportamento em gráfico está apresentado na Figura 55.

Tabela 4 - Número de provetes ensaiados [44].

ρ (%)	d (mm)			
	0 (sem pino)	0,28	0,5	0,7
0 (sem pino)	5			
0,5			5	
2,0		4	5	5
4,0			5	
Total	29			

Em todas as juntas testadas a primeira fissura ocorreu na zona de curvatura dos aderentes em L, mais especificamente entre estes aderentes e o adesivo de preenchimento. O modo de rotura principal foi a delaminação na pele e também foi parcialmente observada uma falha interlaminar na primeira camada. Contudo, não se verificou a existência de delaminação nas juntas com pinos de diâmetro de 0,5 mm e densidade de 4,0%. Através de um estudo paramétrico, foi demonstrado que os valores obtidos nas juntas em T com pinos na direção “z” estão diretamente relacionados com a área de contacto entre os pinos e o laminado. Concluiu-se então que quanto maior a

superfície de contacto, maior vai ser a carga máxima suportada, já que a resistência da junta T com pinos aumentou em cerca de 70% em relação à junta T sem pinos. Os resultados também mostraram que existem condições mínimas para que os pinos possam provocar uma melhoria no desempenho das juntas em T, que correspondem à utilização de um diâmetro de 0,5 mm com uma densidade mínima de 0,5%.

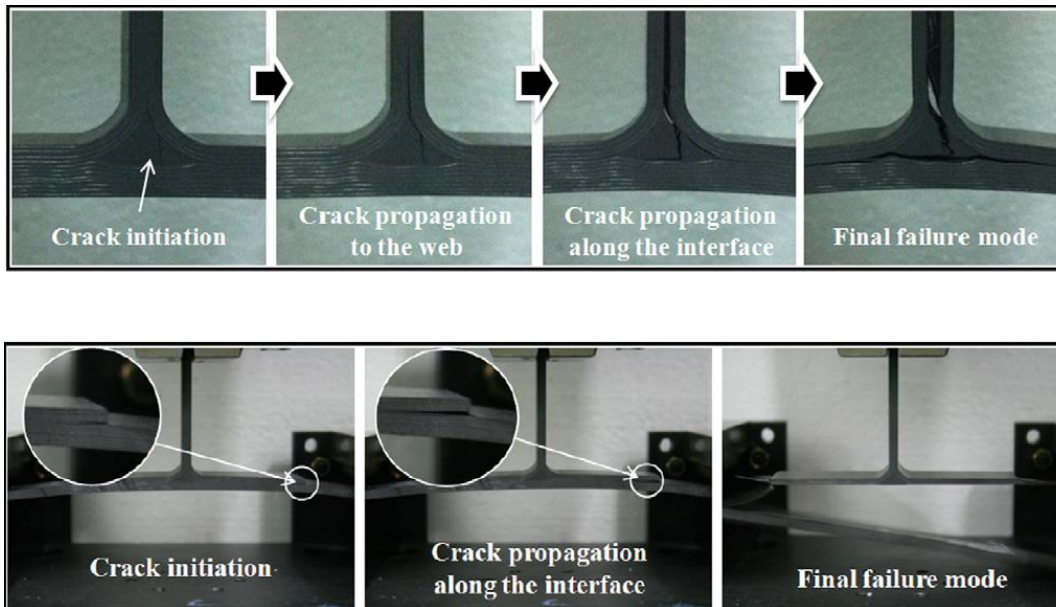


Figura 54 - Modos de rotura nas juntas [44].

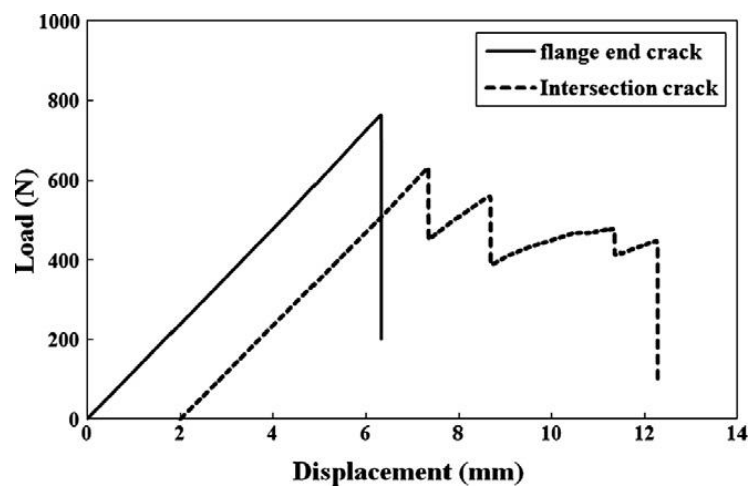


Figura 55 – Curvas P - δ da junta em T [44].

O trabalho numérico e experimental de Koh et al. [45] analisou o efeito da espessura de adesivo na utilização de pinos em juntas em T. Foram estudadas as propriedades de

juntas em T de carbono-epóxico com e sem pinos de reforço, com espessura da flange entre 2 e 8 mm. A junta T em causa está esquematizada na Figura 56.

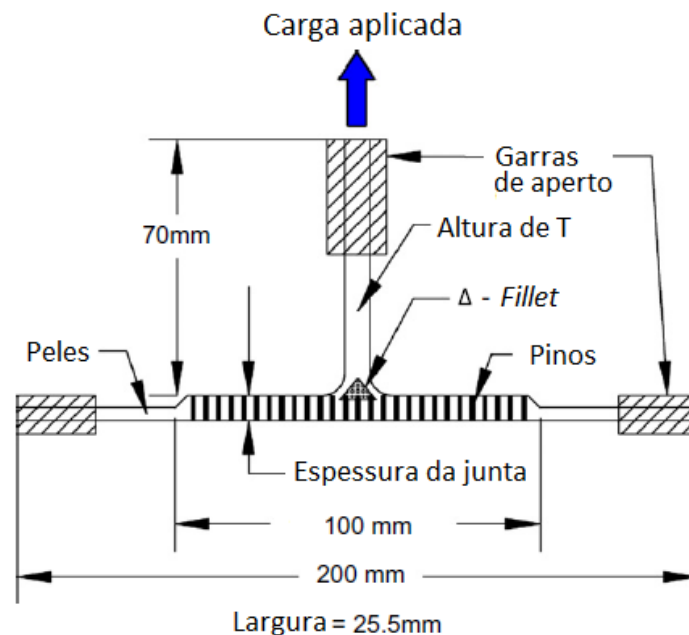


Figura 56 - Esquema da junta T em causa com as dimensões e modo de solicitação [45].

Para prevenir que este tipo de junta sofra delaminação recorreu-se ao seu reforço. Para isso usaram-se pinos de fibras inseridas por costura. Vários estudos experimentais e numéricos mostraram que os pinos aumentam as propriedades estruturais deste tipo de junta e em juntas de sobreposição simples. Este aumento das propriedades estruturais das juntas em T com pinos de reforço é regulado pela carga de tração de ligação e o comportamento de rotura dos pinos. Para determinar a resposta da junta à solicitação aplicada e comportamento de rotura dos pinos foram formuladas leis analíticas de tração-separação. Estas leis mostraram que a carga de tração gerada através dos pinos, quando solicitados, está dependente de vários parâmetros, como a carga crescente, volume, comprimento e diâmetro dos pinos, e também a resistência ao corte entre o pino e laminado. O efeito de aumento do comprimento do pino sobre as propriedades da junta foi determinado pelo aumento da espessura da pele com flange das juntas em T de 2 a 8 mm. Foram obtidas curvas $P-\delta$ para as juntas em T sem e com pinos com diferentes espessuras. O perfil das curvas para as juntas sem pinos com diferentes valores de espessura foi aproximadamente semelhante, na medida em que todos mostram uma resposta elástica até à carga máxima sustentada. Foi então concluído que a rigidez elástica das juntas em T não foi afetada pelos pinos. A queda de carga súbita nas juntas sem pinos, independentemente da sua espessura, foi provocada pela delaminação quase instantânea, crescimento de fendas ao longo do eixo do

reforço e ao longo da interface pele/flange, o que permitiu concluir que existe descolamento da pele, como mostrado na Figura 57.

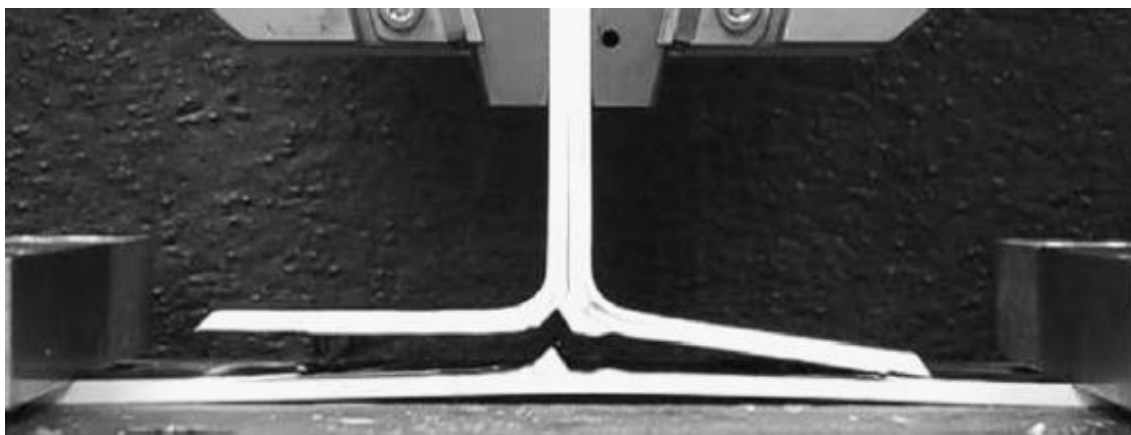


Figura 57 - Imagem ilustrativa da junta T em causa após rotura total [45].

As juntas em T com pinos também experimentaram uma queda súbita de carga em aproximadamente o mesmo valor de deslocamento, que causou uma falha catastrófica das juntas sem pinos.

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

- 3.1.1 Materiais utilizados
- 3.1.2 Geometria das juntas
- 3.1.3 Processo de fabrico
- 3.1.4 Ensaio das juntas
- 3.1.5 Resultados obtidos

3.2 Trabalho numérico

- 3.2.1 Condições da análise numérica
- 3.2.2 Modelo de dano coesivo
- 3.2.3 Análise de tensões na junta
- 3.2.4 Estudo da variável de dano
- 3.2.5 Previsão do comportamento

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

O trabalho experimental realizado nesta dissertação consiste no estudo de juntas em T com 2 tipos de adesivos (Araldite® AV138 e Araldite® 2015). Para cada configuração de junta, definida pelo tipo de adesivo e por t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm), foram ensaiadas 5 juntas em T. Como tal, no total foram fabricadas 40 juntas em T. Neste capítulo descrevem-se os materiais constituintes da junta, o processo de fabricação das juntas, os testes experimentais realizados e são apresentados os resultados no que concerne aos modos de rotura, curvas $P-\delta$, resistência das juntas e análise dos resultados obtidos.

3.1.1 Materiais utilizados

Em todos os ensaios realizados, os provetes foram fabricados com aderentes de alumínio AW 6082-T651, com o adesivo Araldite® AV138 ou Araldite® 2015. O adesivo Sikaforce® 7752 só foi utilizado no estudo numérico da junta. No entanto não deixa de ser importante referir as suas propriedades e características num dos subcapítulos (3.1.1.2.3) deste capítulo. De facto, muitas das propriedades do adesivo Sikaforce® 7752 são utilizadas na introdução dos dados no *software* ABAQUS® para se proceder ao teste das juntas.

3.1.1.1 Aderentes

Os provetes foram fabricados utilizando uma liga de alumínio AW 6082-T651, conhecida como liga estrutural da série 6000, com 82% de alumínio, e magnésio e silício como principais elementos de liga (Tabela 5). A escolha desta liga de alumínio deve-se à vasta utilização na produção de componentes estruturais, sejam eles extrudidos como perfis, ou em peças obtidas por maquinarem.

Tabela 5 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [46].

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
% Mínimo	0,700	0,600	0,400	0	0	0	0	0	----
% Máxima	1,300	1,200	1,000	0,500	0,250	0,200	0,100	0,050	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 [46].

Espessura (mm)	Tensão de rotura mínima (MPa)	Tensão de cedência 0,2% mínima (MPa)	Alongamento mínimo (%)	Dureza Brinell	Módulo de elasticidade (GPa)
3,000	300	255	9	91	70

As juntas adesivas de componentes de alumínio são normalmente usadas nas indústrias aeronáutica e automóvel [16], onde propriedades como a elevada energia de superfície, assim como a sua relação resistência/peso, fazem deste tipo de material um ótimo aderente para este tipo de ligações.

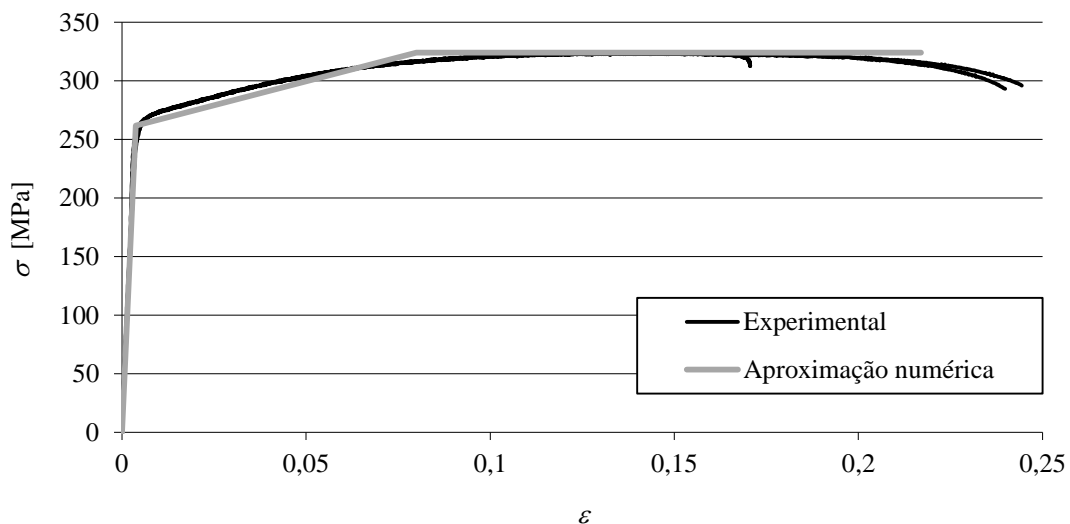


Figura 58 - Curvas σ - ϵ da liga de alumínio AW 6082-T651 [47].

Campilho et al. [47] caracterizaram esta liga de alumínio à tração, de acordo com a norma ASTM E8M [48], onde registaram as seguintes propriedades: E de $70,070 \pm 0,830$ GPa, σ_e de $261,670 \pm 7,650$, tensão de rotura (σ_f) de $324,000 \pm 0,160$ MPa e deformação de rotura à tração (ϵ_f) de $21,7 \pm 4,2\%$. A Figura 58 mostra as curvas tensão-deformação (σ - ϵ) desta liga e respetiva aproximação numérica.

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 aderentes [46].

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo estrutural Araldite® AV138, fabricado pela empresa suíça *Huntsman Advanced Materials*, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência (Figura 59 e Tabela 7), e é adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [30].

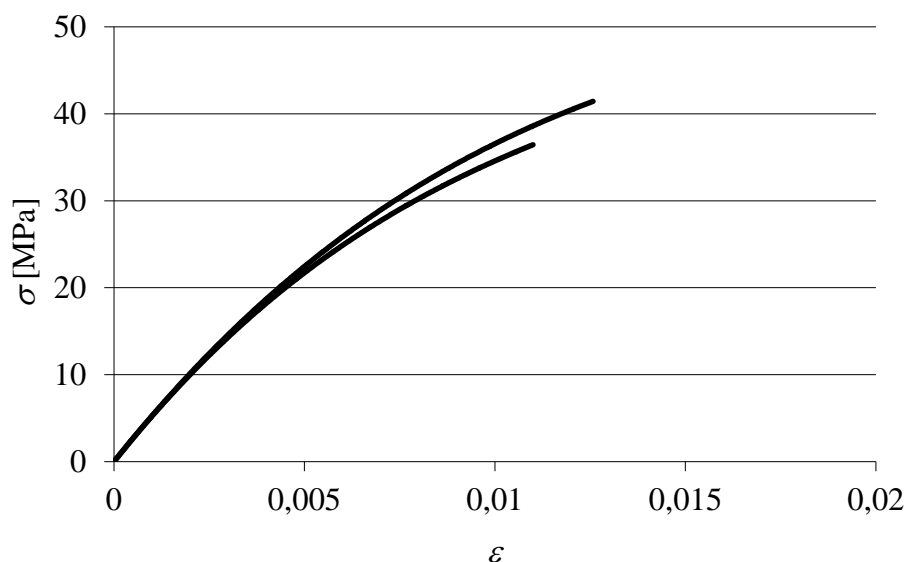


Figura 59 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [30].

Este é um adesivo de base epóxico, termoendurecível, composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 60). 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 [46].



Figura 60 - Adesivo Araldite® AV138 [46].

Tabela 7 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138 [30, 49].

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young, E (GPa)	4,89 ± 0,81
Coefficiente de Poisson, ν^b	0,35
Tensão de cedência à tração, σ_e (MPa)	36,49 ± 2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f (MPa)	39,45 ± 3,18
Deformação de rotura à tração, ϵ_f (%)	1,21 ± 0,10
Módulo de elasticidade transversal, G (GPa)	1,56 ± 0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y (MPa)	25,10 ± 0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f (MPa)	30,20 ± 0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f (%)	7,80 ± 0,70
Tenacidade à tração, G_{Ic} (N/mm)	0,20 ^a
Tenacidade ao corte, G_{IIc} (N/mm)	0,38 ^a

^a Valores estimados na referência [50]; ^b 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, pelo seu 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 61). Este adesivo 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 61 - Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 mL [13].

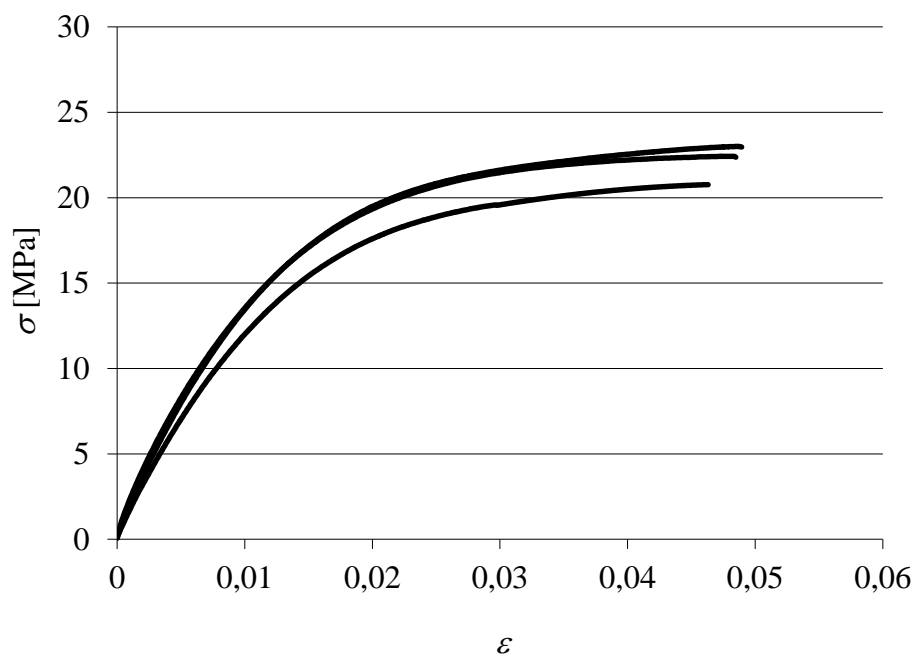


Figura 62 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [30].

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies a ligar. 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 σ - ε de provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 62 [30].

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, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes. A Tabela 8 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes deste adesivo [30].

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [30].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E (GPa)	1,85 ± 0,21
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_e (MPa)	12,63 ± 0,61
Tensão de rotura à tração, σ_f (MPa)	21,63 ± 1,61
Deformação de rotura à tração, ε_f (%)	4,77 ± 0,15
Módulo de elasticidade transversal, G (GPa)	0,56 ± 0,21
Tensão de cedência ao corte, τ_y (MPa)	14,60 ± 1,30
Tensão de rotura ao corte, τ_f (MPa)	17,90 ± 1,80
Deformação de rotura ao corte, γ_f (%)	43,9 ± 3,40
Tenacidade à tração, G_{Ic} (N/mm)	0,43 ± 0,02
Tenacidade ao corte, G_{IIc} (N/mm)	4,70 ± 0,34

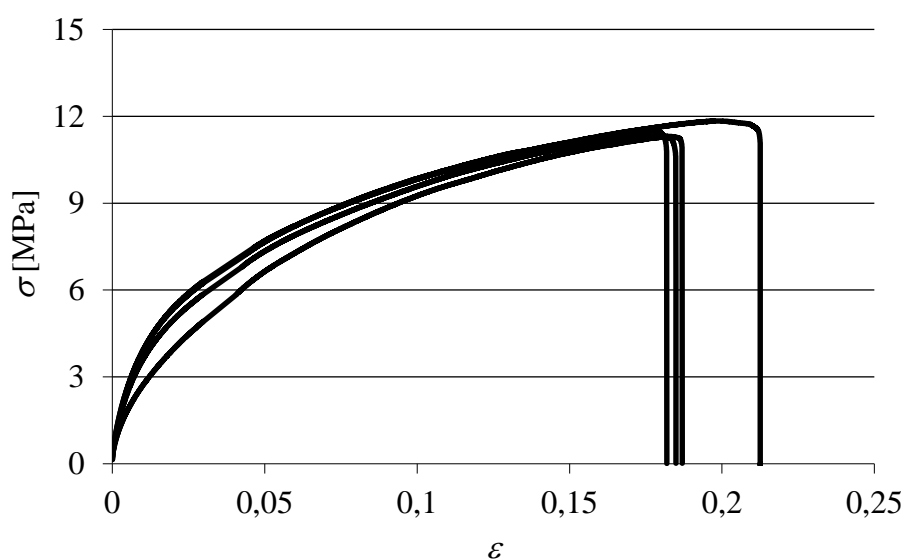
^a Valores do fabricante

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 63). 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 [46].



Figura 63 - Adesivo Sikaforce® 7752 [46].

Figura 64 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Sikaforce® 7752 [51].

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 σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 64 [51]. Na Tabela 9 são indicadas as principais propriedades mecânicas e de fratura do adesivo.

Tabela 9 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Sikaforce® 7752 [51].

Propriedades	Sikaforce® 7752
Módulo de Young, E (GPa)	$0,49 \pm 0,09$
Coefficiente de Poisson, ν^a	0,30
Tensão de cedência à tração, σ_e (MPa)	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de rotura à tração, σ_f (MPa)	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de rotura à tração, ε_f (%)	$19,18 \pm 1,40$
Módulo de elasticidade transversal, G (GPa)	$0,19 \pm 0,01$
Tensão de cedência ao corte, τ_y (MPa)	$5,16 \pm 1,14$
Tensão de rotura ao corte, τ_f (MPa)	$10,17 \pm 0,64$
Deformação de rotura ao corte, γ_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)	$5,41 \pm 0,47$

^a Valores do fabricante

3.1.2 Geometria das juntas

A junta adesiva em estudo tem a forma de T (Figura 65).

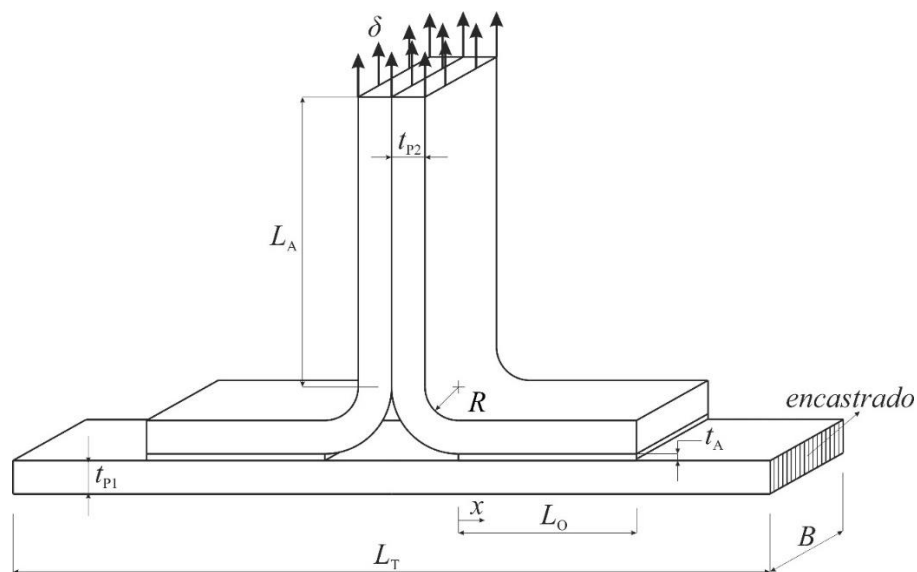


Figura 65 - Esquema representativo da geometria de junta em T.

Esta é constituída por uma base em alumínio colada a dois aderentes em L sobrepostos de costas, também em alumínio. A colagem da junta é feita com recurso ao adesivo Araldite® AV138 ou Araldite® 2015. Na Tabela 10 estão representados os parâmetros definidos para as cotas das 4 geometrias de junta estudadas.

Tabela 10 - Parâmetros usados na geometria de junta.

Parâmetro	Valor (mm)
t_{P1}	3
t_{P2}	1; 2; 3 e 4
t_A	0,2
R	5; 5,500; 7,500 e 7,500
B	25
L_A	60
L_T	100
L_O	25

3.1.3 Processo de fabrico

Descreve-se de seguida o processo de fabrico das juntas em T estudadas nesta dissertação. O processo de fabrico das juntas é semelhante para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, com a exceção da preparação e aplicação do adesivo nos aderentes. De facto, para o Araldite® AV138, a preparação da mistura consiste numa proporção de resina/endurecedor de 10g/4g. Esta mistura é mexida manualmente até à homogeneização do adesivo. Após a mistura do adesivo, este é aplicado também manualmente. 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 e respetiva homogeneização através do bico de mistura dos 2 componentes.

De seguida são enumerados os vários passos do processo de fabrico das juntas:

1. Corte em comprimento dos vários aderentes usados na construção da junta em T. Cada junta consistiu em 2 aderentes de comprimento igual para formar os aderentes em L e mais 1 aderente que consistiu na base onde os aderentes em L são colados;
2. Dobragem dos aderentes em L numa prensa manual (Figura 66);



Figura 66 - Prensa manual usada na dobragem dos aderentes em L.

3. Lixagem dos aderentes nas superfícies de colagem dos aderentes;
4. Limpeza das superfícies lixadas com papel embebido em acetona;
5. Corte de fita calibrada com 0,200 mm de espessura para garantir os valores desejados de t_A e L_0 ;
6. Aplicação de desmoldante (Loctite Frekote® 770-NC) nas fitas calibradas de 0,200 mm;
7. Marcação da posição de colagem das fitas calibradas no provete de base;
8. Colagem das fitas calibradas com uso de cola de cianoacrilato (Figura 67);

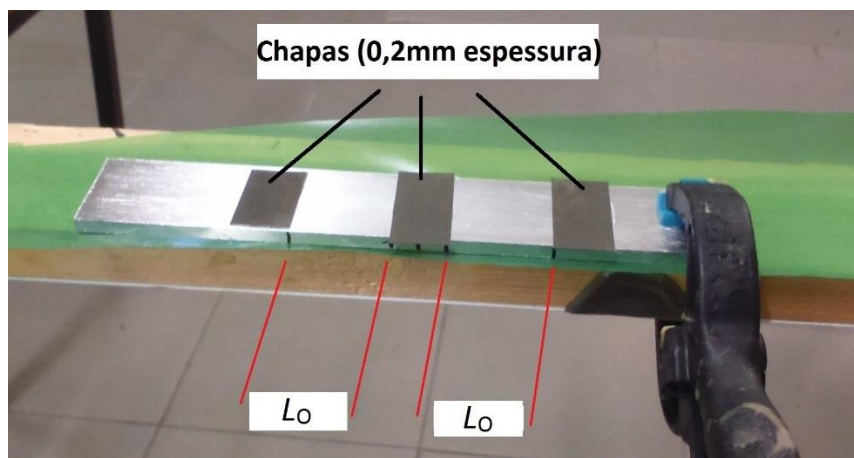


Figura 67 - Chapas normalizadas de 0,2 mm de espessura coladas ao aderente base.

9. Aplicação do adesivo nas superfícies de colagem dos aderentes. Neste ponto a aplicação do adesivo diferiu nos 2 tipos de adesivos. No caso das juntas com o adesivo Araldite® 2015, este é aplicado em “zig-zag” e diretamente no aderente “base” (Figura 68). Quanto ao adesivo Araldite® AV138, este é aplicado diretamente nas superfícies dos aderentes constituintes dos aderentes em forma de L.

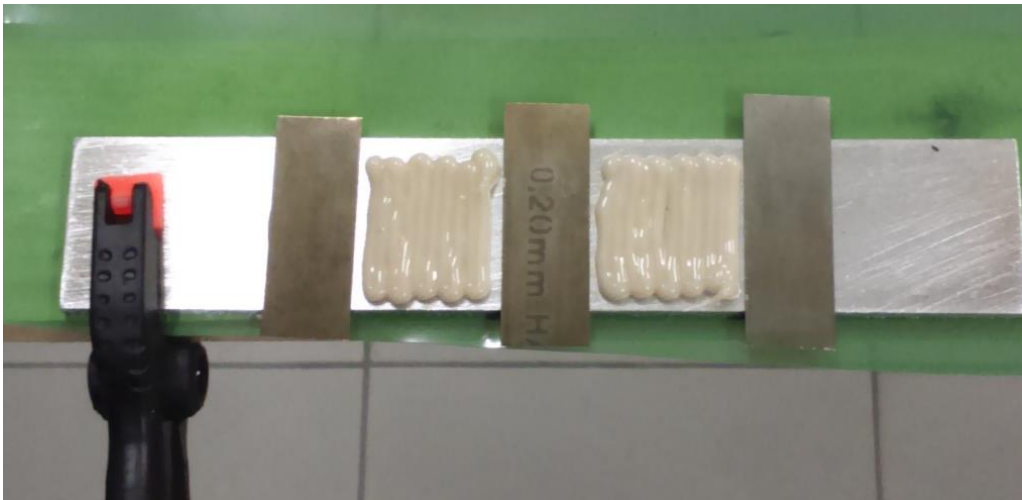


Figura 68 - Adesivo Araldite® 2015 aplicado em "zig-zag" no aderente base.

10. Montagem dos vários aderentes e posterior fixação com recurso a molas (Figura 69);



Figura 69 – Exemplo de juntas com aderentes em L com $t_{p2}=1$ mm: (a) com Araldite® 2015 e (b) com Araldite® AV138.

11. Após o processo de cura das juntas (temperatura ambiente durante pelo menos 7 dias), procedeu-se à remoção dos excessos de adesivo nas juntas com o auxílio de um alicate (Figura 70);

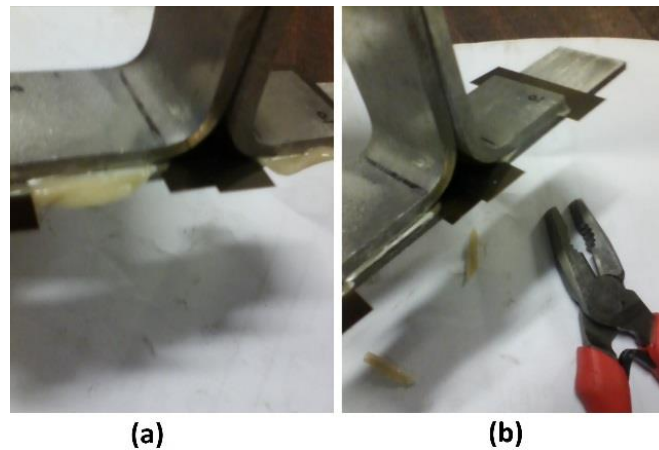


Figura 70 - Remoção dos excessos de adesivo: (a) antes e (b) depois da operação manual.

