



Validação do Método de Elementos Finitos eXtendido para a previsão do comportamento de juntas adesivas em T

FILIPE JOSÉ PINHO MOREIRA

Outubro de 2017

VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO PARA A PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE JUNTAS ADESIVAS EM T

Filipe José Pinho Moreira

1120068

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



VALIDAÇÃO DO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO PARA A PREVISÃO DO COMPORTAMENTO DE JUNTAS ADESIVAS EM T

Filipe José Pinho Moreira

1120068

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

2017

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

A elaboração e conclusão desta dissertação só foi possível com o apoio e contributo de várias pessoas e uma instituição, às quais apresento o meu mais sincero agradecimento.

O meu sincero agradecimento ao meu orientador, Engenheiro Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela disponibilidade e dedicação que apresentou ao longo da realização deste trabalho. Foi uma pessoa que sempre que necessitei de ajuda, mostrou grande disponibilidade em realizá-lo, uma pessoa crucial para a realização com sucesso deste trabalho. Um agradecimento ao Instituto Superior de Engenharia do Porto pela oportunidade concedida para a realização deste trabalho.

Por último, mas não menos importante, um agradecimento à minha família e amigos pelo apoio e pelo incentivo que demonstraram durante este período de tempo, um apoio fundamental para alcançar com sucesso os meus objetivos académicos.

PALAVRAS CHAVE

Método de Elementos Finitos eXtendido; Juntas adesivas; Juntas em T; Adesivo estrutural; Ensaios experimentais.

RESUMO

As ligações adesivas são um método de ligação cada vez mais utilizado em diversas indústrias, muito por culpa das muitas vantagens que apresentam quando comparadas com outros métodos de ligação mais tradicionais. A distribuição mais uniforme de tensões, facilidade de fabricação, possibilidade de união de diferentes materiais, custo mais baixo e redução do peso são as vantagens que mais se destacam. Por estas razões, as juntas adesivas têm aumentado a sua aplicação em diversas indústrias, tais como automóvel, naval, aeroespacial, aeronáutica e calçado. Em relação aos adesivos, estes podem ser de vários tipos. O adesivo Araldite® AV138 é um exemplo de um adesivo rígido e frágil, enquanto o adesivo Araldite® 2015 é considerado um adesivo moderadamente dúctil, menos resistente, mas com maior flexibilidade. Para além destes adesivos, existem outros adesivos caracterizados por possuírem elevada resistência, flexibilidade e ductilidade, tais como o Sikaforce® 7752. A seleção do adesivo deve ser feita de forma cuidada, consoante as suas características e o tipo de solicitação a que vai estar sujeito. Esta dissertação tem como objetivo a realização de um estudo de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio, ligados por três adesivos de características distintas e sujeitas a esforços de arrancamento, onde a espessura do aderente em L (t_{p2}) varia. A análise numérica foi realizada com auxílio do *software* ABAQUS® e considerando o Método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX). Outro objetivo desta dissertação é avaliar o MEFX como técnica de previsão de resistência de juntas adesivas, e verificar se se trata de uma ferramenta adequada e com um índice de fiabilidade aceitável. Foi realizada uma comparação entre resultados obtidos numericamente, através do MEFX, com resultados experimentais e numéricos obtidos num trabalho anterior. Na análise numérica foi realizada um estudo do modelo de dano baseado em tensões e deformações, a análise de tensões nas juntas, a análise da variável de dano e a previsão de resistência das juntas, onde é possível observar-se o efeito do critério de iniciação e da lei de propagação. Após a realização deste estudo, é possível concluir-se que o MEFX é um método adequado para a previsão de resistência de juntas adesivas em T, desde que usados critérios adequados de iniciação e propagação do dano.

KEYWORDS

eXtended Finite Element Method; Adhesive joints; T joints; Structural adhesive; Experimental tests.

ABSTRACT

Adhesive bonds are an increasingly used bonding method in various industries, much because of the many advantages they present compared to other more traditional bonding methods. The more uniform distribution of stresses, ease of manufacture, possibility of joining different materials, lower cost and reduction of weight are the advantages that stand out the most. For these reasons, adhesive joints have increased their application in several industries, such as automobile, naval, aerospace, aeronautics and footwear. Regarding adhesives, these may be of various types. The adhesive Araldite® AV138 is an example of a stiff and brittle adhesive, while the adhesive Araldite® 2015 is considered a moderately ductile, less strong, but more flexible adhesive. In addition to these adhesives, there are other adhesives characterized by high strength, flexibility and ductility, such as Sikaforce® 7752. The selection of the adhesive must be done carefully, depending on its characteristics and the type of application to which it will be subjected to. This dissertation aims to perform a study of adhesive T-joints with aluminum adhesives, bonded by three adhesives with different characteristics and subjected to peeling stresses, where the L-adherend thickness (t_{p2}) varies. The numerical analysis was performed with the aid of ABAQUS® software and considering the eXtended Finite Element Method (XFEM). Another objective of this dissertation is to evaluate the XFEM as a technique for predicting the strength of adhesive joints, and to verify if it is a suitable tool with an acceptable reliability index. A comparison was made between the numerical results, by XFEM, with experimental results obtained in a previous work. In the numerical analysis, a study of the damage model based on stresses and strains, joint stress analysis, damage variable analysis and joint strength prediction was performed, where it is possible to observe the effect of the initiation criterion and the propagation law. After this study, it is possible to conclude that the XFEM is a suitable method for the strength prediction of adhesive T-joints, provided that appropriate damage initiation and propagation criteria are used.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
Al	Alumínio
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CAD	Desenho Assistido por Computador
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber Reinforced Polymer</i>
Cr	Crómio
Cu	Cobre
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
Fe	Ferro
FRP	<i>Fibre-Reinforced Plastics</i>
GLARE	<i>GLAss REinforced</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
JSD	Junta de Sobreposição Dupla
JSS	Junta de Sobreposição Simples
MAXE	Critério de deformação nominal máxima

MAXPE	Deformação principal máxima
MAXPS	Tensão principal máxima
MAXS	Critério de tensão nominal máxima
MDC	Modelos do Dano Coesivo
MEF	Método Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos eXtendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
Mg	Magnésio
Mn	Manganês
PVA	Adesivo Poliacetano de Vinilo
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão
SDEG	<i>Stiffness degradation</i>
SI	Sistema Internacional de Unidades
Si	Silício
Ti	Titânio
XFEM	<i>eXtended Finite Element Method</i>
Zn	Zinco

Lista de Símbolos

B	Largura da junta
E	Módulo de Young
G	Módulo de elasticidade transversal
G_{IC}	Tenacidade à tração
G_{IIC}	Tenacidade ao corte
L_A	Altura dos substratos em L, a partir do raio de encurvadura
L_0	Comprimento do adesivo
L_T	Comprimento dos substratos base entre limites de encastramento
$P_{máx}$	Força máxima resistente da junta
R	Raio de curvatura dos substratos em L
t_A	Espessura do adesivo
t_n	Componente de tensão normal
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_{P1}	Espessura do aderente base
t_{P2}	Espessura do aderente em L
t_s	Componente de tensão de corte
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
x/L_0	Distância normalizada ao longo do comprimento do adesivo
$\delta_{máx}$	Deslocamento associado à força máxima resistente da junta
δ_n^0	Deslocamento normal correspondente a t_n^0
δ_s^0	Deslocamento de corte correspondente a t_s^0

δ	Deslocamento associado à solicitação de tração da junta
ε_f	Deformação de rotura à tração
$\varepsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação principal máxima
$\varepsilon_{m\acute{a}x}^0$	Deformação máxima de um material à tração
ε_n	Componente de deformação normal
ε_n^0	Limite da componente de deformação normal
ε_s	Componente de deformação ao corte
ε_s^0	Limite da componente de deformação ao corte
σ_e	Tensão de cedência à tração
σ_f	Tensão de rotura à tração
$\sigma_{m\acute{a}x}$	Tensão principal máxima
$\sigma_{m\acute{a}x}^0$	Resistência de um material à tração
σ_n^0	Resistência à tração coesiva
σ_x	Tensão normal segundo a direção x
σ_y	Tensão de cedência, tensão de arrancamento
σ_y/σ_{med}	Tensão de arrancamento normalizada para as juntas em T
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_{xy}	Tensão de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte
γ_f	Deformação de rotura ao corte
ν	Coefficiente de Poisson

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - JUNTA ADESIVA E ZONAS CONSTITUINTES (ADESIVO-ADERENTE-INTERFASE-INTERFACE) [5].	9
FIGURA 2 - JUNTA ADESIVA E ZONAS CONSTITUINTES (ADESIVO-ADERENTE-INTERFASE-PRIMÁRIO) [6].	9
FIGURA 3 - ZONAS DO AVIÃO HAVILLAND COMET ONDE SE UTILIZAM JUNTAS ADESIVAS [8].	12
FIGURA 4 - ESTRUTURA PRINCIPAL DA CAUDA DO BOEING 777 COMPOSTA POR DIFERENTES COMPONENTES LIGADOS POR ADESIVOS [9].	12
FIGURA 5 - LOCAIS DE APLICAÇÃO DE ADESIVOS NUM AUTOMÓVEL [10].	13
FIGURA 6 - DIFERENTES APLICAÇÕES NO BODY IN WHITE [10].	13
FIGURA 7 - JUNTAS EM BARCOS COM AS RESPECTIVAS SOLICITAÇÕES [11].	14
FIGURA 8 – CONTRAPLACADO LIGADO COM ADESIVO NUM BARCO (A) E APLICAÇÃO DE ADESIVO NA CONSTRUÇÃO DE UM BARCO (B) [12].	14
FIGURA 9 - LOCAIS DE APLICAÇÃO DE ADESIVOS NUM SATÉLITE DE TELECOMUNICAÇÕES [12].	15
FIGURA 10 - APLICAÇÃO DE ADESIVO EM CALÇADO [13].	15
FIGURA 11 - ESQUEMA DOS CONSTITUINTES A UNIR NUM SAPATO [1].	16
FIGURA 12 - ESFORÇO DE TRAÇÃO [5].	16
FIGURA 13 - ESFORÇO DE COMPRESSÃO [5].	17
FIGURA 14 - ESFORÇO DE CORTE [5].	17
FIGURA 15 - EFEITO DO COMPRIMENTO E DA LARGURA DE SOBREPOSIÇÃO NA RESISTÊNCIA AO CORTE [15].	17
FIGURA 16 - ESFORÇO DE CLIVAGEM [5].	18
FIGURA 17 - ESFORÇO DE ARRANCAMENTO [5].	18
FIGURA 18 - ROTURA COESIVA [6].	19
FIGURA 19 - ROTURA ADESIVA [6].	19
FIGURA 20 - ROTURA DO SUBSTRATO [6].	19
FIGURA 21 - ROTURA MISTA [6].	20
FIGURA 22 - JUNTAS TOPO A TOPO [1].	20
FIGURA 23 - JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO [1].	21
FIGURA 24 - JUNTAS DE TIRA [1].	21
FIGURA 25 - CONFIGURAÇÕES DE REFORÇOS PARA MINIMIZAR: ARRANCAMENTO (A) E CLIVAGEM (B) [5].	22
FIGURA 26 - JUNTAS CILÍNDRICAS: JUNTAS PARA VARÕES (A) E JUNTAS PARA TUBOS (B) [5].	23
FIGURA 27 - JUNTAS EM T [5].	23
FIGURA 28 - JUNTAS DE CANTO [1].	24
FIGURA 29 - CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS SEGUNDO A SUA FUNÇÃO [5].	29
FIGURA 30 - DESCONTINUIDADE DE TENSÕES: NA PROXIMIDADE DE UMA PONTA DE FENDA (A) E NUM CANTO REENTRANTE (B) [22].	35
FIGURA 31 - MODOS DE PROPAGAÇÃO DE UMA FENDA [25].	36

FIGURA 32 - LEIS COESIVAS: TRIANGULAR E EXPONENCIAL (A) E TRAPEZOIDAL (B) [22].	37
FIGURA 33 - PROPAGAÇÃO DO DANO NO MEFX UTILIZANDO O CONCEITO DE NÓS FANTASMA: ANTES (A) E APÓS A PARTIÇÃO (B) DE UM ELEMENTO FRATURADO EM SUBELEMENTOS [42].	39
FIGURA 34 - GEOMETRIA DOS PROVETES DCB E RESPECTIVOS PARÂMETROS [43].	40
FIGURA 35 - CURVAS G_{IC} -A PELOS MÉTODOS CCM E CBT [43].	41
FIGURA 36 - CURVAS P- Δ NUMÉRIAS E EXPERIMENTAIS DOS MODELOS DCB [43].	42
FIGURA 37 - GEOMETRIA E DIMENSÕES DA JUNTA EM ESTUDO [44].	42
FIGURA 38 - CURVAS P- Δ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE E NUMERICAMENTE (POR MDC) PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO: ARALDITE® 2015 E $L_0=37,5$ MM (A) E SIKAFORCE® 7888 E $L_0=50$ MM (B) [44].	43
FIGURA 39 - COMPARAÇÃO DE RESULTADOS EXPERIMENTAIS E RESULTADOS OBTIDOS PELO MEFX PARA JUNTAS COM OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015 [44].	43
FIGURA 40 - GEOMETRIA E DIMENSÕES DA JUNTA ADESIVA EM ESTUDO [45].	44
FIGURA 41 - ZONAS DOS ELEMENTOS COESIVOS E MEFX [45].	44
FIGURA 42 - CURVA P- Δ NUMÉRICA EM COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS [45].	45
FIGURA 43 - PROPAGAÇÃO DA FENDA NAS DIFERENTES REGIÕES [45].	45
FIGURA 44 - INTERAÇÃO DAS FENDAS DAS REGIÕES DE MEFX E MDC [45].	45
FIGURA 45 - INÍCIO E PROPAGAÇÃO DA FENDA NA CAMADA DO ADESIVO [45].	46
FIGURA 46 - CONFIGURAÇÃO DO LAMINADO GLARE [46].	47
FIGURA 47 - DIMENSÕES DO LAMINADO GLARE [46].	47
FIGURA 48 - CURVAS P- Δ NUMÉRICAS, EXPERIMENTAIS E DE AIROLDI ET AL [46].	47
FIGURA 49 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO A 180° [5].	49
FIGURA 50 - ENSAIO DE ROLETE FLUTUANTE [5].	49
FIGURA 51 - ENSAIO DE CLIMBING DRUM [1].	50
FIGURA 52 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE JUNTA EM T [5].	50
FIGURA 53 - EVOLUÇÃO DO COMPORTAMENTO DA DESCOLAGEM DAS JUNTAS CONSOANTE CADA CATEGORIA [7].	51
FIGURA 54 - GEOMETRIA DA JUNTA L EM ESTUDO E RESPECTIVOS PARÂMETROS (A) E MODOS DE APLICAÇÃO DAS CARGAS (B) [48].	52
FIGURA 55 - GEOMETRIA E DIMENSÕES UTILIZADAS NO TESTE EXPERIMENTAL [48].	53
FIGURA 56 - ESQUEMA DA JUNTA L EM ESTUDO [49].	53
FIGURA 57 - VALORES DE P_M EXPERIMENTAIS E RESPECTIVA PREVISÃO NUMÉRICA PARA AS JUNTAS EM FUNÇÃO DE T_{p2} : ARALDITE® AV138 (A) E SIKAFORCE® 7752 (B) [49].	54
FIGURA 58 - ESQUEMA DA JUNTA EM T PARÂMETROS USADOS NA GEOMETRIA DA JUNTA [50].	55
FIGURA 59 - VALORES NUMÉRICOS/EXPERIMENTAIS DE P_M PARA AS JUNTAS ADESIVAS EM T COM ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015 [50].	55
FIGURA 60 - VALORES NUMÉRICOS DE P_M PARA JUNTA ADESIVA EM T COM ARALDITE® AV138, ARALDITE® 2015 E SIKAFORCE® 7752 [50].	56
FIGURA 61 - GEOMETRIA E DIMENSÕES DA JUNTA EM T [51].	56
FIGURA 62 - JUNTAS EM T COM GEOMETRIA CONVENCIONAL E INSPIRADAS NA NATUREZA: 25% (A), 50% (B) E 75% (C) DE EMBEBIMENTO [51].	57

FIGURA 63 – GEOMETRIA E DIMENSÕES DA JUNTA T EM ESTUDO [52].	58
FIGURA 64 - SEIS TIPOS DE JUNTAS EM T UTILIZADAS: TIPO, ADERENTES, GEOMETRIA E O VALOR DE R [52].	58
FIGURA 65 – CURVAS FORÇA-DESLOCAMENTO PARA JUNTAS EM T: TIPO I – EQUILIBRADO (A), TIPO II – EQUILIBRADO (B), TIPO III – EQUILIBRADO (C), TIPO IV – DESEQUILIBRADO (D), TIPO V – DESEQUILIBRADO (E) E TIPO VI – DESEQUILIBRADO (F) [52].	59
FIGURA 66 - ESBOÇO JUNTA T-PEEL (A) E MODELO COMPUTACIONAL COM UMA VISÃO DETALHADA DOS NÓS DOS ELEMENTOS (CÍRCULOS VAZIOS) E DOS PONTOS DE INTEGRAÇÃO (QUADRADO SÓLIDO) (B), DIMENSÕES EM MM [53].	60
FIGURA 67 - CURVAS P- Δ EXPERIMENTAIS (LINHAS FINAS CONTÍNUAS) E NUMÉRICAS (LINHAS GROSSAS TRACEJADAS) PARA JUNTAS COM ADERENTES EM ALUMÍNIO [53].	61
FIGURA 68 - CURVAS P- Δ EXPERIMENTAIS (LINHAS FINAS CONTÍNUAS) E NUMÉRICAS (LINHAS GROSSAS TRACEJADAS) PARA JUNTAS COM ADERENTES EM AÇO [53].	61
FIGURA 69 - RESULTADOS NUMÉRICOS E EXPERIMENTAIS OBTIDOS [53].	62
FIGURA 70 - CURVA Σ -E DA LIGA DE ALUMÍNIO AW6082-T651 E RESPECTIVA APROXIMAÇÃO PARA ANÁLISE DO MÉTODO DE EF [56].	66
FIGURA 71 - CURVAS Σ -E REFERENTES AO ADESIVO ARALDITE® AV138 [30].	67
FIGURA 72 - ADESIVO ARALDITE® AV138 [1].	67
FIGURA 73 - CURVAS Σ -E REFERENTES AO ADESIVO ARALDITE® 2015 [30].	69
FIGURA 74 - ADESIVO ARALDITE® 2015 [60].	69
FIGURA 75 - CURVA DE T Σ -E REFERENTE AO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [6].	70
FIGURA 76 - ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [1].	70
FIGURA 77 - ESQUEMA REPRESENTATIVO DA JUNTA EM T [1].	71
FIGURA 78 - PRENSA MANUAL UTILIZADA NA DOBRAGEM DOS ADERENTES EM L [1].	73
FIGURA 79 - CHAPAS NORMALIZADAS DE 0,2 MM DE ESPESSURA FIXAS AO ADERENTE BASE [1].	73
FIGURA 80 - APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® 2015 EM "ZIG-ZAG" NO ADERENTE BASE [1].	74
FIGURA 81 - EXEMPLO DE JUNTAS COM ADERENTES EM L COM $T_{p2}=1$ MM: COM ARALDITE® 2015 (A) E COM ARALDITE® AV138 (B) [1].	74
FIGURA 82 - REMOÇÃO DOS EXCESSOS DE ADESIVO: ANTES DA REMOÇÃO (A) E APÓS A REMOÇÃO (B) DE EXCESSOS [1].	74
FIGURA 83 - UTILIZAÇÃO DO MANDRIL PARA EFETUAR A REMOÇÃO DE FILETES DE ADESIVO [1].	75
FIGURA 84 - ASPETO FINAL DA JUNTA ANTES DA REALIZAÇÃO DO TESTE [1].	75
FIGURA 85 - ENSAIO: MÁQUINA DE ENSAIOS SHIMADZU AG-X 100 (A) E ENCASTRAMENTO DO PROVETE NA BASE E SOLICITAÇÃO À TRAÇÃO NA VERTICAL (B) [1].	76
FIGURA 86 - CURVAS P- Δ REGISTADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=1$ MM [1].	77
FIGURA 87 - CURVAS P- Δ REGISTADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=2$ MM [1].	77
FIGURA 88 - CURVAS P- Δ REGISTADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=3$ MM [1].	78

FIGURA 89 - CURVAS P- Δ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=4$ MM [1].....	78
FIGURA 90 - CURVAS P- Δ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=1$ MM [1].	79
FIGURA 91 - CURVAS P- Δ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=2$ MM [1].	79
FIGURA 92 - CURVAS P- Δ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=3$ MM [1].	80
FIGURA 93 - CURVAS P- Δ REGISTRADAS ATRAVÉS DOS ENSAIOS DE PROVETES DE JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=4$ MM [1].	80
FIGURA 94 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=1$ MM [1].	81
FIGURA 95 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=2$ MM [1].	81
FIGURA 96 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=3$ MM [1].	82
FIGURA 97 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=4$ MM [1].	82
FIGURA 98 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=1$ MM [1].	82
FIGURA 99 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=2$ MM [1].	83
FIGURA 100 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=3$ MM [1].	83
FIGURA 101 - SUPERFÍCIES DE ROTURA DAS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=4$ MM [1].	83
FIGURA 102 - VALORES EXPERIMENTAIS DE $P_{MÁX}$ OBTIDOS NAS JUNTAS COM OS ADESIVOS ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015 [1].....	84
FIGURA 103 - ELEMENTOS CONSTITUINTES DA JUNTA ADESIVA NO SOFTWARE ABAQUS®.	85
FIGURA 104 - REFINAMENTO DAS MALHAS PARA: ANÁLISE DE RESISTÊNCIA (A) E ANÁLISE DE TENSÕES (B).	86
FIGURA 105 - EXEMPLO DO EFEITO BIAS.....	87
FIGURA 106 - SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA NO ADERENTE EM L.	87
FIGURA 107 - SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA AO LONGO DO COMPRIMENTO DO ADERENTE INFERIOR.	88
FIGURA 108 - SENTIDO DO EFEITO BIAS DA MALHA AO LONGO DA ESPESSURA DO ADERENTE INFERIOR E SUPERIOR.	88
FIGURA 109 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS AOS MODELOS NUMÉRICOS NO SOFTWARE ABAQUS®.	88
FIGURA 110 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T (ARALDITE® AV138).	92
FIGURA 111 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T (ARALDITE® 2015).....	93
FIGURA 112 - TENSÕES Σ_Y PARA JUNTA EM T (SIKAFORCE® 7752).....	93
FIGURA 113 - TENSÕES T_{xy} PARA JUNTA EM T (ARALDITE® AV138).....	94

FIGURA 114 - TENSÕES T_{xy} PARA JUNTA EM T (ARALDITE® 2015).	94
FIGURA 115 - TENSÕES T_{xy} PARA JUNTA EM T (SIKAFORCE® 7752).	95
FIGURA 116 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 NO INSTANTE DE $P_{MÁX}$, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{p2}	96
FIGURA 117 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 QUANDO É ATINGIDO SDEG=1 PELA PRIMEIRA VEZ EM QUALQUER ZONA DA JUNTA, PARA OS DIFERENTES VALORES DE T_{p2}	97
FIGURA 118 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS ADESIVAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=1$ MM.	98
FIGURA 119 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=2$ MM.	98
FIGURA 120 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=3$ MM.	99
FIGURA 121 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 E $T_{p2}=4$ MM.	99
FIGURA 122 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 NO INSTANTE DE $P_{MÁX}$, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{p2}	100
FIGURA 123 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS 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}	101
FIGURA 124 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=1$ MM.	102
FIGURA 125 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=2$ MM.	102
FIGURA 126 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=3$ MM.	103
FIGURA 127 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 E $T_{p2}=4$ MM.	103
FIGURA 128 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NO INSTANTE DE $P_{MÁX}$, PARA DIFERENTES VALORES DE T_{p2}	104
FIGURA 129 - VARIÁVEL DE DANO SDEG PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 QUANDO É ATINGIDO SDEG=1 PELA PRIMEIRA VEZ EM QUALQUER ZONA DA JUNTA, PARA OS DIFERENTES VALORES DE T_{p2}	105
FIGURA 130 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{p2}=1$ MM.	106
FIGURA 131 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{p2}=2$ MM.	106
FIGURA 132 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{p2}=3$ MM.	107
FIGURA 133 - EVOLUÇÃO DA VARIÁVEL DE DANO COM $\Delta/\Delta_{PMÁX}$ PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 E $T_{p2}=4$ MM.	107

FIGURA 134 - CURVAS P- Δ NUMÉRICAS PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 EM FUNÇÃO DE T_{P2} (CRITÉRIO DE DANO QUADS).....	109
FIGURA 135 - CURVAS P- Δ NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 PARA VALOR DE $T_{P2}=1$ MM.	109
FIGURA 136 - CURVAS P- Δ NUMÉRICAS PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 EM FUNÇÃO DE T_{P2} (CRITÉRIO DE DANO QUADS).....	110
FIGURA 137 - CURVAS P- Δ NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 PARA VALOR DE $T_{P2}=1$ MM.	110
FIGURA 138 - CURVAS P- Δ NUMÉRICAS PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 EM FUNÇÃO DE T_{P2} (CRITÉRIO DE DANO QUADS).....	111
FIGURA 139 - CURVAS P- Δ NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 PARA VALOR DE $T_{P2}=1$ MM.	111
FIGURA 140 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 EM FUNÇÃO DE T_{P2}	112
FIGURA 141 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015 EM FUNÇÃO DE T_{P2}	113
FIGURA 142 - VALORES DE $P_{MÁX}$ POR MDC E PREVISÕES NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 EM FUNÇÃO DE T_{P2}	114
FIGURA 143 - PARÂMETROS PARA LEI DE PROPAGAÇÃO TRIANGULAR E EXPONENCIAL.	115
FIGURA 144 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.	116
FIGURA 145 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.	117
FIGURA 146 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.	118
FIGURA 147 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E VALORES NUMÉRICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO MDC E MEFX PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.	119
FIGURA 148 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E VALORES NUMÉRICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO MDC E MEFX PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.	120
FIGURA 149 - VALORES DE $P_{MÁX}$ EXPERIMENTAIS E VALORES NUMÉRICOS OBTIDOS ATRAVÉS DO MDC E MEFX PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.	121