12. Após a remoção dos excessos de adesivo, deve-se retirar as fitas calibradas de 0,2 mm de espessura. Esta etapa da preparação das juntas deve ser feita de forma cuidadosa para não danificar a colagem da junta, pelo que nos casos em que esta operação se revelou complicada, as fitas não foram extraídas. Posteriormente à remoção das chapas procedeu-se a uma limpeza das laterais das juntas e à limpeza de filetes de adesivo restante com o auxílio de um mandril (Figura 71).



Figura 71 - Uso do mandril para remoção de filetes de adesivo.

A Figura 72 representa uma junta em T pronta para ensaio, após os processos de preparação anteriormente referidos.



Figura 72 - Aspeto de junta pronta para teste.

3.1.4 Ensaio das juntas

O ensaio das juntas realizou-se numa máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (Figura 73(a)). As juntas em T foram solicitadas à tração e encastradas no aderente base (Figura 73 (b)).

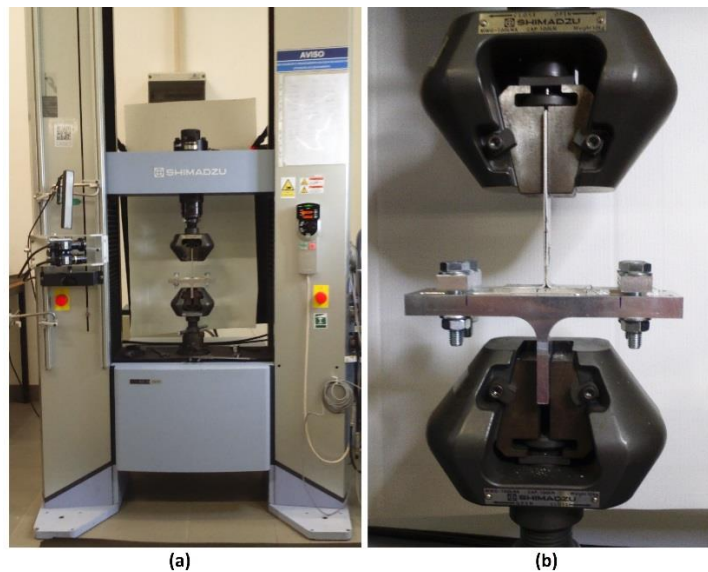


Figura 73 – Imagem representativa de: (a) máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 e (b) encastramento do provete na base e solicitação à tração na vertical.

Para a realização dos ensaios devem ser definidas as velocidades de ensaio para os vários tipos de junta. Nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 foi usada uma velocidade de 0,5 mm/min. No caso das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 foi usada uma velocidade de 1 mm/min. O deslocamento das juntas é realizado sempre a

velocidade constante até que ocorra a rotura total das juntas, ou seja, até que ocorra separação total dos aderentes em L com o aderente base. Este descolamento é promovido pelas garras superiores da máquina Shimadzu AG-X 100, que prendem os aderentes em L a uma distância de 60 mm da zona da ligação adesiva.

O encastramento das juntas é garantido por um suporte em alumínio construído para esse efeito (Figura 73 (b)). Este suporte prende os aderentes base através de barras móveis e aparafusadas de forma a permitir um comprimento livre de 100 mm entre pontos de encastramento. Após o ensaio de cada uma das juntas, a sua remoção é possível através do desaperto dos parafusos constituintes das barras do suporte em alumínio e do desaperto das garras superiores da máquina de ensaios.

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 t_{p2} obtiveram-se vários gráficos representativos do comportamento dos diversos provetes ensaiados. Neste subcapítulo são analisadas as curvas $P-\delta$, os modos de rotura verificados de todos os provetes ensaiados, a resistência das juntas em função de t_{p2} e é feita uma análise destes resultados.

3.1.5.1 Curvas $P-\delta$

Da Figura 74 à Figura 77 representam-se as curvas $P-\delta$ registadas dos ensaios dos provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de t_{p2} definidos.

A partir da análise das curvas $P-\delta$ das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 verifica-se que existe um bom acordo entre elas, no que diz respeito à rigidez inicial e valor de $P_{m\acute{a}x}$. A junta apresenta inicialmente 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 δ . Após se atingir o ponto correspondente a $P_{m\acute{a}x}$ a junta apresenta um comportamento plástico do adesivo até que se atinja a rotura total do adesivo.

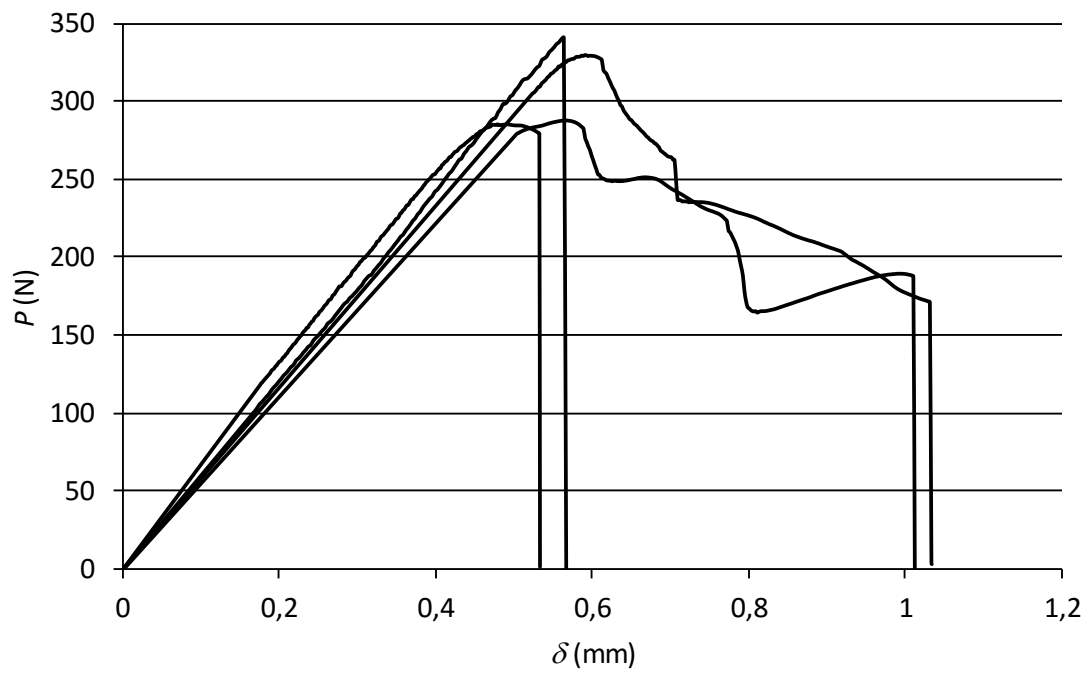


Figura 74 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.

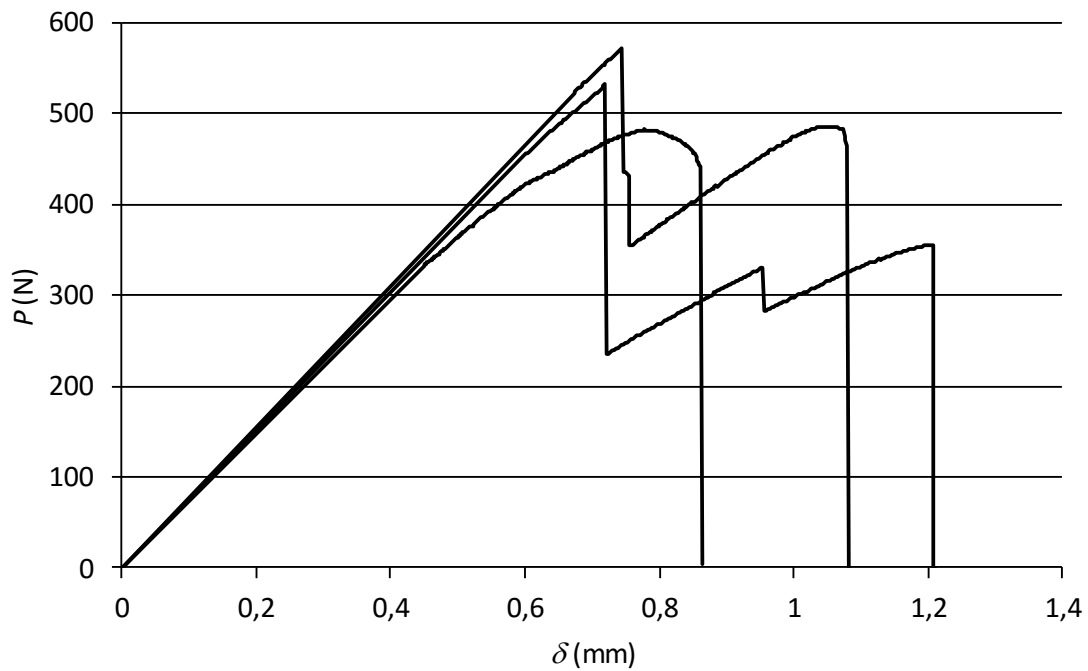


Figura 75 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm.

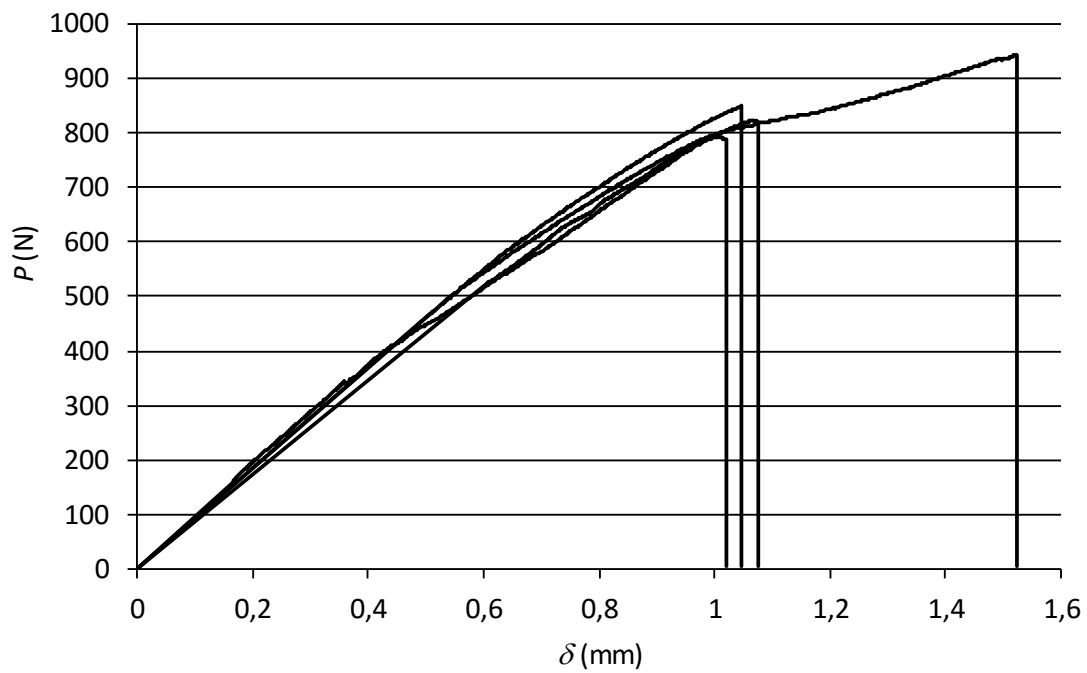


Figura 76 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm.

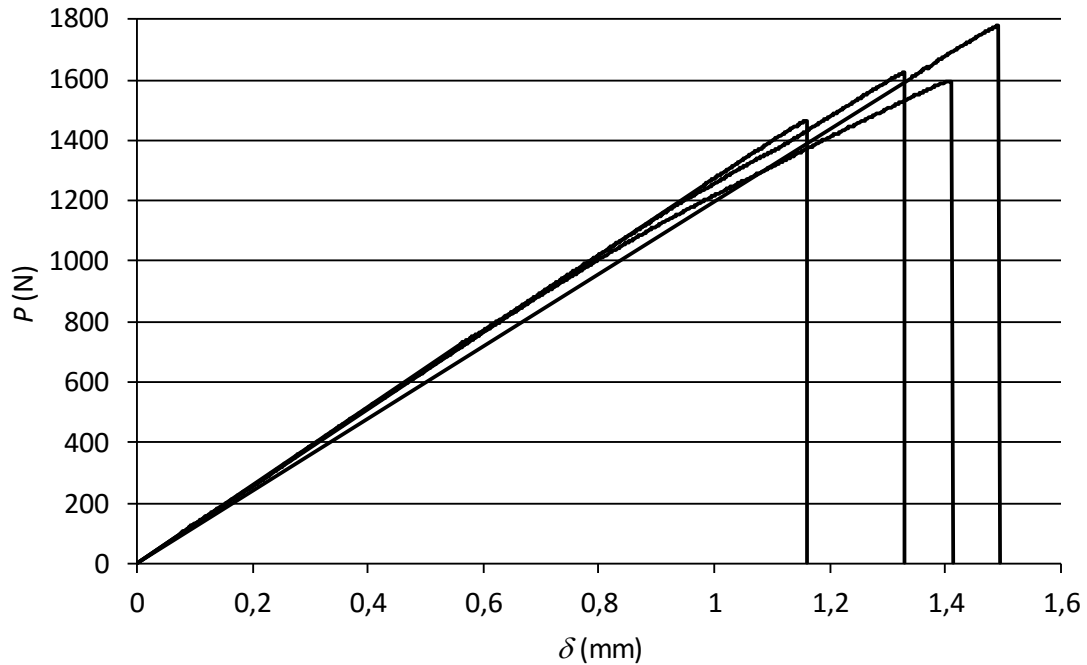


Figura 77 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.

Como se pode verificar da Figura 74 à Figura 77, as curvas $P-\delta$ dos vários provetes ensaiados apresentam uma correlação aceitável no que concerne à resistência máxima e respetivo deslocamento, e ainda deslocamento de rotura. Regista-se como exceção, na Figura 74, uma das juntas ensaiadas em que se obteve um deslocamento abaixo das restantes. Suspeita-se que este deslocamento mais baixo seja devido à má preparação da junta. Devido à fragilidade do adesivo, que não permite plastificação do aderente de alumínio, os deslocamentos de rotura que se evidenciaram foram baixos, sendo os maiores valores obtidos para $t_{p2}=4$ mm. Com o aumento dos valores de t_{p2} a resistência da junta aumenta.

Da Figura 78 à Figura 81 representam-se as curvas $P-\delta$ dos ensaios de provetes de junta colada com adesivo Araldite® 2015, para os 4 valores de t_{p2} .

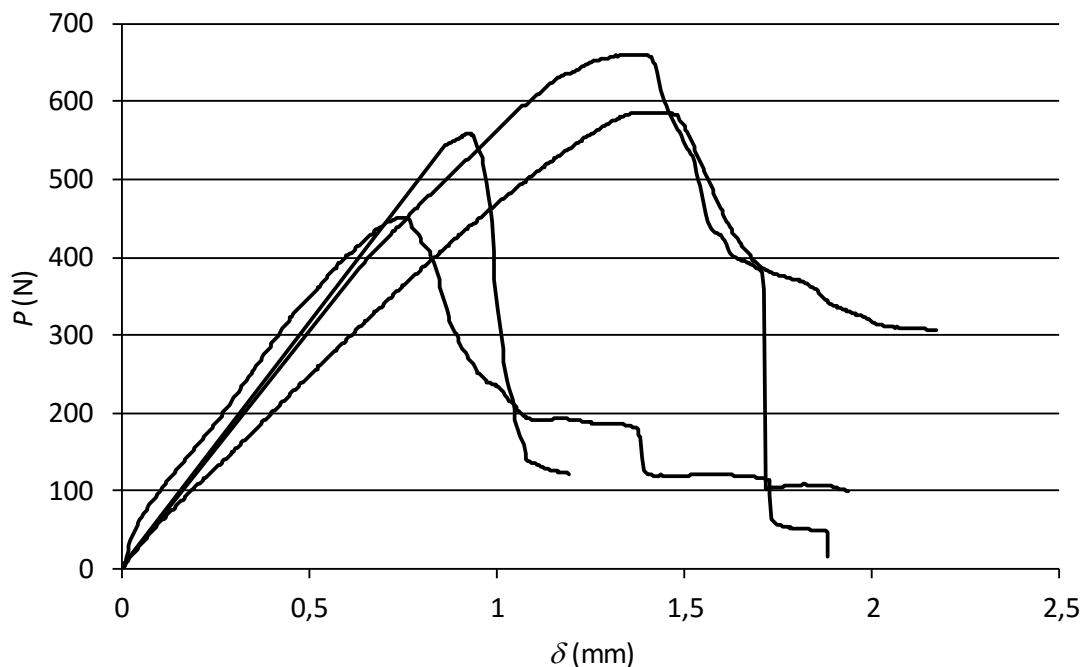


Figura 78 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm.

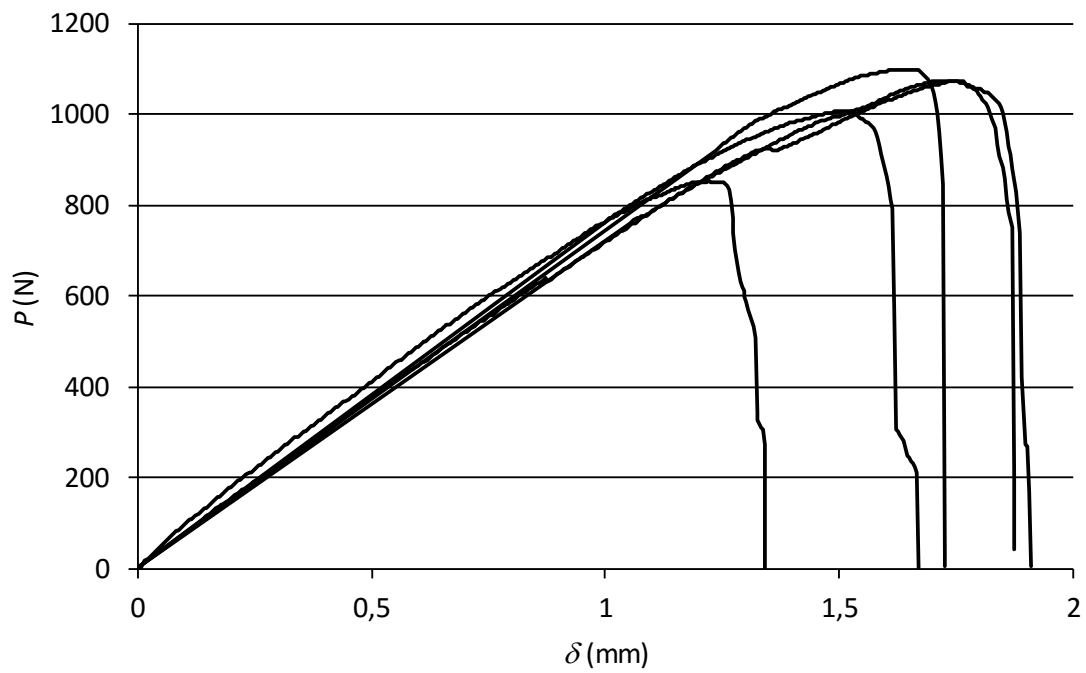


Figura 79 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=2$ mm.

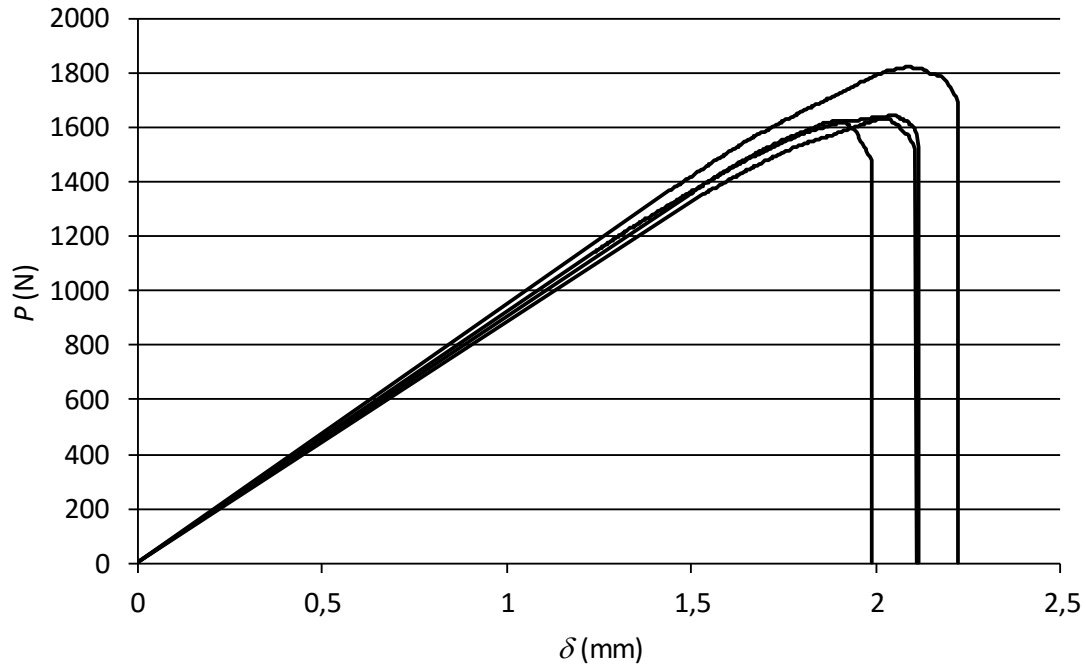


Figura 80 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=3$ mm.

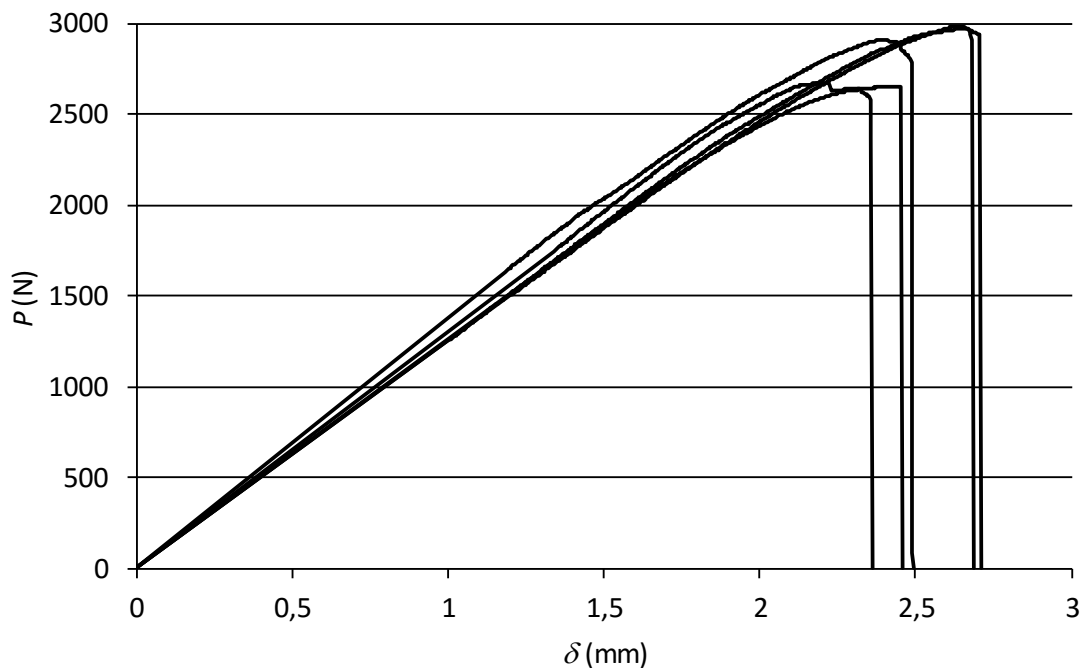


Figura 81 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{P2}=4$ mm.

Tal como nas curvas P - δ registadas nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para as juntas coladas com o Araldite® 2015 obteve-se um comportamento elástico até à proximidade de $P_{máx}$, região em que se observa uma ligeira plastificação na curva P - δ devido à ductilidade do adesivo.

Através da análise da Figura 78 à Figura 81 verifica-se que os conjuntos de curvas P - δ de cada valor de t_{P2} estão de acordo entre eles relativamente aos valores de resistência, deslocamentos de carga máxima e de rotura. O adesivo Araldite® 2015 é mais dúctil que o adesivo Araldite® AV138, o que induziu a plastificação dos aderentes em L para $t_{P2}=1$ mm. Para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 verifica-se que a resistência e deslocamento de rotura da junta adesiva apresentam valores superiores aos evidenciados para o adesivo Araldite® AV138. Como seria de esperar, com o aumento de t_{P2} , os valores da resistência aumentam e deslocamento de rotura aumentaram.

3.1.5.2 Modos de rotura

Da Figura 82 à Figura 85 estão representados os 5 provetes de juntas coladas com adesivo Araldite® AV138 ensaiados para cada um dos 4 valores de t_{P2} .

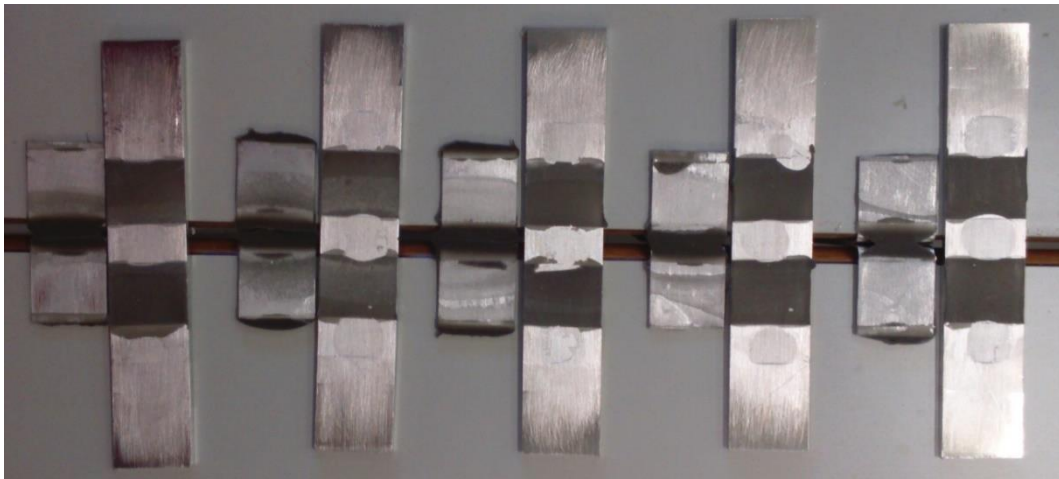


Figura 82 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.

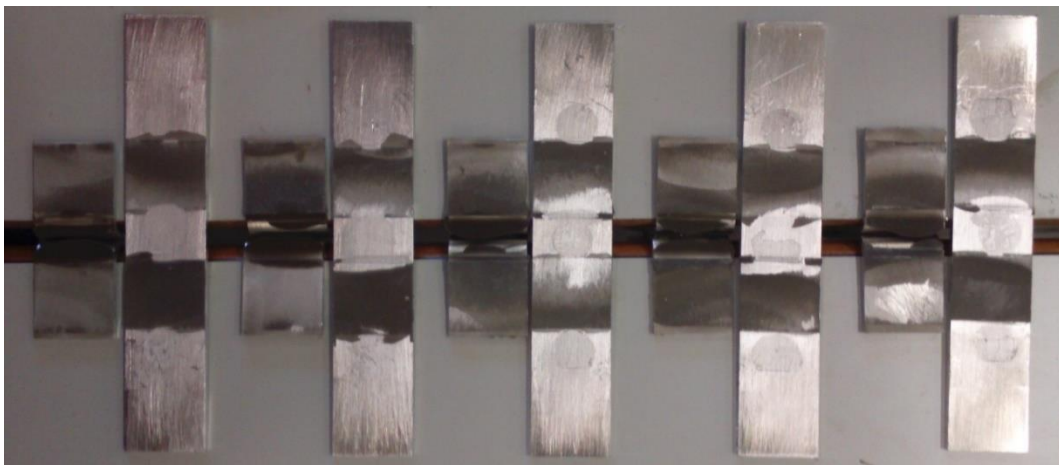


Figura 83 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm.

Os modos de rotura para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 foram semelhantes para todos os valores de t_{p2} . A presença de adesivo em ambos os aderentes de cada junta é representativa de 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, que permite uma melhor molhagem do adesivo nos aderentes. Nas juntas coladas com o Araldite® AV138 observou-se em todas as juntas a existência de adesivo em ambas as superfícies de colagem, embora nalguns casos uma das superfícies tenha ficado coberta com uma camada extremamente fina de adesivo, não claramente visível nas figuras.



Figura 84 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm.



Figura 85 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.

Da Figura 86 à Figura 89 apresentam-se os 5 provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 ensaiados para cada um dos 4 valores de t_{p2} . Tal como nos modos de rotura verificados para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, em todos os provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 se obteve roturas coesivas. Nestes provetes as porções de adesivo nas superfícies aderentes de ambos os aderentes foram semelhantes, o que é indicativo de uma rotura perfeitamente coesiva.

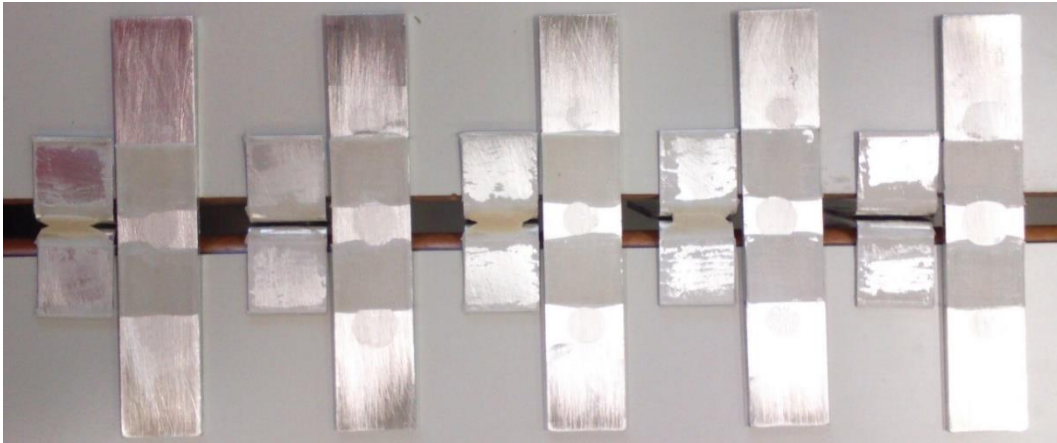


Figura 86 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm.



Figura 87 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=2$ mm.



Figura 88 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=3$ mm.

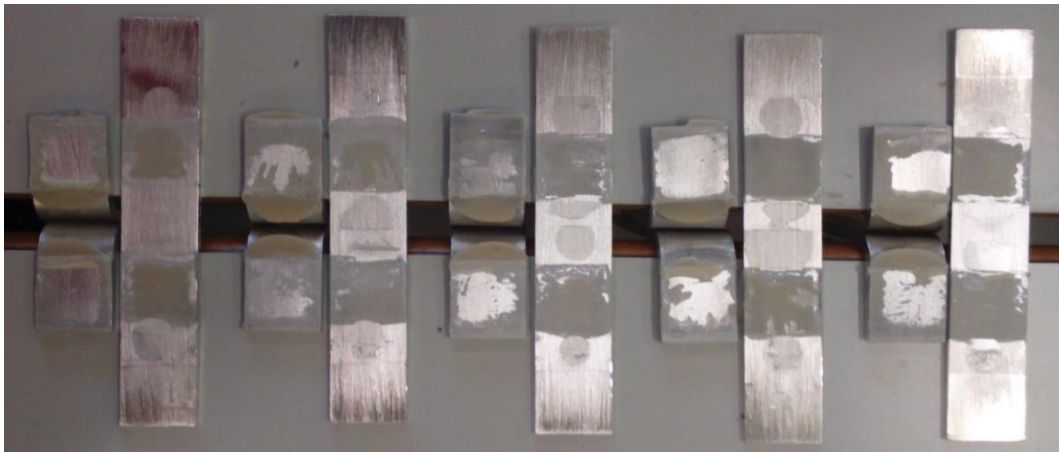


Figura 89 - Superfícies de rotura das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=4$ mm.