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 - DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS [3, 4].	7
TABELA 2 - ADESIVOS E SUAS APLICAÇÕES [15].	28
TABELA 3 - VALORES OBTIDOS DE G_{IC} DE QUATRO PROVETES PARA OS MÉTODOS CCM E CBT (ADAPTADO DE [43]).	41
TABELA 4 - VALORES DE DELAMINAÇÃO, DESLOCAMENTO E CARGA (ADAPTADO DE [46]).	48
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 [1].	65
TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 [1, 55].	66
TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [30, 57].	68
TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [30].	69
TABELA 9 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [61].	71
TABELA 10 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA GEOMETRIA DA JUNTA [1].	72
TABELA 11 – PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO UTILIZADAS NO SOFTWARE ABAQUS®.	85
TABELA 12 - REFINAMENTO UTILIZADO NA ANÁLISE DE PREVISÃO DE RESISTÊNCIA E NA ANÁLISE DE TENSÕES, EM FUNÇÃO DE T_{P2} .	86
TABELA 13 - DEFINIÇÃO DE INCREMENTAÇÃO NO ABAQUS®.	89
TABELA 14 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE MEFX PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.	90
TABELA 15 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE MEFX PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015.	91
TABELA 16 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE MEFX PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.	91
TABELA 17 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ DAS PREVISÕES NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.	112
TABELA 18 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ DAS PREVISÕES NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.	113
TABELA 19 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ DAS PREVISÕES NUMÉRICAS (CRITÉRIOS DE DANO DO MEFX) PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.	114
TABELA 20 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ DAS PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.	116
TABELA 21 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ DAS PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.	117
TABELA 22 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ DAS PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.	118
TABELA 23 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.	119
TABELA 24 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ PARA JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.	120
TABELA 25 - VARIAÇÃO PERCENTUAL DE $P_{MÁX}$ PARA JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.	121

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	Etapas do processo de ligação.....	10
2.1.3	Aplicações comuns das juntas adesivas	11
2.1.3.1	Indústria Aeronáutica	11
2.1.3.2	Indústria automóvel.....	12
2.1.3.3	Indústria naval	14
2.1.3.4	Indústria aeroespacial.....	15
2.1.3.5	Indústria do calçado.....	15
2.1.4	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	16
2.1.4.1	Esforços.....	16
2.1.4.2	Modos de rotura	18
2.1.5	Configurações possíveis de junta	20
2.1.5.1	Juntas topo a topo	20
2.1.5.2	Juntas de sobreposição.....	20
2.1.5.3	Juntas de tira.....	21
2.1.5.4	Juntas de reforço	22
2.1.5.5	Juntas cilíndricas	22
2.1.5.6	Juntas em T	23
2.1.5.7	Juntas de canto	23
2.1.6	Descrição geral dos adesivos.....	24
2.1.6.1	Classificação.....	24

2.1.6.2	Composição	26
2.1.6.3	Modos de endurecimento	27
2.1.7	Adesivos estruturais	29
2.1.7.1	Adesivos de epóxido	29
2.1.7.2	Adesivos fenólicos.....	30
2.1.7.3	Adesivos acrílicos	31
2.1.7.4	Adesivos de poliimida (adesivos para altas temperaturas)	32
2.1.7.5	Adesivos de poliuretano	32
2.2	Previsão de resistência de juntas adesivas	32
2.2.1	Modelos analíticos	32
2.2.2	Métodos numéricos	33
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	34
2.2.2.2	Mecânica da fratura.....	34
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	36
2.2.2.4	Mecânica do dano.....	37
2.2.2.5	Método de Elementos Finitos eXtendido	38
2.2.2.5.1	Formulação	38
2.2.2.5.2	Critérios de início de dano	39
2.2.2.5.3	Aplicação a juntas adesivas.....	40
2.3	Juntas adesivas sujeitas a esforços normais	48
2.3.1	Ensaio de caracterização de adesivos ao arrancamento	48
2.3.1.1	Ensaio de arrancamento a 180°	49
2.3.1.2	Ensaio de rolete flutuante	49
2.3.1.3	Ensaio de climbing	50
2.3.1.4	Ensaio de arrancamento em junta tipo T.....	50
2.3.2	Juntas em L.....	52
2.3.3	Juntas em T.....	54
2.3.4	Outros tipos de juntas	58
3	DESENVOLVIMENTO	65
3.1	Trabalho experimental	65
3.1.1	Materiais utilizados	65

3.1.1.1	Substratos	65
3.1.1.2	Adesivos.....	66
3.1.1.2.1	Araldite® AV138.....	67
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	68
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	70
3.1.2	Geometria das juntas	71
3.1.3	Processo de fabrico	72
3.1.4	Ensaio das juntas	75
3.1.5	Resultados obtidos	76
3.1.5.1	Curvas P- δ	76
3.1.5.1.1	Araldite® AV138	76
3.1.5.1.2	Araldite® 2015.....	79
3.1.5.2	Modos de rotura	81
3.1.5.3	Resistência das juntas.....	83
3.2	Trabalho numérico.....	85
3.2.1	Condições da análise numérica	85
3.2.2	Modelo de dano utilizado.....	89
3.2.2.1	Determinação das propriedades de dano	90
3.2.2.1.1	Araldite® AV138	90
3.2.2.1.2	Araldite® 2015.....	90
3.2.2.1.3	Sikaforce® 7752.....	91
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	92
3.2.3.1	Tensões de arrancamento	92
3.2.3.2	Tensões de corte.....	94
3.2.4	Estudo da variável de dano	95
3.2.4.1	Araldite® AV138.....	96
3.2.4.2	Araldite® 2015	100
3.2.4.3	Sikaforce® 7752	104
3.2.5	Previsão da resistência	108
3.2.5.1	Estudo do efeito do critério de iniciação	108
3.2.5.2	Estudo do efeito da lei de propagação	115
3.2.6	Comparação dos resultados obtidos com MDC	119

3.2.7	Análise dos resultados obtidos.....	121
4	CONCLUSÕES	127
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	133

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A utilização de ligações adesivas tem vindo a verificar um grande aumento na indústria devido às múltiplas vantagens que apresentam, quando comparadas com outros métodos de ligação mais tradicionais, tais como distribuição uniforme de tensões, facilidade de fabricação, possibilidade de união de diferentes materiais, custo inferior e redução do peso. Por outro lado, apresentam desvantagens, como preparação cuidada das superfícies, dificuldades no controlo de qualidade e segurança e baixa resistência ao arrancamento. A resistência de uma ligação adesiva depende de diversos fatores, tais como as propriedades do adesivo e substrato, geometria da junta, entre outros. As indústrias automóvel, naval, aeroespacial, calçado e aeronáutica, aliadas aos bons resultados que se têm obtido na aplicação de juntas adesivas, têm contribuído bastante para uma maior divulgação e consequente utilização de juntas adesivas.

No que se refere aos adesivos, estes podem apresentar diversos comportamentos desde rígido e frágil (Araldite® AV138), moderadamente dúctil e menor resistência, mas com maior flexibilidade (Araldite® 2015), adesivos de elevada resistência, flexibilidade e ductilidade (Sikaforce® 7752). A resistência mecânica e a ductilidade são duas das principais características que influenciam a resistência de juntas adesivas. A resistência do adesivo é um fator bastante importante para a transmissão de esforços elevados entre os aderentes, enquanto a ductilidade tem elevada importância para a absorção de tensões de pico localizadas nas extremidades das juntas, de forma a evitar a rotura prematura destas.

O aumento do número de ferramentas com capacidade para realizar a previsão da resistência das juntas tornou-se num aspeto necessário e fundamental. Um bom exemplo dessas ferramentas é o Método de Elementos Finitos (MEF), uma vez que este permite uma poupança de tempo de análise da resistência e na seleção do adesivo mais apropriado para uma determinada aplicação. O MEFX torna-se um método com capacidade de realizar a previsão do comportamento da junta, apesar de ainda não ser um método completamente estudado para a aplicação a juntas adesivas. A validação deste método para a previsão de juntas adesivas é elevada importância para a indústria relacionada com adesivos.

1.2 Objetivos

A presente dissertação consiste numa simulação numérica pelo MEFX de juntas em T com aderentes de uma liga de alumínio, unidas por três adesivos distintos, o Araldite® AV138, o Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752. A simulação numérica será efetuada com o auxílio do *software* ABAQUS®, onde será feita a análise dos modelos com diferentes configurações de junta, ao nível da espessura dos aderentes de alumínio em formato de L (1, 2, 3 e 4 mm) e os três tipos de adesivos referidos anteriormente.

Este trabalho tem como principais objetivos avaliar se o MEFX é uma técnica de previsão de resistência de juntas adesivas adequada e com um índice de fiabilidade aceitável, estudar o comportamento dos três tipos de adesivos utilizados e analisar a variação de resistência consoante as diferentes configurações de junta. Na parte referente à análise numérica apresenta-se um estudo das distribuições de tensões de arrancamento e de corte, um estudo da variável de dano e a previsão de resistência. Os resultados numéricos obtidos neste trabalho são comparados com os valores experimentais e numéricos por modelos de dano coesivo (MDC) obtidos no trabalho de Carneiro [1].

1.3 Organização do relatório

Esta dissertação foi organizada por quatro capítulos.

No primeiro capítulo é apresentada a contextualização do tema abordado, seguida dos objetivos propostos para o trabalho e da apresentação da organização do relatório.

O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica, onde são descritos os conceitos necessários e de maior importância sobre ligações adesivas. Neste capítulo é realizada uma análise das juntas adesivas, onde são demonstradas vantagens e desvantagens das ligações adesivas, seguida de várias aplicações destas nas mais variadas indústrias. São também apresentados os esforços e modos de rotura que podem existir em juntas adesivas, bem como as possíveis configurações destas mesmas juntas. Neste capítulo são ainda referenciados os vários exemplos de adesivos estruturais conhecidos. Além disso, são apresentados os principais métodos analíticos e numéricos de previsão de resistência de juntas adesivas. Por fim, são descritos os tipos de ensaios de caracterização ao arrancamento a que as juntas adesivas podem estar sujeitas e é realizada uma referência a estudos anteriormente realizados sobre juntas em L, juntas em T e outros tipos de juntas em que o arrancamento é preponderante (por exemplo: juntas *T-Peel*).

No subcapítulo 3.1 é feita a apresentação e descrição detalhada do trabalho experimental realizado num trabalho anterior [1]. Neste subcapítulo são referenciados

todos os materiais constituintes das juntas e respectivas propriedades e é apresentado o processo de fabrico das juntas, bem como as condições de teste das juntas e respetiva geometria. Finalmente são apresentados os resultados experimentais relativos à resistência das juntas.

O subcapítulo 3.2 corresponde ao estudo numérico por MEFX, onde são referenciadas as condições de análise impostas no *software* ABAQUS®, o modelo de dano utilizando critérios baseados em tensões e deformações, a análise de tensões nas juntas, análise da variável de dano, e a previsão da resistência das juntas, onde são apresentadas as curvas P - δ , efetuados estudos do efeito do critério de iniciação e da lei de propagação e é realizada uma comparação com resultados obtidos anteriormente por MDC. Por fim, é feita uma análise detalhada dos resultados obtidos.

No quarto e último capítulo são apresentadas as conclusões finais desta dissertação, bem como apresentadas algumas propostas de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

A utilização de ligações adesivas tem vindo a aumentar ao longo do tempo. Apesar desse grande aumento, as ligações aparafusadas e as ligações soldadas continuam a ser as ligações mais requisitadas. Nas primeiras ligações adesivas, eram usados adesivos naturais, tais como adesivos baseados em caseína (material polimérico derivado do leite). A sua boa funcionalidade foi posta em causa aquando do uso destes adesivos em ambientes húmidos, uma vez que se tornavam fracos e produziam odores pouco agradáveis devido à absorção de água [2].

Tabela 1 - Desenvolvimento histórico de adesivos estruturais [3, 4].

Ano	Adesivo
1910	Fenol-formaldeído
	Éster de celulose
	Resina alquídica
1920	Borracha <i>cyclized</i> em adesivos
	Policloropreno
	Adesivos derivados da soja
1930	Ureia-formaldeído
	Fenólicos-nitrilo
1940	Fenólicos-vinilo
	Acrílicos
	Poliuretanos
	Epóxidos
1950	Cianocrilatos
	Anaeróbicos
	Poliimida
1960	<i>Polibenzimidazole</i>
	<i>Poliquinoxaline</i>
1970	Acrílicos (segunda geração)

No ano de 1754, em Inglaterra, foi atribuída a primeira patente a um adesivo. Tratava-se de uma cola elaborada a partir de peixe, sendo que esta técnica já tinha sido utilizada pelos Egípcios, quinze séculos antes de Jesus Cristo. Os Egípcios criavam colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores para serem utilizadas em aplicações de madeira e pedra. As patentes que foram criadas, após a primeira patente, foram atribuídas a colas baseadas em borracha natural, caseína, leite e goma [2]. Na Tabela 1 está representada a linha cronológica do desenvolvimento de adesivos desde de 1910 até 1970.

As exigências tecnológicas da primeira e segunda guerra mundial originaram a utilização de ligações adesivas. Na segunda guerra mundial foi utilizada uma resina de ureia-formaldeído para colar a estrutura de madeira do caça britânico *Mosquito*. Estes adesivos eram muito frágeis e de Bruyne e seus colegas, nos anos 40, alteraram a composição química dos adesivos adicionando polímeros com boa tenacidade, através de uma combinação de polivinilo formal com resol fenólico. Esta invenção foi responsável por um grande desenvolvimento na tecnologia dos adesivos, permitindo a ligação de materiais diferentes com sucesso [2, 5].

Atualmente, os adesivos são aplicados em situações de elevada importância e responsabilidade, em indústrias onde o rigor e a segurança são pilares essenciais. A indústria automóvel, aeroespacial, aeronáutica, naval e construção civil são bons exemplos da aplicação de adesivos.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Designa-se junta adesiva ao conjunto formado pelo adesivo, substratos ou aderentes, primários (caso seja aplicável), interfases e as interfaces (Figura 1 e Figura 2). O adesivo é o material polimérico que, quando aplicado em superfícies, pode ligá-las e resistir à sua separação. O substrato é o material a ser ligado, e que após essa mesma ligação é designado por aderente. A região que se situa entre o adesivo e o aderente designa-se por interfase. É uma fina região na zona de contacto adesivo-aderente. A interfase apresenta características químicas e físicas diferentes do aderente ou da parte maciça do adesivo e a sua natureza é fator importante e crítico na determinação das propriedades e qualidade da ligação adesiva. A interface, diferente de interfase, está contida na interfase e é o plano de contacto entre as superfícies dos dois materiais. Outra designação atribuída à interface, é de camada limite (*boundary layer*), e nela podem estar contidas várias interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o aderente. Por último, o primário é o revestimento que por vezes se aplica na superfície dos substratos antes da aplicação de um adesivo para melhorar a adesão ou proteger as superfícies até à aplicação do adesivo [5].

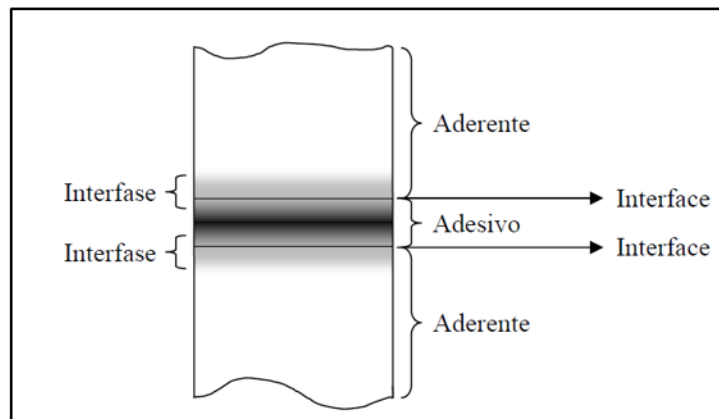


Figura 1 - Junta adesiva e zonas constituintes (adesivo-aderente-interfase-interface) [5].

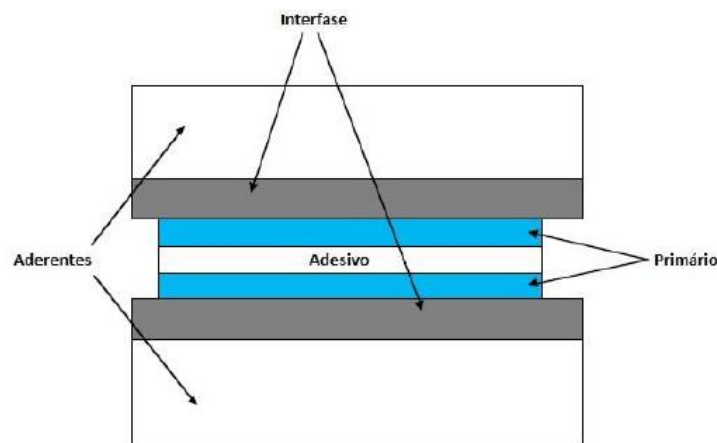


Figura 2 - Junta adesiva e zonas constituintes (adesivo-aderente-interfase-primário) [6].

As ligações adesivas apresentam muitas vantagens, quando comparadas com outros métodos mais tradicionais tais como ligações aparafusadas, soldadura, rebites, brasagem e outros tipos de ligações mecânicas. As vantagens que mais se destacam são [3, 5]:

- Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, o que favorece a transmissão de carga e permite uma maior rigidez, possibilitando assim uma redução de peso, menor custo e melhor resistência à fadiga;
- Amortecimento de vibrações, o que permite, ainda que de uma forma parcial, que as tensões sejam absorvidas;
- Torna o projeto mais flexível, permitindo o uso de novos conceitos e materiais;
- Possibilita a ligação de materiais diferentes, tanto ao nível da composição química como propriedades físicas;
- Permite a ligação de chapas de espessura fina com um grau de eficiência elevado;

- Permite ter estruturas com contornos regulares, evitando assim furos provenientes de rebites ou parafusos, e marcas originadas pela soldadura;
- Garante um contacto contínuo entre as superfícies ligadas;
- Permite ligar componentes com todas as formas e espessuras;
- As temperaturas de processamento não afetam as propriedades dos materiais;
- Geralmente mais económico do que as ligações aparafusadas;
- Minimizar ou prevenir corrosão galvânica entre metais dissimilares.

Por outro lado, as juntas apresentam desvantagens [3, 5]:

- Devem ser utilizadas geometrias que evitem tensões localizadas e que permitam uma distribuição uniforme de tensões. Caso as tensões não estejam posicionadas perpendicularmente ao adesivo, podem-se originar esforços de clivagem e arrancamento;
- Resistência limitada a condições extremas, como calor e humidade;
- Necessita de preparação cuidada das superfícies através desengorduramento com solvente, ataques químicos, abrasão mecânica, entre outros;
- É necessário um projeto de ligação que permita eliminar forças de arrancamento, clivagem e impacto;
- Dificuldades no controlo de qualidade e segurança;
- A ligação não é normalmente realizada instantaneamente e por isso é necessária a utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição durante o processo de cura;
- Inexistência de um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura;
- Os adesivos são normalmente curados a elevadas temperaturas e por isso é necessária a utilização de forno ou prensa.

2.1.2 Etapas do processo de ligação

O processo de ligação de juntas adesivas é constituído pelas seguintes etapas [5, 7]:

1. **Seleção do adesivo:** deve obedecer a determinados parâmetros consoante a aplicação desejada, onde se destacam com maior importância a resistência mecânica, a temperatura de serviço, o meio ambiente e o método de aplicação;
2. **Projeto da junta:** as propriedades do adesivo devem ser conhecidas para permitir que o projeto da junta garanta que o nível de tensão no adesivo não exceda a sua resistência;
3. **Preparação da superfície:** deve ser preparada de forma a garantir uma boa adesão inicial e em serviço. É uma etapa muito importante para que a colagem dos substratos seja bem executada. Tem como principal finalidade a formação

de superfícies resistentes, resultando numa junta estável, resistente e com índice de molhabilidade bastante elevado;

4. **Fabrico da junta:** envolve a aplicação do adesivo sobre os substratos a colar e a cura do adesivo sob determinadas condições de temperatura e de pressão. É necessário garantir que os substratos a ligar estejam fixos, visto que o adesivo é aplicado no estado líquido;
5. **Controlo do processo:** deve-se realizar ensaios destrutivos e não destrutivos ao longo do tempo para garantir que a junta tenha uma resistência satisfatória tanto a curto como a longo prazo.

Os adesivos têm de ter capacidade de resistência ao ambiente operacional onde estão implementados, e as suas propriedades dependem muito da forma como são aplicados e processados. Os adesivos devem possuir as seguintes características, consideradas fundamentais para um futuro sucesso da adesão entre o adesivo e os substratos utilizados no projeto [3]:

- Ter um comportamento líquido, durante a formação da ligação, de modo a ser realizada uma boa molhagem;
- Formar uma ligação entre superfícies através da adesão;
- Preencher fendas e cavidades;
- Ter a capacidade de endurecer, de forma a suportar cargas constantes ou variáveis durante o seu tempo de utilização;
- Transmitir e distribuir cargas aos componentes de uma estrutura.

2.1.3 Aplicações comuns das juntas adesivas

As juntas adesivas são uma tecnologia bastante utilizada em diversas indústrias, tais como aeronáutica, naval, automóvel, construção, têxtil, aeroespacial, móveis, entre outras. Nos subcapítulos seguintes estão mencionadas as indústrias e produtos dessas mesmas indústrias, onde as juntas adesivas são aplicadas.

2.1.3.1 Indústria Aeronáutica

As ligações adesivas são utilizadas há décadas na indústria aeronáutica. Um exemplo de aeronave que utiliza adesivos é o *Havilland Comet*. As aeronaves possuem muitos locais onde são aplicadas ligações adesivas. A Figura 3 apresenta as zonas do avião *Havilland Comet* onde são aplicadas juntas adesivas. Um outro exemplo de aplicação de ligações adesivas na indústria aeronáutica está representado na Figura 4, tratando-se da estrutura da cauda do Boeing 777, composta por diversos materiais ligados com adesivos.

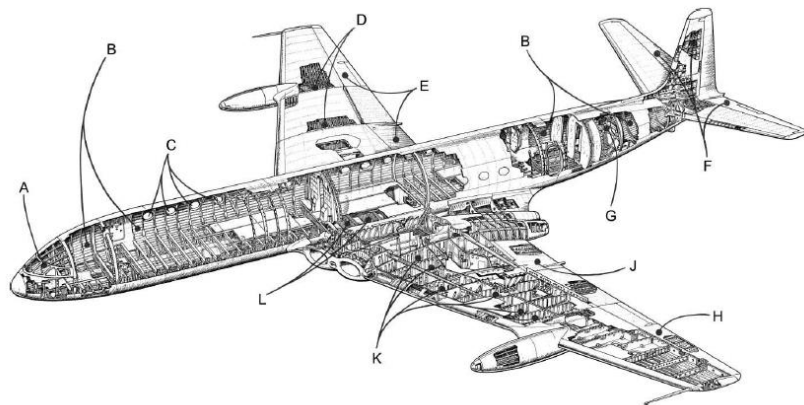


Figura 3 - Zonas do avião *Havilland Comet* onde se utilizam juntas adesivas [8].

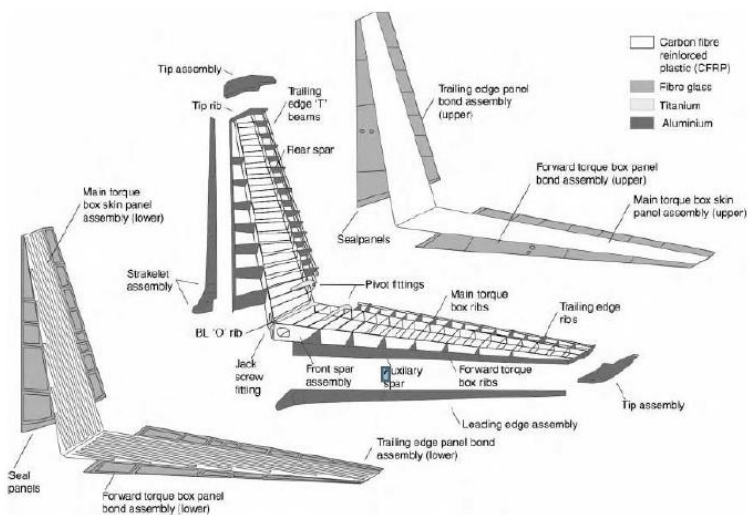


Figura 4 - Estrutura principal da cauda do Boeing 777 composta por diferentes componentes ligados por adesivos [9].

2.1.3.2 Indústria automóvel

O uso de adesivos nesta indústria iniciou-se há décadas com a colagem de para-brisas. Posteriormente, os adesivos passaram a ser utilizados no preenchimento de falhas nas soldaduras de forma a prevenir a corrosão. O aumento da resistência dos adesivos permitiu uma utilização maior nas estruturas dos automóveis, o que possibilita a otimização da rigidez à torção. No ramo automóvel existe uma tendência para projetos de estruturas mais leves através da combinação de materiais, como aços de elevada rigidez, alumínio, ligas de magnésio, estruturas *sandwich* e plásticos reforçados a fibras (FRP), o que promove a utilização de adesivos estruturais pelos fabricantes de automóveis.

Os resultados do uso de adesivos num automóvel são [10]:

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

A Figura 5 apresenta diversos locais onde são aplicados adesivos. A Figura 6 apresenta aplicações de adesivos na estrutura em bruto do automóvel (*body in white*).



Figura 5 - Locais de aplicação de adesivos num automóvel [10].

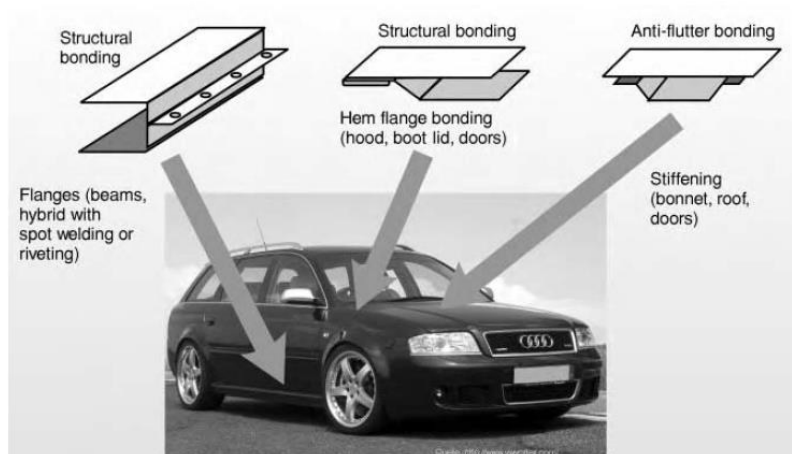


Figura 6 - Diferentes aplicações no *body in white* [10].

2.1.3.3 Indústria naval

Na indústria naval, existe uma grande necessidade de utilizar ligações adesivas. Este tipo de ligações é utilizado para ligar partes que críticas de uma estrutura ou para funcionar como um vedante com uma função estrutural secundária. O tempo de vida dos navios e barcos é de várias décadas e qualquer falha que possa ocorrer numa ligação da estrutura pode ser um fator que ponha a segurança das pessoas em risco [11].

Os materiais usados nos cascos e convés de navios e barcos são [11]:

- FRP com uma matriz termoendurecível (poliéster ou epóxico);
- Ligas de alumínio especializadas para aplicações marinhas (Ex: AlMg3);
- Aços (AISI 304 e AISI 316).

A Figura 7 representa alguns tipos de ligações efetuadas em barcos e a Figura 8 (a) representa a utilização de um adesivo na ligação de contraplacado num barco. A Figura 8 (b) mostra a aplicação de um adesivo no processo de construção de um barco.

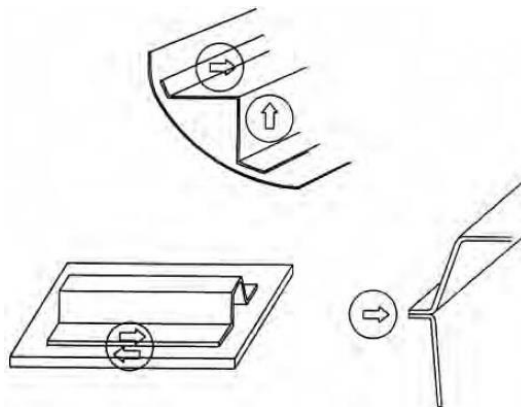


Figura 7 - Juntas em barcos com as respectivas solicitações [11].

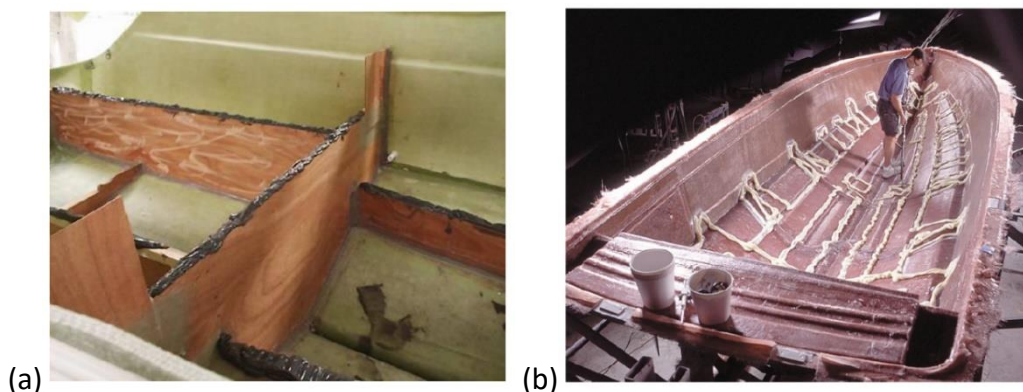


Figura 8 – Contraplacado ligado com adesivo num barco (a) e aplicação de adesivo na construção de um barco (b) [12].

2.1.3.4 Indústria aeroespacial

Nesta indústria existem duas classes de juntas adesivas: estrutural e de selagem. As juntas estruturais, com adesivo epóxico, fenólico ou acrílico, têm como objetivo transferir as cargas entre os membros das estruturas, enquanto as juntas de selagem protegem as interfaces de corrosão [9]. Um exemplo da aplicação de ligações adesivas na indústria aeroespacial está representado na Figura 9 e trata-se de um satélite de telecomunicações, onde os componentes são ligados por adesivos.

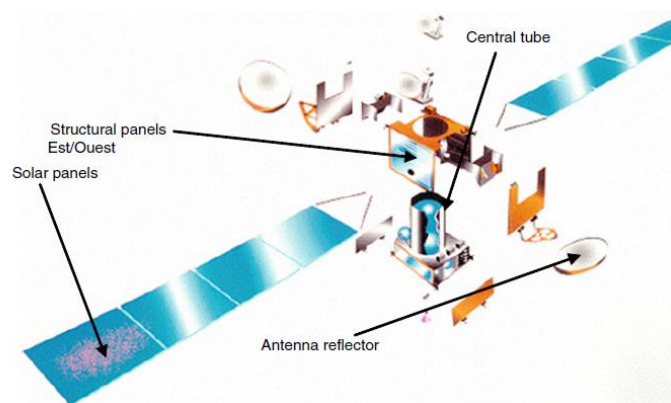


Figura 9 - Locais de aplicação de adesivos num satélite de telecomunicações [12].

2.1.3.5 Indústria do calçado

As ligações adesivas têm uma grande utilização na indústria do calçado, e são uma alternativa à costura e à utilização de pregos ou grampos. As principais vantagens, derivadas do uso de adesivos, são: juntas mais homogêneas e flexíveis, melhor distribuição de cargas ao longo da junta e uma melhoria em termos estéticos. Por outro lado, também apresentam limitações, como por exemplo a necessidade de controlo bastante rigoroso em todas as etapas de conceção das juntas de modo a prevenir problemas de adesão [13]. A Figura 10 e a Figura 11 são bons exemplos no que se refere aos locais de aplicação de adesivo e dos constituintes a serem unidos.

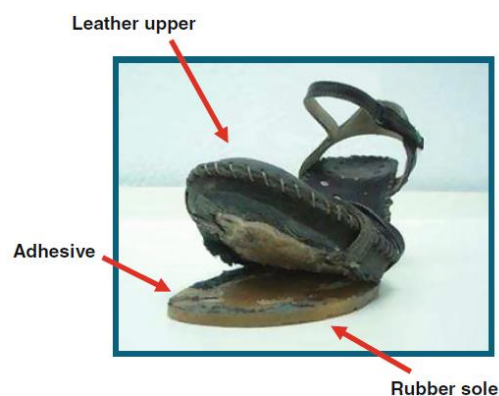


Figura 10 - Aplicação de adesivo em calçado [13].

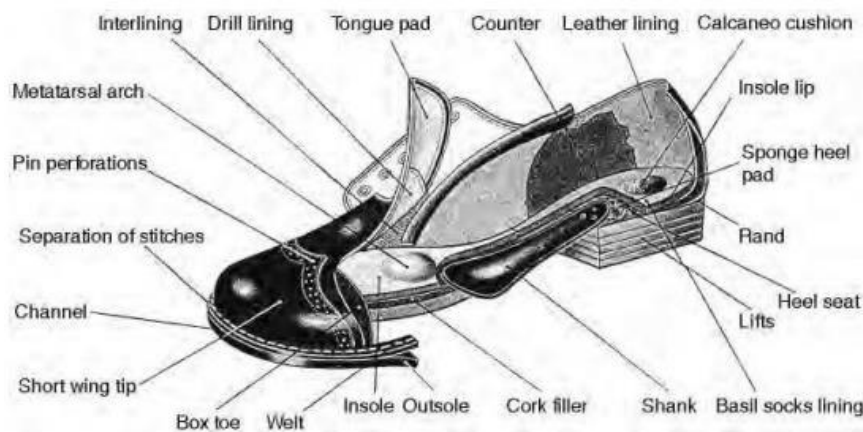


Figura 11 - Esquema dos constituintes a unir num sapato [1].

2.1.4 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

2.1.4.1 Esforços

Existem essencialmente cinco tipos de esforços a que as ligações podem estar sujeitas: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento.

- **Tração:** as tensões tração desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de colagem (Figura 12). Neste caso a distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é uniforme. Para este tipo de solicitações devem-se projetar as juntas com guias de modo a garantir um carregamento axial contínuo, e os substratos devem ser rígidos de forma a garantir uma distribuição de tensões uniforme [5, 14].

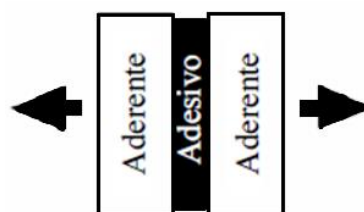


Figura 12 - Esforço de tração [5].

- **Compressão:** os esforços de compressão tendem a comprimir um aderente contra o outro (Figura 13). A distribuição da tensão pelo adesivo é constante, tal como acontece para a tração. Na realidade uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo. Neste tipo de solicitação, as juntas devem ser projetadas com guias de forma a garantir um carregamento axial contínuo [5, 14].

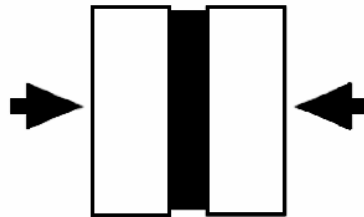


Figura 13 - Esforço de compressão [5].

- **Corte:** as tensões de corte aparecem quando forças que atuam no plano do adesivo tendem a separar os substratos (Figura 14). As juntas são geralmente mais resistentes quando são solicitadas ao corte, porque toda a área de adesivo contribui e é relativamente fácil manter os substratos alinhados. As extremidades da junta estão sujeitas a um maior nível de tensões do que a parte central da ligação. Este fenómeno ocorre devido ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente, desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da sobreposição. Este efeito torna-se mais marcante quando existe um aumento do comprimento de sobreposição. Por este motivo, a largura da sobreposição tem um maior efeito na resistência da junta do que o seu comprimento (Figura 15) [5].



Figura 14 - Esforço de corte [5].

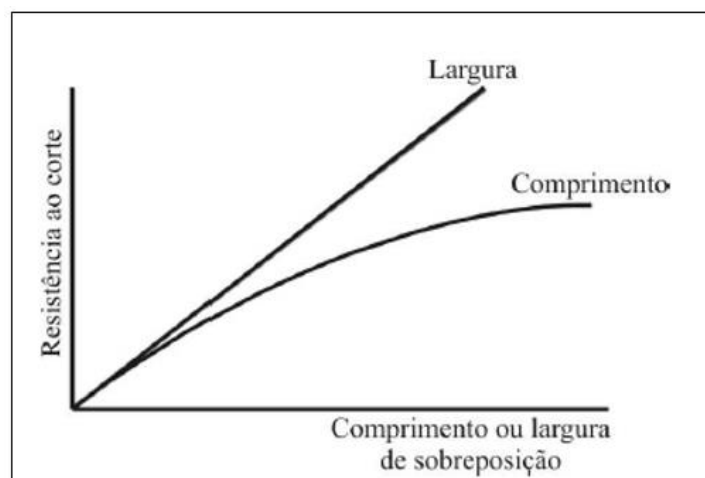


Figura 15 - Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte [15].

- **Clivagem:** as tensões de clivagem e de arrancamento são o principal inimigo das juntas adesivas. A clivagem pode ser definida como a tensão que ocorre quando as forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos (Figura 16) [16]. As juntas sob clivagem são muito menos resistentes do que aquelas sujeitas a corte porque a tensão está concentrada numa área muito pequena [5].



Figura 16 - Esforço de clivagem [5].

- **Arrancamento:** as tensões de arrancamento são semelhantes às de clivagem, mas aplicam-se ao caso onde um ou ambos os substratos são flexíveis (Figura 17) [16]. Por consequência, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem. Tal como na clivagem, a junta sob arrancamento possui uma resistência inferior quando comparada com juntas sujeitas a corte, devido à tensão estar concentrada numa área mais reduzida [5].

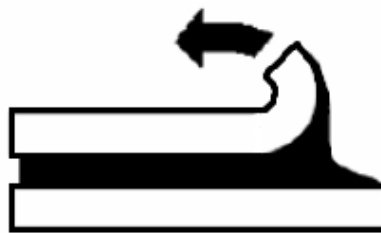


Figura 17 - Esforço de arrancamento [5].

2.1.4.2 Modos de rotura

As juntas adesivas estão sujeitas aos diferentes tipos de carregamento, mencionados anteriormente, podendo sofrer diversos tipos de rotura. De um modo geral, podem-se distinguir os modos de rotura em quatro tipos, rotura coesiva (no interior do adesivo), rotura adesiva (na interface entre o substrato e o adesivo), rotura de um dos substratos e rotura mista (mistura de rotura coesiva com rotura adesiva) [5, 15].

- **Rotura coesiva:** ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo (Figura 18). Neste caso,

ambas superfícies de rotura estão cobertas por adesivo. Este é o tipo de rotura desejado, quando é pretendido que esta rotura ocorra apenas no adesivo, de forma a não danificar os aderentes.



Figura 18 - Rotura coesiva [6].

- **Rotura adesiva:** ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Após a rotura verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo (Figura 19). A superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo. Na rotura adesiva os aderentes não são danificados, e este tipo de rotura ocorre nos casos em que a preparação dos aderentes não foi a mais adequada. Outro fator que pode ser determinante para que este tipo de rotura é a presença de contaminantes nos aderentes na altura da colagem.



Figura 19 - Rotura adesiva [6].

Rotura do substrato: ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais resistente do que o próprio substrato, o que origina a rotura total ou parcial do substrato, mas mantendo-se a camada de adesivo intacta (Figura 20).



Figura 20 - Rotura do substrato [6].

- **Rotura mista:** consiste numa combinação de rotura adesiva e rotura coesiva (Figura 21). Os motivos para a ocorrência deste modo de rotura devem-se à limpeza ineficaz numa determinada região das superfícies a ligar e também falta de homogeneização na mistura do adesivo. Neste tipo de rotura os aderentes não são danificados.



Figura 21 - Rotura mista [6].

2.1.5 Configurações possíveis de junta

As juntas adesivas podem apresentar diversas configurações. Dessas mesmas configurações destacam-se a junta de sobreposição simples, a junta de sobreposição dupla, as juntas com chanfro e as juntas em degraus. Numa junta considerada ideal, o adesivo deve ser solicitado na direção segundo a qual resiste mais. Durante a execução da junta deve-se privilegiar uma configuração em que a solitação ocorra na direção mais favorável para a junta. No entanto, existem algumas geometrias que podem ser consideradas impraticáveis e com um custo bastante elevado. A pessoa responsável pelo projeto da junta deve ter em consideração todos os aspetos referidos anteriormente, de modo a ter maior qualidade no projeto da junta [3, 5].

2.1.5.1 Juntas topo a topo

É a junta mais simples de fabricar. Este tipo de juntas adesivas não suporta esforços de flexão pois estes induzem clivagem no adesivo. Na Figura 22 estão demonstradas várias formas de reduzir a possibilidade de ocorrer clivagem na junta. As juntas macho-fêmea são as mais eficientes porque são auto-alinhantes, funcionando como um reservatório para o adesivo [3, 5].

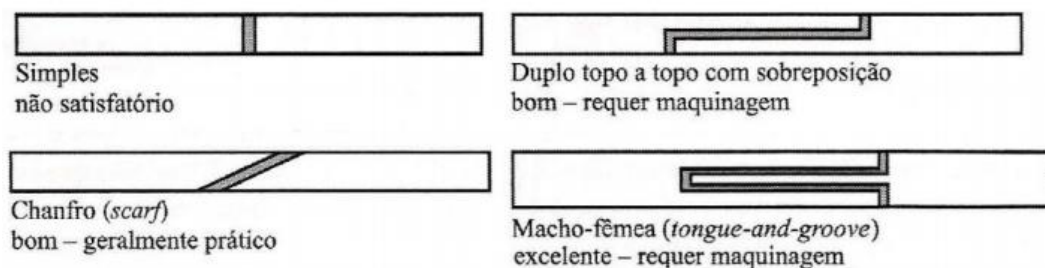


Figura 22 - Juntas topo a topo [1].

2.1.5.2 Juntas de sobreposição

As juntas de sobreposição simples (JSS) são o tipo de junta mais comum devido à facilidade de fabricação e ao facto de o adesivo ser solicitado maioritariamente ao corte. Por outro lado, as forças transmitidas não são colineares e isso origina tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição. Na Figura 23 estão demonstradas várias formas de reduzir esse efeito. A junta de ressalto é a solução mais simples para se obter o alinhamento das forças. Em termos de fabrico, normalmente o substrato é

facilmente dobrado. A junta de sobreposição dupla (JSD) é de fabricação mais complexa, mas permite diminuir o momento-fletor. As juntas com chanfro apresentam um grau de eficiência maior quando comparadas com as JSS e permitem uma diminuição das concentrações de tensão [3, 5].

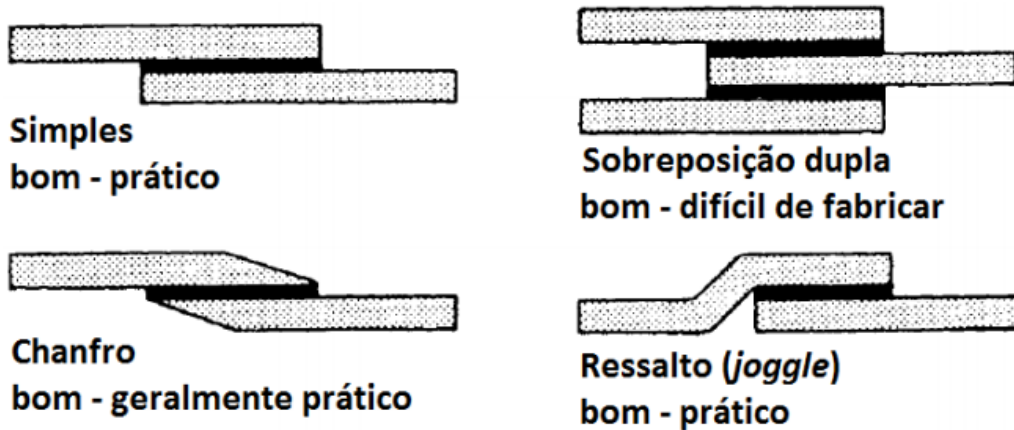


Figura 23 - Juntas de sobreposição [1].

2.1.5.3 Juntas de tira

Na Figura 24 são apresentadas várias configurações de juntas de tira. Tal como na junta de sobreposição simples, a junta de tira simples está sujeita a esforços de arrancamento. A junta com duas tiras permite reduzir o momento-fletor, sendo a mais aconselhável. As tiras com chanfro e as juntas macho-fêmea são as que apresentam maior eficiência, mas necessitam de maquinagem [3, 5].

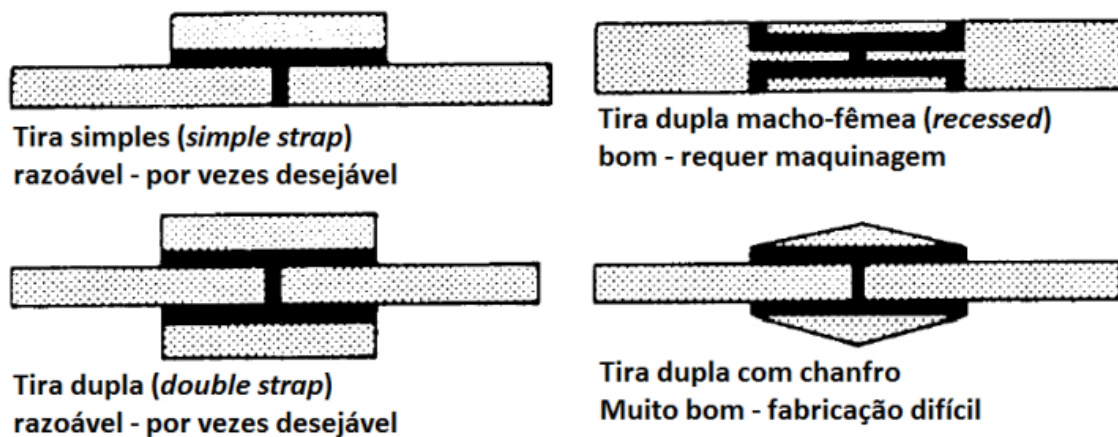


Figura 24 - Juntas de tira [1].

2.1.5.4 Juntas de reforço

A solicitação de juntas obtidas por colagem de substratos finos a componentes espessos origina tensões de arrancamento elevadas. Existem várias soluções para diminuir estas tensões de arrancamento. É uma prática muito comum efetuar a colagem de reforços sobre substratos finos, tendo como objetivo o aumento da rigidez. Nestes casos, as solicitações de flexão podem induzir clivagem no adesivo. Através do aumento da área, do aumento da flexibilidade do rebordo e do aumento da rigidez da base, consegue-se melhorar a resistência às forças de flexão [3, 5]. Na Figura 25 (a) são apresentadas soluções alternativas que permitem a diminuição das tensões de arrancamento (σ_y). Na Figura 25 (b) são apresentadas algumas soluções que permitem diminuir a clivagem de juntas reforçadas.

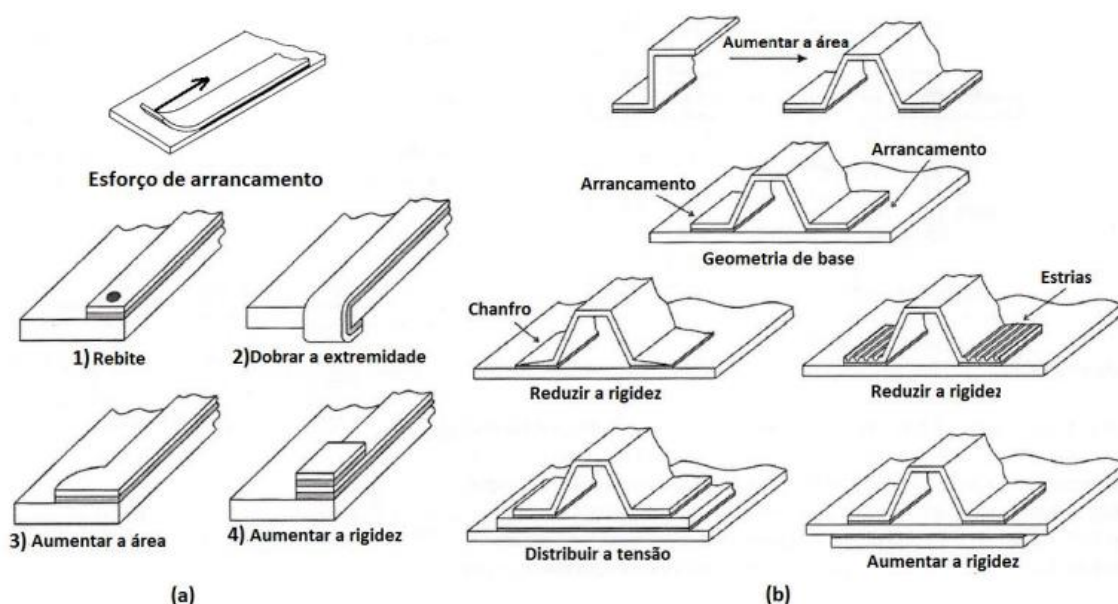


Figura 25 - Configurações de reforços para minimizar: arrancamento (a) e clivagem (b) [5].

2.1.5.5 Juntas cilíndricas

As juntas cilíndricas são normalmente aplicadas na ligação de varões e tubos. São mais vantajosas quando comparadas às juntas topo a topo, devido ao facto de se conseguir uma maior área resistente e uma diminuição do efeito de arrancamento. Neste caso, utilizam-se chanfros, canais e ressaltos, o que facilita a montagem dos componentes. O difícil acesso ao seu interior complica a sua inspeção. A utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para permitir a saída do ar durante a montagem são alguns exemplos de métodos que permitem assegurar que o adesivo preencha toda a cavidade. A execução da maioria destas juntas necessita de maquinaria, provocando assim um aumento do custo do processo de fabrico [3, 5, 17]. Na Figura 26 são apresentadas várias configurações de juntas cilíndricas.

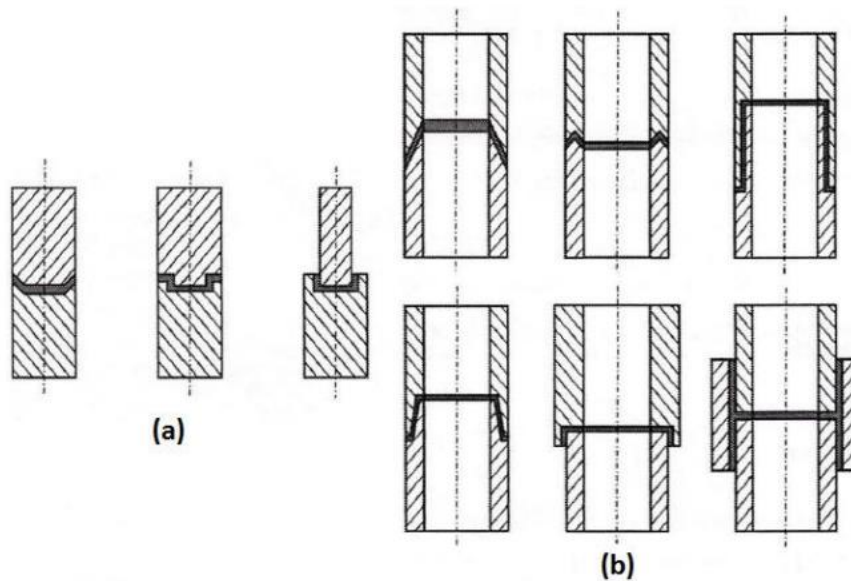


Figura 26 - Juntas cilíndricas: juntas para varões (a) e juntas para tubos (b) [5].

2.1.5.6 Juntas em T

Estas juntas são caracterizadas por terem uma orientação perpendicular dos dois componentes (ângulo de 90°). O carregamento pode ser no plano da chapa (N) ou transverso (T). Tem como objetivo principal minimizar as forças de arrancamento e maximizar as solicitações de corte no adesivo [3, 5]. Na Figura 27 são apresentados alguns exemplos de juntas em T.

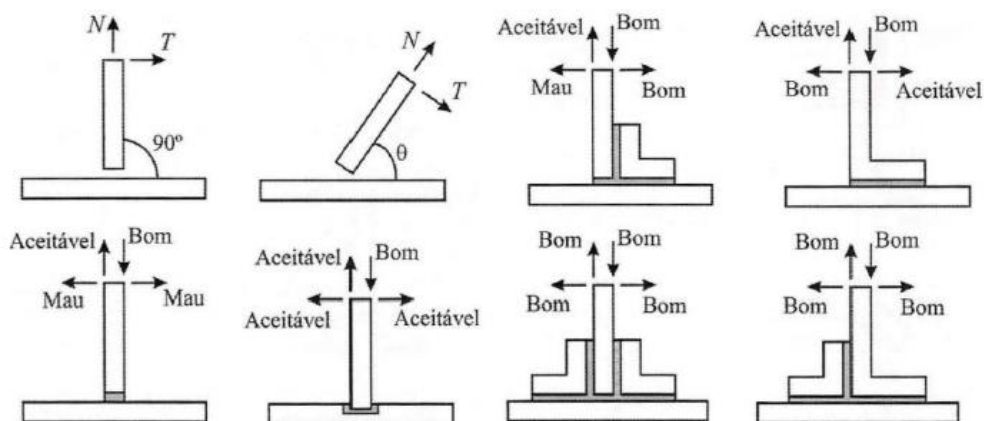


Figura 27 - Juntas em T [5].