3.1.5.3 Resistência das juntas

Neste subcapítulo são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente. No mínimo, foram sempre considerados 3 provetes para calcular as mdias e o desvio padrão de cada configurao de junta. A Figura 90 representa os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em funo de t_{p2} das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 ou Araldite® 2015.

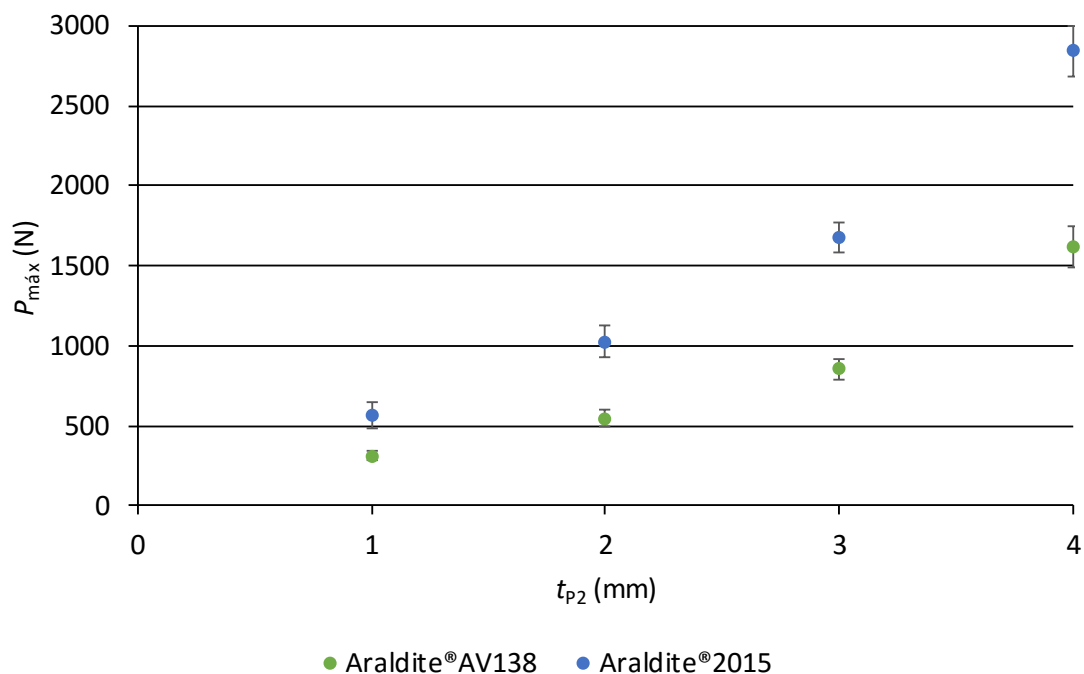


Figura 90 - Valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos nas juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

A partir da análise da Figura 90 observa-se que, independentemente do adesivo, os valores de $P_{m\acute{a}x}$ aumentam com o aumento de t_{p2} . No entanto, a evolução foi similar para ambos os adesivos. Em ambos os casos se observou um maior aumento da resistência entre as juntas com $t_{p2}=3$ e 4 mm. Observa-se na Figura 90 que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas coladas com o adesivo Araldite[®] 2015 são mais elevados do que aqueles obtidos utilizando o adesivo Araldite[®] AV138. De facto, dependendo do valor t_{p2} , a resistência pode ser quase o dobro da obtida com o adesivo Araldite[®] AV138, embora este último adesivo tenha um valor superior de resistência  tração.

Tendo como referência o valor de $P_{m\acute{a}x}$ para $t_{p2}=1$ mm nas juntas coladas com o adesivo Araldite[®] AV138, o aumento percentual dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ relativamente  junta com $t_{p2}=1$ mm foi de 75,0% ($t_{p2}=2$ mm), 173,8% ($t_{p2}=3$ mm) e 419,3% ($t_{p2}=4$ mm). Para o Araldite[®] 2015, o aumento percentual para $t_{p2}=2$ mm foi de 81,2%, para $t_{p2}=3$ mm de 197,8% e por último para $t_{p2}=4$ mm o aumento foi de 403,7%, correspondendo a valores superiores aos encontrados para o adesivo Araldite[®] AV138. Em termos percentuais, o adesivo Araldite[®] 2015 atingiu valores de $P_{m\acute{a}x}$ medidos superiores em 81,3%, 87,7%, 97,2% e 75,9%, respetivamente, para valores de t_{p2} entre 1 a 4 mm relativamente às juntas coladas com adesivo Araldite[®] AV138.

Atendendo às características de cada adesivo, considera-se que o adesivo Araldite[®] 2015 resiste mais aos efeitos de arrancamento devido a ser um adesivo mais dúctil e flexível. De facto, o adesivo Araldite[®] AV138 apresenta um valor de $E=4890$ MPa, enquanto que o adesivo Araldite[®] 2015 apresenta um valor de $E=1850$ MPa. Para além disso, o adesivo Araldite[®] AV138 é mais frágil e, como tal, é mais sensível a esforços de arrancamento. Por outro lado, visto que esta junta é principalmente solicitada  tração, o adesivo Araldite[®] 2015 apresenta valores de G_{Ic} superiores, o que também ajuda a que se obtenha valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores aos observados nas juntas coladas com o adesivo Araldite[®] AV138.

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo são abordadas as condições de análise numérica usadas na análise das várias configurações de junta e é descrito o MDC triangular utilizado. Em termos de resultados, inicialmente é apresentado um estudo de tensões σ_y e τ_{xy} ao longo do comprimento de sobreposição normalizado (x/L_0). Além das tensões é realizado um estudo da variável de dano dos elementos coesivos representativos do adesivo, para melhor compreender o processo de rotura das juntas. O estudo de resistência que se segue irá fazer uma comparação entre os valores numéricos e experimentais anteriormente obtidos, bem como estudar o efeito da consideração ou não do

preenchimento do adesivo na zona do raio de curvatura do aderente em L. Finalmente, é feita uma análise global dos resultados obtidos e tiradas as respectivas conclusões.

3.2.1 Condições da análise numérica

O *software* de análise numérica considerado nesta dissertação é o ABAQUS® versão 6.14. A construção dos modelos numéricos foi levada a cabo tendo em consideração condições de simetria verticais, o que permitiu considerar apenas metade da estrutura e assim simplificar a geometria e diminuir o esforço computacional requerido. A porção representada da estrutura é constituída por um L e metade do comprimento do aderente base da estrutura completa. Neste trabalho numérico são analisados 2 tipos de estrutura de junta em T, uma com adesivo de preenchimento na zona de curvatura do componente em L e outra sem adesivo de preenchimento, para efeitos comparativos entre estas duas configurações de junta.

Para efeitos da modelação do adesivo, no caso da existência do preenchimento da zona da curvatura dos aderentes com adesivo foi necessário dividir a zona representativa do adesivo em zona modelada com elementos coesivos (faixa horizontal de espessura constante) e em zona modelada com elementos sólidos (zona do preenchimento). Na Figura 91 está ilustrado o modelo da junta em T com adesivo de preenchimento, com as dimensões (mm) e propriedades respectivas de cada secção, definidas no ABAQUS®.

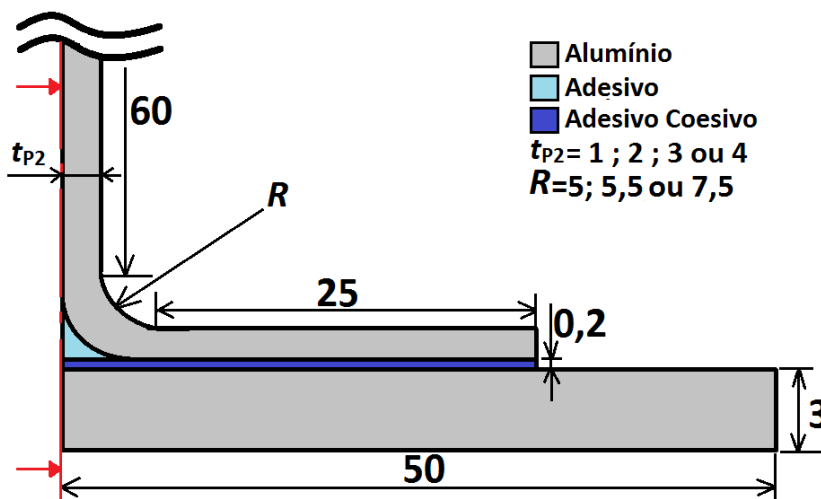


Figura 91 - Esquema do modelo da junta em T com adesivo de preenchimento.

Na Figura 92 está ilustrado o modelo da junta em T sem o adesivo de preenchimento, com as respetivas dimensões (mm).

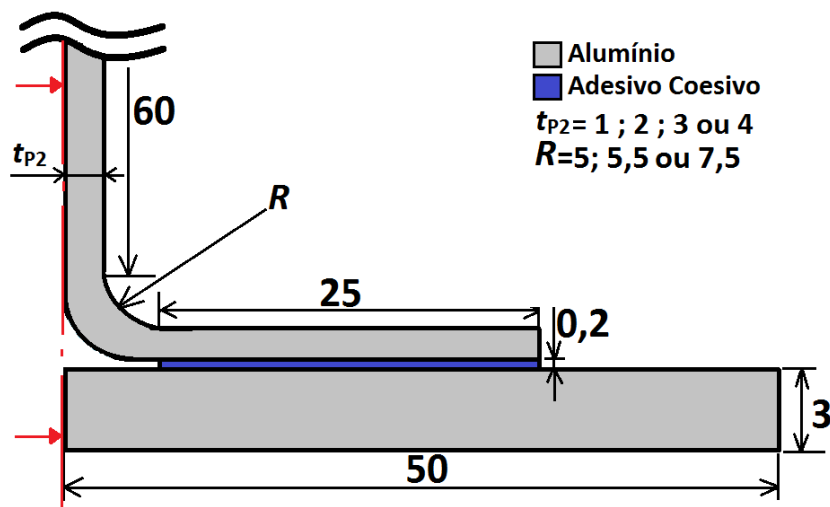


Figura 92 - Esquema do modelo da junta em T sem adesivo de preenchimento.

Desde o desenho das juntas no *software* ABAQUS® até à realização dos testes, diversos passos são necessários. Todo este processo, descrito de seguida com algum detalhe, está dividido por módulos:

- Módulo 1 “Part”: este módulo consiste na realização do desenho da estrutura através dos limites exteriores e posterior divisão em partições, como está representado na Figura 93. É neste módulo que se fazem as alterações no valor de t_{p2} , que toma valores de 1, 2, 3 ou 4 mm.

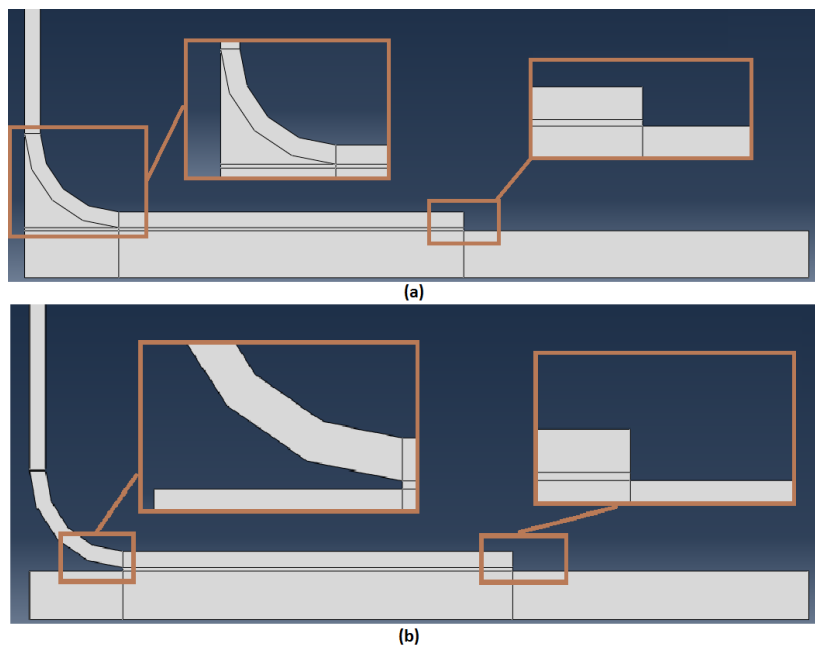


Figura 93 - Imagem do *software* ABAQUS® referente às partições definidas da junta: (a) com adesivo de preenchimento e (b) sem adesivo de preenchimento.

- Módulo 2 “*Property*”: consiste na associação das diferentes propriedades para cada partição da estrutura desenhada no módulo 1. É importante referir que na camada de adesivo modelada com propriedades coesivas, com espessura de 0,2 mm, considerou-se uma secção do tipo coesiva. Quanto ao adesivo para preenchimento da zona de raio de curvatura, consideraram-se elementos com propriedades contínuas.
- Módulo 3 “*Assembly*”: este módulo serve para juntar as diferentes partes de um conjunto mas, no presente caso, não foi necessário efetuar nenhuma operação.
- Módulo 4 “*Load*”: neste módulo são introduzidas as condições fronteira. Na Figura 94 estão representadas as diferentes condições usadas neste módulo.

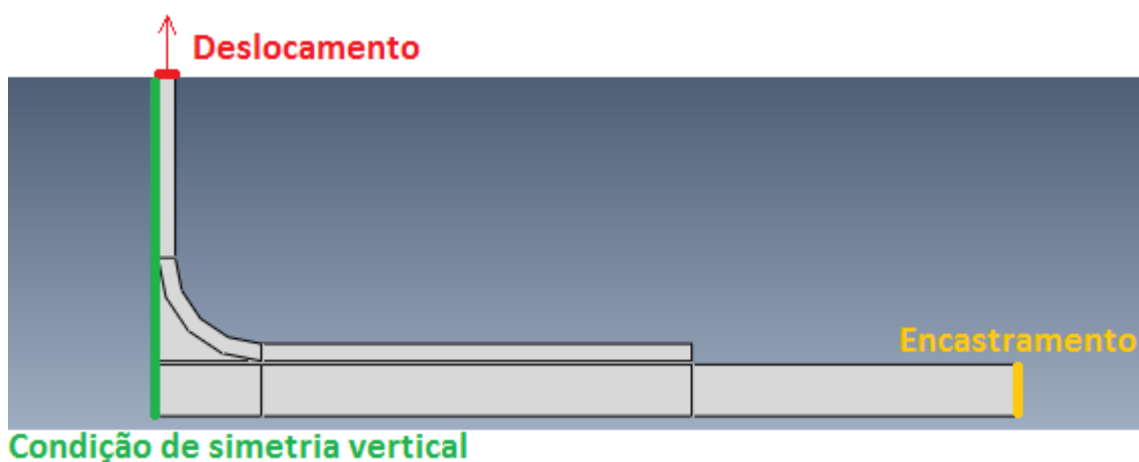


Figura 94 - Esquema representativo das condições fronteira aplicadas aos modelos.

- Módulo 5 “*Step*”: neste módulo é introduzido o número máximo de incrementos que o modelo pode conter e os limites de tamanho destes. Na construção do modelo numérico a incrementação é um aspeto importante a ter em conta. Ao definir a incrementação do modelo, é necessário definir um tamanho de incremento mínimo suficientemente reduzido para que o *software* não tenha problemas de convergência na zona de propagação do dano. Por outro lado, o limite superior de incrementos que a análise pode conter deve ser suficientemente elevado para que a análise não termine devido a exceder o número de incrementos permitido. Na Tabela 11 são referidos os valores utilizados na incrementação.

Tabela 11 - Definições de incrementação no *software* ABAQUS®.

Nº de incrementos	10000
Tamanho inicial do incremento	0,0025
Tamanho mínimo do incremento	10^{-20}
Tamanho máximo do incremento	0,0025

- Módulo 6 “*Mesh*”: neste módulo é feita a discretização da malha, após definição dos tamanhos de malha em cada aresta do modelo. A Figura 95 mostra refinamentos típicos de malha para a análise de rotura (a) e de tensões (b).

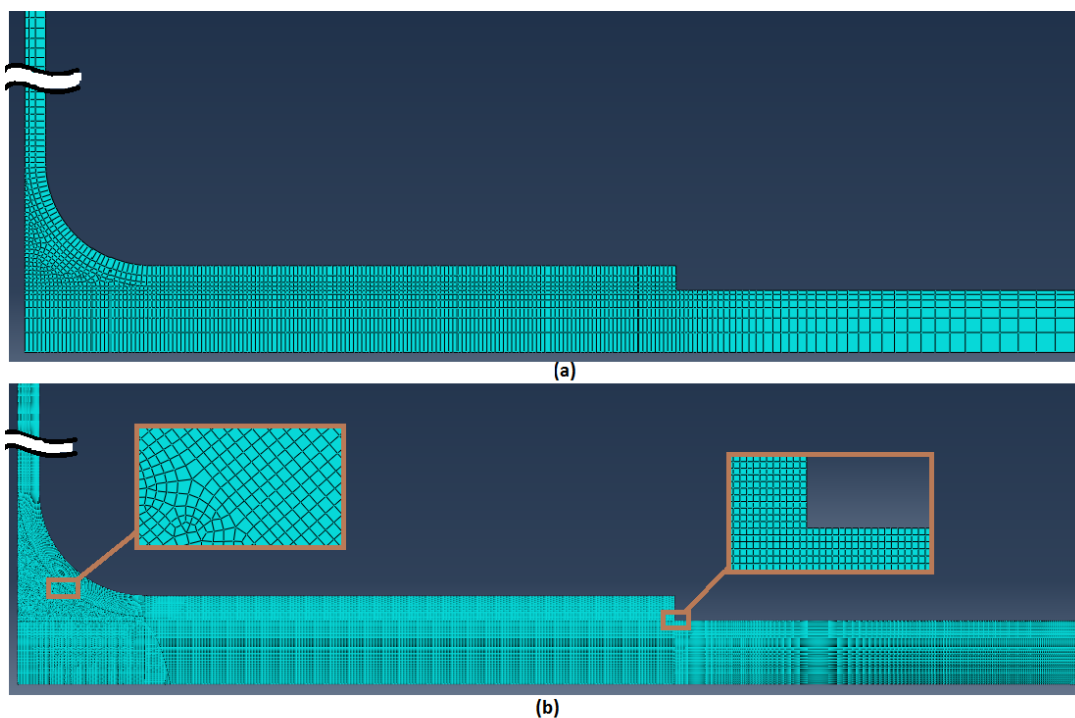


Figura 95 - Malha refinada para: (a) análise de resistência e (b) análise de tensões.

Verifica-se que a malha usada para o teste de análise de tensões é mais refinada do que a malha usada para a análise de resistência. A malha na Figura 95 (b) é cerca de 10 vezes mais refinada. Para a análise das tensões, considerou-se uma malha bastante mais refinada para conseguir capturar os grandes gradientes de tensões ao longo do adesivo. Quanto à análise de resistência, utilizou-se uma malha menos refinada do que a utilizada para a análise de tensões para reduzir o esforço computacional associado, mas sem comprometer a validade dos resultados obtidos.

- Módulo 7 “Job”: neste módulo são realizados os testes dos modelos. Para o modelo de análise de resistência, os testes decorrem até ao fim do deslocamento imposto, de maneira que a rotura total da estrutura seja atingida. Quanto ao modelo de análise de tensões apenas é necessário um incremento de análise, uma vez que se pretende extrair as tensões no domínio elástico do carregamento.
- Módulo 8 “Visualization”: este módulo permite acompanhar o comportamento da estrutura quando solicitada a determinadas condições e permite retirar os valores das forças e tensões.

3.2.2 Modelo de dano coesivo

Como anteriormente referido, 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 [52].

3.2.2.1 Modelo de dano triangular

A lei de dano triangular (Figura 96) 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).

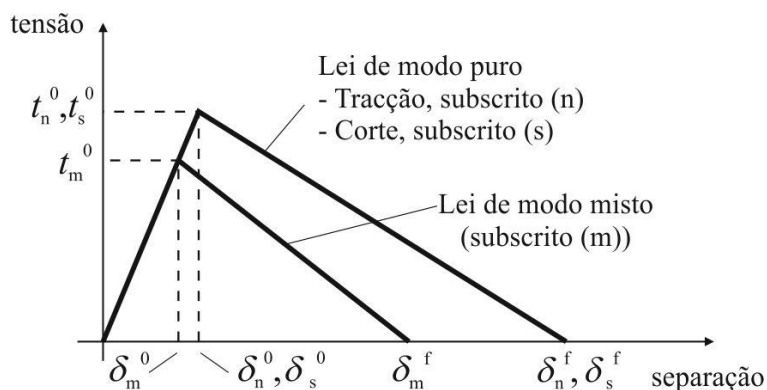


Figura 96 - MDC 2D com lei triangular [31].

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

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 que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [53], sendo dado por

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

$\langle \rangle$ são os parênteses 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 96), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1. \quad (3)$$

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_{Ic} e G_{IIc} (Figura 96). No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios em adesivo maciço [53-55]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos aderentes 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 [56-58]. 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.

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado o método descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [59]. Foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios em adesivo maciço e ensaios de corte *Thick Adherend Shear Test* (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_{Ic} e G_{IIc} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram utilizadas no modelo numérico de uma das geometrias testadas (a junta de sobreposição simples com $L_0=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas de utilizando um método inverso de ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais por variação de G_{Ic} e G_{IIc} . 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 [50] concluiu-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades dos adesivos. A Tabela 12 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 12 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com $t_A=0,2$ mm.

E (MPa)	4890	G (MPa)	1560
t_n^0 (MPa)	39,450	t_s^0 (MPa)	30,200
G_{Ic} (N/mm)	0,200	G_{IIc} (N/mm)	0,380

Para o adesivo Araldite® 2015, as leis coesivas da camada de adesivo foram determinadas em trabalhos anteriores [60] 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_{Ic} e G_{IIc} através de ensaios *Double-cantilever beam* (DCB) e *End-notched flexure* (ENF), respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{Ic} ou G_{IIc} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte) com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo. A Tabela 13 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), respetivamente [59].

Tabela 13 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo de Araldite® 2015 com $t_A=0,2$ mm.

E (MPa)	1850	G (MPa)	650
t_n^0 (MPa)	23,000	t_s^0 (MPa)	22,800
G_{Ic} (N/mm)	0,430	G_{IIc} (N/mm)	4,700

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo distinto. Para a determinação da lei coesiva ao corte, seguiu-se um método

inverso, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fratura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [46]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos na referência [46], 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_{IIC} foi obtido por ensaios de fratura DCB [61], 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 [60]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular da solicitação à tração, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [60], 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) [51]. A Tabela 14 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 14 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Sikaforce® 7752 com $t_A=0,2$ mm.

E (MPa)	493,810	G (MPa)	187,750
t_n^0 (MPa)	11,490	t_s^0 (MPa)	10,170
G_{Ic} (N/mm)	2,360	G_{IIC} (N/mm)	5,410

3.2.3 Análise de tensões na junta

Neste capítulo são apresentadas as tensões σ_y e τ_{xy} ao longo do adesivo. Estes gráficos são representados da seguinte forma:

- Os valores do eixo das abcissas representam x/L_0 ;
- No eixo das ordenadas estão representadas as tensões ao longo do adesivo. Foram estudadas tensões σ_y e τ_{xy} normalizadas (σ_y/σ_{med} e τ_{xy}/σ_{med} , respetivamente). σ_{med} representa a média de σ_y ao longo da camada do adesivo para cada valor de t_{p2} .

Na Figura 97 é apresentado um esquema da junta com adesivo de preenchimento, com o comprimento do adesivo normalizado.

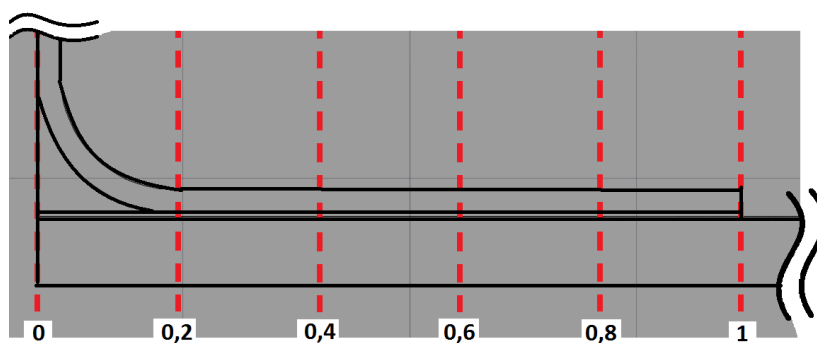


Figura 97 - Comprimento normalizado do adesivo Araldite® AV138 para a junta com adesivo de preenchimento.

Com a análise da Figura 97, observa-se que o ponto referente a $x/L_0 \approx 0,2$ corresponde ao início da zona plana do aderente em L. O ponto $x/L_0=1$ representa a extremidade livre da sobreposição. Refere-se que o ponto $x/L_0 \approx 0,2$ não se situou exatamente a $x/L_0=0,2$, tendo de facto variado ligeiramente em função de $\approx t_{p2}$. No entanto, na presente descrição, o ponto será referido desta forma.

Na Figura 98 é apresentado um esquema da junta sem adesivo de preenchimento, com o comprimento do adesivo normalizado.

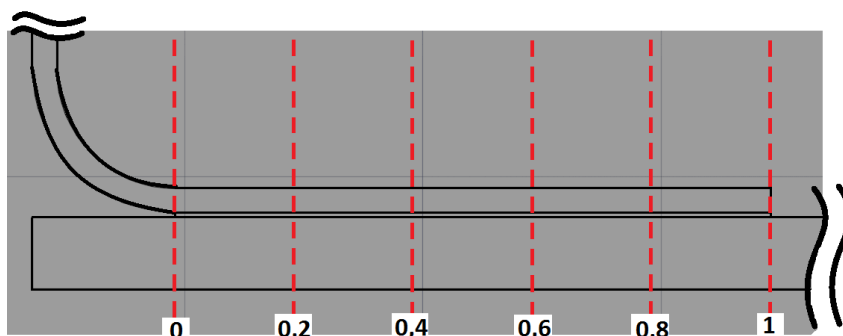


Figura 98 - Comprimento normalizado do adesivo Araldite® AV138 para a junta sem adesivo de preenchimento.

Tal como na junta apresentada na Figura 97, nas juntas sem adesivo de preenchimento (Figura 98) observam-se 2 zonas nas quais se prevê uma concentração de tensões ($x/L_0=0$ e $x/L_0=1$).

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

O estudo das tensões σ_y para os 3 adesivos é feito para as juntas com e sem adesivo de preenchimento. Esta análise consiste no estudo de σ_y/σ_{med} ao longo de x/L_0 .

➤ Juntas com adesivo de preenchimento

A Figura 99, Figura 100 e Figura 101 representam o comportamento das tensões σ_y ao longo de x/L_0 para as juntas com adesivo de preenchimento e coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Neste tipo de junta verifica-se que, para cada valor de t_{p2} , as curvas de tensões apresentam 2 picos de tensão localizados nas proximidades de $x/L_0=0,2$ e 1 mm.

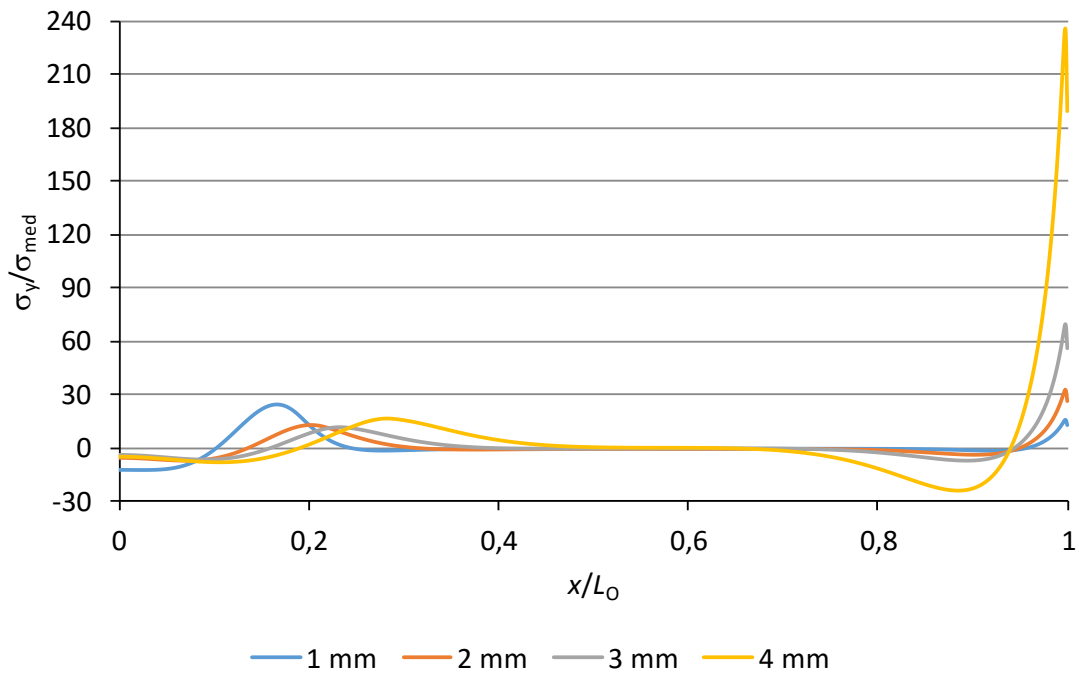


Figura 99 - Tensões σ_y para junta em T com adesivo de preenchimento (Araldite® AV138).

Analisando as curvas de tensões da Figura 99, verifica-se que os picos de tensão na proximidade de $x/L_0=0,2$ diminuem com o aumento dos valores de t_{p2} , com a exceção da junta com $t_{p2}=4$ mm. Na junta com $t_{p2}=4$ mm o valor de pico na proximidade de $x/L_0=0,2$ foi superior à junta com $t_{p2}=2$ e 3 mm. Em relação aos picos de tensão na proximidade de $x/L_0=1$, estes apresentam um crescimento gradual com o aumento de t_{p2} . Este comportamento está relacionado com o aumento da rigidez do componente em L com o aumento de t_{p2} , o que aumenta as tensões σ_y na proximidade de $x/L_0=1$.

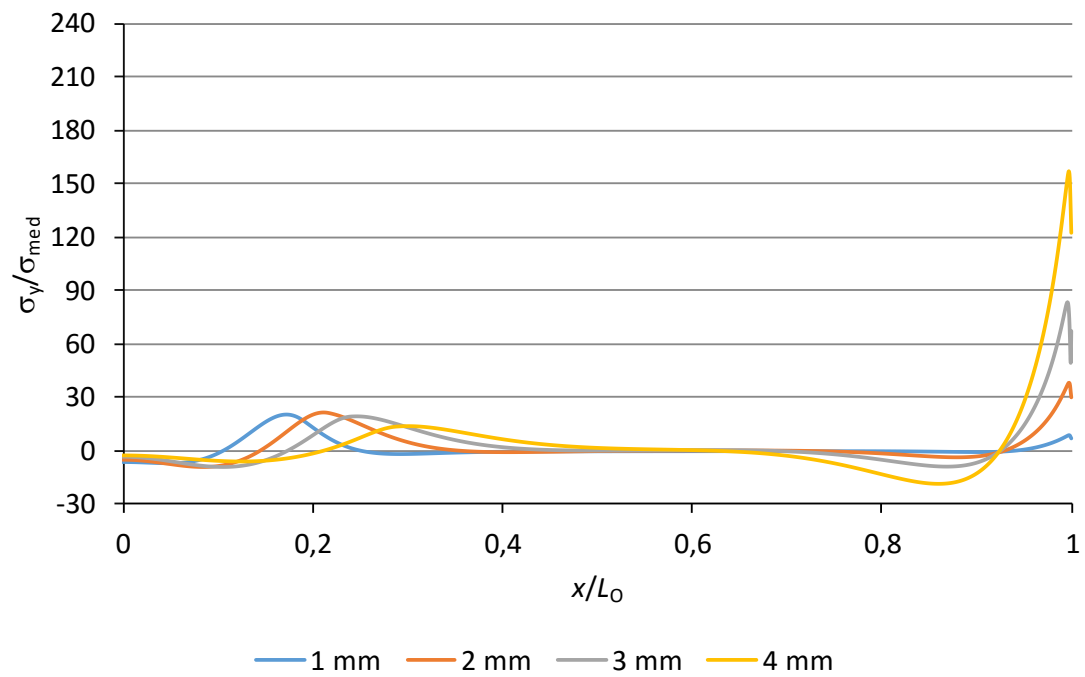


Figura 100 - Tensões σ_y para junta em T com adesivo de preenchimento (Araldite® 2015).