2.1.5.7 Juntas de canto

Semelhantes às juntas em T, as juntas de canto diferenciam-se na ligação efetuada nas extremidades dos aderentes [3, 5]. Na Figura 28 estão representadas soluções utilizadas de modo a diminuir o efeito de arrancamento no adesivo.

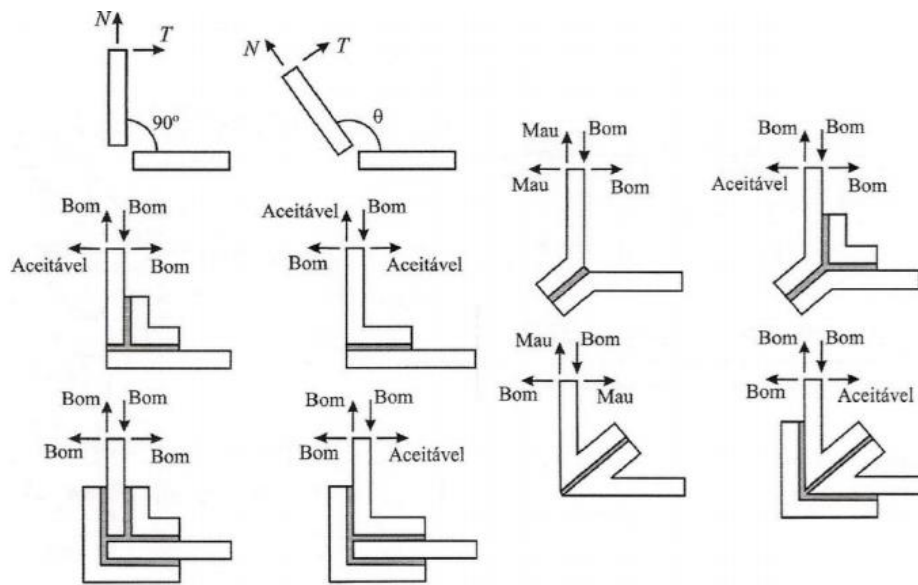


Figura 28 - Juntas de canto [1].

2.1.6 Descrição geral dos adesivos

2.1.6.1 Classificação

Existem vários métodos de classificar os adesivos. O método mais usado é a distinção entre um adesivo fabricado a partir de produtos que são sintéticos ou naturais. Os adesivos sintéticos são fabricados a partir de materiais feitos pelo homem, tais como os polímeros. Por outro lado, os adesivos naturais são fabricados a partir de materiais naturais como subprodutos animais ou de agricultura. Atualmente, a indústria usa outros métodos para classificar os adesivos de acordo com os seus objetivos. Essa classificação é feita por vários métodos, tais como função, composição química, aplicação, entre outros [5].

- **Função:** os adesivos são definidos através da função como estruturais e não estruturais. Os adesivos estruturais são caracterizados por serem aqueles que possuem uma resistência ao corte mínima de 5-10 MPa e uma boa resistência aos meios ambientes mais comuns. No que se refere aos adesivos não estruturais, estes não têm como finalidade resistir a cargas substanciais, limitando-se a manter em posição materiais de baixo peso. Os adesivos não estruturais são frequentemente usados para ligações temporárias, fluem sobre cargas moderadas e degradam-se muitas vezes após exposições prolongadas ao meio ambiente [5].
- **Composição química:** através da composição química os adesivos são descritos como sendo termoendurecíveis, termoplásticos, elastômeros ou misturas desses. Normalmente, a composição química está subdividida em tipos de

famílias dentro de cada grupo, como epóxidos, uretanos, neoprenos e cianoacrilatos. Entende-se por [5]:

- Adesivos termoendurecíveis: são materiais que não podem ser aquecidos e amolecidos repetidamente após a sua cura inicial. Não são materiais fundíveis e insolúveis, e degradam-se ao elevar a temperatura, tornando-se fracos devido à oxidação ou quebras nas cadeias moleculares;
 - Adesivos termoplásticos: são adesivos que se diferenciam dos termoendurecíveis apenas no facto de não curarem ou endurecerem com calor. São polímeros sólidos que amolecem ou fundem quando aquecidos;
 - Adesivos elastoméricos: são baseados em polímeros elastoméricos sintéticos ou naturais que possuem uma grande tenacidade e capacidade de deformação. São capazes de elevados graus de deformação quando tracionados ou comprimidos, retomando o seu comprimento inicial após a remoção da carga;
 - Adesivos híbridos: são feitos através da combinação de resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastoméricas num único adesivo. Geralmente, resinas rígidas e frágeis para altas temperaturas são combinadas com um adesivo elastomérico ou termoplástico flexível e tenaz, de modo a melhorar a resistência ao arrancamento e a capacidade de absorver energia.
- **Modos de aplicação ou reação**: outra forma de classificar os adesivos é através do modo como reagem ou solidificam. Este processo de solidificação pode ocorrer pelos seguintes métodos [5]:
 - Por reação química (incluindo reação com um endurecedor ou reação com energia exterior tal como calor, radiação, catalisador de superfície, etc.);
 - Por perda de solvente;
 - Por perda de água;
 - Por arrefecimento a partir do estado fundido.

O modo como ocorre o processo de cura de um adesivo pode ser um fator determinante no processo de seleção.

- **Forma física**: é outra forma muito utilizada para classificar os adesivos. Os adesivos podem apresentar-se de diversas formas, sendo as mais comuns [5]:
 - Várias partes em solvente (líquido ou pasta);
 - Uma parte sem solvente (líquido ou pasta);
 - Uma parte em solução (líquido);
 - Sólido (pó, fita, filme, etc.).

Alguns tipos de adesivos estão disponíveis sob várias formas com variações mínimas de composição.

- **Custo:** de um modo geral, o custo não está definido como critério de classificação, no entanto é um fator importante e que se deve ter em consideração na seleção de um adesivo e do respetivo processo. Desta forma, o custo pode ser considerado um método de classificação indireto. Adesivos para fins muito especiais, tais como os adesivos resistentes a meios ambientes agressivos, são mais caros do que os adesivos para uso geral. O preço de um adesivo pode variar de valores na casa das dezenas até valores na casa das centenas de euros por quilograma para adesivos resistentes a altas temperaturas [5].
- **Aplicação:** os adesivos são muitas vezes classificados em função do método como são aplicados. Dependendo da viscosidade, os adesivos líquidos podem ser considerados como de spray, de escova ou de espátula. As pastas são consideradas como de extrusão. Os adesivos podem ainda ser aplicados por seringas, pistolas de mástique ou equipamento pneumático [5].

2.1.6.2 *Composição*

Geralmente, não é necessário conhecer totalmente os ingredientes que entram na composição de um adesivo. É possível selecionar um adesivo comercial tendo em conta as suas propriedades funcionais, o procedimento de cura e outras informações relevantes que sejam dadas pelo fornecedor. No entanto, é muito importante estar-se sensibilizado para o tipo de componentes que constituem o adesivo. Os vários componentes que constituem a formulação do adesivo são [5]:

- **Base ou ligante:** é o principal componente do adesivo e é responsável pelas características principais do adesivo, tais como molhagem, propriedades de cura, resistência mecânica e resistência ao meio ambiente;
- **Catalisador ou endurecedor:** substância adicionada a um adesivo para promover a reação química, participando nela. Provocam a cura reagindo com a resina base e são especificamente escolhidos para reagir com certas resinas;
- **Solventes:** são necessários para facilitar a aplicação do adesivo com um pincel ou spray. Os solventes também são usados para diminuir a viscosidade da resina base, facilitando assim a sua mistura com outros componentes;
- **Diluentes:** é um ingrediente que é adicionado à resina base para diminuir a sua concentração. Os diluentes são usados para diminuir a viscosidade e para melhorar o processamento;
- **Distensores:** são substâncias que possuem algumas propriedades dos adesivos e que são adicionados para reduzir a concentração de outros componentes e o custo total da formulação;

- **Cargas:** são substâncias que, não tendo as mesmas propriedades dos adesivos, são adicionadas para melhorar determinadas propriedades de serviço como a resistência, a durabilidade entre outras;
- **Suportes ou reforços:** tecido ou papel usado para suportar o adesivo semicurado, de modo a ter uma fita ou um filme. No caso das fitas sensíveis à pressão, o suporte é a folha na qual é aplicado o adesivo. No caso de filmes, o suporte é geralmente poroso e o adesivo satura o suporte;
- **Plastificantes:** são incorporados num adesivo com vista a melhorar a flexibilidade e/ou a extensão, podendo também reduzir a viscosidade do estado fundido de adesivos termo fusíveis;
- **Tackifiers:** incluem hidrocarbonetos alifáticos e aromáticos, terpenos e colofónias de ésteres. São muito úteis no caso dos adesivos sensíveis à pressão ou outros adesivos que necessitam de elevada viscosidade para ajudar na etapa de montagem;
- **Espessantes e agentes tixotrópicos:** são usados para manter uma espessura razoável através do ajuste da viscosidade. As cargas tixotrópicas são materiais que permitem aumentar a viscosidade do adesivo quando está livre;
- **Formadores de filme:** permitem diminuir a temperatura de transição vítrea, sem diminuir, de forma substancial, a resistência do filme;
- **Agentes antioxidantes, anti hidrólise e anti fungos e estabilizadores:** têm como principal característica atrasar os processos de envelhecimento, mesmo antes de serem utilizados na produção;
- **Sabões, detergentes e agentes de molhagem:** são necessários para estabilizar a emulsão ou latéx. Alguns aditivos são também incorporados sob a forma de formulações aquosas, que permitem estabilidade quando o adesivo é sujeito a ciclos repetidos de congelamento/descongelamento.

2.1.6.3 Modos de endurecimento

O modo como um adesivo cura ou endurece pode ser classificado da seguinte forma [5]:

- **Adesivos que curam por reação química:**
 - Duas partes;
 - Uma parte, cura por catalisador ou endurecedor;
 - Cura com a humidade;
 - Cura por radiação (luz, feixe de eletrões, etc.);
 - Catálise pelo substrato;
 - Forma sólida (fita, filme, pó, etc.).
- **Adesivos que endurecem por perda de solvente ou água:**
 - Contacto;
 - Adesivos sensíveis à pressão;
 - Adesivos reativáveis;

- Adesivos resinosos.
- **Adesivos que endurecem por arrefecimento a partir do estado fundido:**
 - Termo fusíveis;
 - Termo fusíveis à pressão e termoendurecíveis.

Na Tabela 2 são apresentados os tipos de adesivos e respectivos aderentes e aplicações.

Tabela 2 - Adesivos e suas aplicações [15].

Tipo	Adesivos	Aderentes	Aplicações
Naturais	- Amido - Dextrina - Colas de peixe - Bálsamo de Canadá -Etc.	-Papel - Cortiça - Têxteis - Madeira - Alguns plásticos e metais	- Aplicações domésticas - Embalagem
Termoplásticos	-Derivados de celulose -Acetato de polivinilo -Álcool de polivinilo - Polietileno - Polipropileno - Poliamidas - Acrílicos	- Metais - Madeira - Pele - Papel - Têxteis	- Ligações sujeitas a solicitações reduzidas
Termoendurecíveis	- Ureia e Melamina - Formaldeídos - Poliésteres - Epóxidos - Fenólicos	- Metais - Madeira - Cerâmicos - Vidro	- Ligações estruturais sujeitas a níveis significativos de tensões em metal ou madeira
Elastómeros	- Borracha natural - Borracha sintética - Poliuretano - Policloropreno - Nitrilo - Butadieno-Estireno	-Plásticos - Borrachas - Tecidos - Pele	- Juntas flexíveis sujeitas a solicitações reduzidas
Adesivos de dois polímeros	- Fenólicos-Nitrilo - Fenólicos-Neopreno - Fenólicos-Vinílicos - Epóxido-Poliamida - Epóxido-Polisulfido - Epóxido-Fenólico - Epóxido-Poliuretano - Epóxido-Silicone - Epóxido-Nitrilo	- Metais - Cerâmicos - Vidro - Resinas termoendurecíveis	- Estruturas sujeitas a tensões elevadas e condições ambientais de serviço desfavoráveis

2.1.7 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são adesivos que são utilizados em aplicações permanentes e que necessitam de elevada resistência. Em muitos casos, constituem o principal meio de ligação em aplicações estruturais. De um modo geral, são termoendurecíveis e que necessitam de reticulação química com a adição de um endurecedor e/ou fornecimento de calor. A Figura 29 representa a classificação dos adesivos de acordo com a sua função.

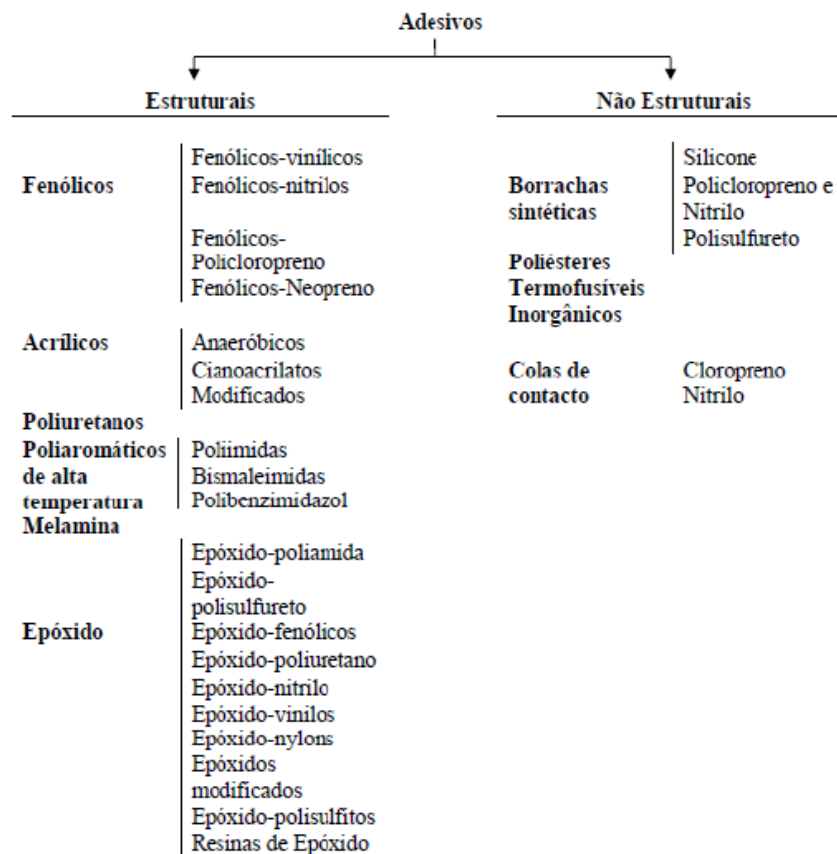


Figura 29 - Classificação dos adesivos segundo a sua função [5].

2.1.7.1 Adesivos de epóxido

Os adesivos de epóxido têm uma vasta aplicação no mercado aeronáutico e automóvel. Possuem uma boa resistência química e mecânica, não têm evaporação de voláteis durante a cura, possuem baixa contração e, caso as juntas estejam bem projetadas e bem fabricadas, formam ligações extremamente fortes e com um elevado nível de duração com a maioria dos materiais. Estes adesivos correspondem à família de adesivos mais multifacetada, visto que possuem uma boa aderência com muitos tipos de substratos, à exceção dos polímeros e dos elastómeros que têm uma energia de superfície muito baixa, embora estes possam ser facilmente modificados para ultrapassar esta limitação [5].

Os adesivos epóxicos estão disponíveis de diversas formas, desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. A sua comercialização é efetuada sob a forma de um só componente ou de vários componentes (normalmente dois componentes). Apresentam um leque de aplicações variado, podendo ser aplicados na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica [5].

Relativamente ao processo de cura, os adesivos epóxicos não necessitam de aplicação de qualquer tipo de pressão, sendo que o posicionamento correto das peças a unir é suficiente. As propriedades dos adesivos epóxicos podem sofrer alterações através de adição outras resinas (poliamida, polisulfito, fenólico, etc.) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo). De seguida estão descritos diferentes tipos de adesivos epóxicos, após essas mesmas alterações [5, 15]:

- **Epóxico-poliamida:** a resina de poliamida tem a função de endurecedor e de agente flexível. O adesivo será mais flexível quanto maior for a razão entre a quantidade de resina poliamida e resina epóxico. O processo de cura ocorre de forma lenta e à temperatura ambiente (12 a 16 horas). Estes adesivos apresentam uma maior resistência ao arrancamento e uma maior flexibilidade;
- **Epóxico-polisulfito:** apresentam boa resistência química, boa resistência ao impacto, com tendência para aplicações que estejam sujeitas a choques e vibrações. São recomendados para ligar materiais com coeficientes de dilatação térmica diferentes;
- **Epóxico-fenólicos:** são produzidos através da mistura de resinas de epóxico com resinas fenólicas o que permite melhorar a resistência a altas temperaturas, mantendo uma boa estabilidade e resistência ao corte para temperaturas da ordem dos 200°C. No entanto, apresentam limitações, tal como baixa resistência ao arrancamento e ao impacto e custo elevado;
- **Epóxico-vinílico:** algumas resinas vinílicas melhoram as resistências ao impacto e ao arrancamento, mas por outro lado prejudicam a resistência a altas temperaturas;
- **Epóxico-poliuretano:** têm como objetivo obter um adesivo com uma resistência ao arrancamento idêntica à dos adesivos epóxico-poliamida, e também boa resistência a choques e vibrações. Apresentam boa resistência à fadiga;
- **Epóxico-nitrilo:** são adesivos que possuem uma boa resistência ao arrancamento e que podem ser utilizados a temperaturas entre -55 e 120°C. Têm grande aplicação na construção e manutenção de aviões comerciais a jato.

2.1.7.2 Adesivos fenólicos

São adesivos que apresentam um baixo custo, boa resistência mecânica e boa resistência a elevadas temperaturas e a agentes ambientais. Os adesivos fenólicos apresentam como principais desvantagens a baixa resistência à corrosão por solventes,

baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. O processo de cura deve ser realizado a temperaturas elevadas, e utilizados aderentes porosos ou aplicada pressão durante a cura, de modo a evitar a retenção de vapor de água na junta e aparecimento de vazios na zona de colagem. São adesivos muito utilizados pela indústria, sendo comercializados de diversas formas [5, 15]:

- **Fenólicos-vinílicos:** possuem uma temperatura máxima de utilização de 130°C e apresentam elevada resistência ao corte e ao arrancamento, sendo que a resistência à fadiga é considerada boa devido às propriedades plastificantes da fase vinílica. Estes adesivos são geralmente apresentados na forma de dois componentes ou como emulsões e filmes;
- **Fenólicos com nitrilo:** são adesivos que, ao nível das características mecânicas, são ligeiramente inferiores aos adesivos fenólicos-vinílicos, mas que apresentam uma melhor estabilidade térmica. Apresentam-se sob a forma de filme ou de líquido mono-componente;
- **Fenólicos com cloropreno:** podem ser utilizados a baixa temperatura (até aos 50°C negativos) e têm maior sensibilidade aos agentes químicos, comparativamente aos adesivos mencionados anteriormente.

2.1.7.3 Adesivos acrílicos

Adesivos com grande aplicação na indústria mecânica. No grupo dos adesivos acrílicos, incluem-se os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados [5, 15].

- **Anaeróbicos:** são adesivos que têm uma grande aplicação na indústria mecânica, mais especificamente em peças estriadas e roscadas, fixação de rolamentos e na ligação de peças de geometria cilíndrica. Apresentam uma resistência bastante variável, podendo ser da ordem dos adesivos epóxidos, apresentam ainda uma boa resistência a solventes e a sua temperatura máxima de utilização situa-se próxima dos 150°C;
- **Cianoacrilatos:** permitem colagens bastante rápidas, apresentando-se sob a forma de líquidos mono-componente ou na versão tixotrópica sem solventes. Apresentam excelente resistência à tração, mas baixa resistência ao arrancamento, custo elevado e comportamento frágil. São adequados para colar pequenas partes de plásticos e borrachas;
- **Acrílicos modificados e metacrilatos:** possuem elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento e ao impacto e possuem uma grande variedade de aplicações. Como desvantagens destacam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada inflamabilidade.

2.1.7.4 Adesivos de poliimida (adesivos para altas temperaturas)

São os adesivos que têm maior estabilidade a altas temperaturas (superior a 200°C). Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes, sendo caracterizados por um elevado preço e difícil manuseamento. São geralmente utilizados em aplicações de baixo peso sujeitas a temperaturas mais elevadas, como chips e eletroímãs, entre outros componentes eletrônicos. Necessitam de elevados tempos de cura, com ciclos de pressão e temperatura elevada, o que torna a sua aplicação muito complexa. A maior vantagem destes adesivos é uma maior retenção de resistência a longo prazo a temperaturas elevadas [5, 15].

2.1.7.5 Adesivos de poliuretano

Os adesivos de poliuretano resultam da reação de um poliol com um isocianato, apresentando-se sob a forma de dois componentes. O processo de cura é lento à temperatura ambiente, mas estes adesivos podem ser elaborados de forma a apresentarem tempos de cura mais elevados. Podem apresentar uma resistência de rotura ao corte no valor de 20 MPa, o que permite a sua utilização em aplicações estruturais. São adesivos que apresentam várias vantagens, tais como [5, 15]:

- Bom comportamento a baixas temperaturas;
- Boa resistência ao arrancamento;
- Boa flexibilidade;
- Boa resistência à abrasão, a choques e vibrações;
- Boa tenacidade;
- Bom comportamento quando sujeitos a intempéries.

2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

Quando surgiram, as técnicas de previsão de resistência de ligações adesivas eram sobretudo utilizadas em estruturas de maior responsabilidade, sendo de elevada importância um rigoroso e correto dimensionamento. No caso geral, as juntas adesivas eram sobredimensionadas, resultante da falta de informação e conhecimento sobre modelos de previsão, para além de os adesivos não serem tão confiáveis como o são nos dias de hoje. Porém, com o passar dos anos foram surgindo técnicas analíticas e numéricas para a previsão de resistência de juntas cada vez mais refinadas, o que permitiu uma maior difusão destas ferramentas.

2.2.1 Modelos analíticos

Os métodos analíticos surgiram por Volkersen [18] e Goland e Reissner [19], que foram os primeiros a obter distribuições de tensões em estruturas adesivas. O primeiro modelo

analítico para juntas de distribuição simples, denominado modelo de Volkersen, foi desenvolvido nos anos 30. No entanto, neste modelo era feita uma aproximação um pouco grosseira, pois se consideram os materiais como sendo totalmente elásticos e que o adesivo apenas sofre deformação ao corte, o que não corresponde à realidade. Os modelos analíticos adquirem maior complexidade no caso de o adesivo apresentar também deformação plástica e na ligação de aderentes de diferentes tipos. Atualmente, devido às simplificações das solicitações, da geometria, das condições fronteira e da utilização de critérios de tensões ou deformações, os estudos analíticos são normalmente substituídos por análises numéricas [20].

2.2.2 Métodos numéricos

Os métodos numéricos permitem fazer uma estimativa da resistência das ligações adesivas através do MEF, no qual as tensões ou deformações obtidas são utilizadas em critérios de rotura adequados. Uma das grandes vantagens do MEF é a possibilidade de permitir a modelação de geometrias e configurações de grande complexidade. De facto, é possível modelar com grande precisão todos os detalhes da geometria devido ao avanço computacional e do desenho assistido por computador (CAD). Adotando uma abordagem da mecânica contínua, a previsão da resistência das juntas adesivas é uma técnica que requer critérios de rotura e distribuições de tensões adequadas. Contudo, os critérios de tensões apresentam algumas limitações, pois nas extremidades da sobreposição observam-se singularidades de tensões que, de acordo com uma análise linear elástica, pode definir-se como um ponto no qual se obtém um valor infinito de tensão. Deste modo, os resultados obtidos estão sempre dependentes da malha utilizada durante a simulação numérica [15, 21].

No caso da mecânica do dano, são utilizadas práticas de modelação avançadas que se encontram muito difundidas atualmente e que transmitem uma representação mais fiel do processo de rotura. Outro aspeto muito importante é o facto destes critérios possibilitarem a análise completa das estruturas até à sua rotura.

Outro método que pode ser utilizado para a previsão da resistência de juntas, quer pelo fator de densidade de tensão ou por métodos energéticos, como a técnica de fecho virtual da fenda, é a mecânica da fratura.

No caso dos MDC a modelação de dano recorre à utilização de elementos finitos convencionais nas zonas do modelo em que não é esperado dano e à inserção de elementos coesivos nos planos em que se pretende promover a propagação do dano.

Por fim, o MEFX, representa uma alternativa para a modelação de propagação de fendas que utiliza funções de forma enriquecidas para uma melhor representação do campo de deslocamento descontínuo.

De seguida são abordadas as diferentes técnicas numéricas para previsão da resistência de juntas adesivas:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fratura;
- Mecânica do dano;
- Modelos de dano coesivo;
- Método dos Elementos Finitos eXtendido.

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

Esta técnica consiste na obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou energia das juntas através de métodos analíticos ou numéricos. Numa fase posterior, é efetuada a avaliação da resistência da junta através de uma comparação entre as tensões máximas obtidas e critérios de tensões ou deformações [22].

Após a implementação do MEF em programas computacionais, a mecânica dos meios contínuos foi rapidamente aplicada à análise de juntas adesivas. No entanto, esta técnica apresenta uma limitação relevante, dado que as estruturas ligadas com adesivos apresentam tensões localizadas nas extremidades das regiões de sobreposição motivadas pelas arestas vivas. Durante a análise pelo MEF, a tensão nessas zonas aumenta com o refinamento da malha, impossibilitando a convergência, tornando assim as previsões dependentes da malha [20].

Existem vários critérios, para além da tensão principal máxima, para avaliar a resistência das juntas, tal como o critério de von Mises que afirma, que a resistência do material está dependente de tensões multiaxiais quando a energia de distorção atinge valores críticos [23].