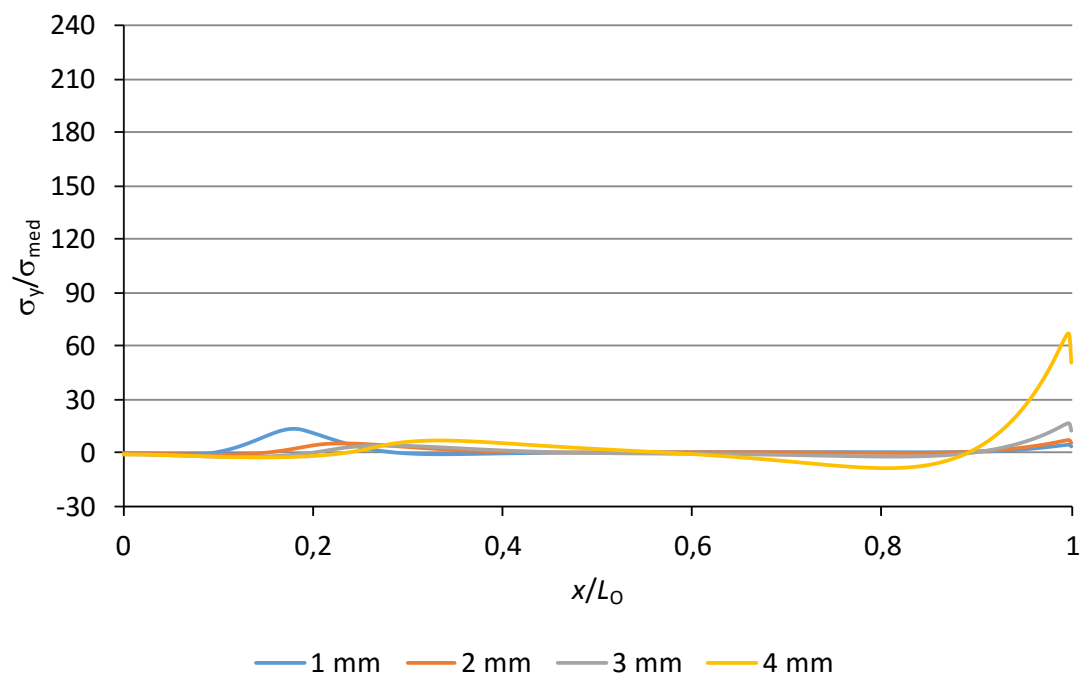


Figura 101 - Tensões σ_y para junta em T com adesivo de preenchimento (Sikaforce® 7752).

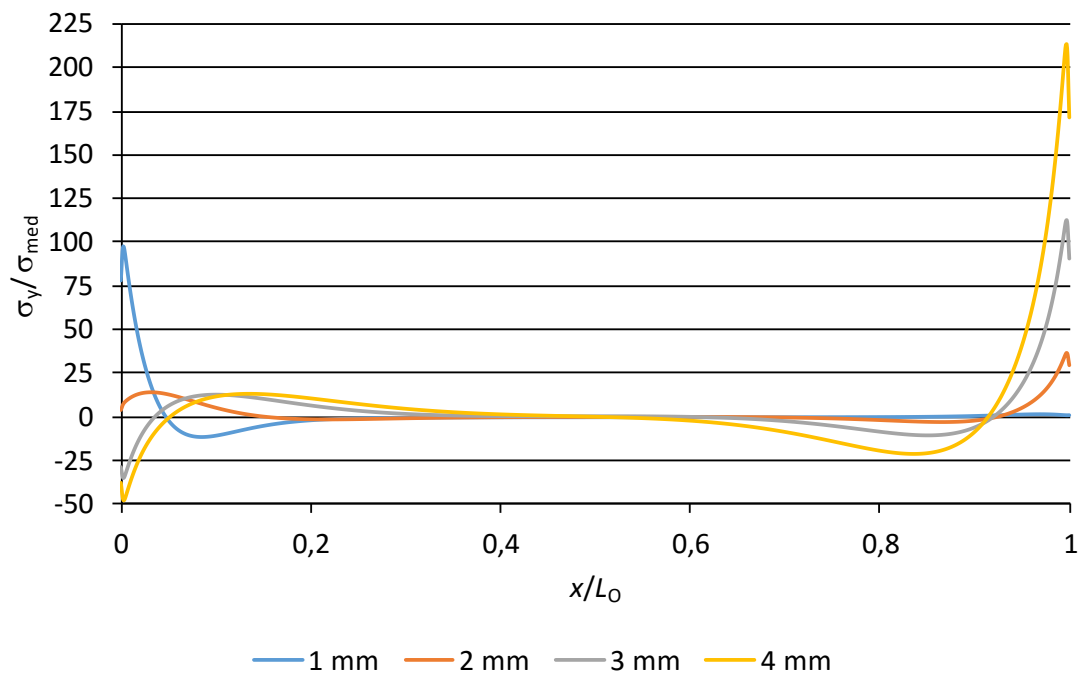
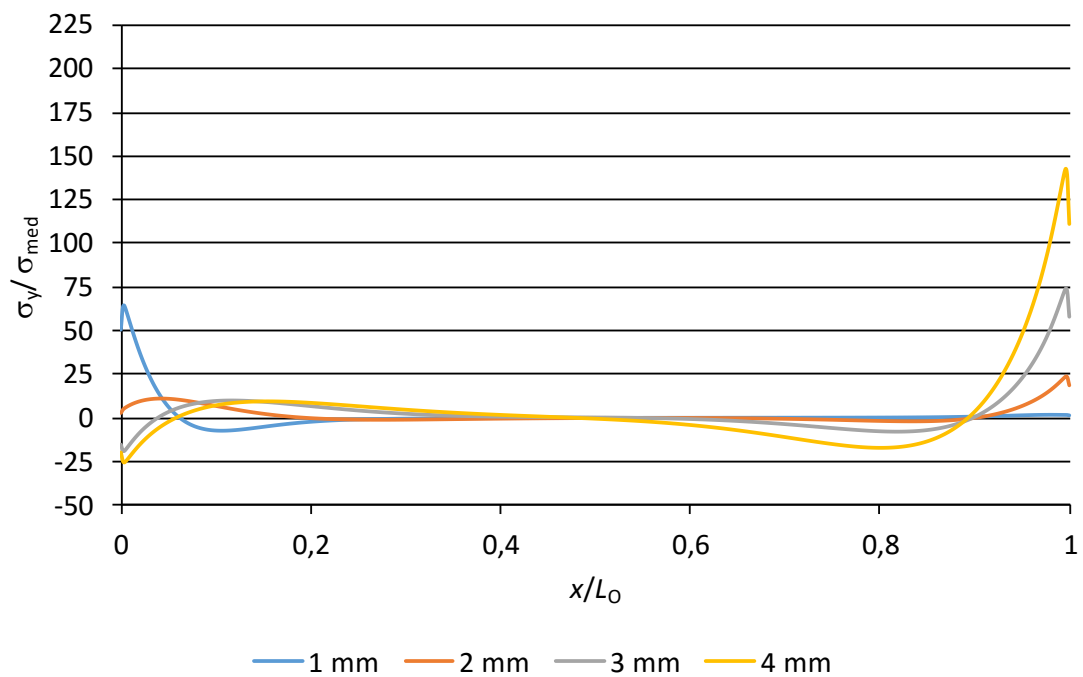
Tal como nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para o adesivo Araldite® 2015 verificou-se que, com o aumento dos valores de t_{p2} , os picos de tensão na proximidade de $x/L_0=0,2$ apresentam um pequeno decréscimo e os picos de tensão na proximidade de $x/L_0=1$ apresentam um crescimento gradual. Contudo, neste tipo de juntas, os valores normalizados dos 2 picos de tensão foram inferiores aos valores observados nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138. Esta diferença justifica-se devido à rigidez do Araldite® 2015 ser inferior à do Araldite® AV138.

Nas juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 verificou-se que, com o aumento dos valores de t_{p2} , os picos de tensão na proximidade de $x/L_0=0,2$ diminuem, enquanto os picos de tensão na proximidade de $x/L_0=1$ aumentam gradualmente, tal como se verificou nas juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e Araldite® AV138. No entanto, tal como na junta colada com o adesivo Araldite® AV138, para $t_{p2}=4$ mm obteve-se um valor do primeiro pico de tensão superior ao da junta com $t_{p2}=2$ e 3 mm. Neste tipo de junta os 2 picos de tensão normalizada para todos os valores de t_{p2} foram bastante inferiores aos valores registados no adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, devido também à rigidez bastante inferior deste adesivo.

Em geral, para os 3 adesivos em estudo, verificou-se que os valores de pico em $x/L_0=0,2$ foram inferiores a $x/L_0=1$, com exceção da junta com $t_{p2}=1$ mm. O ponto $x/L_0=1$ corresponde a um ponto de concentração máxima de tensões (mencionado na Figura 16). Este fenómeno deve-se à flexão do aderente retilíneo provocado pelo carregamento imposto.

➤ Juntas sem adesivo de preenchimento

A Figura 102, Figura 103 e Figura 104 representam o comportamento das tensões σ_y/σ_{med} ao longo de x/L_0 para as juntas sem adesivo de preenchimento e coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Neste tipo de junta verifica-se que, para cada valor de t_{p2} , as curvas de tensões apresentam 2 picos de tensão localizados nas proximidades de $x/L_0=0$ e 1 mm. O comportamento das curvas de σ_y para as juntas sem adesivo de preenchimento foi muito semelhante nos 3 adesivos analisados, apenas variando na grandeza dos valores. Os valores registados nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 foram superiores aos do adesivo Araldite® 2015 e bastante superiores aos do adesivo Sikaforce® 7752, devido à rigidez do primeiro ser superior à dos restantes. Além disso, verificou-se a partir de $t_{p2}=2$ mm um aumento dos valores de pico σ_y/σ_{med} . Na junta com $t_{p2}=1$ mm o pico de tensão na proximidade de $x/L_0=0$ foi superior aos picos de tensão, nesse mesmo ponto, das juntas com $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm. Quanto aos picos de tensão na proximidade de $x/L_0=1$, estes apresentaram um crescimento gradual com o aumento de t_{p2} . No entanto, este crescimento gradual foi diminuindo com o aumento da flexibilidade do adesivo.

Figura 102 - Tensões σ_y para junta em T sem adesivo de preenchimento (Araldite® AV138).Figura 103 - Tensões σ_y para junta em T sem adesivo de preenchimento (Araldite® 2015).

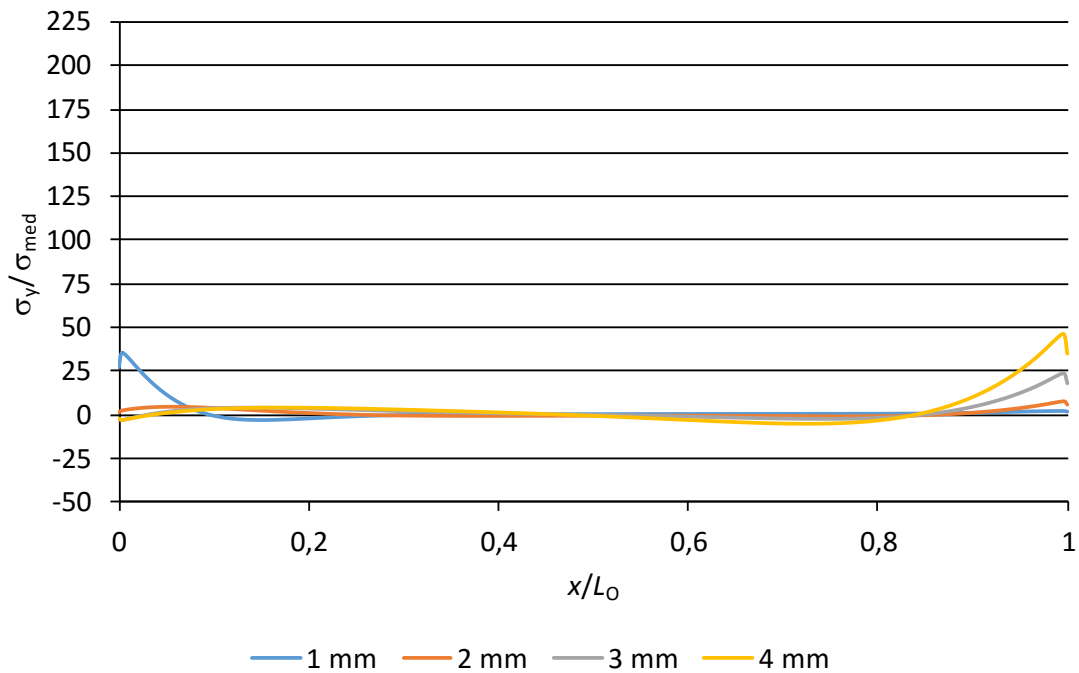


Figura 104 - Tensões σ_y para junta em T sem adesivo de preenchimento (Sikaforce® 7752).

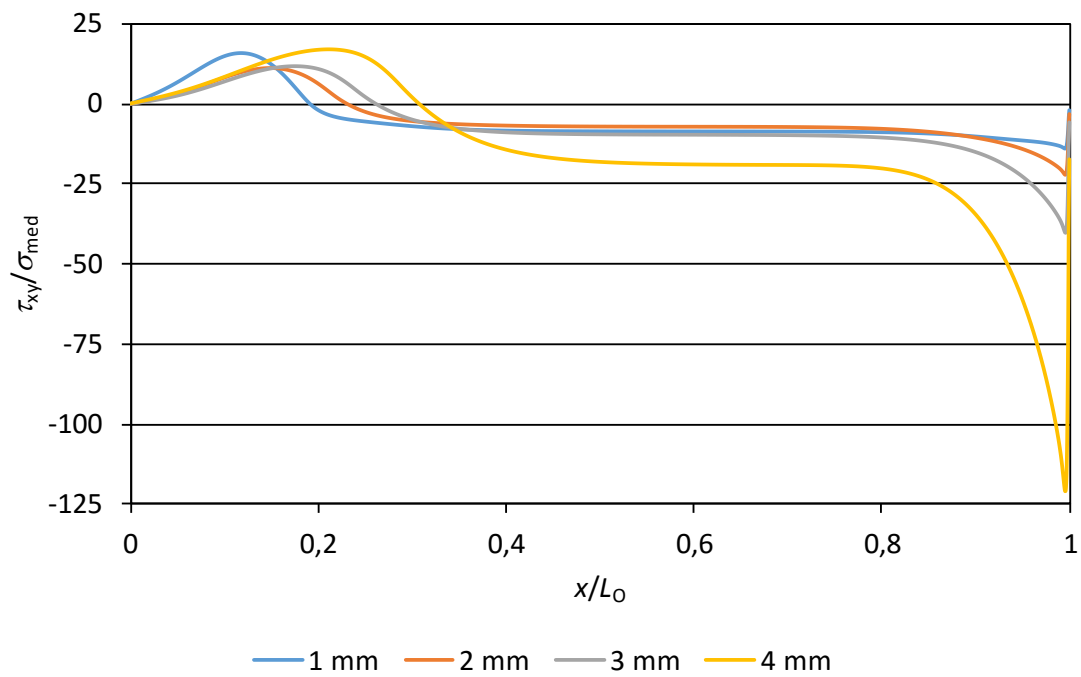
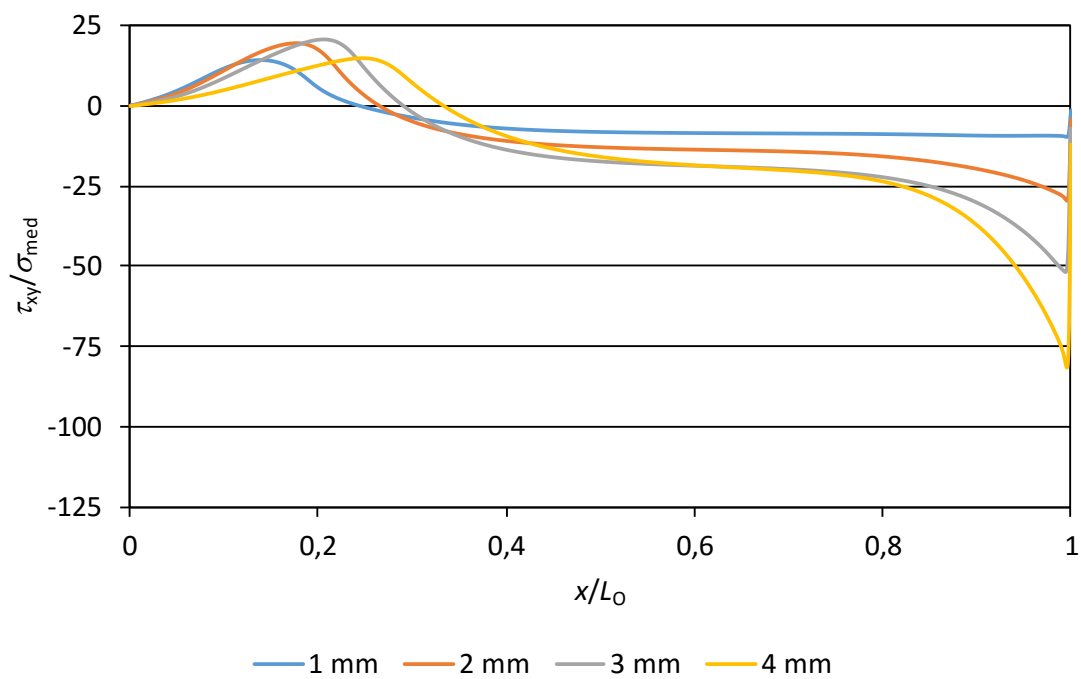
A existência de picos de tensão ao longo do adesivo na proximidade de $x/L_0=0$ e 1 deve-se à variação brusca da geometria nessas zonas. A não presença de adesivo de preenchimento eleva as tensões σ_y na extremidade do adesivo referente a $x/L_0=0$. Além disso, verificou-se que, para os 3 adesivos em estudo, o comportamento das tensões σ_y/σ_{med} ao longo de x/L_0 difere em função de t_{p2} , em termos de valores negativos e positivos, correspondentes a compressão e tração, respectivamente.

3.2.3.2 Tensões de corte

Neste subcapítulo é feita uma análise das tensões τ_{xy}/σ_{med} para os três adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) e 2 tipos de juntas (com e sem adesivo de preenchimento). A análise dos resultados obtidos das tensões τ_{xy} consiste no estudo do comportamento das referidas tensões ao longo de x/L_0 .

➤ Juntas com adesivo de preenchimento

A Figura 105, Figura 106 e Figura 107 representam os resultados obtidos das tensões τ_{xy} nas juntas com adesivo de preenchimento coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respectivamente.

Figura 105 - Tensões τ_{xy} para junta em T com adesivo de preenchimento (Araldite® AV138).Figura 106 - Tensões τ_{xy} para junta em T com adesivo de preenchimento (Araldite® 2015).

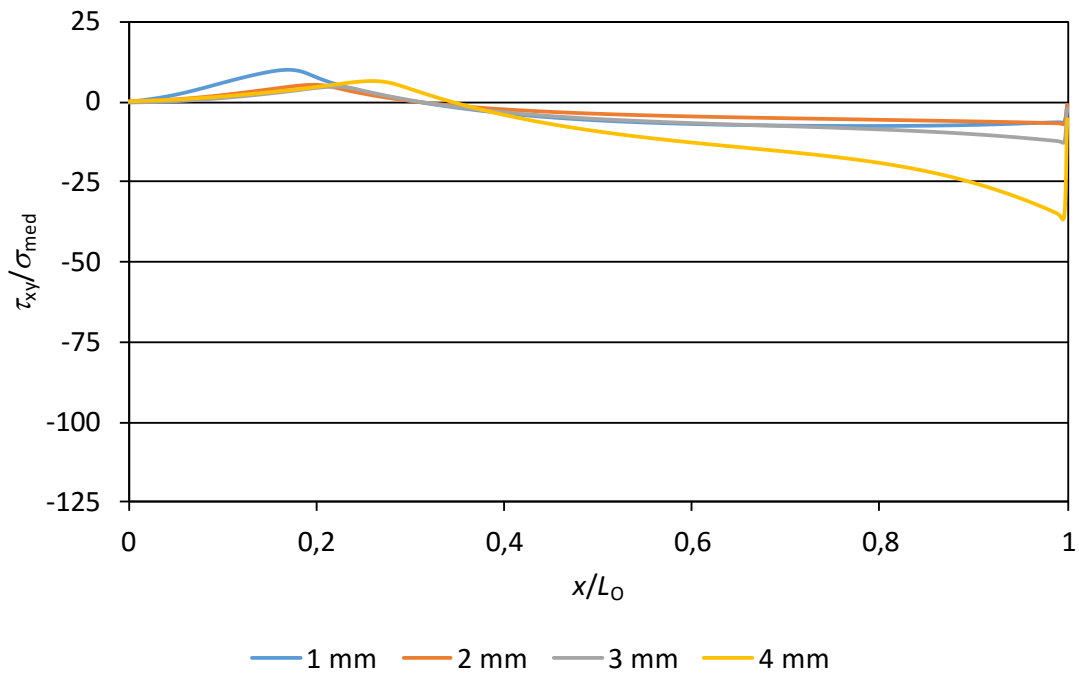


Figura 107 - Tensões τ_{xy} para junta em T com adesivo de preenchimento (Sikaforce® 7752).

Analisando a Figura 105, referente às juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, observa-se que os valores de pico em $x/L_0 \approx 0,2$ aumentam com o crescimento dos valores de t_{p2} a partir de $t_{p2}=2$ mm. Na junta com $t_{p2}=1$ mm, este pico foi superior ao das juntas com $t_{p2} = 2$ e 3 mm, embora inferior à junta com $t_{p2}=4$ mm. Quanto pico de tensão na proximidade de $x/L_0=1$ verificou-se um crescimento gradual dos valores com o aumento de t_{p2} .

Os resultados para o adesivo Araldite® 2015 (Figura 106) mostraram que, com o aumento dos valores de t_{p2} até $t_{p2}=3$ mm, as tensões τ_{xy} de pico em $x/L_0=1$ também aumentam. No entanto, no caso da junta com $t_{p2}=4$ mm, obteve-se valores inferiores aos valores das juntas com $t_{p2}=2$ e 3 mm. Quanto aos picos de tensão na proximidade de $x/L_0=1$ verificou-se um aumento gradual destes com o aumento dos valores de t_{p2} . Comparando com as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 observou-se que os valores de τ_{xy}/σ_{med} ao longo do adesivo são ligeiramente inferiores, devido à rigidez do adesivo Araldite® 2015 ser inferior à do adesivo Araldite® AV138.

Nas juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 107) os picos de tensão na proximidade de $x/L_0=0,2$ aumentam com o aumento dos valores de t_{p2} a partir de $t_{p2}=2$ mm. No caso da junta com $t_{p2}=1$ mm observou-se um valor de pico superior às outras juntas. Os valores de pico na proximidade de $x/L_0=1$ registaram um aumento gradual à medida que t_{p2} aumenta. Nas juntas coladas com este tipo de adesivo verificou-se que

os valores de τ_{xy}/σ_{med} ao longo do adesivo são inferiores aos das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e bastante inferiores aos valores do adesivo Araldite® AV138. Isto deve-se à diminuição da rigidez do adesivo Sikaforce® 7752, que tem como efeito a maior uniformização das tensões ao longo da zona ligada. Em todos os gráficos apresentados para as tensões τ_{xy} registou-se uma inversão do sentido das tensões na proximidade de $x/L_0=0,3$, o que apenas diz respeito à alteração do sentido de deslizamento entre o aderente base e componente em L.

Comparando as tensões σ_y com as tensões τ_{xy} , verifica-se que os valores de τ_{xy} observados são muito inferiores aos valores das tensões σ_y . Isto deve-se ao facto desta junta ser solicitada principalmente ao arrancamento.

➤ Juntas sem adesivo de preenchimento

A Figura 108, Figura 109 e Figura 110 representam as distribuições das tensões τ_{xy} nas juntas sem adesivo de preenchimento coladas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

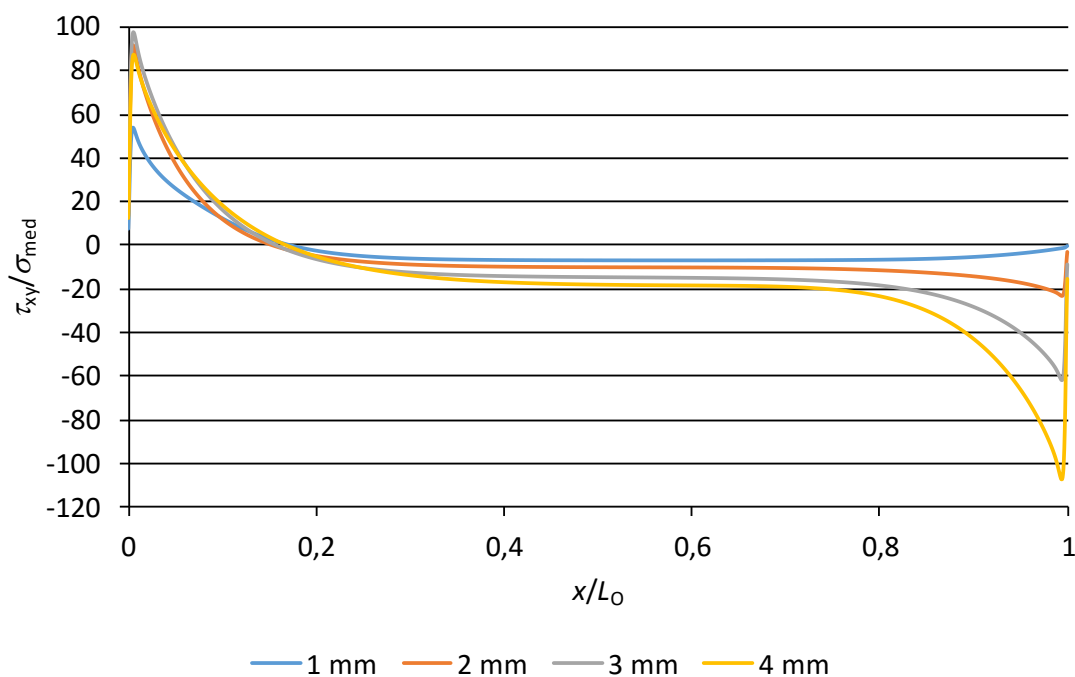


Figura 108 - Tensões τ_{xy} para junta em T sem adesivo de preenchimento (adesivo Araldite® AV138).

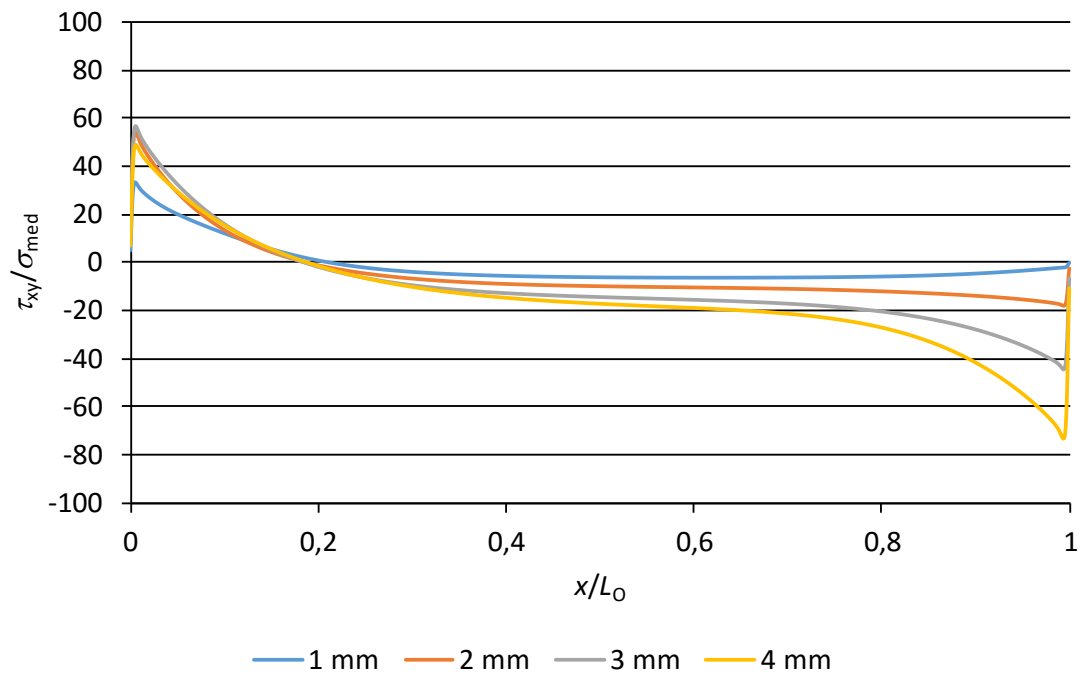


Figura 109 - Tensões τ_{xy} para junta em T sem adesivo de preenchimento (Araldite® 2015).

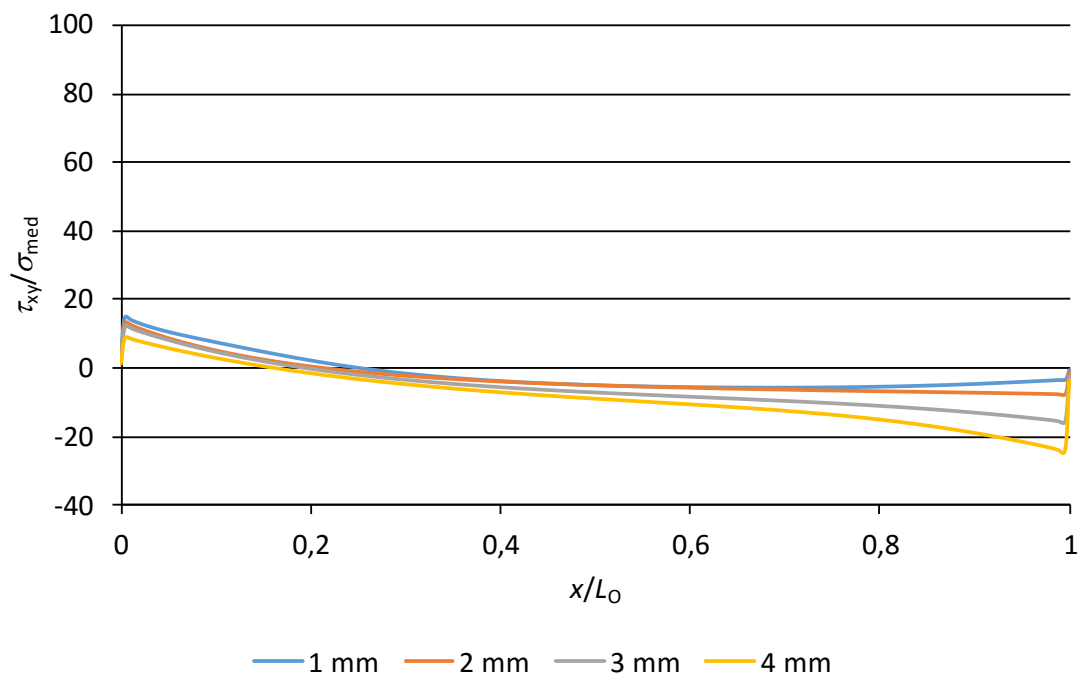


Figura 110 - Tensões τ_{xy} para junta em T sem adesivo de preenchimento (Sikaforce® 7752).

Nas juntas sem adesivo de preenchimento e coladas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015 observou-se que, com o aumento de t_{p2} , se verifica um aumento dos picos em $x/L_0=0$. Este aumento foi maior na transição entre $t_{p2}=1$ e 2 mm. No entanto, os valores para $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm foram praticamente iguais, tendo-se observado uma redução significativa para $t_{p2}=1$ mm. Em relação ao pico na proximidade $x/L_0=1$, verificou-se um aumento gradual dos valores com o aumento de t_{p2} . Comparando estes 2 adesivos, observou-se que com o aumento da flexibilidade do adesivo menores são os picos de tensão τ_{xy} registados.