2.2.2.2 Mecânica da fratura

Na mecânica dos meios contínuos é assumido que a estrutura e os materiais são contínuas, o que não corresponde à realidade de alguns casos. No entanto, a análise de estruturas compostas por dois materiais com cantos reentrantes ou com defeitos através desta técnica não é a mais recomendada. Na verdade, a mecânica dos meios contínuos não fornece solução para o estado de tensão neste tipo de situações. Sendo as fendas os defeitos mais comuns em estruturas, tornou-se necessária a utilização do método da mecânica da fratura. Este método pode ser aplicado ao estudo do comportamento de estruturas que contêm defeitos, tais como fendas. No entanto, não é obrigatório as estruturas já possuírem fendas. Estas fendas podem surgir através de concentrações de tensões, normalmente situadas em furos, entalhes ou pontos com materiais distintos. Existem dois tipos diferentes de concentrações de tensões: as concentrações finitas, tais como furos e concentrações de tensões infinitas,

normalmente denominadas por singularidades de tensões, que ocorrem em fendas ou cantos reentrantes [24].

Na Figura 30 é possível verificar o estado de tensão na zona envolvente de uma fenda presente numa placa de dimensões infinitas, que é considerado pela mecânica dos meios contínuos.

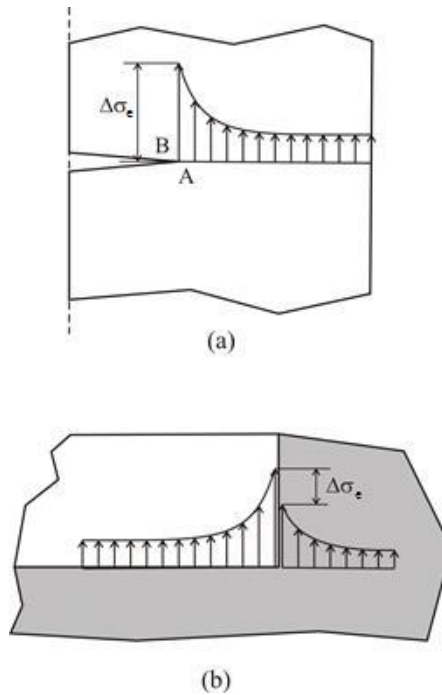


Figura 30 - Descontinuidade de tensões: na proximidade de uma ponta de fenda (a) e num canto reentrante (b) [22].

Na extremidade da fenda (ponto A), fisicamente as tensões σ_y devem ser finitas (ao invés de infinitas como previsto pelos métodos analíticos). No entanto, as mesmas tensões na zona da fenda e longe da sua extremidade (ponto B) são nulas devido à existência de superfícies livres. Este acontecimento provoca uma descontinuidade de tensões σ_y no ponto A, a menos que σ_y tenha valor 0 (zero). Uma distribuição de tensões deste tipo não pode ser tratada pela mecânica dos meios contínuos, uma vez que este método necessita que as tensões sejam contínuas.

Existem três modos distintos de propagação das fendas, como se pode observar na Figura 31. No Modo I é o modo de abertura e os Modos II e III são os modos de corte. No Modo II, ocorre o movimento das superfícies da fenda de forma perpendicular à frente da fenda, ao passo que no Modo III o movimento é paralelo à frente da fenda. Regra geral, a rotura em juntas adesivas ocorre em modo misto devido às propriedades diferentes dos adesivos à tração e ao corte, e também pelo efeito de restrição às deformações do adesivo induzido pelos substratos.

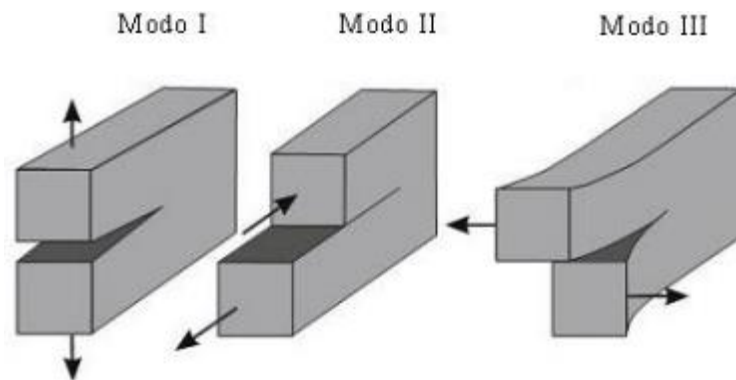


Figura 31 - Modos de propagação de uma fenda [25].

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

A implementação em computador dos métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) obteve um grande sucesso há algumas décadas, mas estes métodos estavam limitados a plastificação reduzida na extremidade da fenda. 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. São baseados em elementos coesivos que ligam elementos sólidos de estruturas bidimensionais (2D) e tridimensionais (3D). Os MDC foram testados e otimizados para efetuar simulações da iniciação e propagação de fendas em problemas de rotura coesiva e interfacial ou delaminação em compósitos. A implementação dos MDC pode ser realizada em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos [27]. Estes elementos podem, com grande facilidade, ser incorporados numa análise de MEF 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 através da 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 estas possam ser definidas de forma diferente para uma representação mais precisa do comportamento dos materiais [30]. Na Figura 32 estão representados três tipos de lei que podem ser utilizadas em elementos coesivos: triangular, trapezoidal e linear-exponencial. As leis coesivas mais comuns no âmbito das ligações adesivas são as leis triangular e trapezoidal [22].

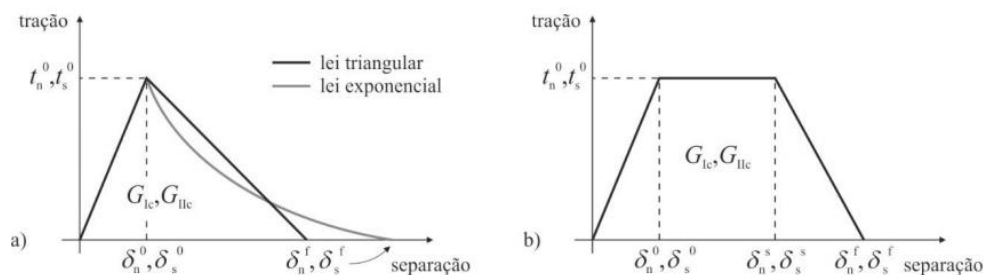


Figura 32 - Leis coesivas: triangular e exponencial (a) e trapezoidal (b) [22].

As leis dos MDC são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos, e são capazes de ligar nós de elementos que sejam de materiais diferentes ou de diferentes camadas em compósitos, e podem ser aplicadas diretamente entre dois materiais sem contacto para simular uma camada fina, por exemplo para simular uma ligação adesiva. Os MDC, através das leis de tração-deslocamento relativo, proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um dado percurso, não valorizando fenómenos microscópicos que possam estar presentes no início da fenda. A propagação das fendas é baseada nas energias de rotura. Os MDC permitem modelar a evolução da resistência e amaciamento até à rotura, permitindo assim ter em conta a degradação progressiva das propriedades do material [29].

2.2.2.4 Mecânica do dano

A simulação através do MEF, baseando-se na utilização de elementos de sólidos contínuos, prevê de forma errada que os elementos sofrem plasticidade generalizada sem evolução do dano, enquanto os modelos da mecânica do dano podem induzir dano nos elementos pela redução de esforços transmitidos. Como resultado, torna-se então possível a simulação gradual do dano e propagação de fendas, que podem ter uma trajetória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita [21]. Na mecânica do dano é estabelecido um parâmetro de dano com vista a alterar a resposta dos materiais constituintes através da depreciação da resistência ou rigidez, tal como acontece nas camadas de adesivo, ou nas delaminagens ou rotura nos materiais compósitos, para modelar o dano durante o carregamento [31, 32].

A variável de dano, por sua vez, pode ser utilizada numa lei de evolução de dano com o intuito de modelar o dano, tanto antes da iniciação da fenda, como durante a sua evolução. As variáveis de dano podem ser divididas em dois grupos. O primeiro grupo refere-se às variáveis que modelam o dano através da redefinição das propriedades constitutivas dos materiais, embora estas não estejam diretamente relacionadas com o mecanismo de dano. O segundo grupo refere-se às variáveis que estão relacionadas com a definição física de um tipo específico de dano, tais como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro cavidades [33].

Quanto ao crescimento do dano, este pode ser definido de duas formas, ou em função da carga para análises estáticas [34] ou em função dos números de ciclos para análises de fadiga [35, 36]. No entanto, as técnicas da mecânica do dano para a fadiga, quando comparadas com os MDC, não apresentam uma distinção clara entre as fases de início e propagação do dano. Ainda assim, é possível simular a evolução do dano antes do crescimento da fenda. Por outro lado, a modelação do dano à fadiga através dos MDC está restringida a caminhos pré-definidos da fenda e, em aplicações específicas, pode ser recomendada a mecânica do dano se o dano for mais generalizado ou se o caminho de rotura não for conhecido [37].

2.2.2.5 Método de Elementos Finitos eXtendido

O MEFX é uma melhoria do MEF para modelar o crescimento de dano em estruturas. No entanto, este método utiliza leis de dano para a previsão da fratura, que são fundamentadas na resistência dos materiais para a iniciação do dano e deformações para a rotura, tenacidade à tração (G_{IC}), em alternativa aos valores de resistência coesiva à tração e ao corte, respetivamente (t_n^0/t_s^0), ou deslocamento normal ou de corte, respetivamente (δ_n^0/δ_s^0) utilizados pelos MDC. O MEFX, quando comparado ao MDC, apresenta uma grande vantagem, uma vez que não é necessário que a fenda siga um trajeto pré-definido. A propagação da fenda pode ocorrer livremente no interior do material, sem que a geometria das descontinuidades coincida com a malha ou que seja necessária a correção da malha na proximidade da fenda [38]. O MEFX foi introduzido pela primeira vez no final dos anos 90, por Belytschko e Black [39]. Este método tem como base um conceito de partição de unidade, que pode ser implementado no MEF através da introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto da extremidade da fenda, o que permite o crescimento do dano e que ocorra separação entra as faces da fenda. Inicialmente, o MEFX considera um comportamento linear elástico dos materiais, sendo representado por uma matriz constitutiva elástica, que permite relacionar tensões com as separações normais e de corte dos elementos fraturados. Com o crescimento da fenda, a sua extremidade está constantemente a alternar a sua posição e orientação segundo as condições de carga e da geometria da estrutura. Ao mesmo tempo, são criadas as funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais do MEF em torno do percurso ou extremidade da fenda [40].

2.2.2.5.1 Formulação

A expressão fundamental do vetor deslocamento \mathbf{u} , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [41]:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[\mathbf{u}_i + H(x)\mathbf{a}_i + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)\mathbf{b}_i^{\alpha} \right], \quad (1)$$

onde $N_i(x)$ e u_i correspondem às funções de forma nodais e ao vetor de deslocamento nodais, respetivamente. O termo $H(x)a_i$ só está ativo para nós onde alguma função de forma é cortada pela fenda e pode ser expresso pelo produto do vetor dos graus de liberdade nodais enriquecidos incluindo os nós mencionados, a_i , com as funções de forma descontínuas associadas, $H(x)$, nas superfícies da fenda [22].

O método estabelece nós fantasma que subdividem os elementos fraturados e simulam a separação entre subelementos recém-criados. A propagação da fenda ao longo de um trajeto arbitrário é possível através do uso dos nós fantasma que inicialmente têm as mesmas coordenadas que os nós reais e que estão completamente fixos aos nós reais até à iniciação do dano. A descontinuidade nos elementos torna-se possível pela adição de nós fantasmas sobrepostos aos nós originais. Quando um elemento fratura, cada um dos dois subelementos será formado pelos nós reais e nós fantasmas. Os dois subelementos possuem campos de deslocamentos totalmente independentes e substituem o elemento original. A partir deste ponto, cada par de nó real e nó fantasma do elemento fraturado separa de acordo com uma lei até à rotura e os nós reais e fantasmas ficam livres de se mover sem restrições, simulando-se assim o crescimento do dano (Figura 33) [22].

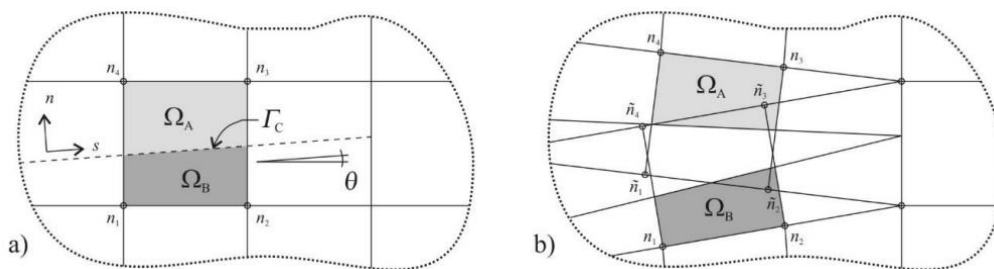


Figura 33 - Propagação do dano no MEFX utilizando o conceito de nós fantasma: antes (a) e após a partição (b) de um elemento fraturado em subelementos [42].

2.2.2.5.2 Critérios de início de dano

Como foi referido no ponto 2.2.2.5.1., a avaliação da iniciação do dano pode ser realizada de acordo com diferentes critérios. Os critérios da tensão principal máxima (MAXPS) e deformação principal máxima (MAXPE), são baseados nas seguintes funções de dano, respetivamente [41]:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \right\} \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_{\max} \rangle}{\varepsilon_{\max}^0} \right\}, \quad (2)$$

onde σ_{\max} é a tensão principal máxima atual num dado ponto de integração e σ_{\max}^0 é a resistência de um material à tração. ε_{\max} é a deformação principal máxima num dado ponto de integração e ε_{\max}^0 é a deformação máxima de um material à tração. Os critérios

de tensão nominal máxima (MAXS) e deformação nominal máxima (MAXE) são baseados nas seguintes funções, respetivamente [41]:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_s}{t_s^0} \right\} \quad e \quad f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}, \quad (3)$$

onde t_n e t_s são as componentes de tensão normal e de corte da superfície fraturada e t_n^0 e t_s^0 são os respetivos valores limite. No caso do critério MAXE, ε_n e ε_s são as componentes de deformação normal e de corte, e ε_n^0 e ε_s^0 são os respetivos valores limites. Os critérios quadráticos de tensão (QUADS) e deformação (QUADE) são dados pelas seguintes funções, respetivamente [41]:

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \quad e \quad f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2, \quad (4)$$

2.2.2.5.3 Aplicação a juntas adesivas

Neste capítulo são descritos alguns dos trabalhos científicos mais relevantes relacionados com a aplicação do MEFX em ligações adesivas. Campilho et al. [43] realizaram um estudo sobre a viabilidade da aplicação do MEFX em ligações adesivas utilizando materiais compósitos. O objetivo deste trabalho consistiu em propor e validar uma lei de dano para modelar a propagação do dano numa camada de adesivo epóxico utilizando uma abordagem por MEFX. O valor de G_{IC} e t_n^0 foram determinados através de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e ensaios de tração, respetivamente. Assim sendo, estas propriedades permitiram modelar a lei de dano. As juntas adesivas utilizadas neste trabalho eram constituídas por dois substratos de carbono-epóxico ligados com o adesivo Araldite®2015. As propriedades mecânicas do adesivo são as seguintes: Módulo de Young ($E=1,85\pm 0,21$ GPa); tensão de rotura à tração ($\sigma_f=21,63\pm 1,61$ MPa); deformação de rotura à tração ($\varepsilon_f=4,77\pm 0,15\%$). Na Figura 34 apresenta-se a geometria das juntas e os respetivos parâmetros, onde $L=140$ mm; $h=2,4$ mm; $t_A=0,2$ mm; $a_0=55$ mm.

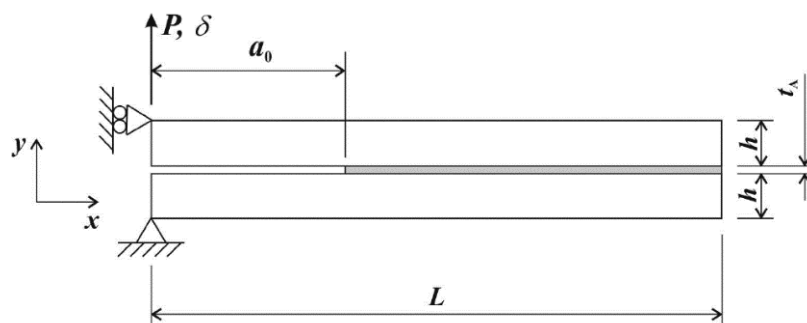


Figura 34 - Geometria dos provetes DCB e respetivos parâmetros [43].

Foram utilizados dois métodos da MFLE para a determinação de G_{IC} . Na Figura 35 está representada a comparação das curvas $G_{IC}-a$ dos métodos *Compliance Calibration Method* (CCM) e *Corrected Beam Theory* (CBT).

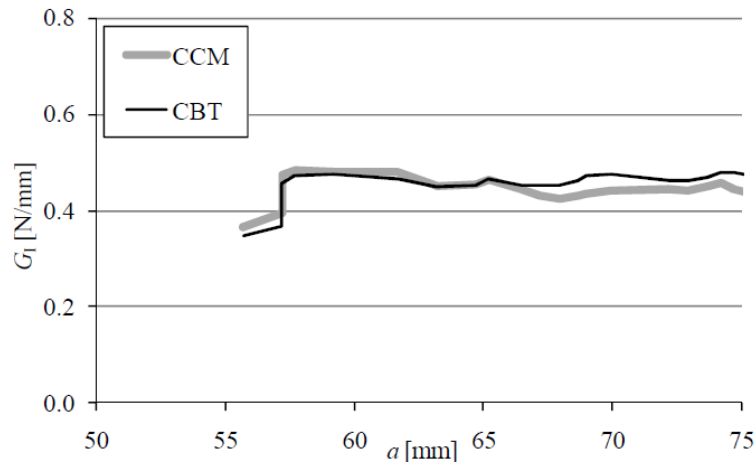


Figura 35 - Curvas $G_{IC}-a$ pelos métodos CCM e CBT [43].

Em relação aos resultados obtidos, os valores obtidos nos dois métodos são muito próximos, apesar de o CCM apresentar maior variação de valores. Na Tabela 3 estão apresentados os valores de G_{IC} obtidos para cada provete, média e desvio-padrão, aplicando os dois métodos.

Tabela 3 - Valores obtidos de G_{IC} de quatro provetes para os métodos CCM E CBT (adaptado de [43]).

Provete	CCM	CBT
1	0,401	0,468
2	0,394	0,420
3	0,433	0,444
4	0,328	0,404
Média G_{IC}	0,389	0,434
Desvio-padrão	0,044	0,028

A análise numérica foi realizada utilizando o *software* ABAQUS®, para definir uma lei de dano de forma a realizar uma simulação de uma fina camada de adesivo pelo MEFX. A lei de dano foi considerada triangular e foram utilizadas as propriedades obtidas no ensaio DCB e no ensaio de tração. Em relação aos substratos de compósito reforçado a fibra de carbono ou *carbon fiber reinforced polymers* (CFRP), estas foram considerados como sendo elásticos ortotrópicos e a fratura do adesivo foi modelada pelo MEFX.

A validação das leis de dano propostas foi obtida através da comparação das curvas $P-\delta$ obtidas a partir do ensaio DCB com os resultados obtidos numericamente pelo MEFX. A Figura 36 apresenta a comparação das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais dos modelos DCB.

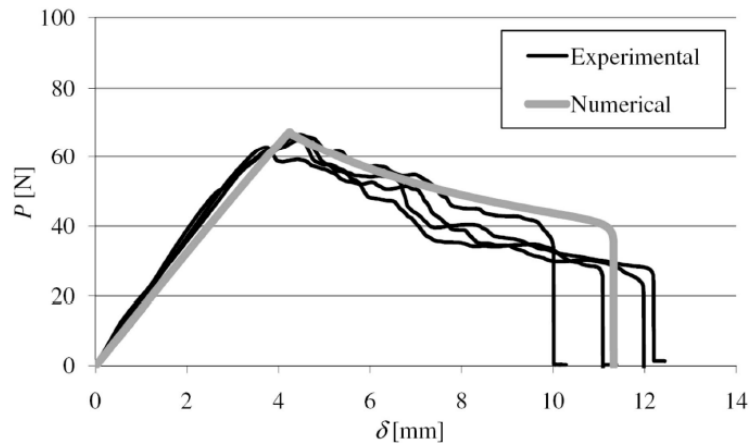


Figura 36 - Curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais dos modelos DCB [43].

Este trabalho permitiu verificar que a simulação numérica e os resultados experimentais são consistentes, em termos de curvas $P-\delta$. Conclui-se que a análise pelo MEFX é uma boa opção quando se pretende efetuar a previsão da resistência de uma junta adesiva sob um carregamento de modo I.

O trabalho de Fernandes et al. [44] consistiu na aplicação dos métodos MDC e MEFX para previsão da resistência de JSS. Foram utilizados três tipos de adesivos: um adesivo frágil (Araldite® AV138), um adesivo moderadamente dúctil (Araldite® 2015) e um adesivo dúctil (Sikaforce® 7888). Em relação aos substratos, estes são de alumínio e com diferentes comprimentos de sobreposição. A análise numérica foi realizada utilizando o *software* ABAQUS®. Na Figura 37 estão representadas as dimensões e geometria da junta em estudo.

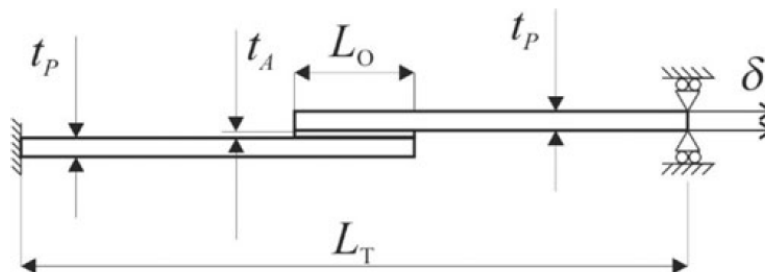


Figura 37 - Geometria e dimensões da junta em estudo [44].

Na Figura 38 estão representadas as curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente (por MDC) para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm; Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm.

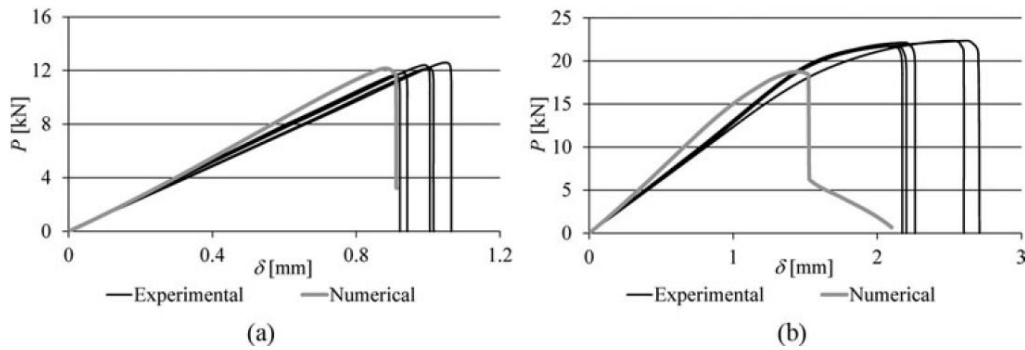


Figura 38 - Curvas P - δ obtidas experimentalmente e numericamente (por MDC) para as juntas com o adesivo: Araldite® 2015 e $L_0=37,5$ mm (a) e Sikaforce® 7888 e $L_0=50$ mm (b) [44].

O MEFX foi utilizado para estudar o comportamento das juntas, sendo que apenas foram utilizados critérios baseados nas deformações (MAXE, MAXPE e QUADE) para previsão da resistência das juntas adesivas. Na Figura 39 é apresentada uma comparação dos resultados obtidos pelo MEFX com os resultados obtidos experimentalmente pelos critérios MAXPE, MAXE e QUADE, para juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

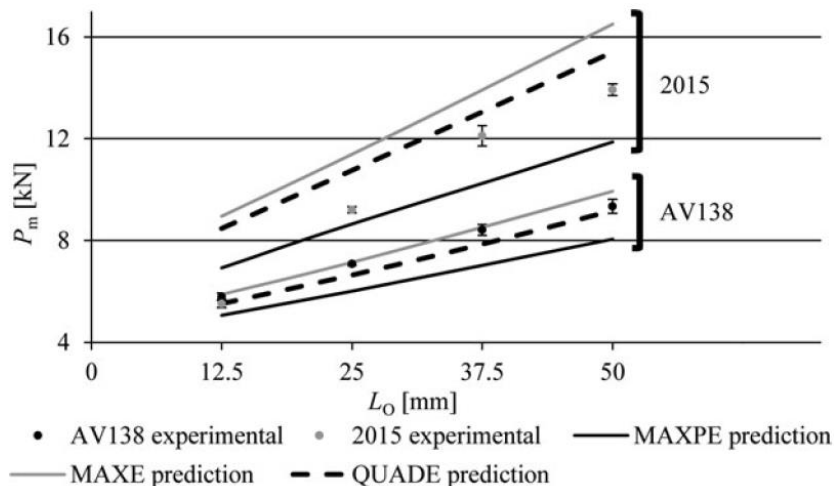


Figura 39 - Comparação de resultados experimentais e resultados obtidos pelo MEFX para juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [44].

Este trabalho permitiu concluir que a modelação por MDC com uma lei de dano triangular possui um elevado nível de precisão para juntas onde se utilizem adesivos considerados frágeis e moderadamente dúcteis. Para o adesivo Sikaforce® 7888, a lei de dano triangular não foi a mais adequada devido à grande ductilidade do adesivo. A

análise pelo MEFX revelou que não é possível modelar a propagação do dano por causa de a rotura ocorrer maioritariamente em modo de corte. Por fim, os resultados demonstraram que os critérios baseados em tensões não são compatíveis com os valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$, o que prova que estes não são adequados para a previsão da resist\encia pelo MEFX.

Mubashar et al. [45] estudaram a modela\c3o de dano e rotura de juntas adesivas, utilizando uma combina\c3o de dois m\c3todos: MEFX e MDC. O MEFX foi aplicado para efetuar a modela\c3o da fenda na regi\c3o de *fillet* onde a trajet\c3ria da fenda \c3 desconhecida. Por outro lado, os MDC foram aplicados para modelar a progress\c3o da fenda e do dano ao longo da interface da liga\c3o adesiva. Foram consideradas JSS constitu\cdas por substratos da liga de alum\cdnio 2024 T3 ligados com o adesivo ep\cdxico FM73-M. Na Figura 40 est\c3o representadas as dimens\c3es e geometria da junta em estudo.