Em relação à junta colada com o adesivo Sikaforce® 7752 observou-se que, com o aumento dos valores de t_{p2} , se verifica uma diminuição dos valores de pico para $x/L_0=0$ e também um aumento dos respetivos valores para $x/L_0=1$. Com exceção da junta com $t_{p2}=4$ mm, os valores referentes ao primeiro pico de tensão foram superiores aos do segundo pico de tensão. Para este adesivo as tensões τ_{xy} foram muito inferiores às observadas no adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, devido à diferença de rigidez dos adesivos, tal como foi referido anteriormente.

Tal como nas juntas com adesivo de preenchimento, em todos os gráficos apresentados para as tensões τ_{xy} registou-se ao longo de x/L_0 uma inversão do sentido das tensões. Desta vez, esta inversão de sentido ocorreu na proximidade de $x/L_0=0,2$.

3.2.4 Estudo da variável de dano

Este subcapítulo descreve o estudo da variável do dano dos elementos coesivos do adesivo (SDEG). O estudo apresentado tem como objetivo descrever a extensão do dano ao longo do adesivo em diversas fases de carregamento das juntas. Um valor de SDEG=0 indica que o elemento coesivo ainda não sofreu degradação e SDEG=1 indica que o elemento coesivo se encontra em degradação máxima, ou seja, após rotura. Um valor de SDEG entre estes 2 limites significa que o elemento coesivo está em processo de amaciamento. São analisados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Para cada adesivo usado nas juntas são analisadas as 4 geometrias de junta ($t_{p2}=1,2,3$ e 4 mm). O estudo da variável do dano apenas é realizado para as juntas sem adesivo de preenchimento com o sentido de avaliar a propagação do dano e explicar as variações de resistência registadas numericamente e experimentalmente.

3.2.4.1 Araldite® AV138

A Figura 111 representa a variável SDEG na camada de adesivo Araldite® AV138 no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido e para os diferentes valores de t_{p2} , em função de x/L_0 .

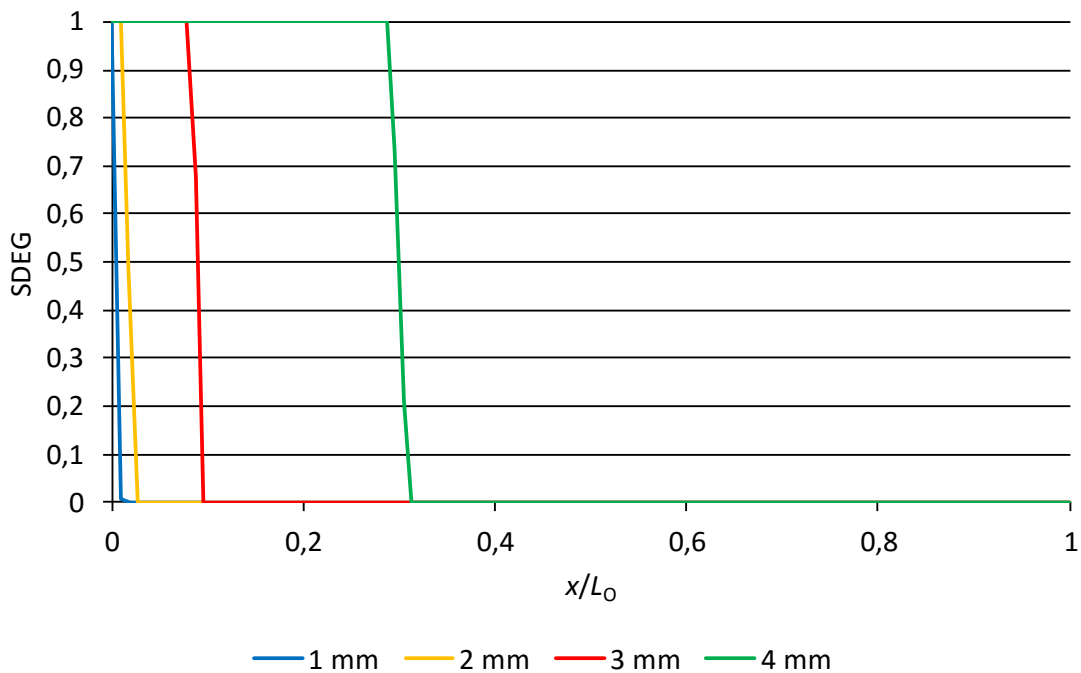


Figura 111 - Variável de dano SDEG para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 no instante de $P_{m\acute{a}x}$ para diferentes valores de t_{p2} .

Através da análise da Figura 111 verifica-se que, com o aumento de t_{p2} , a porção de dano no adesivo quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingida aumenta com t_{p2} . De facto, no instante em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ para todos os valores de t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm), a proporção de adesivo danificado é de 1,8; 2,6; 9,5 e 31,3%, respetivamente. Observa-se que a zona de dano em todos os casos é bastante reduzida, o que está relacionado com as grandes concentrações de tensões σ_y para $x/L_0 \approx 0$ (Figura 102) e também com a fragilidade deste adesivo. Por sua vez, este comportamento deve estar relacionado com uma resistência de junta inferior à obtida com adesivos mais dúcteis. O aumento da quantidade de adesivo danificado com o aumento de t_{p2} está relacionado com a respetiva maior rigidez do aderente de alumínio, o que aumenta a área de adesivo em plastificação na altura da rotura.

A Figura 112 representa a junta colada com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu $P_{m\acute{a}x}$. O valor de δ correspondente foi $\approx 0,48$ mm.

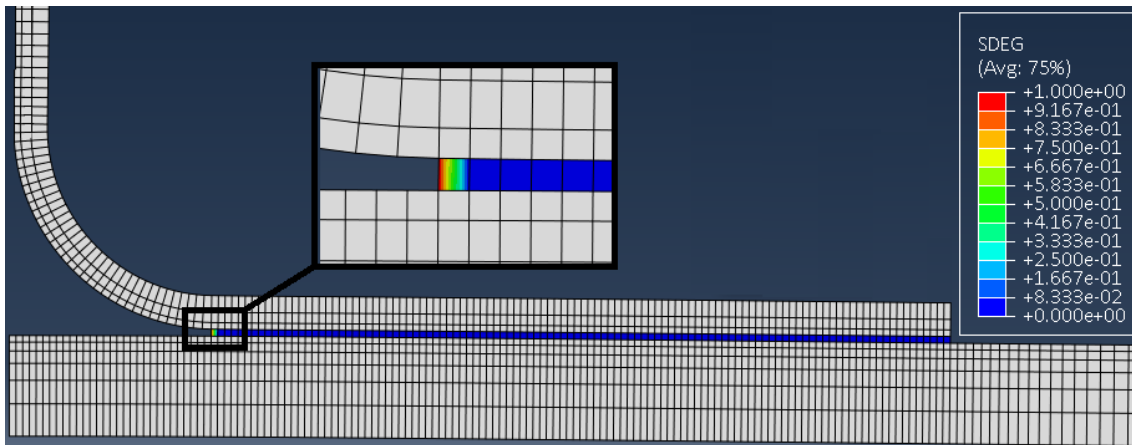


Figura 112 - Processo de rotura da junta colada com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu $P_{máx}$.

Antes de se proceder a uma análise da evolução do dano ao longo de x/L_0 é analisado o comportamento das juntas quando é atingido $SDEG=1$ pela primeira vez em qualquer zona da junta. Através da Figura 113 verifica-se que as 4 juntas se comportaram de maneira idêntica, tendo-se verificado o início de propagação de dano a uma distância muito próxima de $x/L_0=0$, embora com uma extensão de dano crescente com o aumento de t_{p2} . No entanto, em todos os casos, o processo de rotura é bastante abrupto.

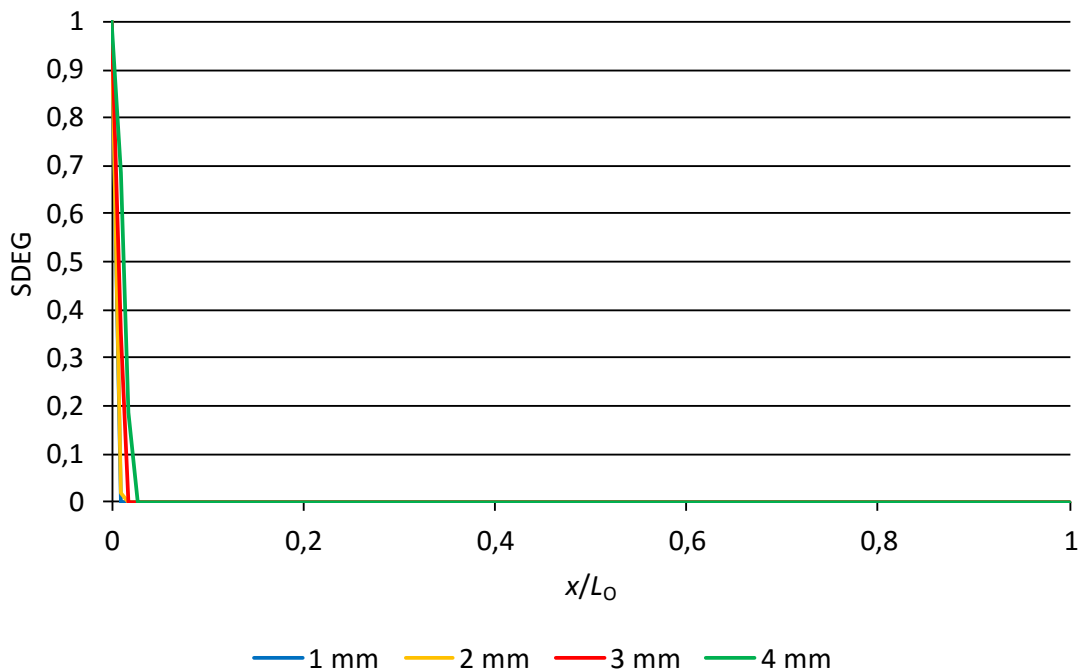


Figura 113 - Variável de dano SDEG para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 quando é atingido $SDEG=1$ pela primeira vez em qualquer zona da junta, para diferentes valores de t_{p2} .

Na Figura 114 está representada a junta colada com adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu a rotura total.

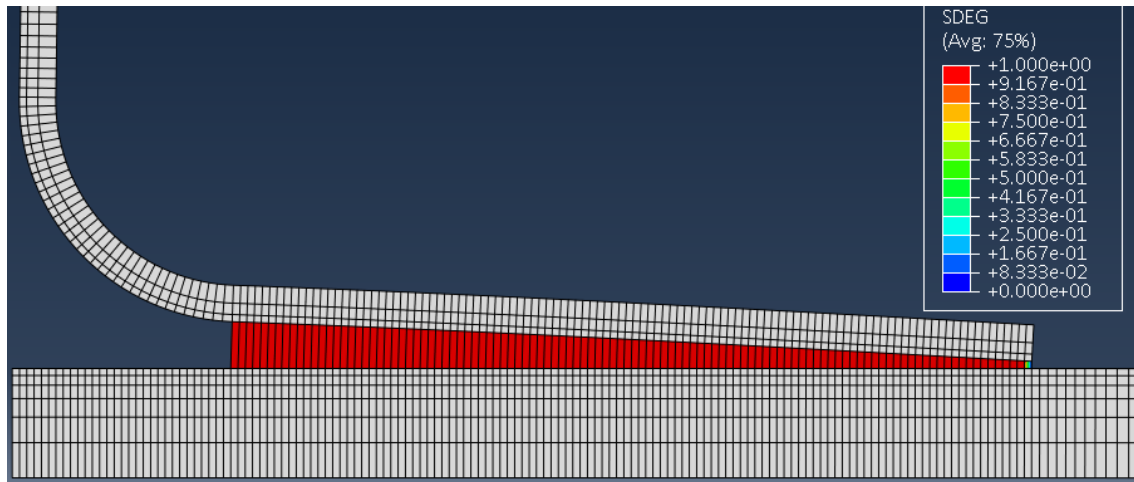


Figura 114 – Rotura total da junta colada com adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.

É visível que a rotura da junta ocorre apenas no adesivo. No entanto, embora reduzida, ocorre deformação plástica no aderente em L. Para ser possível analisar a propagação de dano ao longo de x/L_0 em função do carregamento, da Figura 115 à Figura 118 representa-se a distribuição da variável SDEG em função do valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$ (%) para os 4 valores de t_{p2} das juntas coladas com adesivo Araldite® AV138. A variável δ corresponde ao deslocamento atual e $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ corresponde ao deslocamento no momento em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$.

Pela análise da Figura 115 verifica-se que o dano se propaga de forma gradual à medida que o carregamento é aplicado. A transição de SDEG=0 (ausência de dano) para SDEG=1 (dano total) ocorre numa extensão bastante reduzida, dando assim lugar a uma zona de dano muito localizada. Este comportamento deve-se ao facto do adesivo Araldite® AV138 ser bastante rígido e frágil, o que resulta numa pequena zona de plastificação do adesivo na extremidade da fenda. Dadas as características frágeis do adesivo em causa, a variável de dano progride de forma rápida à medida que o carregamento é aplicado, com a exceção das juntas com $t_{p2}=1$ mm, devido à plastificação do aderente em L. Neste caso da junta com $t_{p2}=1$ mm, a rotura total do adesivo ocorre com um valor de $\delta=1,253$ mm. No caso da junta com $t_{p2}=2$ mm (Figura 116), a evolução do dano ao longo de x/L_0 foi algo distinta da verificada na junta com $t_{p2}=1$ mm (Figura 115). Esta diferença foca-se essencialmente na redução do valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ no instante da rotura de uma junta para a outra, na medida em que a junta com $t_{p2}=2$ mm sofreu uma rotura mais brusca do que com $t_{p2}=1$ mm ($\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}=125,8\%$ comparado com $257,4\%$, e $\delta=0,880$ mm em vez de $\delta=1,253$ mm, para o instante de rotura). A diminuição destes valores está relacionada com a eliminação da deformação plástica do aderente em L.

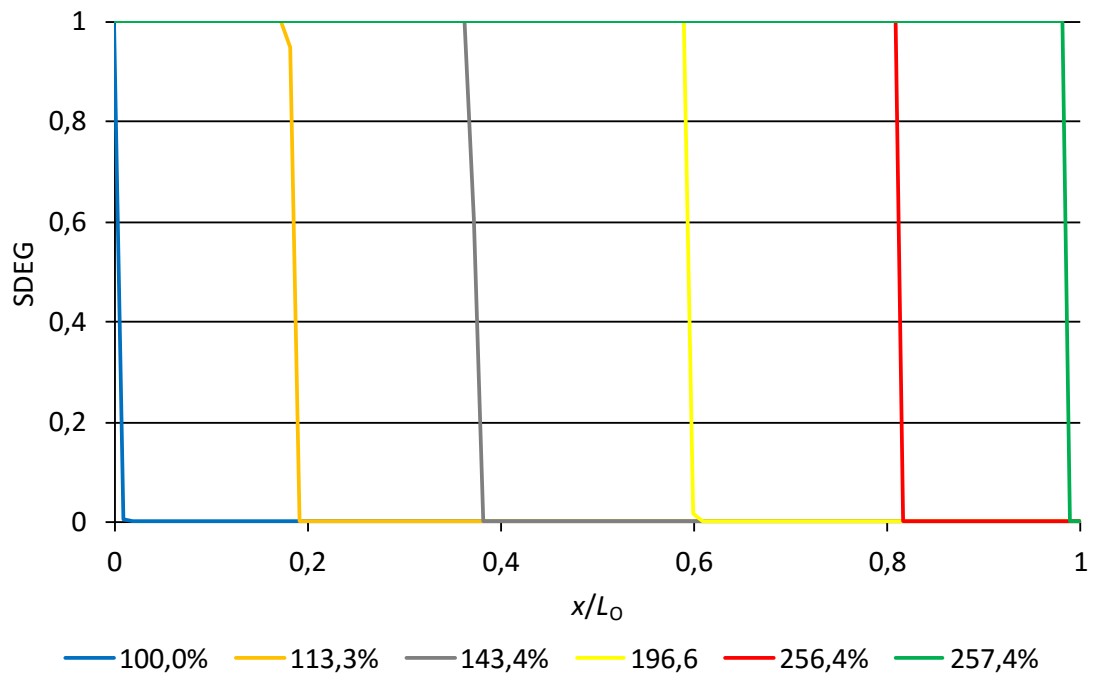


Figura 115 -Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p\text{máx}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e t_{p2}=1 mm.

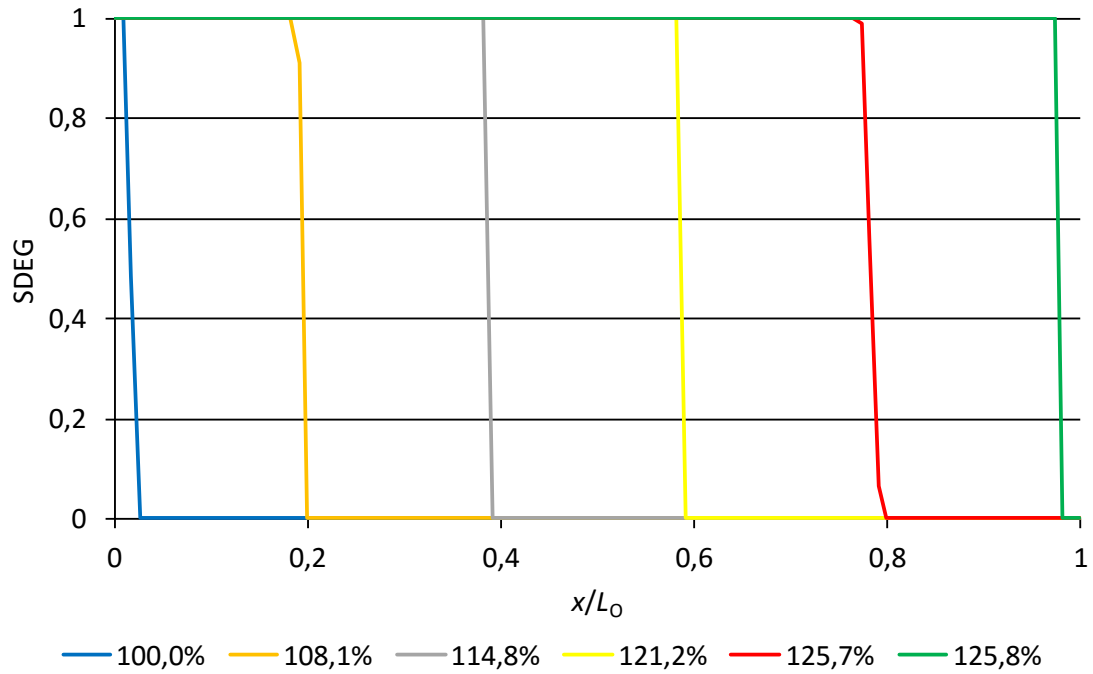


Figura 116 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p\text{máx}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e t_{p2}=2 mm.

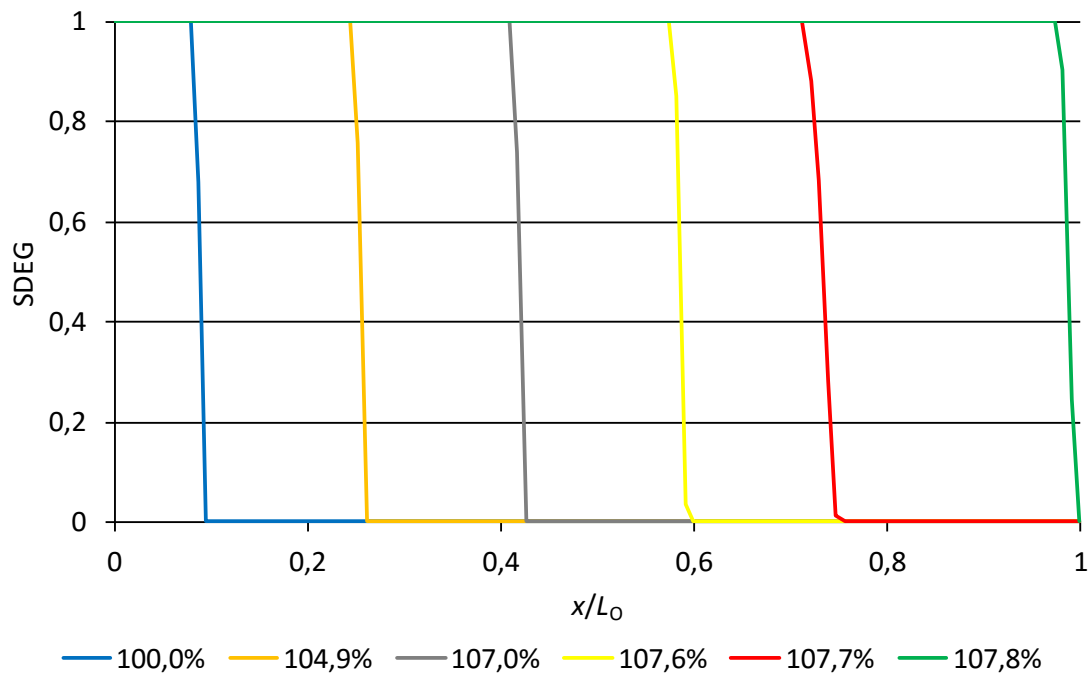


Figura 117 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p\text{máx}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm.

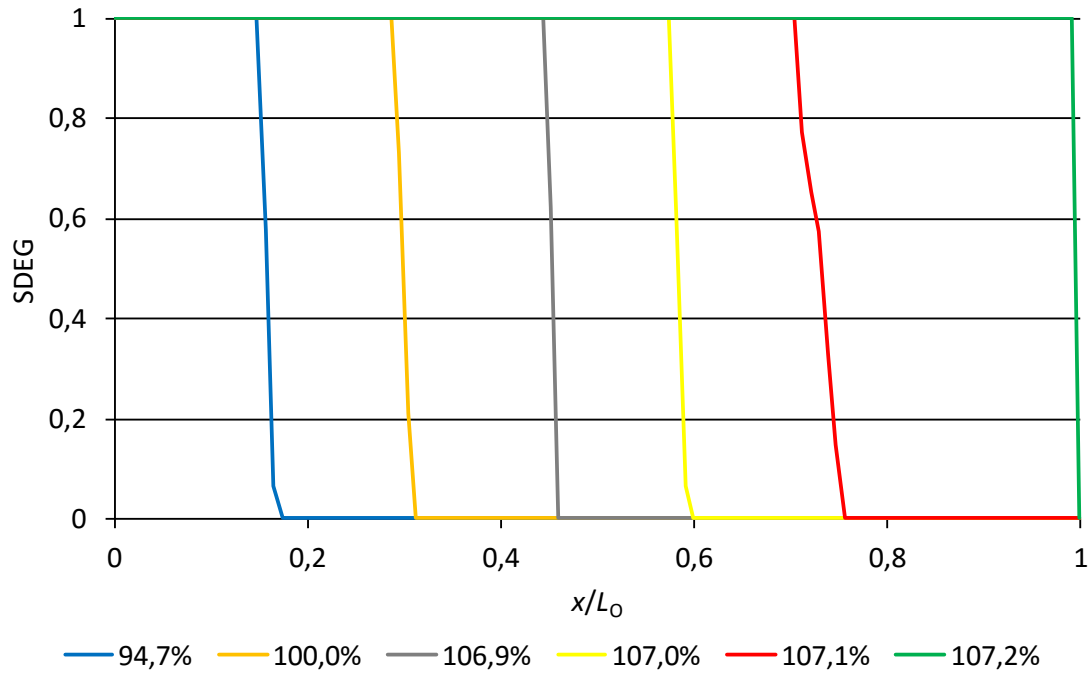


Figura 118 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p\text{máx}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.

Na junta com $t_{p2}=3$ mm (Figura 117) registou-se um valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ menor que na junta com $t_{p2}=2$ mm (107,8%). Da mesma forma, o valor de δ na rotura é de 1,033 mm. Esta diferença de valores foi menor do que a verificada na mudança de $t_{p2}=1$ para 2 mm. A junta com $t_{p2}=4$ mm registou um valor de δ na rotura superior ao da junta com $t_{p2}=2$ e 3 mm (1,252 mm). Este aumento é justificado com uma ligeira plastificação do aderente base devido a um maior valor de $P_{m\acute{a}x}$.

3.2.4.2 Araldite® 2015

A Figura 119 representa a variável SDEG na camada de adesivo Araldite® 2015 no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido e para os diferentes valores de t_{p2} , em função de x/L_0 .

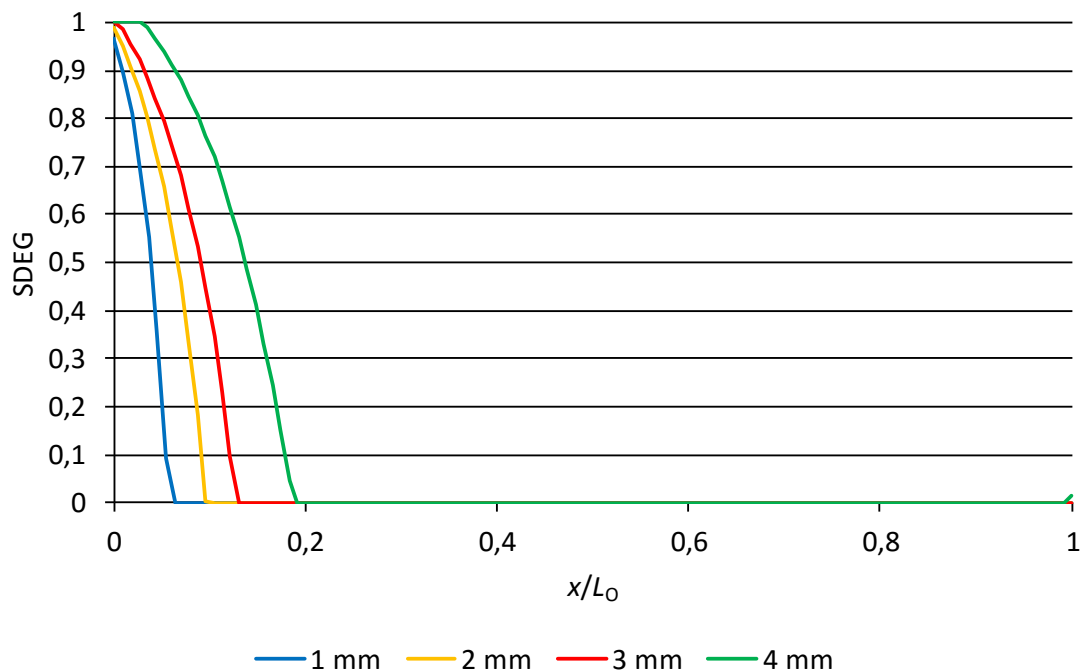


Figura 119 - Variável de dano SDEG para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 no instante de $P_{m\acute{a}x}$, para diferentes valores de t_{p2} .

Pela análise da Figura 119 verifica-se que o aumento de t_{p2} promove um alargamento da região danificada quando é atingido $P_{m\acute{a}x}$, tal como se verificou para o adesivo Araldite® AV138. Neste instante a proporção de adesivo danificado é de 6,3; 9,5; 13,0 e 19,1% para $t_{p2}=1, 2, 3$ e 4 mm, respetivamente. Comparando com as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 verifica-se uma diferença na zona em processo de dano (medido entre SDEG=0 e SDEG=1), na medida em que a zona danificada apresenta uma extensão significativamente superior. Este facto deve-se a 2 aspetos: por um lado, as tensões σ_y apresentam gradientes de tensão inferiores (Figura 103 comparada com a

Figura 102) e, por outro, o adesivo Araldite®2015 tem valores de G_{Ic} e G_{IIc} superiores, o que permite a plastificação da camada de adesivo. Este tipo de comportamento é mais favorável para o tipo de sollicitação em causa, uma vez que a sollicitação de arrancamento concentra tipicamente as tensões numa porção reduzida de sobreposição. Este tipo de comportamento é indicativo de uma área maior que resiste à sollicitação de arrancamento, o que antecipa uma maior resistência de junta. Além disso, na junta com $t_{p2}=4$ mm verifica-se que, no momento em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$, há dano muito reduzido na proximidade de $x/L_0=1$. Na Figura 120 está representada a junta colada com adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu $P_{m\acute{a}x}$.

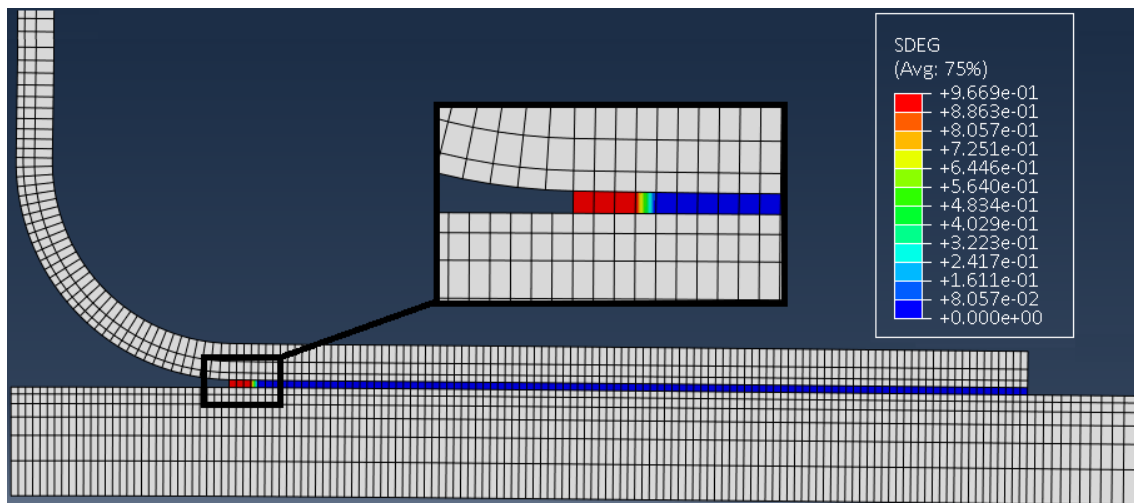


Figura 120 - Processo de rotura da junta colada com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu $P_{m\acute{a}x}$.

Na Figura 121 apresenta-se a variável de dano SDEG para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 quando é atingido $SDEG=1$ pela primeira vez em qualquer zona da junta, para os diferentes valores de t_{p2} . A partir da análise da Figura 121 verifica-se que as 4 juntas se comportaram de maneira idêntica, tendo-se verificado o início de dano entre $x/L_0=0$ e $x/L_0=0,2$, dependendo de t_{p2} . No entanto, é bem visível que o aumento de t_{p2} tem como consequência uma crescente extensão do dano na proximidade de $x/L_0=0$. Tal como verificado na Figura 119, no momento em que é atingido $\delta/\delta_{p\acute{m}a}x=100\%$, a junta com $t_{p2}=4$ mm registou existência de dano ($SDEG=0,01$) próximo de $x/L_0=1$.

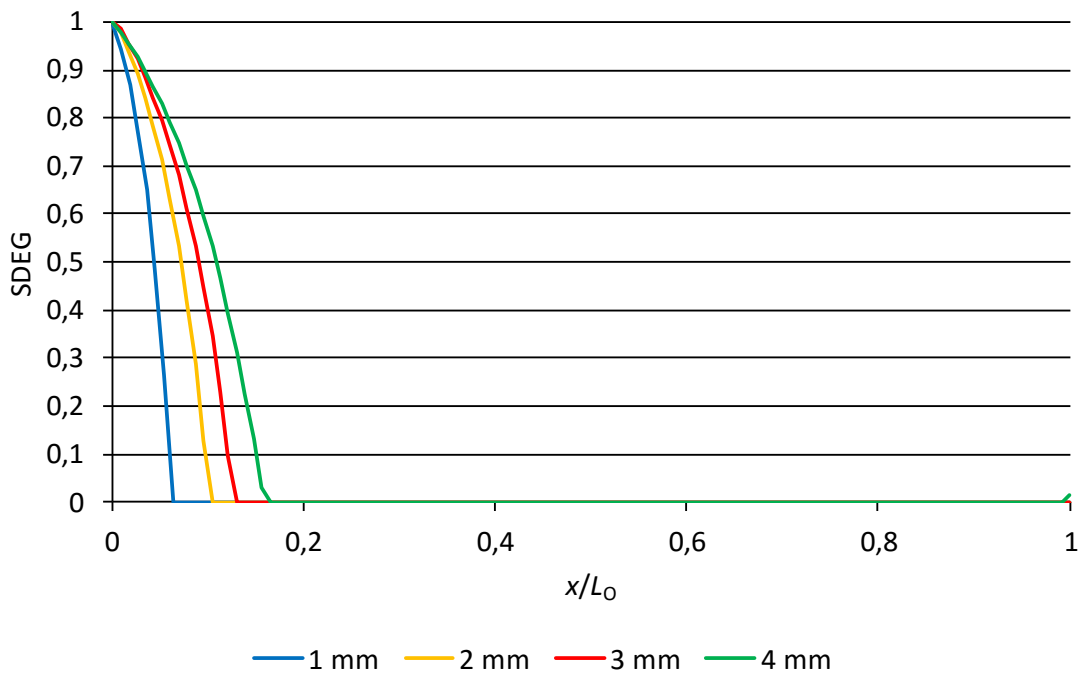


Figura 121 - Variável de dano SDEG para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 quando é atingido SDEG=1 pela primeira vez em qualquer zona da junta, para diferentes valores de t_{p2} .

Na Figura 122 está representada a junta colada com adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu a rotura total.

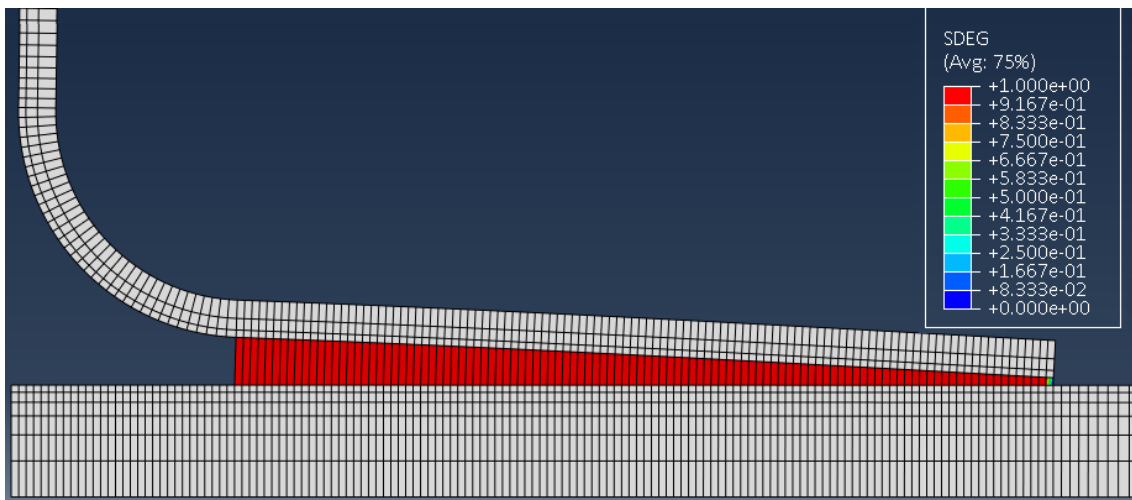


Figura 122 - Rotura total da junta colada com adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm.

Tal como verificado para a junta colada com o adesivo Araldite® AV138, a rotura ocorre apenas no adesivo. Embora pequena, também se verifica deformação plástica no aderente em L, mas superior à verificada na junta colada com adesivo Araldite® AV138.

Da Figura 123 à Figura 126 representa-se a distribuição da variável SDEG em função do valor de $\delta/\delta_{p_{\max}} \times 100$ (%) para os 4 valores de t_{p2} das juntas coladas com adesivo Araldite® 2015, no sentido de analisar o comportamento de propagação de dano ao longo de x/L_0 . Tal como para o caso da junta colada com o adesivo Araldite® AV138, analisando a Figura 123 verifica-se que o dano se propaga de forma gradual à medida que o carregamento é aplicado. A transição de SDEG=0 (ausência de dano) para SDEG=1 (dano total) ocorre numa extensão superior à observada para o Araldite® AV138, devido à maior ductilidade do adesivo Araldite® 2015.

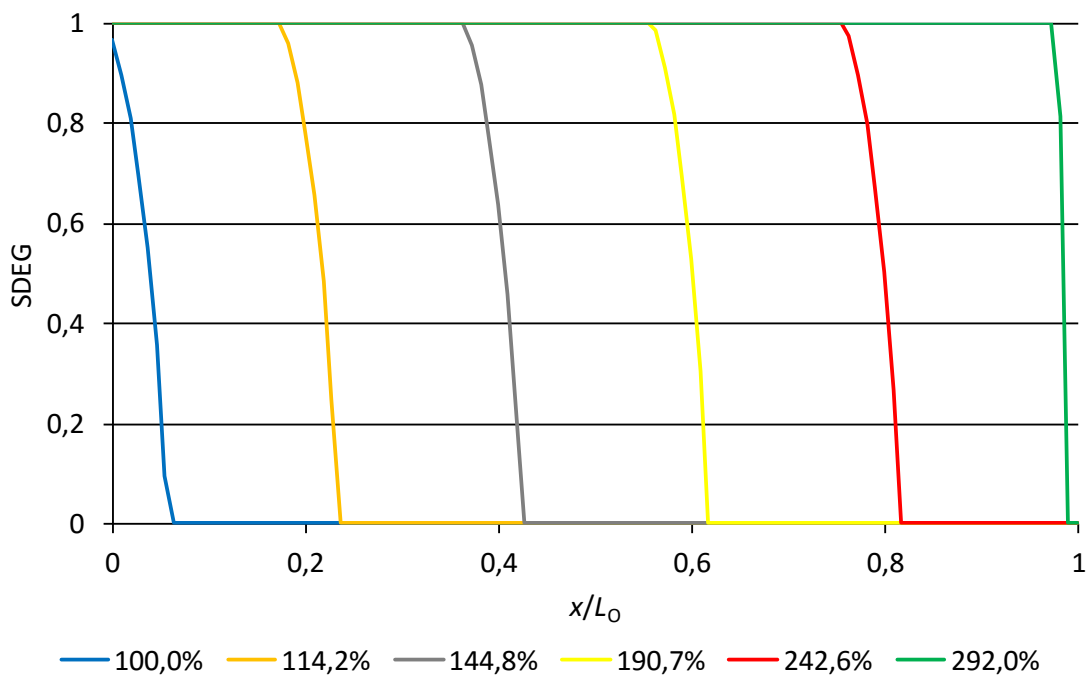


Figura 123 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p_{\max}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm.

Com alguma semelhança às juntas coladas com adesivo Araldite® AV138, o aumento de t_{p2} tem como consequência uma diminuição gradual do deslocamento total desde o início até à rotura total do adesivo, à exceção da junta com $t_{p2}=4$ mm, para a qual o valor de δ volta a aumentar. No entanto, os valores de δ na rotura para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 foram superiores aos das juntas coladas com o Araldite® AV138, devido à flexibilidade deste adesivo (registaram-se valores δ na rotura de 2,500; 1,919; 1,789 e 2,456 mm para valores crescentes de t_{p2} entre 1 e 4 mm). Desta forma, verifica-se que quanto maior a flexibilidade do adesivo maiores os valores de δ na rotura.

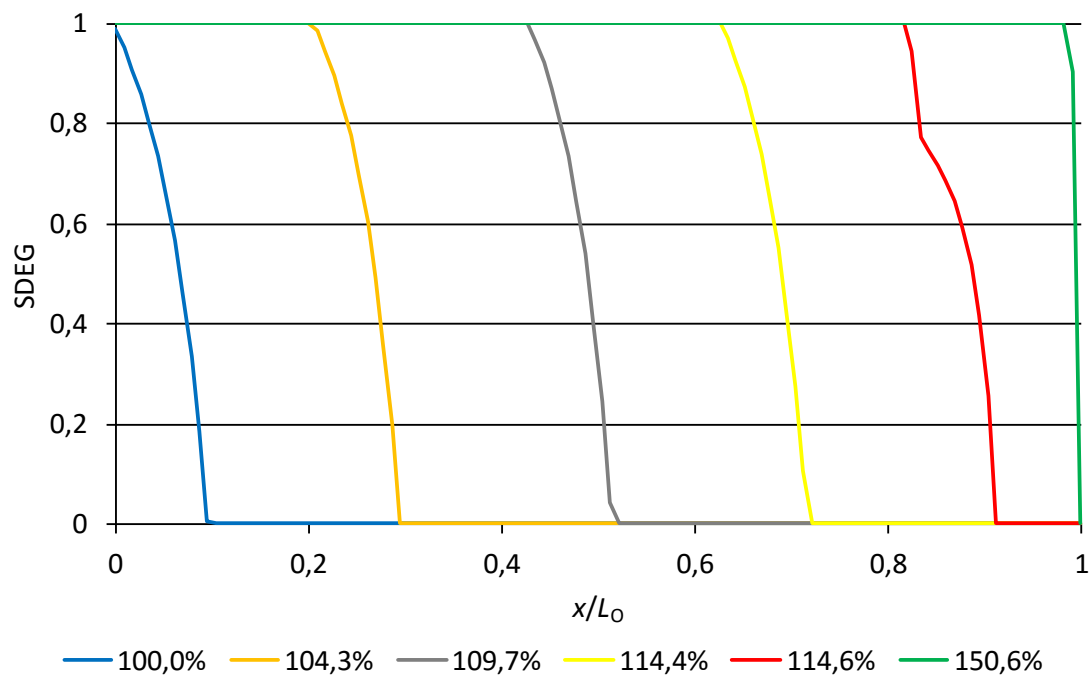


Figura 124 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p_{m\acute{a}x}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=2$ mm.

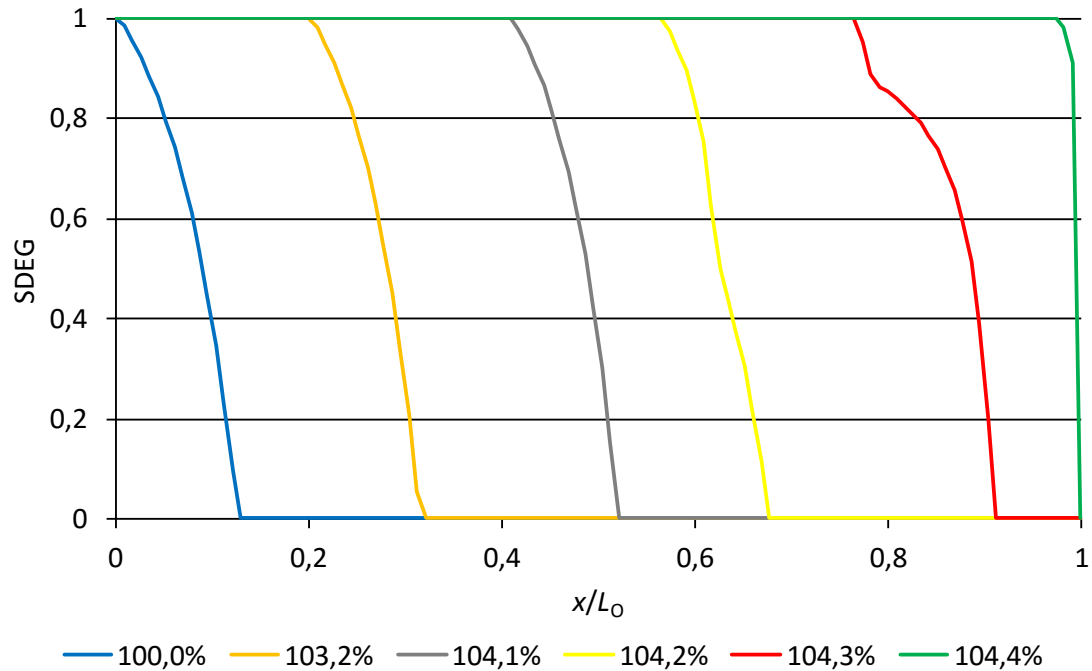


Figura 125 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p_{m\acute{a}x}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=3$ mm.

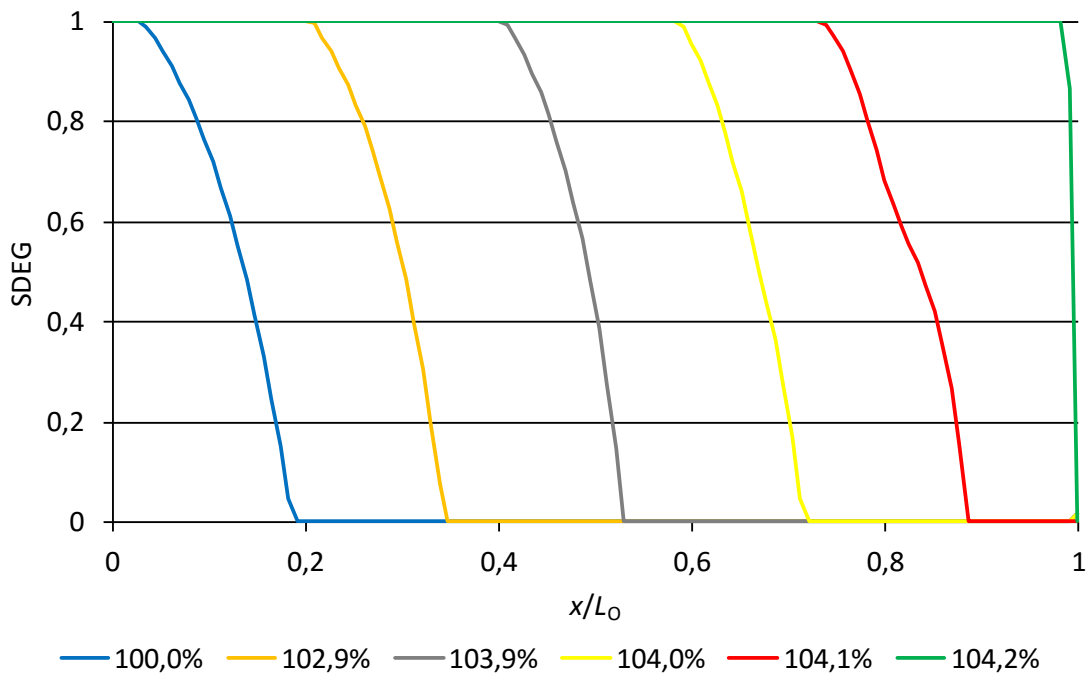


Figura 126 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{P2}=4$ mm.

A elevada flexibilidade do adesivo Araldite® 2015 permite um aumento de extensão da zona de rotura. Por outro lado, o aumento de t_{P2} tem como consequência uma diminuição de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ no momento em que se atinge rotura (292,0; 150,6; 104,4 e 104,2% para $t_{P2}=1, 2, 3$ e 4 mm, respetivamente). A diminuição de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ no momento em que se atinge rotura nas juntas com $t_{P2}=3$ e 4 mm é inferior à verificada nas juntas com $t_{P2}=1$ e 2 mm. Tal como explicado para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, o valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ na rotura para $t_{P2}=1$ mm é superior a 2 mm devido à existência de plastificação do aderente em L. Em relação às juntas com $t_{P2}=3$ e 4 mm, a diferença de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ na rotura não foi tão elevada. No entanto, o aumento do valor de δ na rotura para a junta com $t_{P2}=4$ mm deve-se à ligeira plastificação do aderente base, que não ocorreu apenas para este caso de t_{P2} . Todos estes fatores descritos indicam claramente que o adesivo Araldite® 2015 se trata de um adesivo de maior ductilidade que o Araldite® AV138.

3.2.4.3 Sikaforce® 7752

A Figura 127 representa a variável SDEG na camada de adesivo Sikaforce® 7752 no instante em que $P_{m\acute{a}x}$ é atingido e para os diferentes valores de t_{P2} , em função de x/L_0 . Verifica-se que, com o aumento dos valores de t_{P2} , a zona danificada correspondente a

$P_{m\acute{a}x}$ apresenta uma extens\~ao crescente. Al\~em disso, vari\~avel SDEG para todos os valores de t_{p2} n\~ao atinge SDEG=1, ou seja, ainda n\~ao se atingiu a rotura em nenhum ponto do adesivo no momento em que se atingiu $P_{m\acute{a}x}$. Neste instante, para todos os valores de t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm), a propor\~ao de adesivo danificado \~e de 20,9; 33,9; 39,1 e 40,0%, respetivamente. Comparando com os resultados obtidos em rela\~ao ao adesivo Araldite[®] AV138 e Araldite[®] 2015, nota-se uma grande diferen\~ca na zona de dano (entre SDEG=0 e SDEG=1). Esta diferen\~ca foca-se numa extens\~ao superior da zona de dano, que \~e tanto maior quanto maior a ductilidade do adesivo. Dos 3 adesivos, o adesivo Sikaforce[®] 7752 \~e o mais flex\~ivel e, por outro lado, tamb\~em tem valores de G_{Ic} e G_{IIc} superiores aos do adesivo Araldite[®] 2015 e bastante superiores aos do adesivo Araldite[®] AV138. Desta forma, as curvas de dano deste adesivo apresentam uma varia\~ao mais suave ao longo de x/L_0 . Este tipo de comportamento \~e caracter\~istico de uma \~area ainda maior em rela\~ao ao adesivo Araldite[®] 2015 que resiste \~a sollicita\~ao de arrancamento. Isto permite antecipar uma maior resist\~encia de junta. Nas juntas coladas com o adesivo Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=4$ mm observou-se a exist\~encia de dano tamb\~em na proximidade de $x/L_0=1$, embora o valor m\~aximo de SDEG s\~o tenha atingido 0,520. Este comportamento est\~a relacionado com o aumento de rigidez do aderente em L para valores mais elevados de t_{p2} , o que por sua vez se traduz em picos maiores de tens\~ao σ_y na proximidade de $x/L_0=1$ e conseq\~uentemente na exist\~encia de dano nesta zona. Na Figura 128 est\~a representada a junta com adesivo Sikaforce[®] 7752 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu $P_{m\acute{a}x}$.

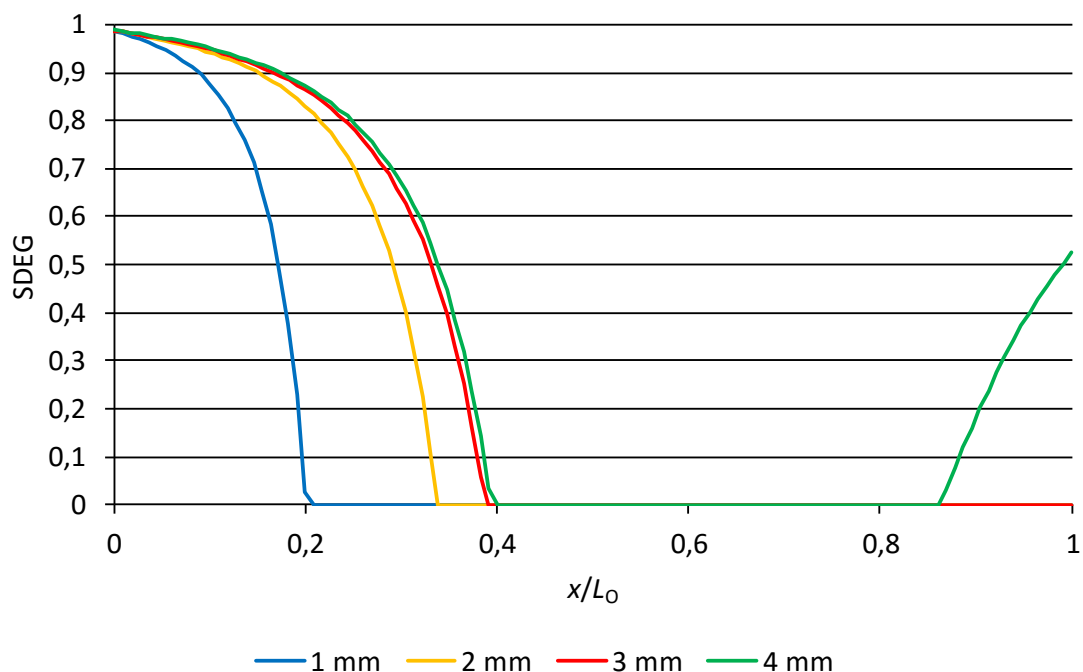


Figura 127 - Variável de dano SDEG para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 no instante de $P_{m\acute{a}x}$ para diferentes valores de t_{p2} .

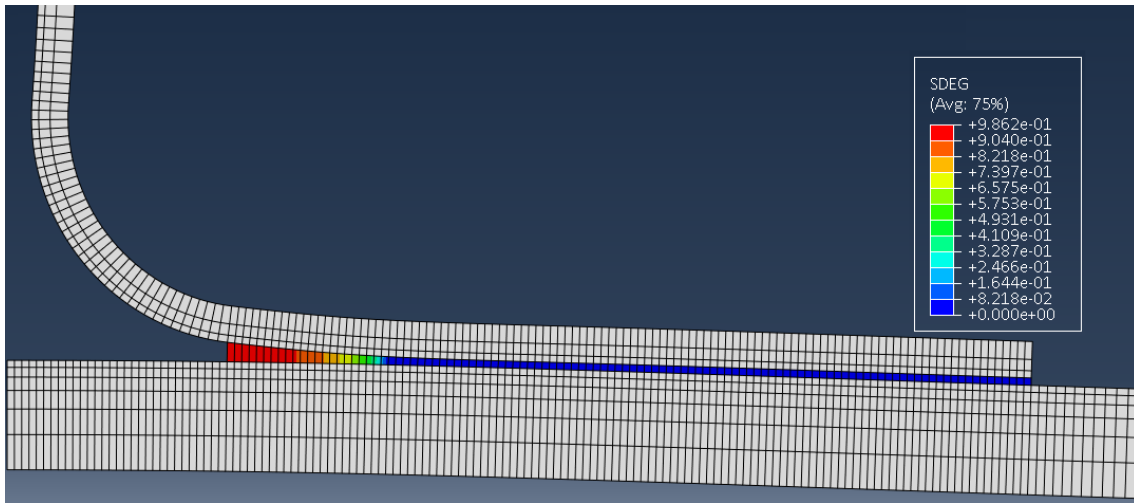


Figura 128 - Processo de rotura da junta colada com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu $P_{m\acute{a}x}$.

Na Figura 129 apresenta-se comportamento das juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 quando é atingido SDEG=1 em qualquer ponto do adesivo, para todos os valores de t_{p2} em estudo.

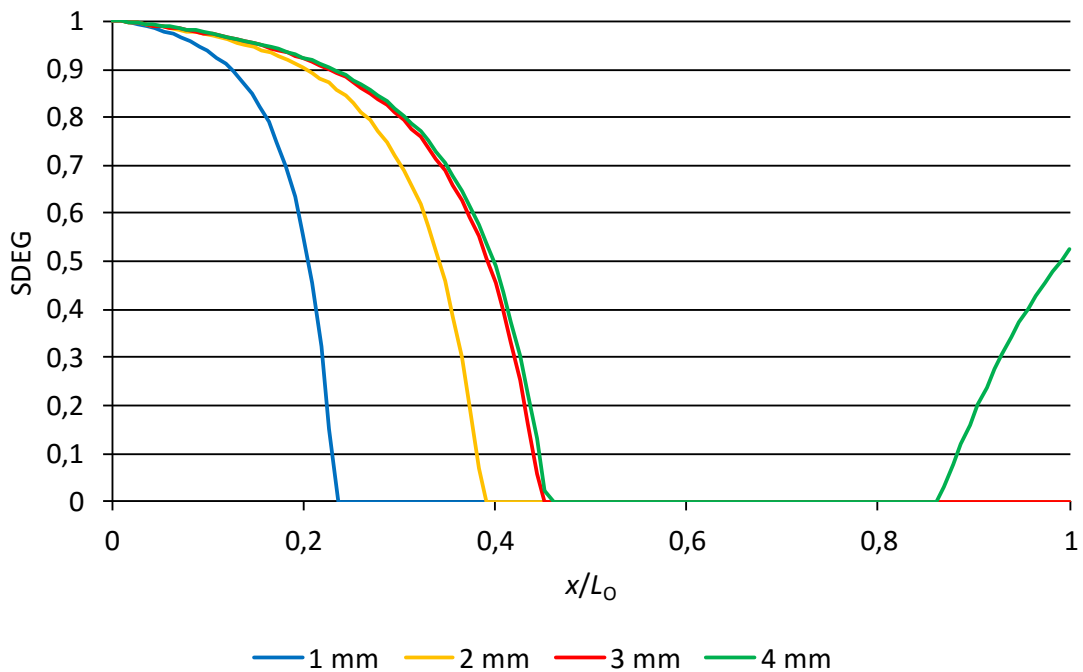


Figura 129 - Variável de dano SDEG para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 quando é atingido SDEG=1 pela primeira vez em qualquer zona da junta, para diferentes valores de t_{p2} .

Verifica-se que as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 se comportam de maneira distinta em função de t_{p2} . À medida que o valor de t_{p2} aumenta, as curvas de dano (Figura 129) estendem-se cada vez mais para a zona central da junta. Este comportamento demonstra que valores de t_{p2} mais elevados são mais favoráveis para a resistência da junta na medida em que a zona de processo estende-se por uma maior área de adesivo. Comparando com as curvas de dano obtidas para $P_{m\acute{a}x}$ (Figura 127) observa-se que, na junta com $t_{p2}=4$ mm, também se verifica a existência de 2 zonas com dano ao longo de x/L_0 , nomeadamente nas 2 extremidades da ligação (Figura 129). Além disso, observou-se um pequeno aumento dos valores de x/L_0 para a condição da Figura 129 (início de SDEG=1) relativamente à da Figura 127 ($P_{m\acute{a}x}$). Em geral, a diferença entre as curvas apresentadas na Figura 127 e Figura 129 é que as curvas da Figura 129 apresentam uma pequena secção na proximidade de $x/L_0=0$, na qual o valor de SDEG=1.

Na Figura 130 está representada a junta colada com adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm no momento em que se atingiu a rotura total.

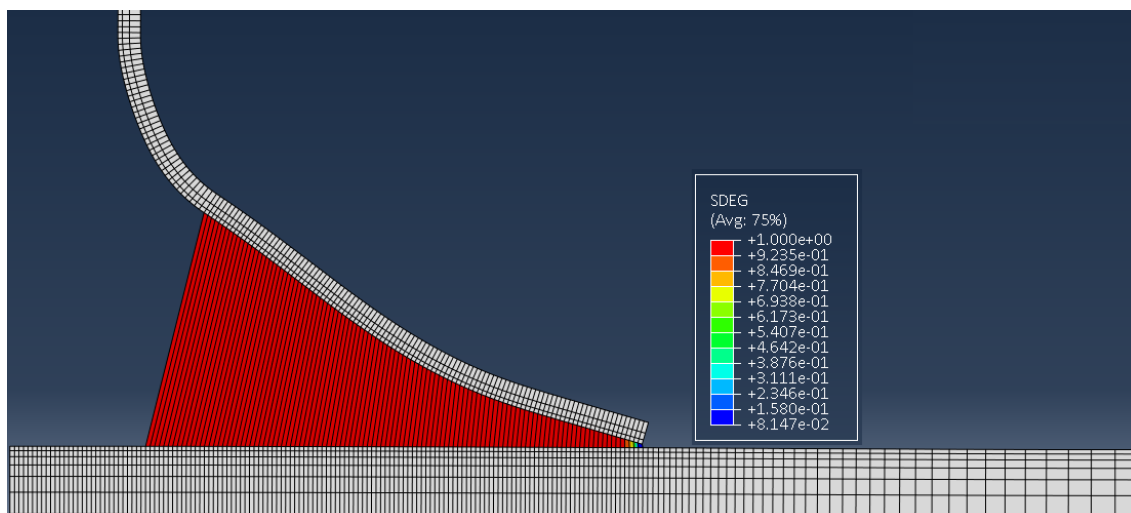


Figura 130 - Rotura total da junta colada com adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm.

É visível que a rotura da junta ocorre pelo adesivo. Para o adesivo Sikaforce® 7752 ocorreu uma grande deformação plástica no aderente em L.

Da Figura 131 à Figura 134 representa-se a distribuição da variável SDEG em função do valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$ (%) para os 4 valores de t_{p2} das juntas coladas com adesivo Sikaforce® 7752, no sentido de analisar o comportamento de propagação de dano ao longo de x/L_0 .

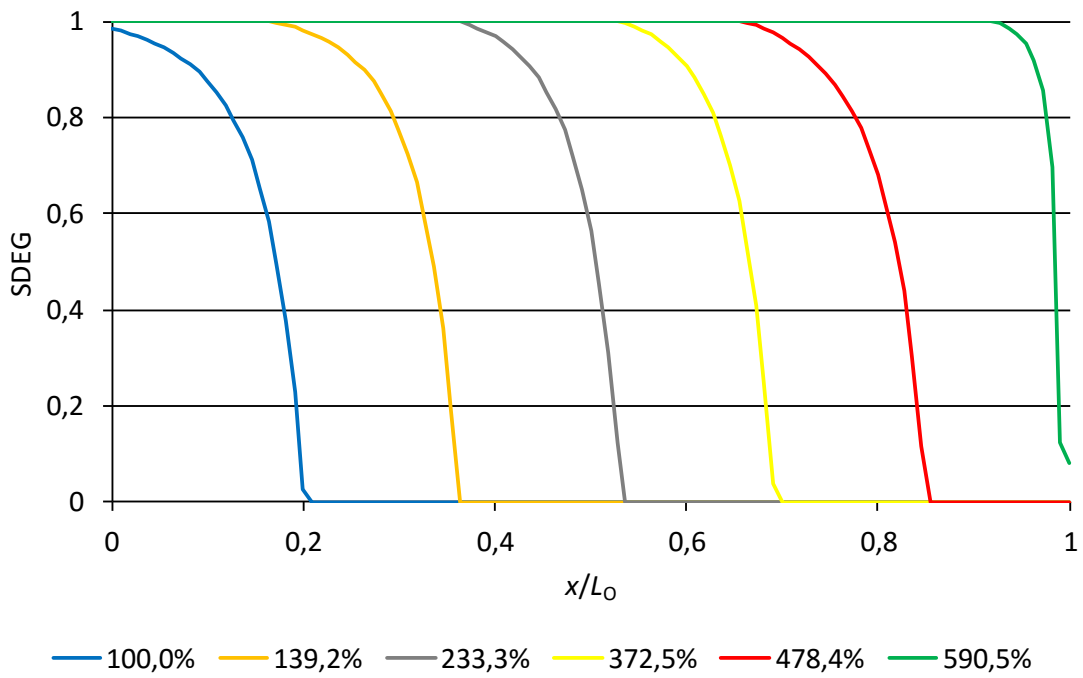


Figura 131 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p\text{máx}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm.

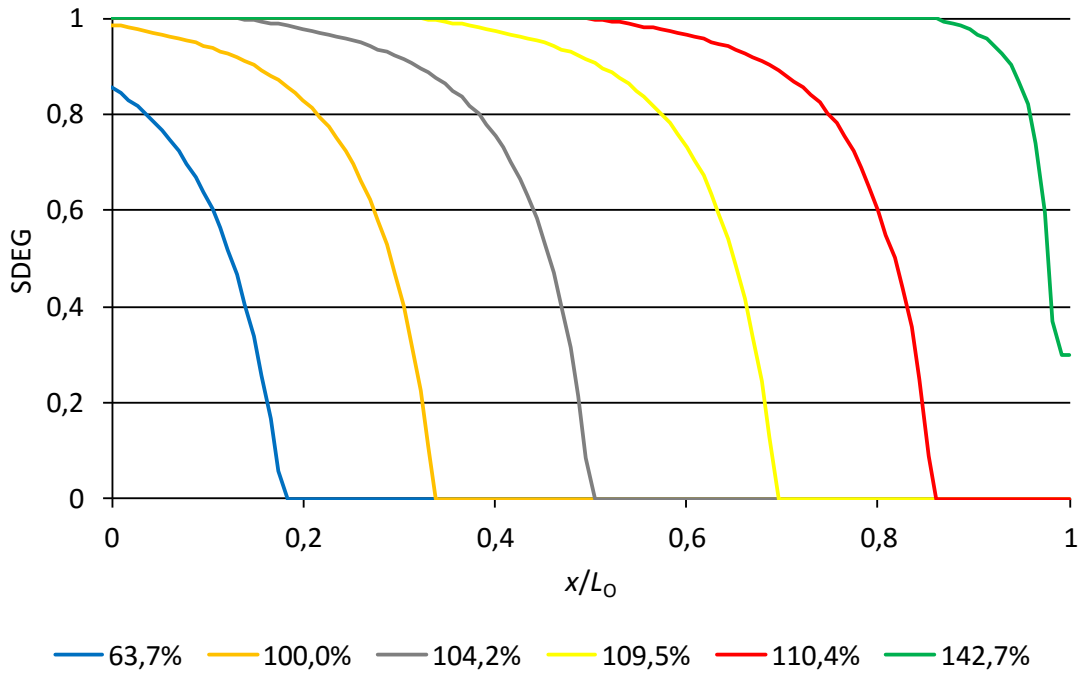


Figura 132 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p\text{máx}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=2$ mm.