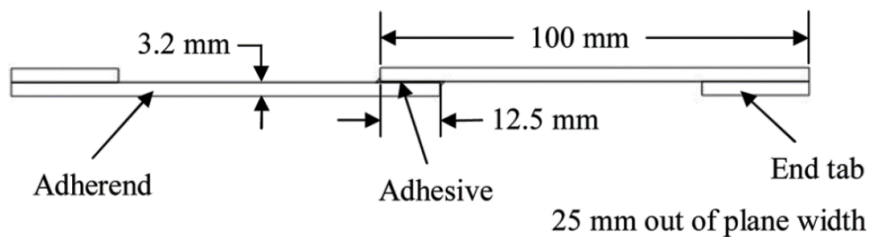


Figura 40 - Geometria e dimens\c3es da junta adesiva em estudo [45].

A an\c3lise num\c3rica foi realizada no *software* ABAQUS[®], sendo que o adesivo foi modelado com propriedades elasto-pl\c3sticas, obtidas em ensaios de tra\c3o. A Figura 41 \c3 representativa das zonas de aplica\c3o dos elementos coesivos e do MEFX.

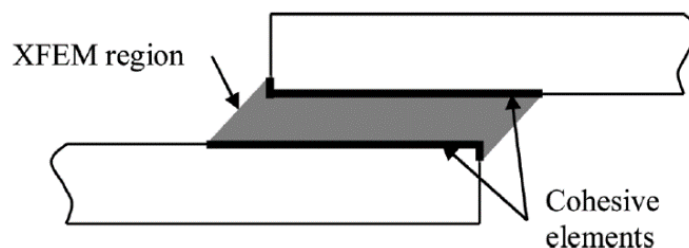


Figura 41 - Zonas dos elementos coesivos e MEFX [45].

A Figura 42 apresenta uma compara\c3o da curva P - δ num\c3rica com os limites superior e inferior de for\c3a m\c3xima resistente da junta ($P_{m\acute{a}x}$) experimental (linhas horizontais a tracejado). Atrav\c3s de uma breve an\c3lise, pode-se observar que a carga m\c3xima at\c3 \c3 rotura coincide com o intervalo de carga m\c3xima dos resultados experimentais.

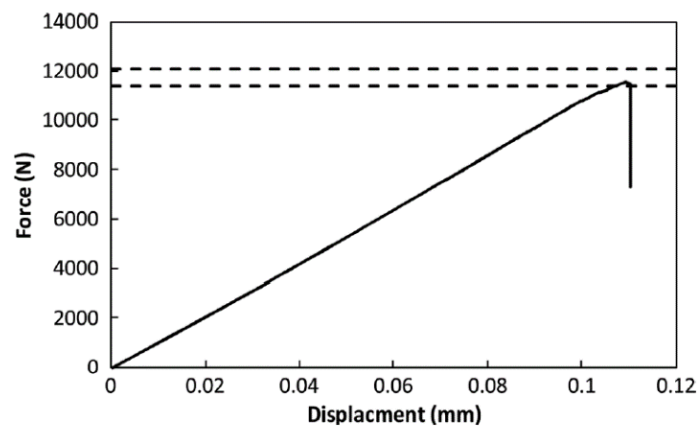


Figura 42 - Curva $P-\delta$ numérica em comparação com dados experimentais [45].

A propagação do dano e interação das fendas pelo MDC e MEFX podem ser observadas na Figura 43 e na Figura 44.

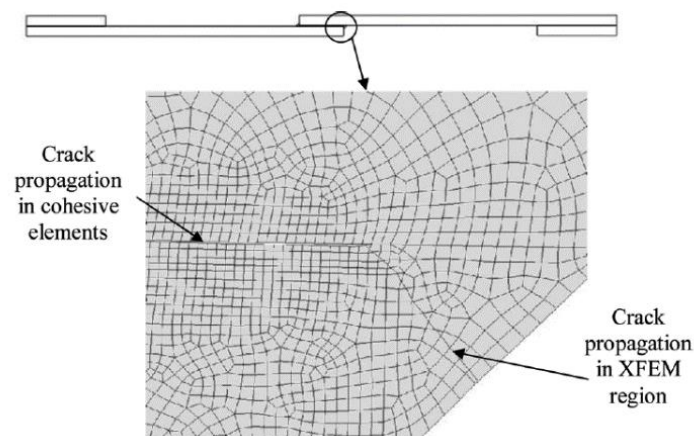


Figura 43 - Propagação da fenda nas diferentes regiões [45].

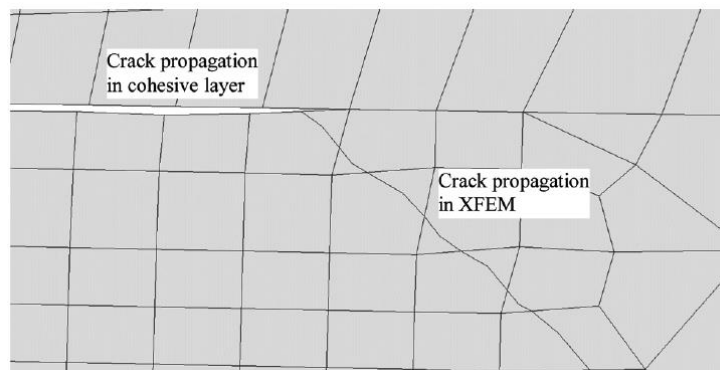


Figura 44 - Interação das fendas das regiões de MEFX e MDC [45].

O início da fenda ocorreu na região do MEFX (Figura 45 (a)), e estendeu-se em direção à camada de adesivo e ao substrato superior à medida que o carregamento aumenta (Figura 45 (b)). À medida que a fenda se aproxima dos elementos coesivos, a propagação da fenda na região do MEFX termina, sendo possível observar-se dano na zona coesiva. A rotura dos elementos coesivos é evidente na Figura 45 (c).

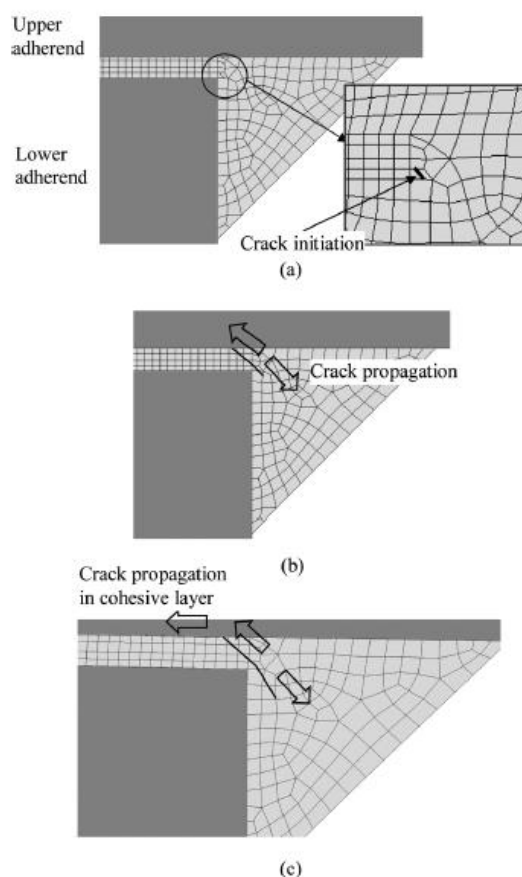


Figura 45 - Início e propagação da fenda na camada do adesivo [45].

Este trabalho permitiu concluir que o MEFX demonstra ser capaz de efetuar uma previsão bastante precisa da trajetória de uma fenda na região do adesivo numa junta adesiva. A combinação do MEFX e do MDC é possível, com a finalidade de prever de uma forma precisa a iniciação e desenvolvimento da fenda desde o *fillet* até uma zona mais central de uma camada adesiva, incluindo a interface. Por outro lado, esta técnica também apresenta limitações, nomeadamente uma potencial descontinuidade na fenda no momento de transição MEFX-MDC.

Curiel Sosa et al. [46] realizaram um estudo sobre a aplicação do MEFX na modelação da delaminação de laminados de fibra-metal. Foi considerada uma configuração DCB na qual foram analisadas a iniciação da fenda em modo I e respetiva propagação. O laminado de fibra e metal utilizado neste trabalho é *GLAss REinforced (GLARE)*, que

consiste num laminado de alumínio reforçado com camadas reforçadas a fibra de vidro. A configuração do laminado GLARE está apresentada na Figura 46, e as suas dimensões estão representadas na Figura 47.

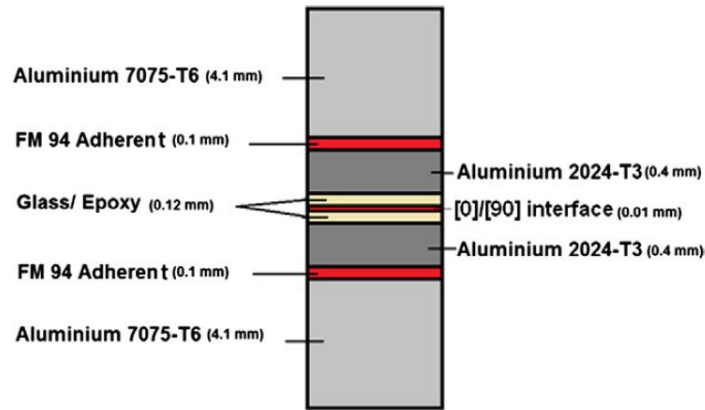


Figura 46 - Configuração do laminado GLARE [46].

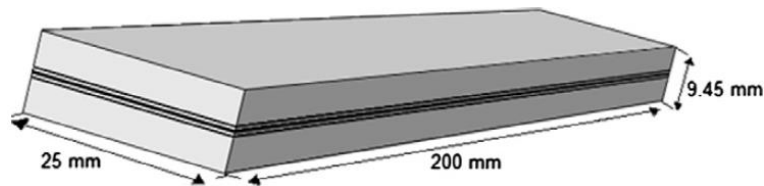


Figura 47 - Dimensões do laminado GLARE [46].

Na Figura 48 estão representadas as curvas $P-\delta$ numéricas obtidas, bem como a comparação com os resultados experimentais obtidos no trabalho de Airoidi et al. [47]. A Tabela 4 apresenta os valores de delaminação comparados com a carga aplicada e o deslocamento.

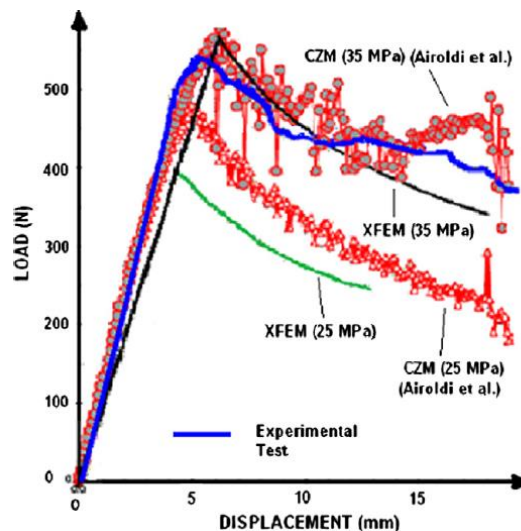


Figura 48 - Curvas $P-\delta$ numéricas, experimentais e de Airoidi et al [46].

Tabela 4 - Valores de delaminação, deslocamento e carga (adaptado de [46]).

Delaminação - a (mm)	Deslocamento - δ (mm)	Carga (N)	δ/a
0	6,1	567	0,1525
5	7,6	510	0,1689
10	9,3	460	0,1860
15	11,2	425	0,2036
20	13,3	392	0,2217
25	15,5	362	0,2385
30	18	340	0,2571

Pode-se concluir que os resultados obtidos experimentalmente, numericamente e no trabalho de Airoid et al [47] demonstraram uma boa aproximação entre ambos. Apesar de ter sido utilizado apenas no ensaio DCB, o MEFX assume-se como uma boa técnica para modelar rotura em materiais compósitos.

2.3 Juntas adesivas sujeitas a esforços normais

As juntas adesivas são constantemente sujeitas a tensões normais. Estas tensões normais podem ter uma maior ou menor importância na rotura conforme a geometria e tipo de solicitação. As juntas em T e L apresentam semelhanças entre elas, e os carregamentos aplicados, por norma, resultam em solicitações maioritariamente de arrancamento. Este tipo de juntas é normalmente 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 de adesivos ao arrancamento

Os ensaios de arrancamento são bastante úteis para se diferenciar os adesivos frágeis dos adesivos dúcteis. Existem diversos tipos de ensaio para caracterizar adesivos ao arrancamento, cuja maior parte é utilizada para a caracterização de adesivos dúcteis. A resistência ao arrancamento é usualmente uma propriedade fornecida pelos fabricantes de adesivos. Nestes ensaios, uma boa parte da energia é dissipada nos substratos, pelo que a sua seleção tem uma grande importância. De salientar que os ensaios de arrancamento provocam uma grande deformação dos aderentes [7].

2.3.1.1 Ensaio de arrancamento a 180°

O ensaio de arrancamento a 180° é um ensaio bastante comum para a caracterização de adesivos, sendo normalizado pela norma ASTM D 903-49. Este ensaio consiste na dobragem de um dos substratos com características mais flexíveis, formando assim um ângulo de 180°. Este ensaio tem aplicação útil na caracterização de adesivos não estruturais, tais como vedantes. É um ensaio adequado para determinar a resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva em que um dos substratos é rígido e outro é flexível. Na Figura 49 está demonstrado como funciona o ensaio de arrancamento a 180° [5, 12].

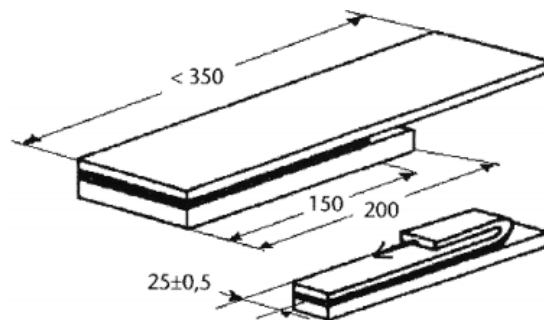


Figura 49 - Ensaio de arrancamento a 180° [5].

2.3.1.2 Ensaio de rolete flutuante

O ensaio de rolete flutuante, também designado por *floating roller test*, permite determinar a resistência ao arrancamento numa ligação entre um substrato flexível e um substrato rígido. Este tipo de ensaio é normalizado pela norma ASTM D 3167. O mecanismo de rolete utilizado permite ter um ângulo constante de arrancamento que se mantém durante o ensaio. O dispositivo permite ainda a afinação do ângulo desejado para realizar o arrancamento. Neste ensaio, pretende-se obter a carga média ao longo do período em que a força de arrancamento se mantém estável [5, 12]. A Figura 50 representa o princípio de funcionamento do ensaio de rolete flutuante.

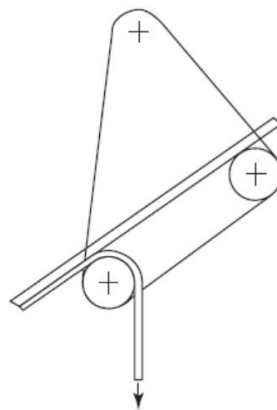


Figura 50 - Ensaio de rolete flutuante [5].

2.3.1.3 Ensaio de climbing

Também designado por *climbing drum test*, é normalizado pela ASTM D1781, e pode ser utilizado para caracterizar a resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva entre um substrato flexível e um substrato rígido. Este tipo de ensaio é mais utilizado em estruturas *sandwich* onde se pretenda conhecer a resistência de separação entre a pele e o núcleo. Geralmente é aplicado com o objetivo de forma a controlar a qualidade da ligação adesiva. Um exemplo típico é a determinação da qualidade de cura em adesivos frágeis. Um valor reduzido de força de arrancamento pode significar a existência de uma cura incompleta do adesivo [5, 12]. Na Figura 51 está representado o princípio de funcionamento do ensaio de *climbing*.

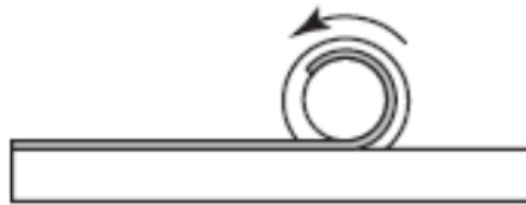


Figura 51 - Ensaio de *climbing drum* [1].

2.3.1.4 Ensaio de arrancamento em junta tipo T

O ensaio de arrancamento em junta tipo T é bastante conhecido, sendo que é normalizado pela norma ASTM D1876. Este tipo de ensaio pode ser utilizado para caracterizar a resistência ao arrancamento de uma ligação adesiva em substratos flexíveis. Caso a deformação dos substratos seja significativa, o ensaio não deve ser aplicado [5]. Na Figura 52 está representada a configuração deste tipo de ensaio de arrancamento.

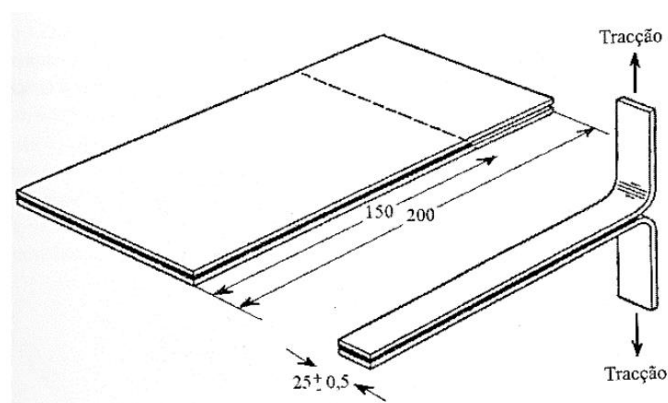


Figura 52 - Ensaio de arrancamento de junta em T [5].

O ensaio de arrancamento de junta em T realiza-se numa máquina universal de tração e a velocidade de aplicação da carga deve ser constante. A resistência é medida através

da razão entre a força média e o comprimento de sobreposição da junta. A obtenção dos provetes deve obedecer a uma técnica relativamente simples. Este processo inicia-se pela colagem dos dois substratos – superior e inferior – segundo as dimensões representadas na figura, e se seguida os provetes são cortados com largura de 25,4 mm (uma polegada). Segundo a norma, devem ser ensaiados no mínimo dez provetes nas mesmas condições. Este ensaio tem sido muitas vezes utilizado para permitir a caracterização de diferentes combinações de adesivo com preparação da superfície, tendo-se verificado uma dispersão significativa de resultados em diversos casos [5]. Os resultados obtidos dependem da espessura da camada de adesivo, sendo que normalmente esta espessura é de 0,25 mm. Outro aspeto que deve ser considerado é a geometria do adesivo excedentário na extremidade da junta, sendo que este deve apresentar uma altura de cerca de 50% do raio da secção curva do substrato. Este aspeto pode ser garantido através da utilização de uma ferramenta de modo a remover o adesivo em excesso. Verifica-se que em adesivos mais rígidos e frágeis, a concentração máxima de tensões ocorre na extremidade do adesivo excedentário, mas em adesivos mais flexíveis e dúcteis essa maior concentração de tensões pode deslocar-se para o interior da camada de adesivo [5].

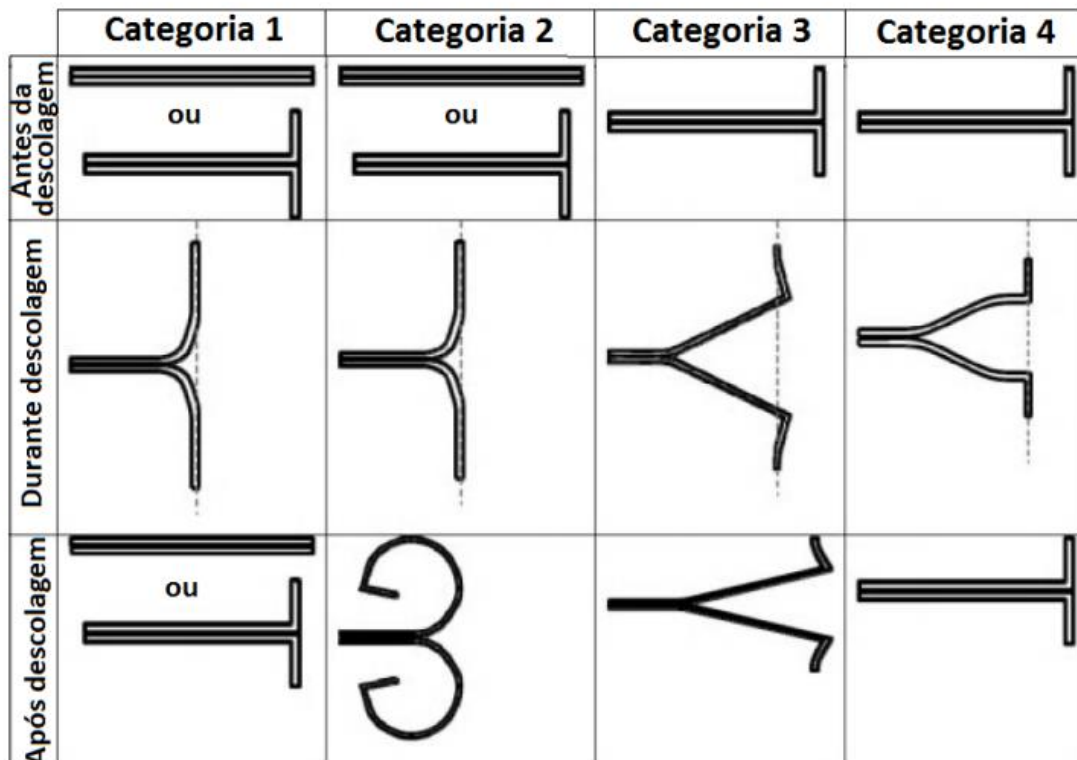


Figura 53 - Evolução do comportamento da descolagem das juntas consoante cada categoria [7].

Na Figura 53 estão representadas diferentes categorias no que respeita à evolução do comportamento da descolagem das juntas. Estas categorias são as seguintes [7]:

- **Categoria 1:** ocorre deformação elástica dos aderentes, e ocorre descolagem auto-semelhante;
- **Categoria 2:** ocorre deformação plástica dos aderentes, e ocorre descolagem auto-semelhante;
- **Categoria 3:** ocorre deformação plástica dos aderentes, e não é atingida descolagem auto-semelhante;
- **Categoria 4:** ocorre deformação elástica dos aderentes, e não é atingida a descolagem auto-semelhante.

2.3.2 Juntas em L

Neste capítulo são descritos alguns dos trabalhos científicos relacionados com juntas em L. Um bom exemplo é o estudo realizado por Li et al. [48], que consistiu no estudo de uma junta adesiva em L com aderentes em aço. O esquema da junta utilizado neste estudo bem como os respetivos parâmetros, estão representados na Figura 54 (a).

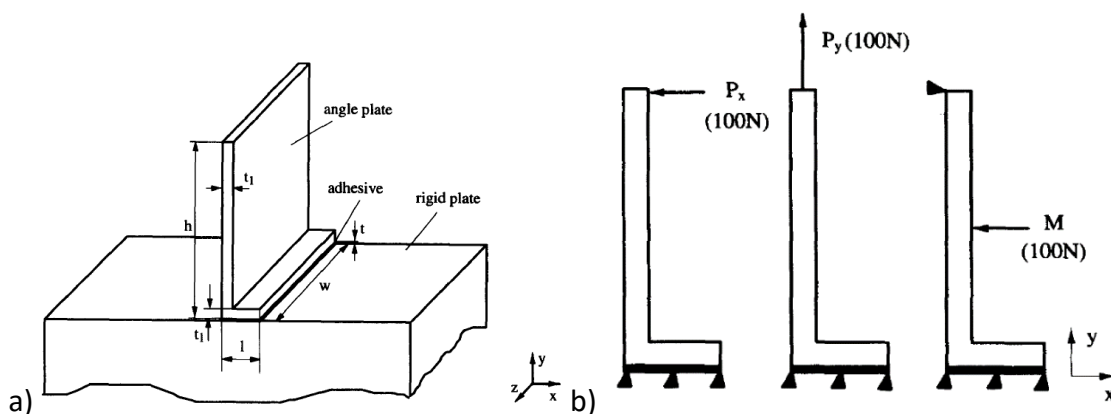


Figura 54 – Geometria da junta L em estudo e respetivos parâmetros (a) e modos de aplicação das cargas (b) [48].

Consideraram-se os valores de 2 e 4 mm para a espessura de aderente em L (t_1). Os valores de 6, 8, 10, 12, 14 e 16 são referentes ao comprimento de ligação l , mantendo uma espessura de adesivo de 0,2 mm (t). A altura de aderente em L (h) possui um valor de 40 mm e o comprimento de aderente em L um valor de 20 mm. Na Figura 54 (b) estão representados os três modos de aplicação das cargas (P_x , P_y e M) utilizados na realização deste estudo.

Realizando uma análise de MEF, através do uso do programa ABAQUS®, foram analisadas as tensões σ_y , tensão normal segundo a direção x (σ_x) e tensão de corte (τ_{xy}) ao longo do adesivo. Com o aumento da espessura dos aderentes, ocorre uma redução da tensão máxima no adesivo. Contudo, o valor das tensões no final do comprimento de

ligação aumenta, com exceção da sollicitação por carga P_y . Na análise experimental foram realizados testes com o modo de carga P_x , sendo aplicados 7 extensómetros ao longo do adesivo para estimar as tensões. Na Figura 55 estão representadas as dimensões e geometria utilizadas no teste experimental.

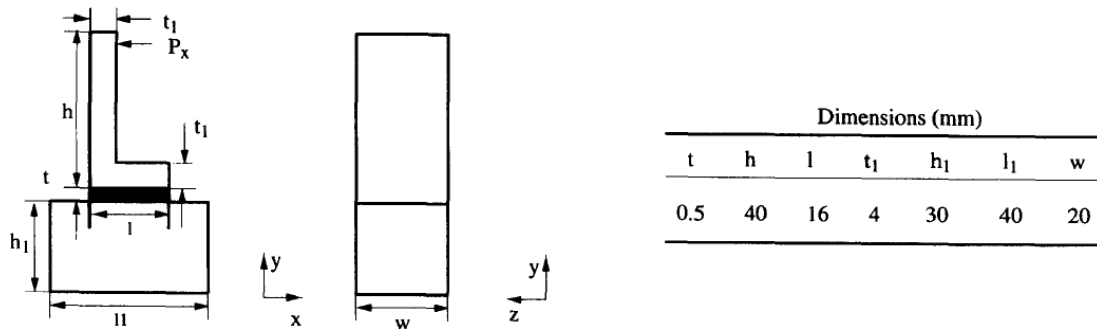


Figura 55 - Geometria e dimensões utilizadas no teste experimental [48].