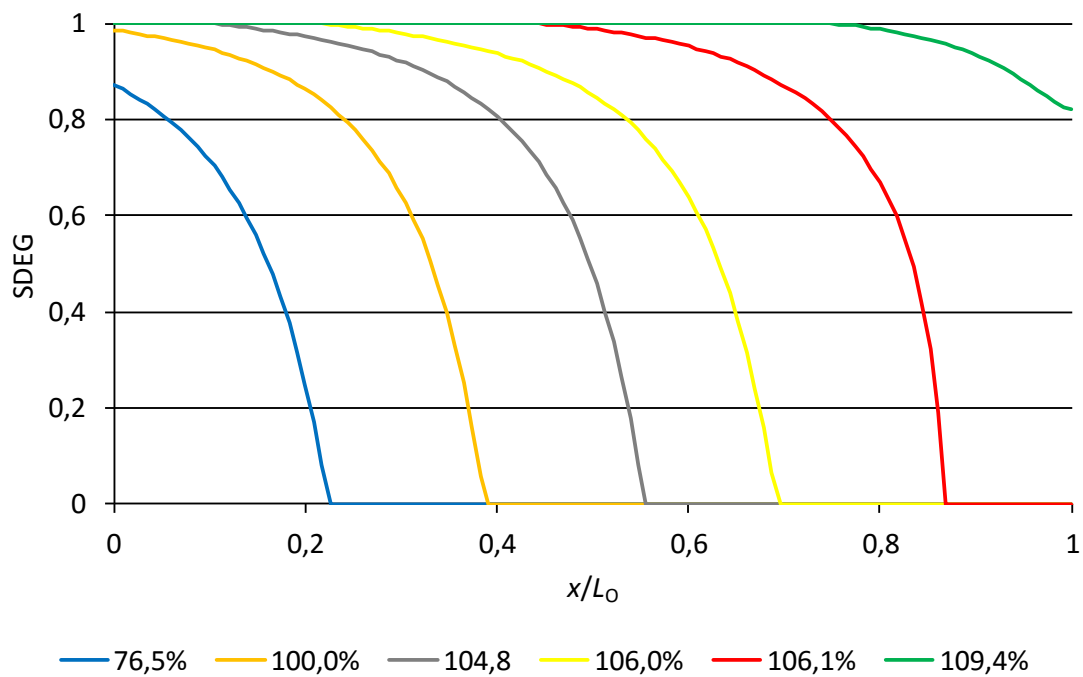


Figura 133 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p_{m\acute{a}x}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=3$ mm.

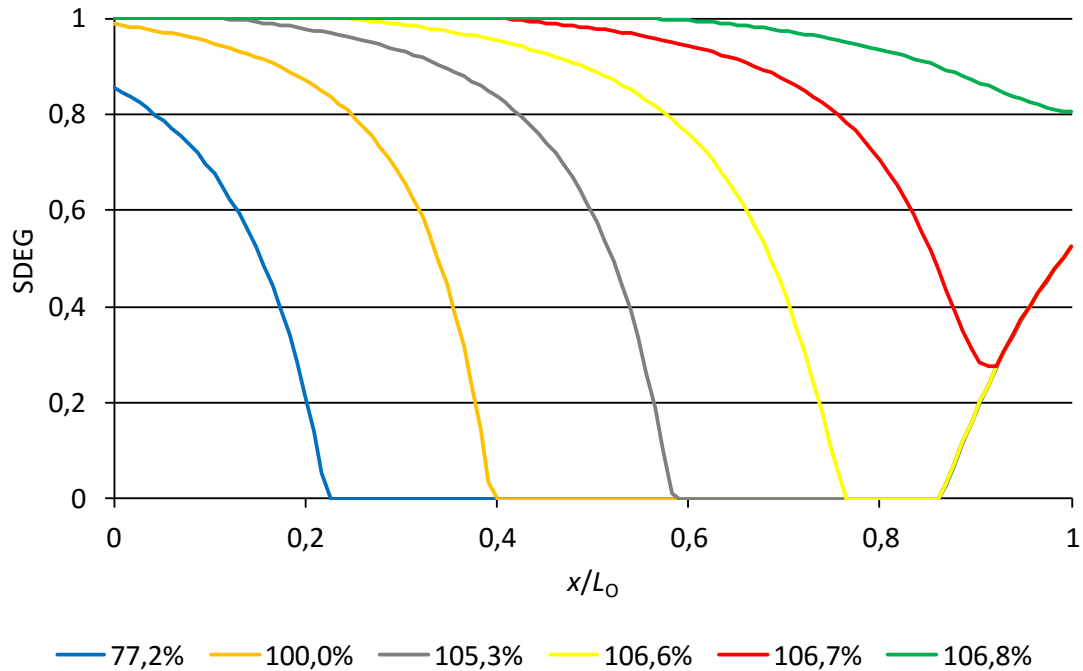


Figura 134 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p_{m\acute{a}x}}$ para as juntas adesivas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=4$ mm.

Analisando a evolução de SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ ao longo de x/L_0 para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 verifica-se que o comportamento das curvas de dano é muito diferente do comportamento verificado nas juntas coladas com Araldite® AV138 e Araldite® 2015. De facto, nas juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 verifica-se que o dano se propaga de uma forma mais suave à medida que o carregamento é aplicado. A transição de SDEG=0 para SDEG=1 ocorre numa extensão mais elevada para todos os valores de t_{P2} . Desta forma, a localização do dano ao longo de x/L_0 deixa de ser tão precisa. Na Figura 134 observa-se que mesmo para valores de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x} \times 100 (\%) = 61,6$ já se verifica uma região danificada para $x/L_0 > 0,9$. Isto demonstra que, para a juntas com $t_{P2} = 4$ mm, o adesivo além de sofrer rotura em $x/L_0 = 0$ também apresenta sinais de poder vir a sofrer rotura na outra extremidade do adesivo ($x/L_0 = 1$). Este comportamento pode ser justificado pelo aumento das tensões σ_y nesta zona (Figura 104). Os valores de δ na rotura para este adesivo foram de 12,046; 4,791; 4,541 e 4,945 mm para valores de t_{P2} de 1, 2, 3 e 4 mm, respetivamente, o que mostra que, quanto maior a flexibilidade do adesivo, maiores os valores de δ na rotura para todos os valores de t_{P2} . De outra forma, tal como para o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, verificou-se um aumento de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ no momento em que se atinge rotura com o aumento de t_{P2} (590,5; 142,7; 109,4 e 106,8% para $t_{P2} = 1, 2, 3$ e 4 mm, respetivamente). Estes comportamentos devem-se à grande plastificação do aderente em L para $t_{P2} = 1$ mm e à ligeira plastificação do aderente base para $t_{P2} = 4$ mm. Dos 3 adesivos em estudo, o Sikaforce® 7752 é o que apresenta maior flexibilidade e ductilidade, o que é ideal para quando se pretende que a rotura mais faseada.

3.2.5 Previsão do comportamento

Neste subcapítulo apresenta-se um estudo com o objetivo de avaliar a capacidade dos MDC em prever a resistência das juntas adesivas estudadas, bem como explicar de forma detalhada os resultados obtidos para os diversos tipos de junta. Apresentam-se inicialmente as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, seguindo-se a resistência numérica das juntas com e sem adesivo de preenchimento, com t_{P2} (1, 2, 3 e 4 mm) e os 3 adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752). Finalmente, é efetuada uma comparação dos valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e numéricos por MDC.

3.2.5.1 Curvas $P-\delta$

Da Figura 135 à Figura 138 estão representadas as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 para $t_{P2} = 1, 2, 3$ e 4 mm. As curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 apresentam um comportamento semelhante durante o regime elástico. No entanto

verificaram-se algumas discrepâncias no que toca à evolução dos valores de P após se atingir $P_{máx}$. A partir da análise das juntas com $t_{p2}=1$ mm (Figura 135), verifica-se que as curvas $P-\delta$ das várias juntas experimentais apresentam uma correlação aceitável com a curva $P-\delta$ numérica no que concerne ao valor de $P_{máx}$ e respetivo deslocamento. Em relação ao deslocamento de rotura, este foi ligeiramente superior para a curva numérica. Em relação à junta com $t_{p2}=2$ mm (Figura 136), nota-se que as curvas $P-\delta$ das várias juntas experimentais apresentam alguma discrepância ao longo do processo de rotura. Os valores de P ao longo da rotura também apresentaram um comportamento ligeiramente diferente entre as curvas experimentais e numérica. No entanto, os deslocamentos correspondentes a $P_{máx}$ estão bastante próximos.

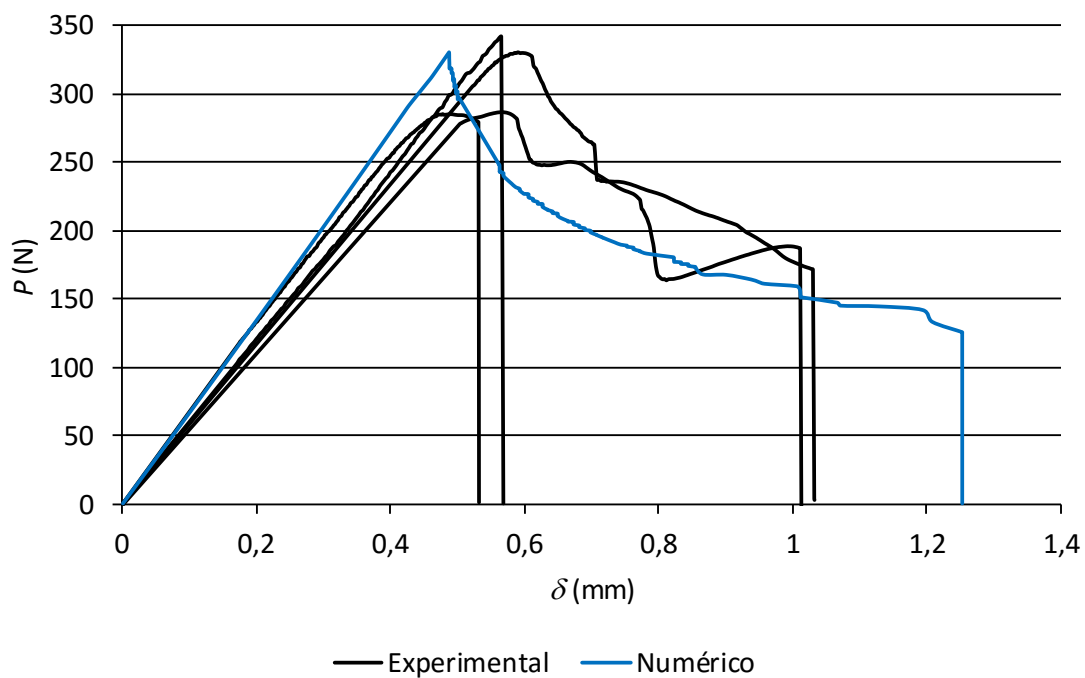


Figura 135 - Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.

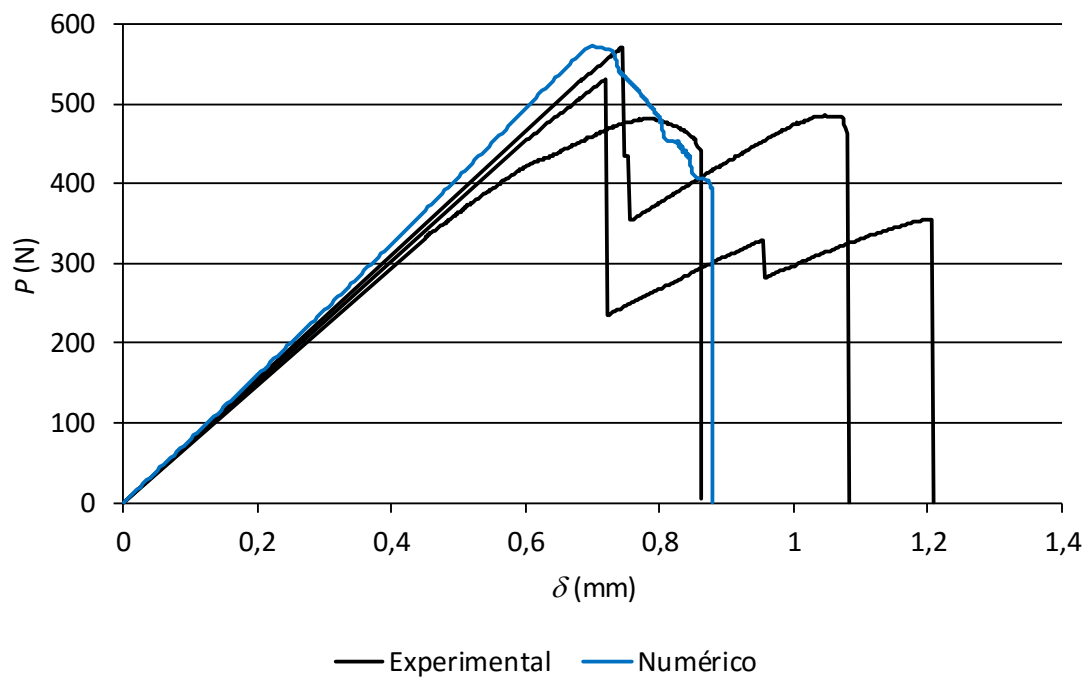


Figura 136 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm.

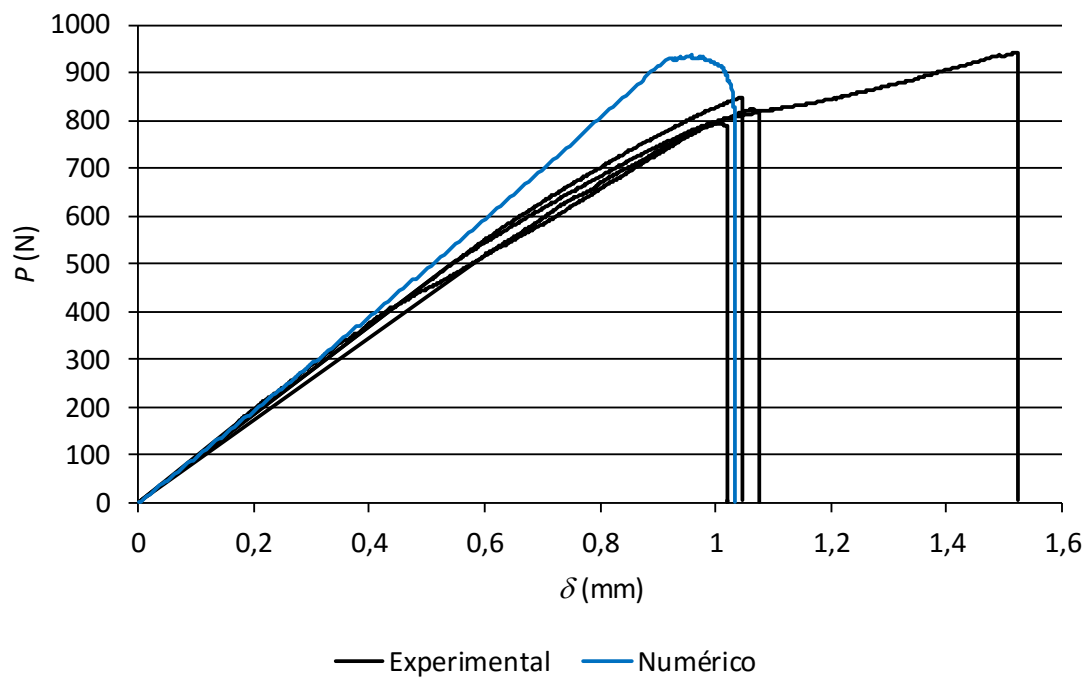


Figura 137 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm.

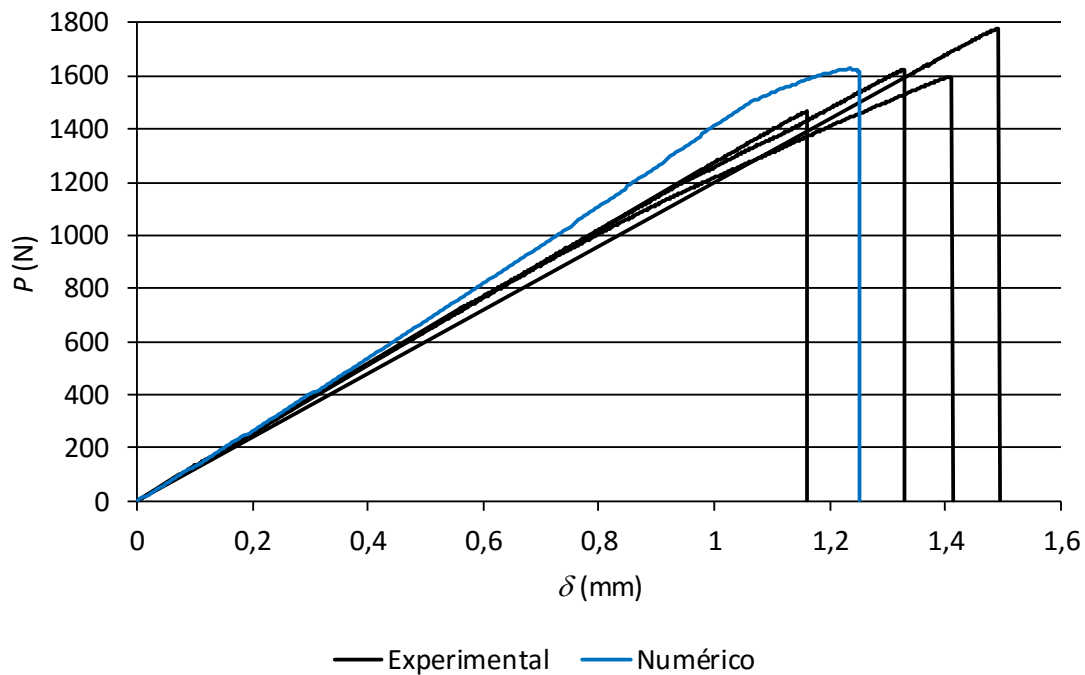


Figura 138 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.

Analisando as juntas com $t_{p2}=3$ e 4 mm (Figura 137 e Figura 138, respetivamente) verifica-se uma proximidade aceitável das várias curvas P - δ experimentais com a curva P - δ numérica. Na junta com $t_{p2}=3$ mm uma das curvas experimentais obteve um deslocamento de rotura muito superior às restantes juntas. No entanto, é visível que até ao ponto de $P_{m\acute{a}x}$ a fase elástica não apresenta um comportamento linear. Este comportamento é típico da existência de escorregamento nas garras da máquina de ensaios. Por outro lado, uma das curvas P - δ experimentais das juntas com $t_{p2}=4$ mm atingiu um valor de $P_{m\acute{a}x}$ superior à junta numérica. Isto pode acontecer quando a preparação das juntas para ensaio não é a mais correta. Por exemplo, a existência de um filete de adesivo entre a colagem dos aderentes pode elevar o valor de $P_{m\acute{a}x}$. Em geral, para todos os valores de t_{p2} as juntas experimentais obtiveram um comportamento similar e aceitável, em comparação com as várias juntas numéricas.

Da Figura 139 à Figura 142 estão representadas as curvas P - δ experimentais e numéricas das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 para $t_{p2}=1, 2, 3$ e 4 mm.

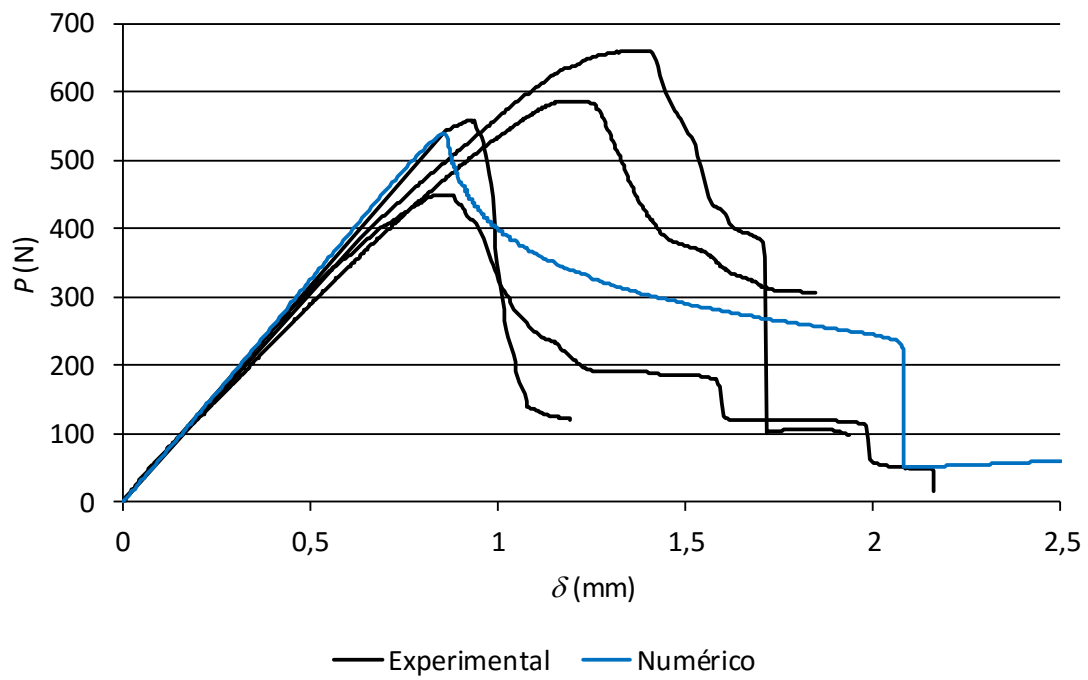


Figura 139 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm.

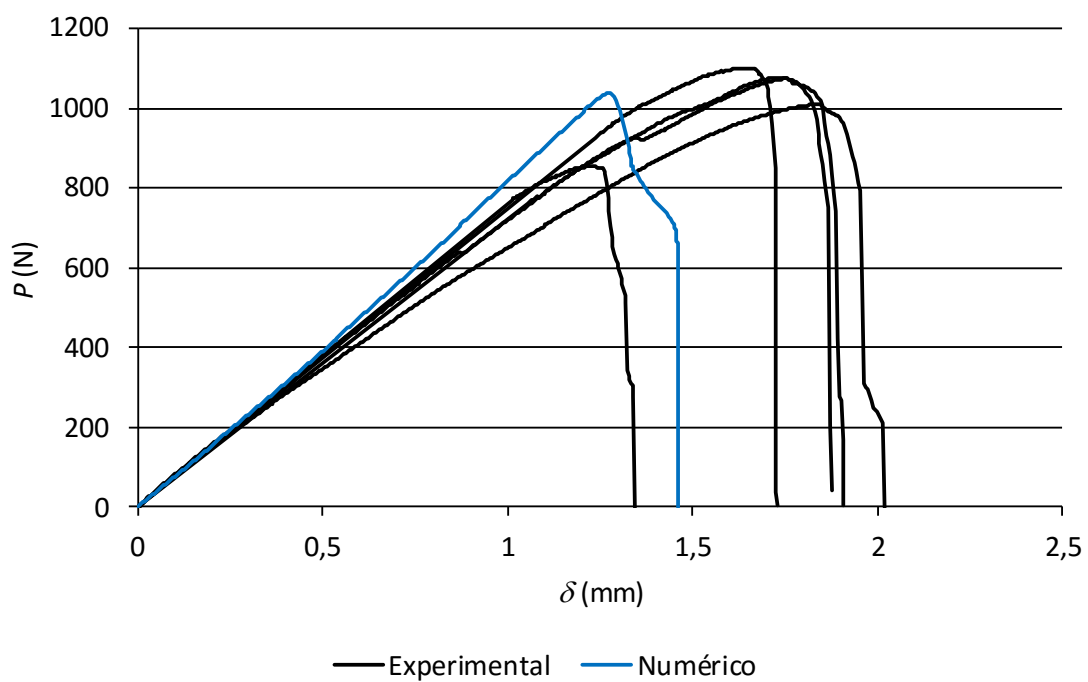


Figura 140 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=2$ mm.

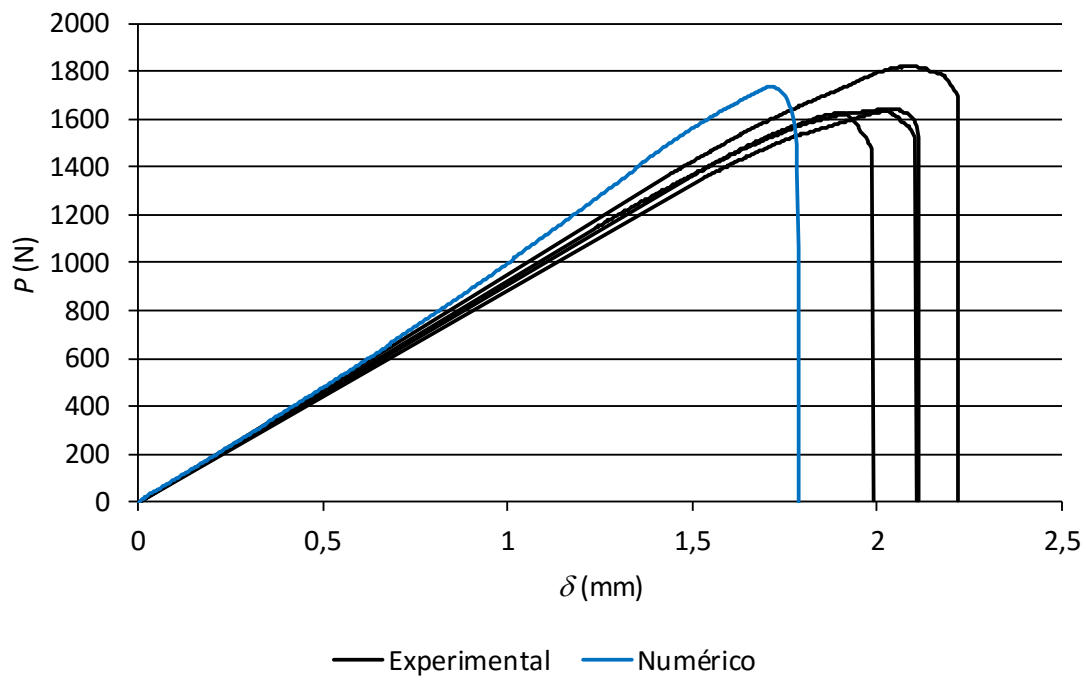


Figura 141 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=3$ mm.

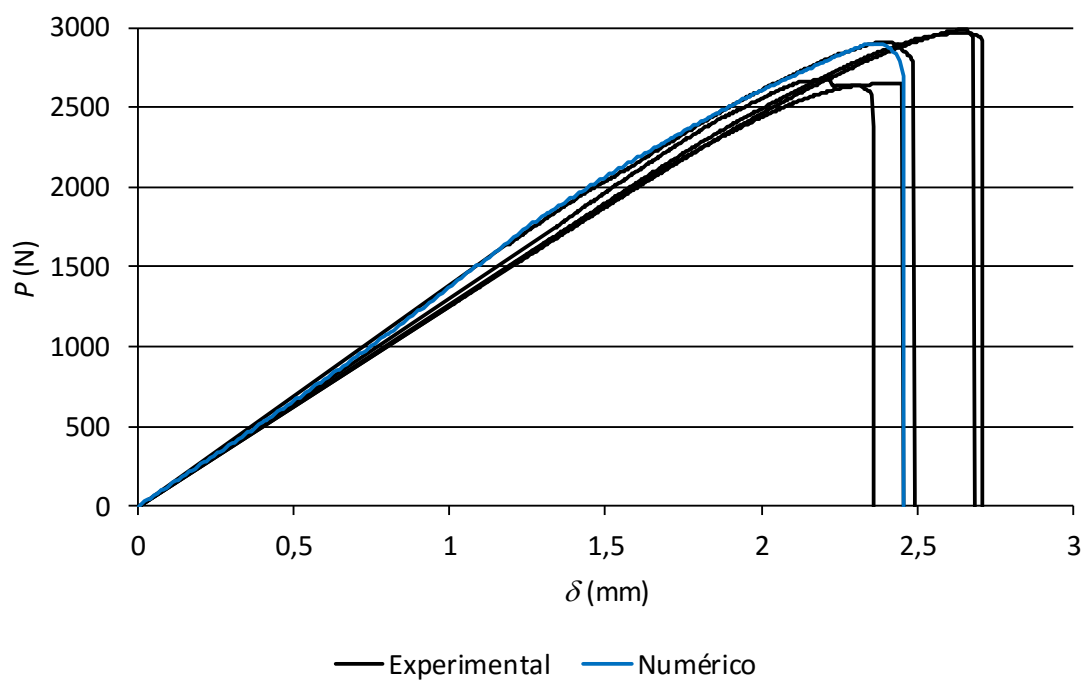


Figura 142 - Curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=4$ mm.

Todas as curvas P - δ experimentais e numéricas para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 apresentam um comportamento elástico semelhante para cada valor de t_{p2} . No entanto, tal como no adesivo Araldite® AV138, verificaram-se algumas discrepâncias no que toca à evolução dos valores de P após se atingir $P_{m\acute{a}x}$. Nas juntas com $t_{p2}=1$ mm (Figura 139), verifica-se que as curvas P - δ de algumas juntas experimentais apresentam uma correlação aceitável com a curva P - δ numérica no que concerne ao valor de $P_{m\acute{a}x}$ e respetivo deslocamento. Em relação ao deslocamento de rotura, este foi ligeiramente superior para a curva numérica. As juntas com $t_{p2}=2$ e 3 mm apresentam comportamentos das curvas P - δ bastante semelhantes entre as juntas experimentais e numéricas. No entanto, na junta com $t_{p2}=3$ mm verificou-se um deslocamento de rotura ligeiramente inferior. Em relação às juntas com $t_{p2}=4$ mm, verificou-se uma boa correlação entre as curvas P - δ experimentais e numérica, tanto no valor de $P_{m\acute{a}x}$, como no deslocamento respetivo. Em geral, para todos os valores de t_{p2} verificou-se uma aproximação bastante boa das fases elásticas em todas as juntas.

Para as juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 não é feita uma comparação das curvas P - δ experimentais e numéricas, pois não se realizaram ensaios experimentais com este adesivo.

3.2.5.2 Resistência das juntas com e sem adesivo de preenchimento

A Figura 143 apresenta os valores numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, para os 4 valores de t_{p2} e geometrias com e sem adesivo de preenchimento. A partir da análise da Figura 143 é visível que as juntas com adesivo de preenchimento atingem valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ atingidos pelas juntas sem adesivo de preenchimento, nos 4 valores de t_{p2} . Pode-se concluir que as juntas coladas com adesivo Araldite® AV138 com presença de adesivo de preenchimento são mais resistentes do que as juntas sem adesivo de preenchimento, especialmente para $t_{p2}=1$ mm. Pode-se atribuir esta diferença a uma maior uniformização das tensões σ_y nas juntas com adesivo de preenchimento na zona principal de início de dano, ou seja, $x/L_0 \simeq 0,2$ (Figura 99) relativamente às juntas sem adesivo de preenchimento (Figura 102). Com o aumento dos valores de t_{p2} verifica-se um aumento de resistência nos 2 tipos de junta com e sem adesivo de preenchimento, devido à redução dos picos de tensão σ_y (Figura 99 e Figura 102), o que por sua vez se traduz numa maior porção de zona danificada quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingido (Figura 111 para as juntas sem adesivo de preenchimento). No entanto, o aumento de resistência com o aumento dos valores de t_{p2} não é proporcional, pois se verifica que o aumento de resistência é maior para maiores valores de t_{p2} . Este comportamento está relacionado com a alteração das distribuições das tensões σ_y que se traduzem num aumento da

extensão da zona de processo a uma taxa crescente com o aumento de t_{p2} (Figura 102 e Figura 111, relativamente às juntas sem adesivo de preenchimento).