Com a realização dos ensaios numéricos concluiu-se que, para os modos de carga P_x e M , a máxima concentração de tensões ocorre na extremidade do adesivo oposta à curvatura do aderente em L. Com isto, pode-se concluir que a propagação de rotura se inicia nesta mesma zona. Numericamente, observou-se para o modo de carga P_y , que as máximas concentrações de tensões ocorrem na extremidade do adesivo, próximo da curvatura do aderente em L, sendo que o início da propagação de rotura ocorre nessa mesma zona.

O trabalho de Domingues et al. [49] teve como principal objetivo realizar um estudo, experimental e por MDC, de juntas adesivas em L entre componentes de alumínio e compósito de carbono epóxido quando sujeitas a sollicitações de forças de arrancamento, tendo em consideração diferentes configurações de junta e adesivos de diferentes ductilidades. Na Figura 56 estão representados o esquema da junta em L e as dimensões geométricas das juntas, respetivamente.

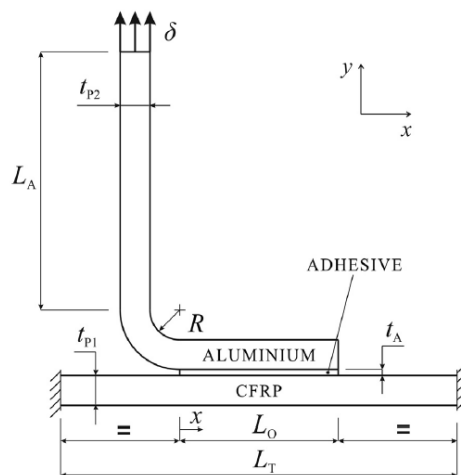


Figura 56 - Esquema da junta L em estudo [49].

As dimensões geométricas das juntas são definidas como espessura do aderente de alumínio ($t_{p2}=1,2,3$ e 4 mm), comprimento de sobreposição ($L_0=25$ mm), comprimento entre apoios do aderente de CFRP ($L_T=80$ mm), espessura do adesivo ($t_A=0,2$ mm), raio de curvatura do aderente de alumínio ($R=5$ mm), espessura do aderente de CFRP ($t_{p1}=3$ mm) e altura do aderente de alumínio ($L_A=60$ mm).

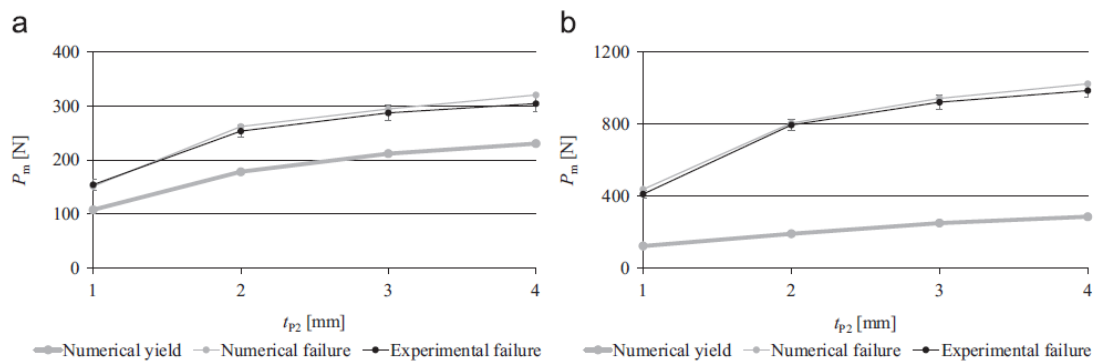


Figura 57 - Valores de P_m experimentais e respetiva previsão numérica para as juntas em função de t_{p2} : Araldite® AV138 (a) e Sikaforce® 7752 (b) [49].

Na Figura 57 estão representados os valores de P_m experimentais e respetiva previsão numérica para as juntas em função de t_{p2} . Com a realização deste trabalho, concluiu-se que os picos de tensões de arrancamento ocorrem para todas as configurações de junta em $x/L_0=0$ (Figura 57), na extremidade solicitada, sendo que os maiores valores de pico são obtidos para as juntas com Araldite® AV138, uma vez que a sua rigidez é superior. Através da análise de tensões, concluiu-se também que, para os dois adesivos, quanto maior for o valor de L_0 , maior serão os picos de arrancamento no adesivo. Contudo, o parâmetro que possui maior influência nos valores de tensão é t_{p2} uma vez que, com o seu aumento, o tipo de solicitação a que a junta está sujeita altera, aproximando-se mais da clivagem, e as distribuições de tensões de arrancamento tornam-se mais graduais ao longo do adesivo. Com o aumento de t_{p2} , no adesivo Araldite® AV138 registou-se um aumento na porção da junta danificada quando é atingido P_m . No caso do adesivo Sikaforce® 7752, foi observado que a porção danificada no momento da rotura é muito superior à do adesivo Araldite® AV138. Ao nível de resistência das juntas, o adesivo mais dúctil (Sikaforce® 7752) registou os maiores valores de P_m , com melhoria entre $t_{p2}=1$ e 2 mm. Com o aumento do valor de t_{p2} registaram-se maiores valores de resistência do que com o aumento de L_0 . Os resultados obtidos permitiram validar a técnica de MDC para a previsão de resistência neste tipo de juntas em L, já que esta se revelou uma ferramenta precisa para a modelação do processo de rotura.

2.3.3 Juntas em T

Neste capítulo são descritos alguns trabalhos científicos relacionados com juntas em T. O trabalho de Carneiro et al. [50] consistiu num estudo experimental e numérico por

MDC do comportamento de uma junta adesiva em T entre aderentes de alumínio solicitada à tração. Foram testadas diferentes configurações de junta e adesivos de diferente ductilidade. Na Figura 58 está representada a geometria da junta em T utilizada neste trabalho e os parâmetros usados na geometria da junta.

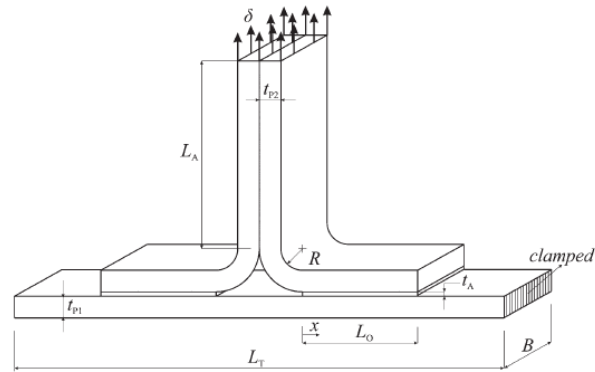


Figura 58 – Esquema da junta em T parâmetros usados na geometria da junta [50].

As dimensões geométricas das juntas são definidas $t_{p2}=1,2,3$ e 4 mm, comprimento do adesivo ($L_0=25$ mm), comprimento dos aderentes base entre limites de encastramento ($L_T=100$ mm), espessura do adesivo ($t_A=0,2$ mm), raio de curvatura dos aderentes em L ($R=5; 5,5; 7,5$ e $7,5$ mm), espessura dos aderentes base ($t_{p1}=3$ mm) e altura dos aderentes em L ($L_A=60$ mm). O estudo experimental consistiu no estudo de juntas em T com dois tipos de adesivos (Araldite® AV138 e Araldite® 2015). Para cada configuração de junta, definida pelo tipo de adesivo e por t_{p2} , foram ensaiadas 5 juntas, sendo que no total foram fabricadas 40 juntas em T. O estudo numérico consistiu na previsão numérica da resistência das juntas em T através de um MDC triangular. No estudo numérico foram utilizados três tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752). O *software* de análise numérica utilizado foi o ABAQUS®. Na Figura 59 está representada a comparação final de valores numéricos e experimentais de P_m para junta adesiva em T com adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

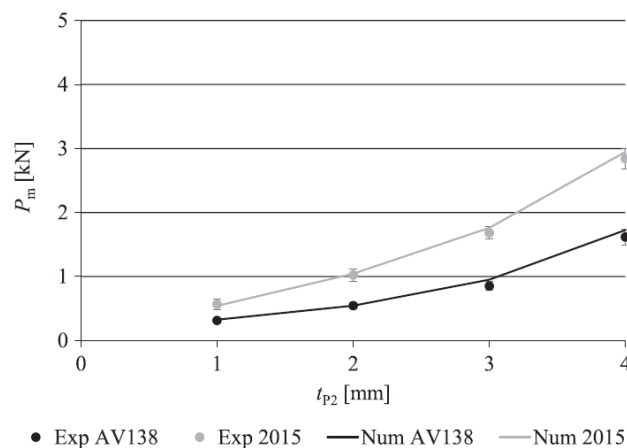


Figura 59 - Valores numéricos/experimentais de P_m para as juntas adesivas em T com Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [50].

Na Figura 60 estão representados os valores numéricos de P_m para junta adesiva em T com adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

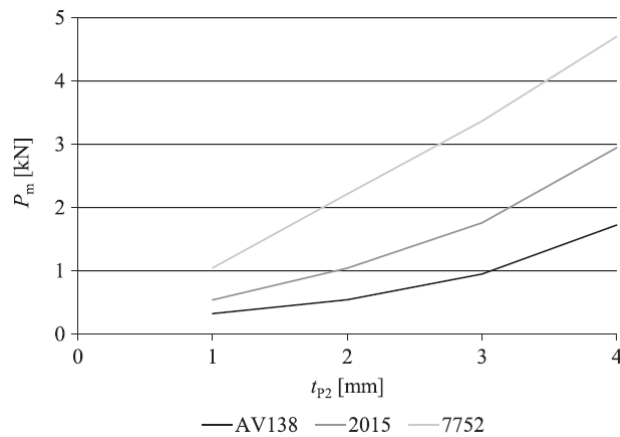


Figura 60 - Valores numéricos de P_m para junta adesiva em T com Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 [50].

Este trabalho permitiu concluir que, ao nível de resistência das juntas, foi com a utilização do adesivo mais dúctil que se registaram os valores mais elevados de P_m , registando-se uma melhoria significativa entre $t_{p2}=3$ e 4 mm. Os ensaios experimentais permitiram a validação dos resultados numéricos para os dois adesivos testados experimentalmente. Por fim, concluiu-se que o adesivo Sikaforce® 7752 (dúctil) é o mais recomendado para o tipo de solicitação e geometria de junta em causa. Este adesivo permite uma distribuição da carga solicitada sobre uma região mais abrangente da camada de adesivo, resultando em valores mais elevados de P_m .

Burns et al. [51] analisaram uma junta em T constituída por compósitos de resina epóxida impregnada com fibras de carbono, sendo considerada uma estratégia de projeto com inspiração na natureza, mais especificamente a ligação entre os ramos e tronco de árvores. As juntas em T foram curadas em autoclave a 180°C durante 2 horas a uma pressão de 690 kPa e com uma orientação de laminado (+/- 45, 0/90, +/-45, 0/90). Na Figura 61 estão representadas as dimensões e a geometria da junta em T.

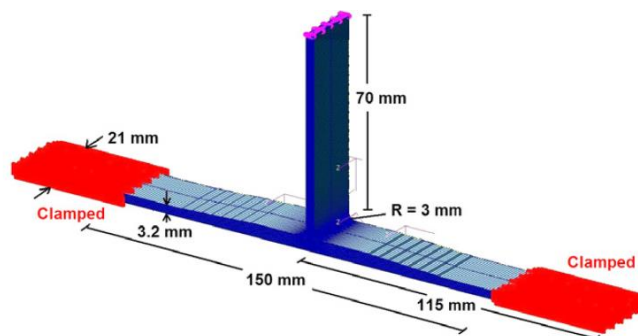


Figura 61 – Geometria e dimensões da junta em T [51].

Neste trabalho foram considerados provetes com três condições de embebedimento do componente em T no componente retilíneo da junta (25, 50 e 75% da espessura do componente retilíneo). Foi considerado um número de camadas de compósito proporcional à percentagem de embebedimento para cada uma das condições referidas anteriormente. Efetuou-se uma comparação de resultados obtidos com juntas com o mesmo número de camadas do compósito, mas neste caso, sem embebedimento no componente retilíneo, tal como se pode comprovar na Figura 62.

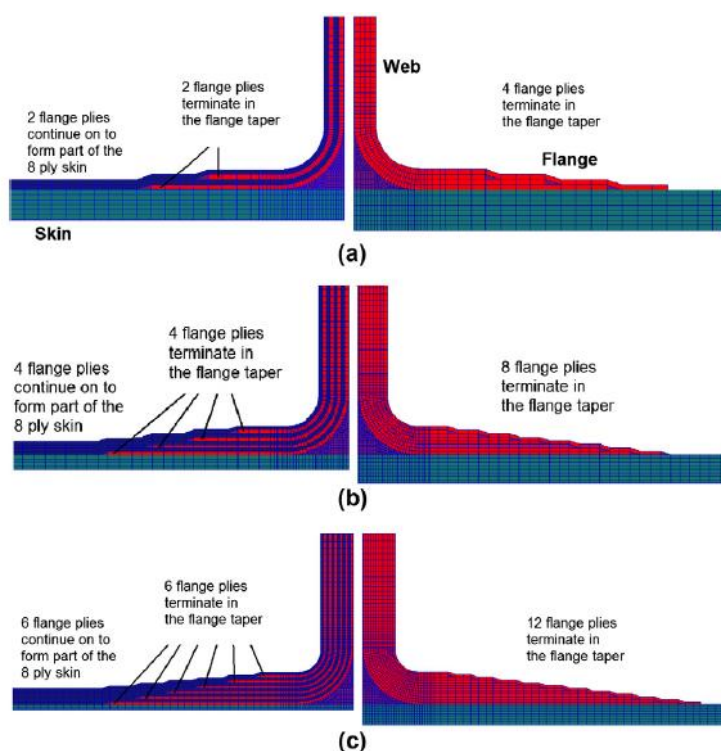


Figura 62 - Juntas em T com geometria convencional e inspiradas na natureza: 25% (a), 50% (b) e 75% (c) de embebedimento [51].

Foram testadas 8 amostras para cada geometria de junta, utilizando uma máquina de ensaios com célula de carga de 50 kN. Foram considerados dois tipos de carregamento:

- De tração na extremidade livre do componente em T a uma velocidade constante de 1 mm/min;
- De flexão, através da aplicação de uma força transversal ao componente em T, aplicada na sua extremidade livre a uma velocidade constante de 3 mm/min.

O presente trabalho permitiu concluir que a aplicação deste design estrutural, baseado na natureza em juntas adesivas em T, tem como vantagens: o aumento da ductilidade, o aumento da energia absorvida até à carga de pico e por último, melhorar na tolerância ao dano, o que permite uma redução da possibilidade de rotura frágil catastrófica da junta em T. Como desvantagem apresenta-se a carga de iniciação de dano mais reduzida

devido às tensões interlaminares mais elevadas no raio de curvatura por causa da geometria embebida.

2.3.4 Outros tipos de juntas

Neste capítulo são descritos alguns dos trabalhos científicos relacionados com outros tipos de juntas com solicitação predominante de arrancamento, neste caso, designadas por *T-Peel*. O trabalho experimental e numérico realizado por Ping Hu et al. [52] teve como objetivo analisar a capacidade de carga das juntas adesivas *T-peel* sob uma carga de tração nas extremidades do T. Considerou-se o efeito do comprimento de ligação das juntas adesivas em T produzidas em aço e alumínio. Na Figura 63 são apresentadas as dimensões e geometria da junta T em estudo.

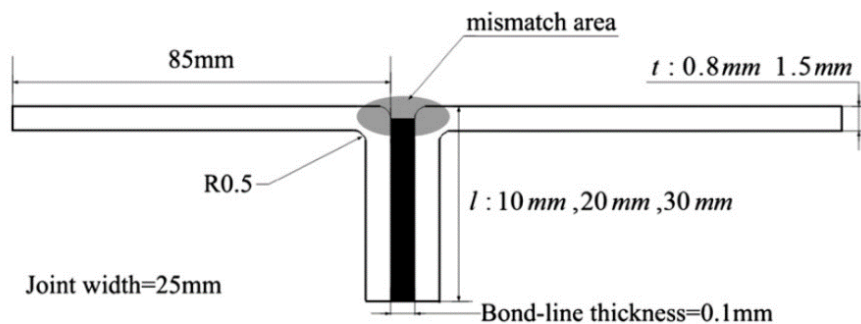


Figura 63 – Geometria e dimensões da junta T em estudo [52].

Na Figura 64 estão representados seis tipos de juntas em T utilizadas neste trabalho, bem como o tipo de aderentes, geometria e valor de *R*.

Type	Adherends	Geometry (mm)		The ratio <i>R</i>
Balanced T-joint				
I	Aluminum–Aluminum	<i>t</i> :0.8–0.8	<i>l</i> :10,20,30	1
II	Aluminum–Aluminum	<i>t</i> :1.5–1.5	<i>l</i> :10,20,30	1
III	Steel–Steel	<i>t</i> :1.5–1.5	<i>l</i> :10,20,30	1
Imbalanced T-joint				
IV	Aluminum–Steel	<i>t</i> :1.5–1.5	<i>l</i> :10,20,30	0.34
V	Aluminum–Aluminum	<i>t</i> :0.8–1.5	<i>l</i> :10,20,30	0.15
VI	Aluminum–Steel	<i>t</i> :0.8–1.5	<i>l</i> :10,20,30	0.05

Figura 64 - Seis tipos de juntas em T utilizadas: tipo, aderentes, geometria e o valor de *R* [52].

Realizou-se um estudo numérico no *software* ABAQUS® de forma a analisar a propagação do dano através de uma análise baseada em MDC. Neste estudo pode-se observar que apenas a extremidade superior do adesivo transmite a carga no início. Após a ocorrência do dano, este irá propagar-se da extremidade superior para a extremidade inferior. Na Figura 65 são apresentados os resultados de força-deslocamento para os seis tipos de juntas utilizadas neste trabalho.

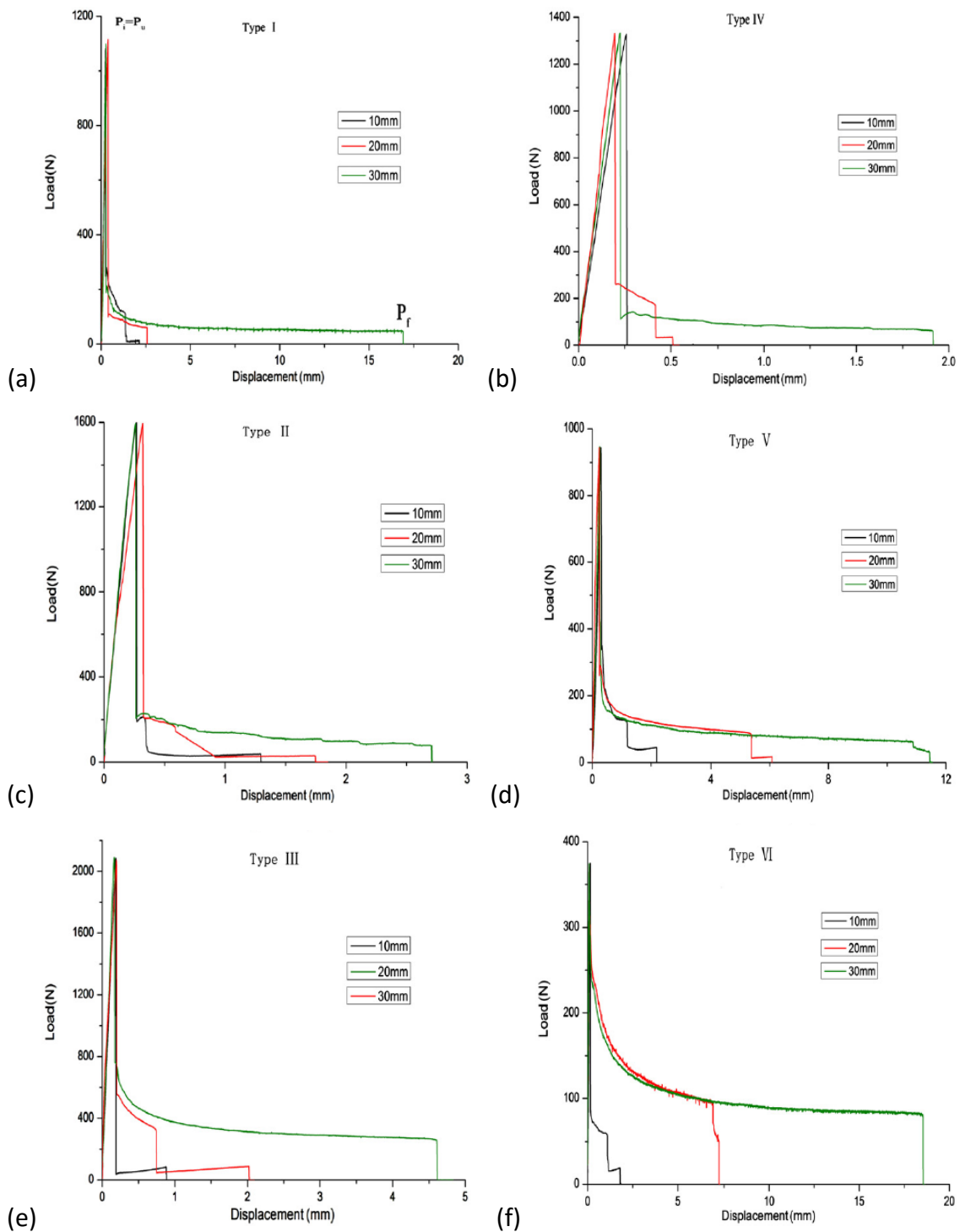


Figura 65 – Curvas força-deslocamento para juntas em T: Tipo I – equilibrado (a), Tipo II – equilibrado (b), Tipo III – equilibrado (c), Tipo IV – desequilibrado (d), Tipo V – desequilibrado (e) e Tipo VI – desequilibrado (f) [52].

Este trabalho permitiu concluir que os resultados experimentais mostraram que o comprimento de ligação não teve nenhum efeito sobre a carga máxima da junta em T. No entanto, com o aumento do comprimento de ligação, a capacidade de absorção de energia das juntas em T aumentou significativamente. Nas juntas equilibradas, o modo

de rotura do adesivo é o principal motivo que provocou um aumento do valor da carga final, do tipo I para o tipo III. O pré-tratamento da superfície é bastante importante para obter melhores resultados nas juntas T equilibradas. Nas juntas desequilibradas, a razão R é um fator chave que afeta a resistência da junta *T-peel*, uma vez que, aumentando o valor de R , a carga máxima também pode ser aumentada.

Castagnetti et al. [53] realizaram um trabalho onde é descrito um procedimento eficiente para análise de estruturas complexas, baseado em técnicas de elementos finitos de análise de juntas adesivas. Este trabalho também pretende avaliar a precisão do método proposto para a previsão da resistência de juntas adesivas *T-peel*. Os aderentes são de dois materiais distintos, aço e alumínio, e o adesivo *Henkel Loctite 9466*. Para cada tipo de material foram realizados quatro ensaios. Na Figura 66 estão representados um esboço da junta *T-peel* e um modelo computacional com uma visão detalhada de alguns elementos. Os parâmetros t e b variam, sendo que t pode assumir os valores de 2 ou 3 mm, enquanto que b pode assumir os valores de 12 ou 20 mm.

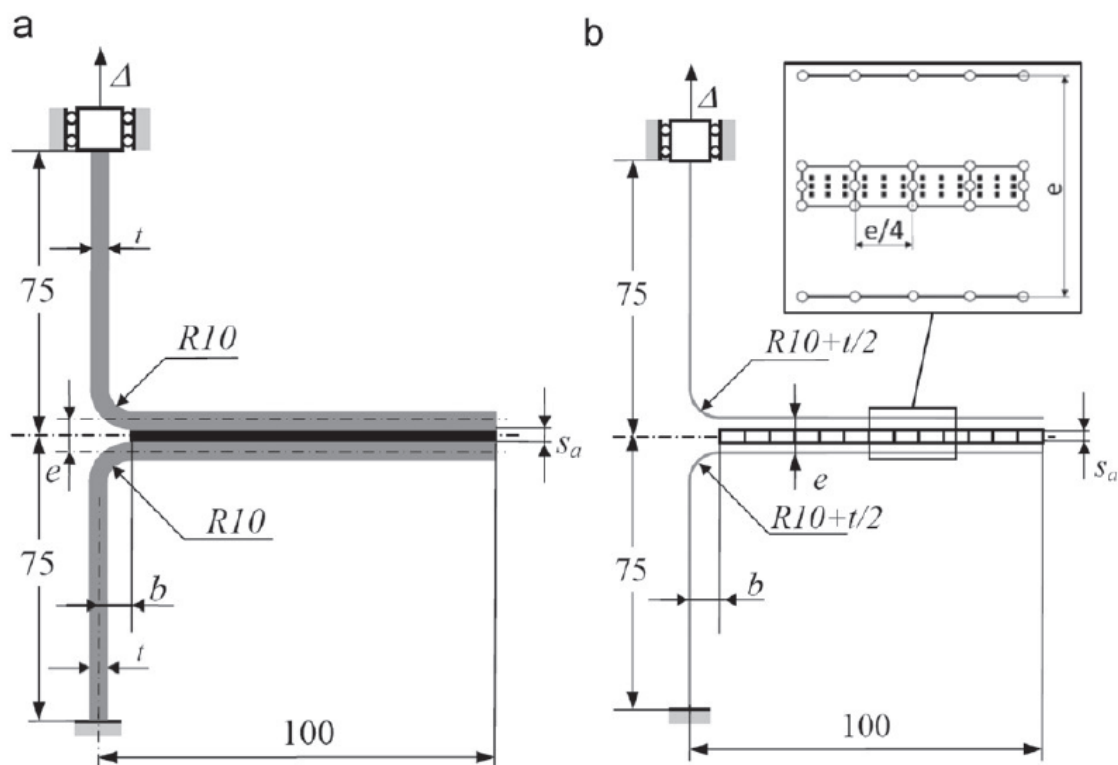


Figura 66 - Esboço junta *T-peel* (a) e modelo computacional com uma visão detalhada dos nós dos elementos (círculos vazios) e dos pontos de integração (quadrado sólido) (b), dimensões em mm [53].

Na Figura 67 e Figura 68 são apresentadas as curvas $P-\delta$ para cada tipo de aderente, aço ou alumínio, e respetivos valores de t e b .