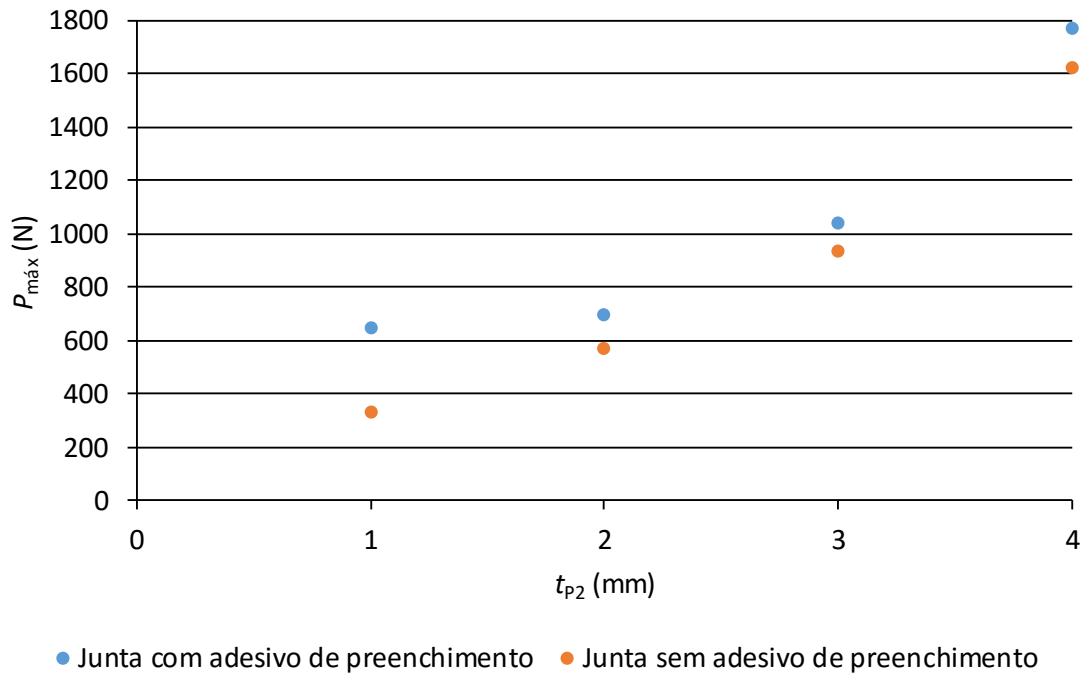


Figura 143 - Valores numéricos de $P_{máx}$ para os 4 valores de t_{p2} , nas juntas com e sem adesivo de preenchimento, Araldite® AV138.

A Figura 144 representa os valores numéricos de $P_{máx}$ obtidos nas juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 para os 4 valores de t_{p2} e geometrias com e sem adesivo de preenchimento. Tal como para as juntas coladas com adesivo Araldite® AV138, as juntas coladas com adesivo Araldite® 2015 e com adesivo de preenchimento são mais resistentes que as juntas sem adesivo de preenchimento. Neste caso o maior acréscimo de resistência verificou-se para as juntas com $t_{p2}=4$ mm. Este fenómeno ocorreu devido à maior uniformização das tensões σ_y nas juntas com adesivo de preenchimento na proximidade de $x/L_0=0,2$ (Figura 100) relativamente às juntas sem adesivo de preenchimento (Figura 103). Com o aumento dos valores de t_{p2} também se verifica um aumento de resistência nos 2 tipos de junta com e sem adesivo de preenchimento, devido à redução dos picos de tensão σ_y (Figura 100 e Figura 103 para as juntas com e sem adesivo de preenchimento, respetivamente), o que por sua vez se traduz numa maior porção de zona danificada quando $P_{máx}$ é atingido (Figura 119 para as juntas sem adesivo de preenchimento). Para o adesivo Araldite® 2015, o aumento de resistência não foi idêntico para todos os valores de t_{p2} , já que foi nitidamente superior para $t_{p2}=1$ e 4 mm.

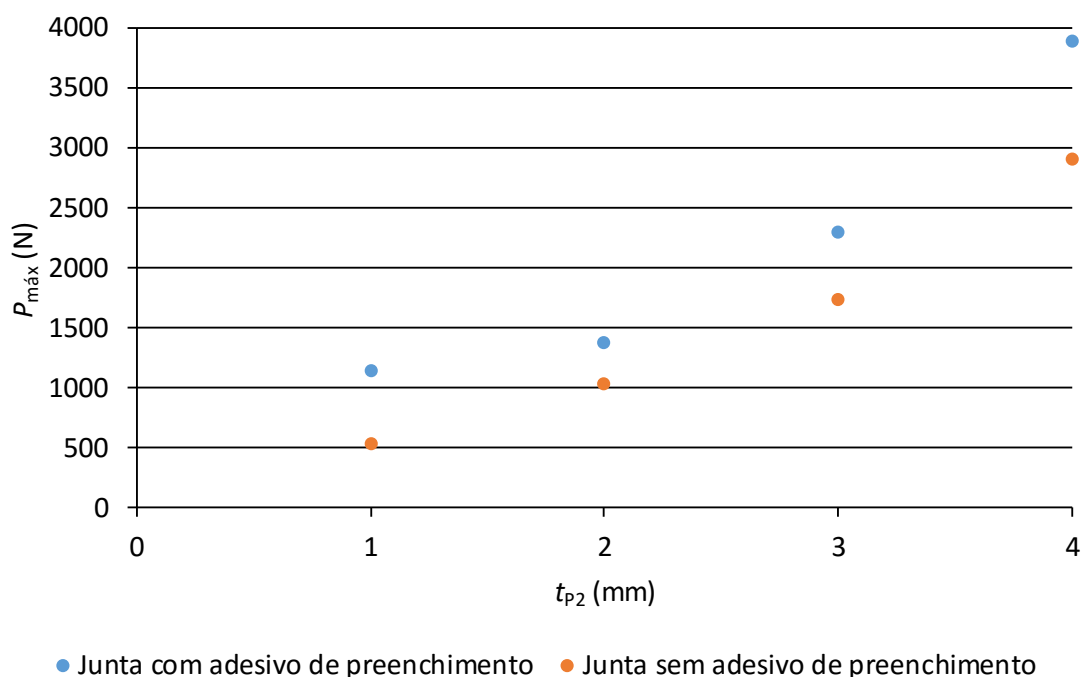


Figura 144 - Valores numéricos de $P_{máx}$ para os 4 valores de t_{p2} , nas juntas com e sem adesivo de preenchimento, Araldite® 2015.

Na Figura 145 apresentam-se os valores numéricos de $P_{máx}$ nas juntas coladas com adesivo Sikaforce® 7752 para os 4 valores de t_{p2} e geometrias com e sem adesivo de preenchimento. Tal como verificado para as juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, as juntas com adesivo de preenchimento atingem valores de $P_{máx}$ superiores às juntas sem adesivo de preenchimento, especialmente para a junta com $t_{p2}=4$ mm. Este acréscimo de resistência deve-se à maior uniformização das tensões σ_y nas juntas com adesivo de preenchimento na proximidade de $x/L_0=0,2$ (Figura 101) relativamente às juntas sem adesivo de preenchimento (Figura 104). Em relação à variação da resistência com o aumento dos valores de t_{p2} , verifica-se um aumento de resistência nos 2 tipos de junta com e sem adesivo de preenchimento devido à redução dos picos de tensão σ_y (Figura 101 e Figura 104), o que por sua vez se traduz numa maior porção de zona danificada quando $P_{máx}$ é atingido (Figura 127 para as juntas sem adesivo de preenchimento). O aumento de resistência com o aumento dos valores de t_{p2} não é proporcional, pois se verifica um aumento de resistência crescente com o aumento de t_{p2} .

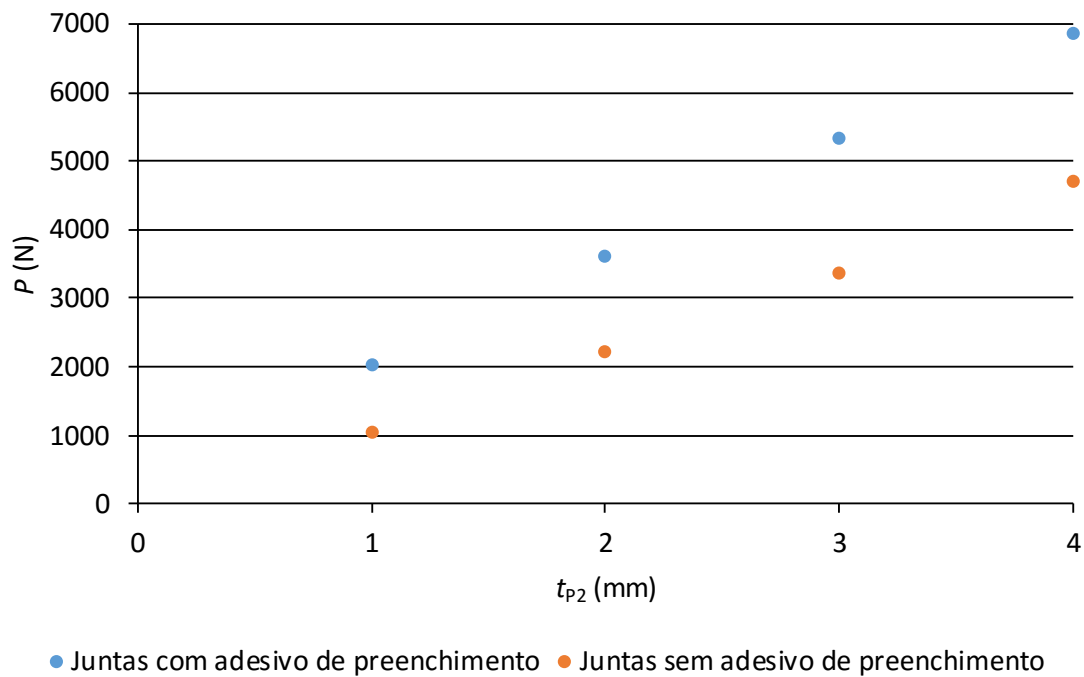


Figura 145 - Valores numéricos de $P_{m\acute{a}x}$ para os 4 valores de t_{p2} , nas juntas com e sem adesivo de preenchimento, Sikaforce® 7752.

O estudo numérico das juntas coladas com os 3 adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) permitiu concluir que o aumento de t_{p2} tem como resultado um aumento não proporcional na resistência da junta. Desta forma, na Tabela 15 é apresentado o aumento percentual da resistência atingida para os 2 tipos de junta (com e sem adesivo de preenchimento) para $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm relativamente à junta com $t_{p2}=1$ mm

A análise da Tabela 15 permite chegar à conclusão que para este tipo de geometria de junta em T e quer exista ou não a presença de adesivo de preenchimento, o aumento de t_{p2} tem influência direta no aumento da resistência. Além disso, quanto maior os valores de t_{p2} admitidos, melhores os resultados na resistência da junta. Comparando com os resultados experimentais, também se observou que o maior acréscimo de resistência ocorre no aumento de $t_{p2}=3$ para 4 mm.

Tabela 15 - Aumentos percentuais das resistências obtidas numericamente para as juntas com $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm relativamente às juntas com $t_{p2}=1$ mm.

t_{p2} (mm)	Com adesivo de preenchimento			Sem adesivo de preenchimento		
	2	3	4	2	3	4
Araldite® AV138 (%)	8,4	61,3	174,8	66,7	192,0	430,1
Araldite® 2015 (%)	20,9	101,8	240,6	93,2	225,2	444,8
Sikaforce® 7752 (%)	78,2	162,8	237,7	111,9	221,9	349,7

Como resumo, na Tabela 16 estão representados os aumentos em percentagem da resistência das juntas com adesivo de preenchimento em comparação com as juntas sem adesivo de preenchimento.

Tabela 16 – Aumento da resistência em % das juntas com adesivo de preenchimento em comparação com as juntas sem adesivo de preenchimento

	$t_{p2}=1$ mm	$t_{p2}=2$ mm	$t_{p2}=3$ mm	$t_{p2}=4$ mm
Araldite® AV138	94,9%	22,0%	10,9%	8,9%
Araldite® 2015	111,5%	33,1%	32,8%	34,1%
Sikaforce® 7752	94,3%	63,4%	58,6%	45,9%

A análise da Tabela 16 permite concluir que a presença de adesivo de preenchimento neste tipo de junta pode contribuir num aumento máximo da resistência de aproximadamente 111% e um mínimo de aproximadamente 9%, o que é bastante significativo. Além disso, verifica-se que o aumento da resistência das juntas com adesivo de preenchimento em comparação com as juntas sem adesivo de preenchimento diminui com o aumento de t_{p2} , apenas com exceção da junta colada com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=4$ mm.

3.2.5.3 Comparação entre a resistência numérica e experimental das juntas

Este capítulo trata a comparação dos resultados obtidos no estudo numérico das juntas sem adesivo de preenchimento com os resultados experimentais. É feita uma comparação entre os resultados obtidos das juntas para os 2 tipos de adesivos analisados (Araldite® AV138 e Araldite® 2015). Na Figura 146 estão representados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente pelas juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

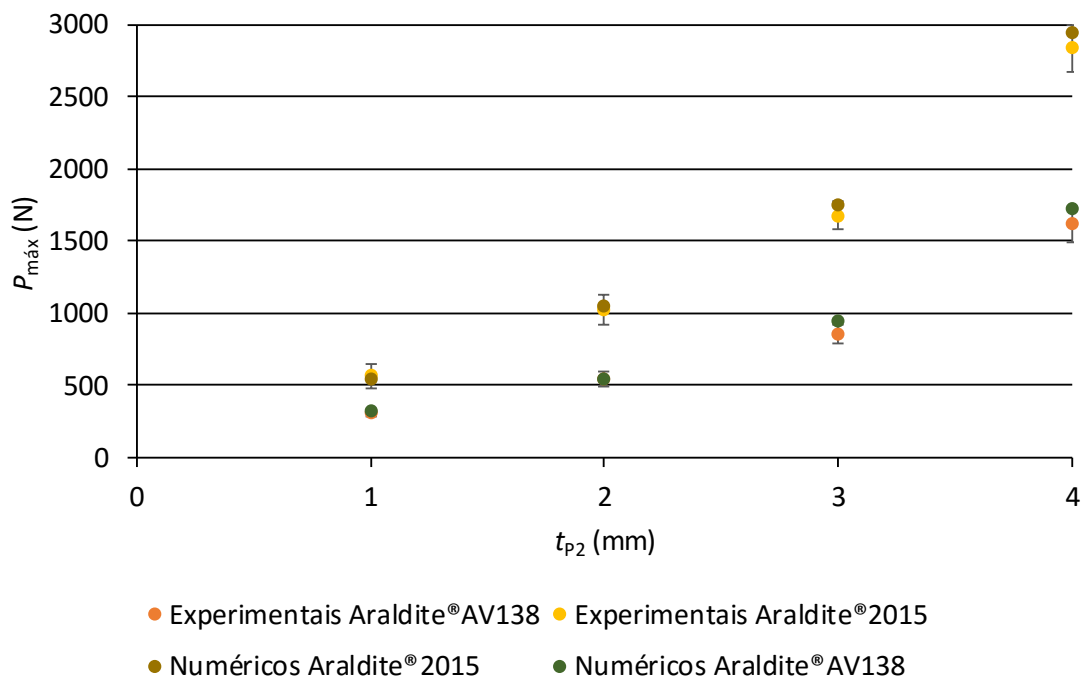


Figura 146 – Valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e numericamente pelas juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

Considerando os valores de $P_{m\acute{a}x}$ atingidos para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, verifica-se que os valores numéricos são superiores aos valores experimentais para todos os valores de t_{p2} , exceto para $t_{p2}=2$ mm, que regista um valor experimental mais elevado em 0,4%. Entre os restantes valores de t_{p2} (1, 3 e 4 mm) os valores de resistência experimentais foram inferiores aos valores numéricos em 4,4%, 10,4% e 6,3%, respetivamente. Em função dos reduzidos desvios obtidos, em que a máxima de diferença é de 10,4%, pode-se confirmar que o método numérico é fiável para previsão de resistência deste tipo de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138.

Quanto aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ atingidos para as juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015, verifica-se que os valores numéricos são superiores aos valores experimentais para todos os valores de t_{p2} , exceto para $t_{p2}=1$ mm, que regista um valor experimental

mais elevado em 4,3%. Entre os restantes valores de t_{P2} (2, 3 e 4 mm) os valores de resistência experimentais foram inferiores aos valores numéricos em 2,2%, 4,5% e 3,5%, respetivamente. A máxima diferença entre valores numéricos e experimentais das juntas coladas com o adesivo Araldite® 2015 é de 4,5%, o que permite confirmar que o método numérico é fiável para previsão de resistência neste tipo de juntas.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo estudar, por análise numérica e experimental, o comportamento de ligações adesivas em T entre aderentes de alumínio. Desta forma, consideraram-se diferentes condições geométricas (valores de t_{p2} e diferentes geometrias de preenchimento do adesivo) e adesivos de ductilidade distinta. Numericamente, foi efetuada uma análise de tensões, análise de dano e resistência da junta através do *software* ABAQUS®, de modo a avaliar a influência de t_{p2} e presença ou não de adesivo de preenchimento, face aos 3 tipos de adesivo em estudo. Os resultados numéricos da resistência das juntas sem adesivo de preenchimento foram comparados com uma análise experimental para validação da técnica numérica. Numericamente, foram também comparada a resistência com e sem adesivo de preenchimento.

A geometria de junta estudada resulta numa solicitação tipicamente de arrancamento. No entanto, esta análise revelou o aparecimento de tensões τ_{xy} para as juntas com todos os adesivos, embora de magnitude inferior relativamente às tensões σ_y . Na análise das tensões σ_y , em ambas as juntas com e sem adesivo de preenchimento ocorreram 2 picos de tensão, sendo os de maior valor localizados na proximidade de $x/L_0=1$. Foi nas juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 onde se verificaram os maiores valores de pico, dada a rigidez superior do adesivo. Este adesivo provoca uma tensão σ_y elevada numa área muito pequena da sobreposição, o que é típico de adesivos rígidos. Para o adesivo Araldite® 2015 verificaram-se valores de pico das tensões σ_y inferiores e ainda mais inferiores no adesivo Sikaforce® 7752 devido à sua menor rigidez, que faz com que este adesivo seja capaz de distribuir as tensões de forma mais gradual por uma área maior de sobreposição. Para além disso, o adesivo Araldite® 2015 é mais dúctil que o Araldite® AV138 e menos dúctil que o adesivo Sikaforce® 7752. Observou-se que o aumento de ductilidade proporcionou um aumento de resistência das juntas, o que levou à plastificação do aderente em L para $t_{p2}=1$ mm para os 3 adesivos. A maior ductilidade dos adesivos é altamente benéfica para a resistência de junta, tal como foi demonstrado pelos resultados numéricos e experimentais. A análise das tensões σ_y permitiu ainda concluir que, com o aumento de t_{p2} , o tipo de solicitação que a junta está sujeita altera, na medida em que se aproxima mais da clivagem, e as distribuições de tensões σ_y tornam-se mais graduais ao longo da camada adesiva.

A presença de adesivo de preenchimento neste tipo de juntas resultou numa diminuição dos picos de tensões σ_y na proximidade da extremidade esquerda do adesivo. Esta diminuição ocorreu para todas os valores de t_{p2} . Além disso, para todas as configurações de junta verificou-se que o aumento de ductilidade dos adesivos é benéfico na diminuição de tensões σ_y , devido ao adesivo ter maior capacidade de distribuição deste

tipo de tensões ao longo de x/L_0 . No entanto, com o aumento de t_{p2} verifica-se um aumento destas tensões para os 2 tipos de junta (com e sem adesivo de preenchimento).

Complementarmente, neste estudo comparou-se a evolução da variável de dano para os 3 adesivos. Para os 3 adesivos verificou-se um aumento da porção da junta danificada quando é atingido $P_{máx}$ com o aumento de t_{p2} , que se traduz numa diminuição dos valores de $\delta/\delta_{máx}$ no instante em que se atinge a rotura. No entanto, esta diminuição não foi proporcional, concluindo-se que a plastificação do aderente em L para as juntas com $t_{p2}=1$ mm é benéfica para um aumento dos valores $\delta/\delta_{máx}$ na rotura. Por outro lado, o aumento de t_{p2} para 4 mm permite um aumento dos valores $\delta/\delta_{máx}$ na rotura em relação à junta com $t_{p2}=2$ e 3 mm devido à ligeira plastificação do aderente base. Também se verificou que, para todos os valores de t_{p2} , o adesivo Sikaforce® 7752 obteve valores de $\delta/\delta_{máx}$ na rotura superiores aos do adesivo Araldite® 2015 e muito superiores aos do Araldite® AV138. O aumento da ductilidade dos adesivos permite obter porções de zona danificada superiores no momento em que se atinge a rotura. A maior ductilidade do adesivo (por exemplo, Sikaforce® 7752) permite à junta acomodar de forma mais gradual o carregamento imposto, o que em termos de resistência da junta se revelou bastante positivo.

A nível de resistência das juntas, foi com a utilização do adesivo mais dúctil que se registaram os maiores valores de $P_{máx}$, com significativa melhoria entre $t_{p2}=3$ e 4 mm. Numericamente, verificou-se que as juntas com adesivo de preenchimento, em comparação com as juntas sem adesivo de preenchimento, aumentam a resistência até um máximo de aproximadamente 111% (Araldite® 2015, $t_{p2}=1$ mm) e um mínimo de 9% (Araldite® AV138, $t_{p2}=4$ mm). Nas juntas sem adesivo de preenchimento e coladas com o adesivo Araldite® AV138, o aumento percentual da resistência relativamente às juntas com $t_{p2}=1$ mm foi de 66,7%, 192,0% e 430,1%, para a junta com $t_{p2}=2$, 3 e 4 mm, respetivamente. Para o adesivo Araldite® 2015 o aumento percentual dos valores de $P_{máx}$ relativamente às juntas com $t_{p2}=1$ mm foi de 93,2%, 225,2% e 444,8%, para a junta com $t_{p2}=2$, 3 e 4 mm, respetivamente. Quanto às juntas coladas com o adesivo Sikaforce® 7752 o aumento percentual dos valores de $P_{máx}$ relativamente às juntas com $t_{p2}=1$ mm foi de 111,9%, 221,9% e 349,7%, para a junta com $t_{p2}=2$, 3 e 4 mm, respetivamente.

Os ensaios experimentais permitiram validar os resultados numéricos para os 3 adesivos. A máxima variação entre os resultados numéricos e experimentais foi, no caso do Araldite® AV138, de 10,4% ($t_{p2}=3$ mm) e no caso do Araldite® 2015, de 4,5% ($t_{p2}=3$ mm). Considerando todas as configurações de junta ensaiadas, estas variações são de forma geral inferiores a 10%. Estes resultados mostram que os MDC são uma ferramenta bastante precisa para a previsão de resistência neste tipo de juntas em T e que pode ser utilizada para efeitos de projeto deste tipo de juntas.

Em conclusão, o adesivo Sikaforce® 7752 (dúctil) é o mais recomendado para o tipo de solicitação e geometria de junta em causa. O uso deste adesivo permite uma distribuição da carga solicitada sobre uma região mais alargada da camada de adesivo, o que resulta em valores mais elevados de $P_{m\acute{a}x}$. Além disso, o uso de adesivo de preenchimento é eficaz quando se pretende aumentar significativamente a resistência da junta. A geometria do aderente em L (nomeadamente o valor de t_{p2}), o uso ou não de adesivo de preenchimento de adesivo e o tipo de adesivo utilizado são os parâmetros mais relevantes para a resistência da junta.

Como sugestões de trabalhos futuros, referem-se os seguintes:

- O aumento de t_{p2} , uma vez que se obtiveram melhores resultados de resistência nas juntas com $t_{p2}=4$ mm;
- Estudo do efeito da variação de t_{p1} , visto que na junta com $t_{p2}=4$ mm se verifica uma ligeira plastificação do aderente base;
- Averiguar o comportamento da junta com espessuras diferentes de adesivo;
- Consideração de adesivos com características diferentes;
- Estudo do efeito na utilização de filetes de adesivo na extremidade livre da camada de adesivo;
- Avaliação do efeito da variação do raio de curvatura do aderente em L;
- Estudo do comportamento das juntas em T à fadiga.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

11. Di Bella, G., C. Borsellino, E. Pollicino, and V.F. Ruisi, *Experimental and numerical study of composite T-joints for marine application*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 347-358.
2. Trask, R.S., S.R. Hallett, F.M.M. Helenon, and M.R. Wisnom, *Influence of process induced defects on the failure of composite T-joint specimens*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(4): p. 748-757.
3. Bianchi, F., T.M. Koh, X. Zhang, I.K. Partridge, and A.P. Mouritz, *Finite element modelling of z-pinned composite T-joints*. Composites Science and Technology, 2012. **73**: p. 48-56.
4. Dillard, D.A. and A.V. Pocius, eds. *The Mechanics of Adhesion*. Adhesion Science and Engineering, ed. A.V. Pocius. 2002, Elsevier: Amesterdão.
5. Hall, D. and J.F. Butler. *Featured Creatures*. 2001 [cited 2015 Dezembro]; Available from: http://entnemdept.ufl.edu/creatures/orn/palms/hemisphaerota_cyanea.htm.
6. Débora, C.M. *Lignina*. 2015 [cited 2015 Dezembro]; Available from: <http://www.infoescola.com/compostos-quimicos/lignina/>.
7. Da Silva, L.F.M., A.G. Magalhães, and M.F.S.F. De Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007, Porto: Publindustria.
8. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modeling single and double lap repairs and composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**: p. 1948-1958.
9. Adams, R.D. and R.G.H. Davies, *Strength of lap shear joints*, in *The mechanics of adhesion*, D.A. Dillard and A.V. Pocius, Editors. 2002, Elsevier: Amsterdam.
10. Bishopp, J., *Aerospace: a pioneer in structural adhesive bonding*, in *Handbook of Adhesives and Sealants. Volume 1*, P. Cognard, Editor. 2005, Elsevier: Amesterdão.
11. *The Aluminium Automotive Manual*. 2013; Available from: http://www.european-aluminium.eu/wp-content/uploads/2011/12/1_AAM_Body-structures.pdf.
12. Adams, R.D., *Adhesive Bonding: Science, Technology, and Applications*. 2005, Boca Raton: CRC Press.
13. Zygmund, S., *Araldite industrial adhesives*, in *Adhesives technology*, H. Corporation, Editor. 2014: Switzerland.
14. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000: McGraw-Hill.
15. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology*. 2nd Edition ed. An Introduction.

16. Petrie, E.M., *The fundamentals of adhesive joint design and construction: Function-specific construction is the key to proper adhesion and load-bearing capabilities*. Metal Finishing, 2008. **106**(11): p. 55-57.
17. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Doutoramento em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
18. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. 1938. **15**: p. 41-47.
19. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. *Journal of Applied Mechanics*. 1944: p. 66:17-27.
20. Panigrahi SK, P.B., *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: p. 26:183-201.
21. Duan K, H.X., Mai YW., *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004: p. 18:39-53.
22. Liljedahl CDM, C.A., Wahab MA, Ashcroft IA., *Damage modelling of adhesively bonded joints*, ed. I.J.o. Fracture. 2006.
23. 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.
24. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. *Bulletin of the Seismological Society of America*, 1959. **49**: p. 199-204.
25. 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.
26. 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.
27. Feraren, P. and H.M. Jensen, *Cohesive zone modelling of interface fracture near flaws in adhesive joints*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2004. **71**(15): p. 2125-2142.
28. Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe, and S.-S. Pang, *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.
29. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints.*, ed. I.J.o. Fracture. Vol. 110. 2001.
30. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, and L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2013. **44**: p. 48-56.

31. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints* 2012, Heidelberg: Springer.
32. Hua, Y., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive*, ed. I.J. Adhes. Vol. 28. 2008.
33. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*, ed. B. Publishing. 2008, New Jersey.
34. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal of Fracture Mechanics, 1999: p. 45:601–620.
35. Moës N, D.J., Belytschko T., *finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999: p. 46:131–150.
36. Da Silva, L.F.M., D.A. Dillard, B.R.K. Blackman, and R.D. Adams, *Testing Adhesive Joints*. Best Practices, ed. W.-V.V.C. KGaA. 2012, 69469 Weinheim, Germany.
37. Li, W., L. Blunt, and K.J. Stout, *Analysis and design of adhesive-bonded tee joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1997. **17**(4): p. 303-311.
38. Zhang, K., L. Li, Y. Duan, and Y. Li, *Experimental and theoretical stress analysis for an interface stress model of single-L adhesive joints between CFRP and aluminum components*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **50**: p. 37-44.
39. Burns, L.A., A.P. Mouritz, D. Pook, and S. Feih, *Bio-inspired design of aerospace composite joints for improved damage tolerance*. Composite Structures, 2012. **94**(3): p. 995-1004.
40. Yang, T., J. Zhang, A.P. Mouritz, and C.H. Wang, *Healing of carbon fibre–epoxy composite T-joints using mendable polymer fibre stitching*. Composites Part B: Engineering, 2013. **45**(1): p. 1499-1507.
41. Guo, S. and R. Morishima, *Numerical analysis and experiment of composite sandwich T-joints subjected to pulling load*. Composite Structures, 2011. **94**(1): p. 229-238.
42. Hélénon, F., M.R. Wisnom, S.R. Hallett, and R.S. Trask, *Numerical investigation into failure of laminated composite T-piece specimens under tensile loading*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(7): p. 1017-1027.
43. Burns, L.A., A.P. Mouritz, D. Pook, and S. Feih, *Strength improvement to composite T-joints under bending through bio-inspired design*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(11): p. 1971-1980.
44. Park, Y.-B., B.-H. Lee, J.-H. Kweon, J.-H. Choi, and I.-H. Choi, *The strength of composite bonded T-joints transversely reinforced by carbon pins*. Composite Structures, 2012. **94**(2): p. 625-634.
45. Koh, T.M., S. Feih, and A.P. Mouritz, *Strengthening mechanics of thin and thick composite T-joints reinforced with z-pins*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(8): p. 1308-1317.

46. Azevedo, J.C.S.A., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Noched Flexure (ENF)*. 2014, Mestrado em Engenharia Mecânica, Departamento de Engenharia Mecânica: Instituto Superior de Engenharia do Porto.
47. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, and L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
48. ASTM, *E8M - Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*. International: West Conshohocken.
49. 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.
50. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, and A.M.P. de Jesus, *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
51. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Mestrado em Engenharia Mecânica, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
52. Ribeiro, T.E.A., R.D.S.G. Campilho, L.F.M. da Silva, and L. Goglio, *Damage analysis of composite-aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Composite Structures, 2016. **136**: p. 25-33.
53. Gonçalves, J.P.M., M.F.S.F. de Moura, and P.M.S.T. de Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(5): p. 357-365.
54. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology*, in *Adhesion and Adhesives Technology (Third Edition)*. 2012, Hanser. p. I-XVI.
55. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. 2005, Mestrado em Engenharia Mecânica, Faculdade de Engenharia da Universidade de Porto.
56. 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.
57. Högberg, J.L. and U. Stigh, *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2541-2556.
58. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. International Journal of Solids and Structures, 2007. **44**(2): p. 530-545.
59. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, and L.F.M. da Silva, *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011(25): p. 2351-2368.
60. 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.
61. Darwish, S.M.H. and A. Ghanya, *Critical assessment of weld-bonded technologies*. Journal of Materials Processing Technology, 2000. **105**(3): p. 221-229.