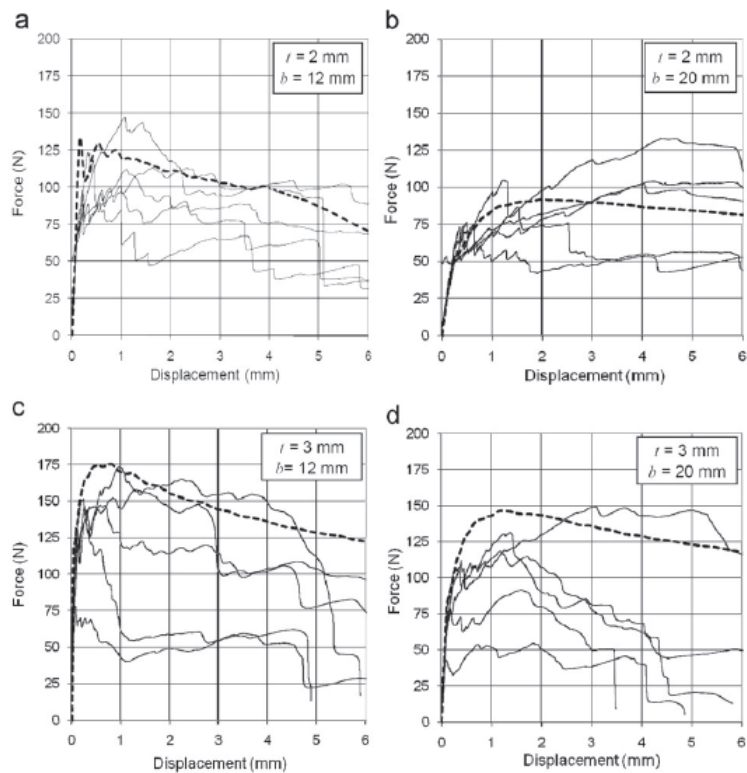


Figura 67 - Curvas P - δ experimentais (linhas finas contínuas) e numéricas (linhas grossas tracejadas) para juntas com aderentes em alumínio [53].

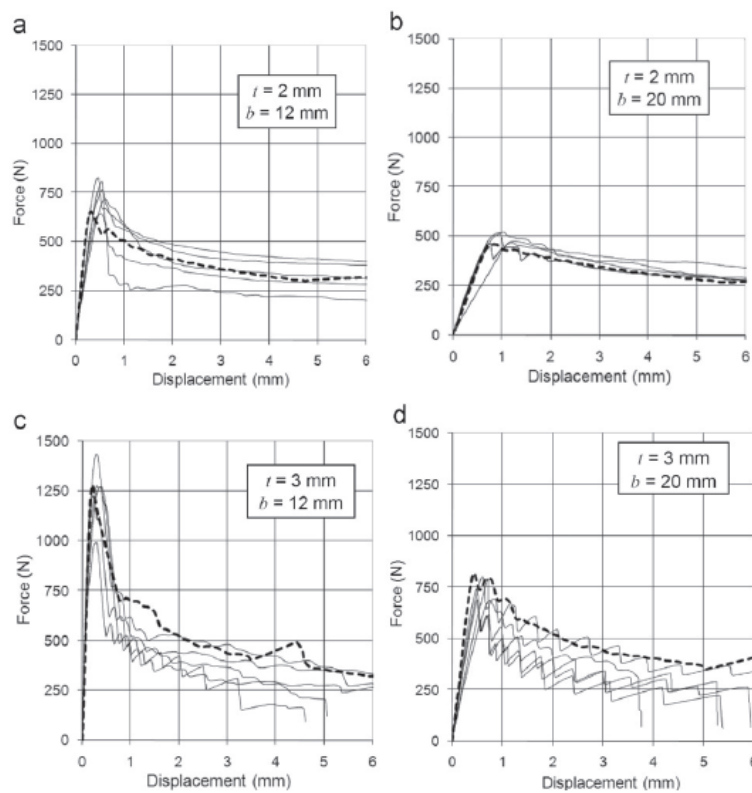


Figura 68 - Curvas P - δ experimentais (linhas finas contínuas) e numéricas (linhas grossas tracejadas) para juntas com aderentes em aço [53].

Na Figura 69 são apresentados, de uma forma mais simples de interpretação, os resultados experimentais e numéricos obtidos.

		Aluminium			Steel	
		<i>b</i> (mm)	<i>t</i> = 2 mm	<i>t</i> = 3 mm	<i>t</i> = 2 mm	<i>t</i> = 3 mm
1.	Experimental peak force, F_{exp} (N)	20	65.3 ± 11.1	88.6 ± 29.9	487.5 ± 29.3	779.2 ± 72.9
		12	102.7 ± 14.5	129.6 ± 30.1	794.5 ± 53.3	1289.3 ± 162.9
2.	Experimental failure stress (MPa)	20	25.3 ± 7.5	17.9 ± 5.7	131.8 ± 9.2	126.4 ± 16.1
		12	25.1 ± 7.7	17.2 ± 6.2	142.7 ± 14.9	113.5 ± 7.8
3.	Average failure stress (MPa)		21.3 ± 6.8		128.5 ± 12.2	
4.	Numerical peak force, F_{num} (N)	20	54.6	89.1	457.9	815.77
		12	91.3	135.3	653.1	1279.6
5.	Relative error (%) = $(F_{num} - F_{exp})/F_{exp}$	20	-11.1%	0.6%	-6.1%	9.9%
		12	-16.4%	4.4%	-13.1%	3.1%

Figura 69 - Resultados numéricos e experimentais obtidos [53].

A partir da Figura 69 pode-se afirmar que o aço apresenta valores mais elevados de resistência, tanto experimental como numérica, para os vários valores de t e de b . A nível de tensão experimental de rotura, o alumínio apresenta valores inferiores aos valores obtidos para o aço. Este trabalho permitiu concluir que, quanto maior for o valor de t , maior será o valor da força máxima obtida, independente do valor de b e do tipo de material do aderente utilizados. O modelo revelou-se bastante preciso em relação aos resultados experimentais obtidos, tanto em termos de força máxima como comportamento pós-elástico.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Os ensaios apresentados neste capítulo correspondem a ensaios realizados num trabalho anterior [1]. Na referente dissertação, o trabalho experimental consiste no estudo de juntas em T com dois 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, 4 mm), foram realizados ensaios em 5 juntas em T, sendo que no total foram fabricadas 40 juntas em T. Neste capítulo são descritos os materiais constituintes da junta, o processo de fabrico das juntas, os testes experimentais efetuados e são apresentados os resultados, no que se refere aos modos de rotura, curvas $P-\delta$, resistência das juntas e respetiva análise dos resultados obtidos.

3.1.1 Materiais utilizados

3.1.1.1 Substratos

O material utilizado no trabalho prático foi uma liga de alumínio. O alumínio é um material bastante utilizado em diversas indústrias, devido às suas características como durabilidade, resistência à corrosão, leveza, boa condutividade elétrica e facilidade de conformação [54]. A liga de alumínio utilizada foi a liga AW6082-T651, sendo uma liga estrutural da série 6000, composta maioritariamente por alumínio, magnésio e silício (Tabela 5). Este tipo de liga possui uma grande utilização na produção de componentes estruturais, tais como chassis de camiões, navios e em pontes. As propriedades que mais se destacam são a alta resistência à corrosão, a boa condutividade térmica e baixo peso [1, 55].

Tabela 5 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [1].

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
% Mínimo	0,7	0,6	0,4	0	0	0	0	0	----
% Máximo	1,3	1,2	1,0	0,5	0,25	0,2	0,1	0,05	Resto

A liga de alumínio apresenta as propriedades mecânicas referidas na Tabela 6, conforme especificado pelo fabricante.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [1, 55].

Propriedade	Unidade S.I.	Valor
Módulo de elasticidade	GPa	70
Espessura	mm	3,0
Tensão de rotura mínima	MPa	300
Tensão de cedência 0,2% mínima	MPa	255
Alongamento mínimo	%	9
Dureza Brinell	HB	91

As curvas de tensão-deformação à tração desta liga foram obtidas num trabalho anterior [1] de acordo com a norma ASTM-E8M-04, sendo essas curvas apresentadas na Figura 70. Este material apresenta uma resistência à tração de aproximadamente 324 MPa, sendo obtida através do envelhecimento artificial sob uma temperatura de 180°C [55].

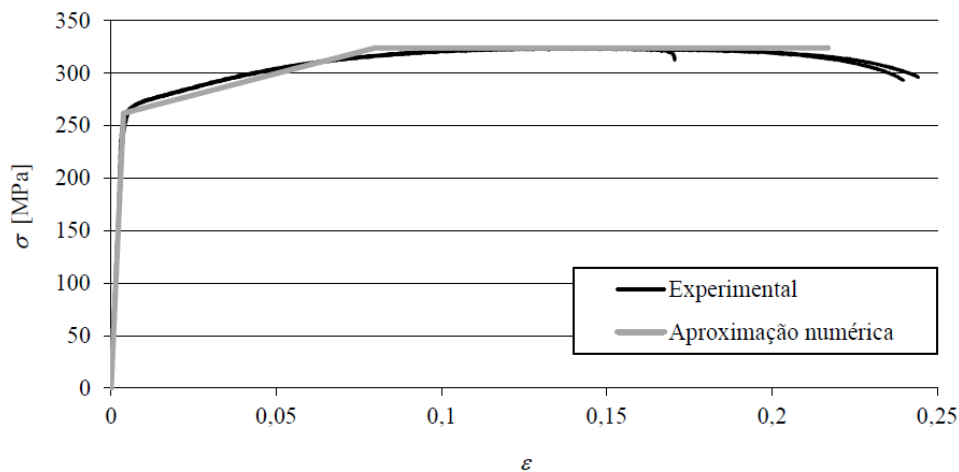


Figura 70 - Curva σ - ϵ da liga de alumínio AW6082-T651 e respetiva aproximação para análise do método de EF [56].

3.1.1.2 Adesivos

Neste trabalho prático foram utilizados três adesivos distintos. O adesivo epóxico Araldite® AV138, o adesivo epóxico Araldite® 2015 e por último o adesivo poliuretano Sikaforce® 7752. Os três adesivos apresentam uma característica em comum, sendo ela uma viscosidade baixa, o que permite facilitar a sua deposição nas superfícies a ligar.

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138, considerado um adesivo estrutural e fabricado pela empresa *Hunstman Advanced Materials*, caracteriza-se pelo seu comportamento frágil, mas de elevada resistência (Figura 71 e Tabela 7), sendo adequado para ligar diferentes materiais tais como metais, polímeros ou compósitos. É um adesivo de base epóxido, termoendurecível e composto por dois elementos, resina AV138 e endurecedor HV998 (Figura 72) [1]. É um adesivo que quando apresenta uma combinação na proporção de 100g:40g, apresenta uma elevada rigidez e uma boa resistência mecânica e química, permitindo ainda a cura à temperatura ambiente. Este adesivo suporta elevadas temperaturas de trabalho e ambientes bastante agressivos. As vantagens que se destacam neste adesivo são [55]:

- Excelente resistência química;
- Baixa emissão de gases e perda de voláteis;
- Resistência a temperaturas até 120°C;
- Temperatura de cura acima de 5°C;
- Boa capacidade de preenchimento e baixo escoamento.

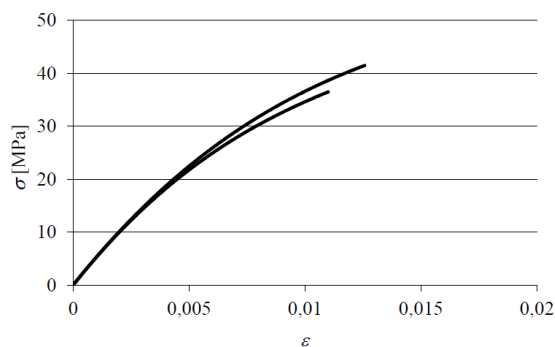


Figura 71 - Curvas σ - ϵ referentes ao adesivo Araldite® AV138 [30].



Figura 72 - Adesivo Araldite® AV138 [1].

Tabela 7 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [30, 57].

Propriedade	Unidade S.I.	Valor
Módulo de Young, E	GPa	$4,89 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson, ν	----	$0,35^a$
Tensão de Cedência à Tração, σ_e	MPa	$36,49 \pm 2,47$
Tensão de Ruptura à Tração, σ_f	MPa	$39,45 \pm 3,18$
Deformação de Ruptura à Tração, ε_f	%	$1,21 \pm 0,10$
Módulo de Elasticidade Transversal, G	GPa	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de Cedência ao Corte, τ_y	MPa	$25,10 \pm 0,33$
Tensão de Ruptura ao Corte, τ_f	MPa	$30,20 \pm 0,40$
Deformação de Ruptura ao Corte, γ_f	%	$7,80 \pm 0,70$
Tenacidade à Tração, G_{IC}	N/mm	$0,20^b$
Tenacidade ao Corte, G_{IIC}	N/mm	$0,38^b$

^a - Dados do fabricante; ^b - Estimado na referência [56, 58]

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015, considerado um adesivo estrutural e fabricado pela empresa *Hunstman Advanced Materials*, caracteriza-se pela baixa contração, pelo seu comportamento moderadamente dúctil e pela alta resistência ao corte e à clivagem (Figura 73 e Tabela 8). É um adesivo de base epóxico, termoendurecível e composto por dois elementos (Figura 74) [1].

A sua cura é feita à temperatura ambiente, e a sua mistura é realizada através de uma pistola manual, o que permite uma aplicação simples do adesivo com recurso a um bico que mistura os dois componentes e apresenta uma combinação na proporção de 50g:50g [59].

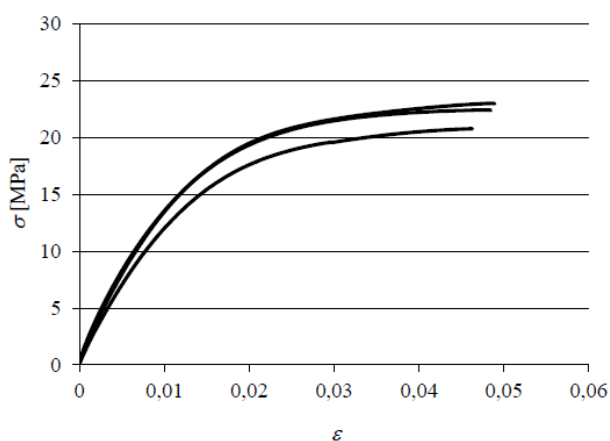


Figura 73 - Curvas σ - ϵ referentes ao adesivo Araldite® 2015 [30].



Figura 74 - Adesivo Araldite® 2015 [60].

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

Propriedade	Unidade S.I.	Valor
Módulo de Young, E	GPa	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, ν	---	$0,33^a$
Tensão de Cedência à Tração, σ_e	MPa	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de Ruptura à Tração, σ_f	MPa	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de Ruptura à Tração, ϵ_f	%	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de Elasticidade Transversal, G	GPa	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de Cedência ao Corte, τ_y	MPa	$14,60 \pm 1,30$
Tensão de Ruptura ao Corte, τ_f	MPa	$17,90 \pm 1,80$
Deformação de Ruptura ao Corte, γ_f	%	$43,90 \pm 3,40$
Tenacidade à Tração, G_{IC}	N/mm	$0,43 \pm 0,02$
Tenacidade ao Corte, G_{IIC}	N/mm	$4,70 \pm 0,34$

^a - Dados do Fabricante

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo Sikaforce® 7752, considerado um adesivo estrutural e fabricado pela empresa Sika®, caracteriza-se pela sua base de poliuretano estrutural tixotrópico e é constituído por dois componentes: resina e endurecedor (Figura 76).

É um adesivo que possui uma estrutura bastante estável e flexível, possui uma boa resistência térmica e uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento (Figura 75 e Tabela 9). As vantagens que mais se destacam neste tipo de adesivo são as seguintes [55]:

- Resistência ao envelhecimento;
- Resistência ao impacto;
- Cura à temperatura ambiente;
- Funciona com retardador de chamas;
- Excelente flexibilidade a baixas temperaturas.

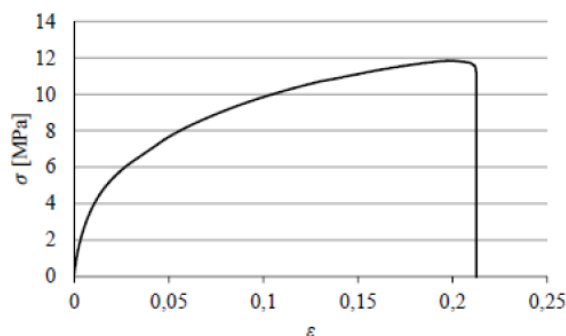


Figura 75 - Curva de σ - ϵ referente ao adesivo SikaForce® 7752 [6].



Figura 76 - Adesivo Sikaforce® 7752 [1].

Tabela 9 - Propriedades mecânicas do adesivo Sikaforce® 7752 [61].

Propriedade	Unidade S.I.	Valor
Módulo de Young, E	GPa	$0,49 \pm 0,09$
Coefficiente de Poisson, ν	----	$0,30^a$
Tensão de Cedência à Tração, σ_e	MPa	$3,24 \pm 0,48$
Tensão de Rotura à Tração, σ_r	MPa	$11,48 \pm 0,25$
Deformação de Rotura à Tração, ε_r	%	$19,18 \pm 1,40$
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 - Dados do Fabricante

3.1.2 Geometria das juntas

A junta adesiva em estudo neste trabalho prático tem a forma de T, como se pode verificar na Figura 77.

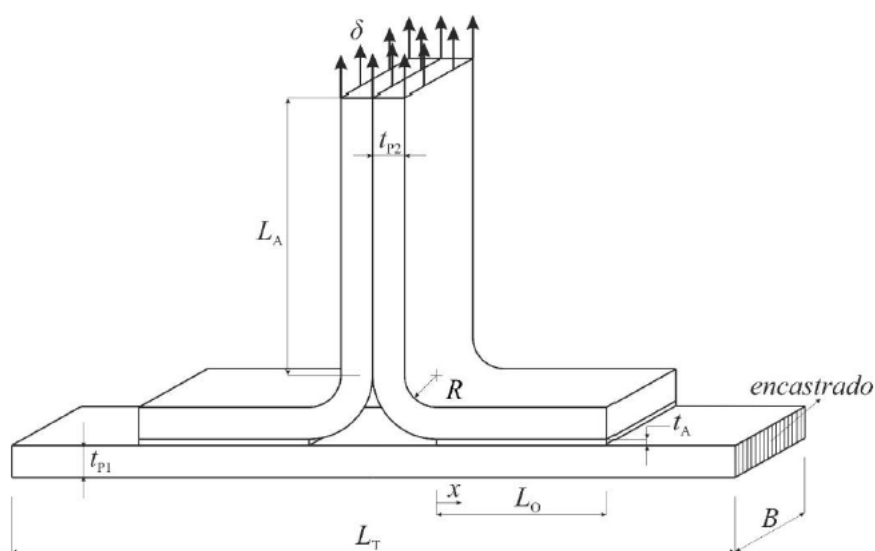


Figura 77 - Esquema representativo da junta em T [1].

A sua constituição resume-se a uma base em alumínio unida por adesivo a dois aderentes, também em alumínio, com a forma de L, posicionados simetricamente e na zona superior dessa mesma base. A colagem da junta é efetuada com os três tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015) e segundo os parâmetros definidos na Tabela 10.

Tabela 10 - Parâmetros utilizados na geometria da junta [1].

Parâmetro	Valor (mm)
t_{P1}	3
t_{P2}	1; 2; 3; 4
t_A	0,2
L_A	60
L_T	100
L_0	25
R	5; 5,5; 7,5; 7,5
B	25

3.1.3 Processo de fabrico

De seguida, é descrito o processo de fabrico das juntas em T estudadas. O processo de fabrico das juntas apresenta semelhanças para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, com exceção da preparação e aplicação dos adesivos nos aderentes. No caso do adesivo Araldite® AV138, a preparação da mistura consiste numa proporção de resina/endurecedor de 10g/4g. Esta mistura é realizada manualmente até se atingir a homogeneização do adesivo. Após a mistura do adesivo, a aplicação é feita manualmente. Por outro lado, a aplicação do adesivo Araldite® 2015, fornecido em bisnagas 50 ml + 50 ml, é realizada através do uso de uma pistola manual de pressão e respetiva homogeneização através do bico de mistura dos dois 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 constitui em dois aderentes de comprimento igual para formar os aderentes em L e mais 1 aderente que constitui na base onde os aderentes em L são colados;
2. Dobragem dos aderentes em L, efetuada numa prensa manual (Figura 78);



Figura 78 - Prensa manual utilizada na dobragem dos aderentes em L [1].

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 0,2 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 0,2 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 79);

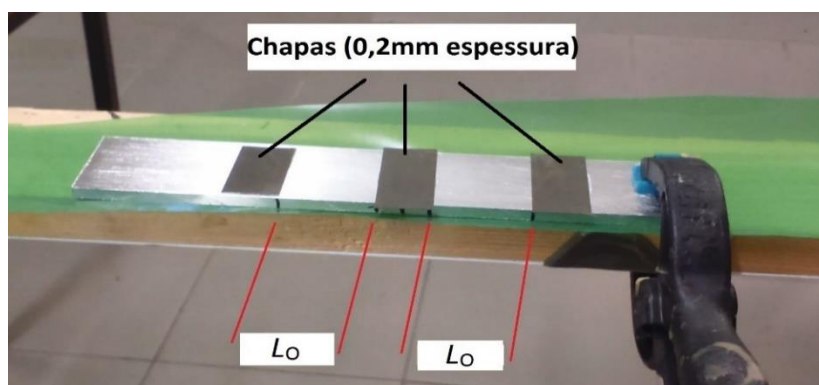


Figura 79 - Chapas normalizadas de 0,2 mm de espessura fixas ao aderente base [1].

9. Aplicação do adesivo nas superfícies de colagem dos aderentes. Neste ponto a aplicação do adesivo é diferente nos dois tipos de adesivos. No caso das juntas com adesivo Araldite® 2015, este é aplicado em “zig-zag” e diretamente no aderente base (Figura 80). Em relação ao adesivo Araldite® AV138, a sua aplicação é feita diretamente nas superfícies dos aderentes constituintes dos aderentes em forma de L;



Figura 80 - Aplicação do adesivo Araldite® 2015 em "zig-zag" no aderente base [1].

10. Montagem dos diversos aderentes e posterior fixação com recurso a molas (Figura 81);



Figura 81 - Exemplo de juntas com aderentes em L com $t_{p2}=1$ mm: com Araldite® 2015 (a) e com Araldite® AV138 (b) [1].

11. Posteriormente ao processo de cura das juntas (temperatura ambiente durante pelo menos 7 dias), iniciou-se a remoção dos excessos de adesivo nas juntas com o auxílio de um alicate (Figura 82);

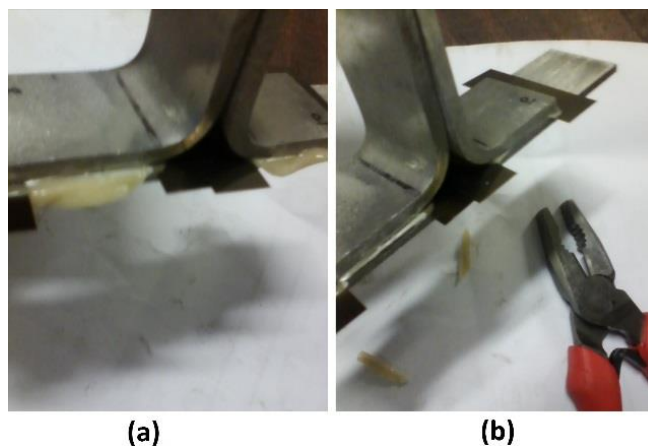


Figura 82 - Remoção dos excessos de adesivo: antes da remoção (a) e após a remoção (b) de excessos [1].

- 12.** Após a remoção dos excessos de adesivo, é aconselhável retirar-se as fitas calibradas de 0,2 mm de espessura. A preparação das juntas deve ser feita de forma cuidada de modo a não danificar a colagem da junta, pelo que nos casos em esta operação revelou um grau de maior complicação, as fitas não foram extraídas. Posteriormente à remoção das chapas, foi realizada uma limpeza das laterais das juntas e dos filetes de adesivo restante com o auxílio de um mandril (Figura 83).



Figura 83 - Utilização do mandril para efetuar a remoção de filetes de adesivo [1].

A Figura 84 representa uma junta em T, já preparada para ser sujeita ao ensaio em causa, após os processos de preparação referidos anteriormente, embora ainda com as fitas calibradas.

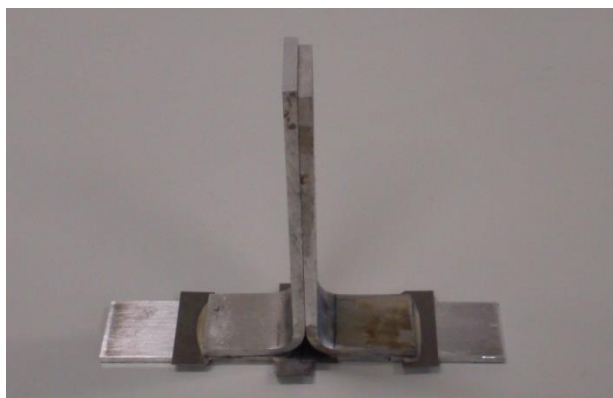


Figura 84 - Aspeto final da junta antes da realização do teste [1].

3.1.4 Ensaio das juntas

O ensaio das juntas foi realizado numa máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (Figura 85 (a)). As juntas em T foram sujeitas a uma solicitação à tração e encastradas no aderente base (Figura 85 (b)).

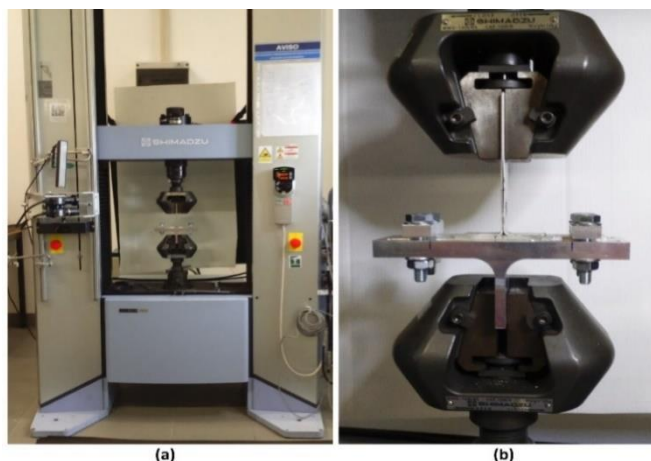


Figura 85 - Ensaio: máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (a) e encastramento do provete na base e solicitação à tração na vertical (b) [1].

Na realização dos ensaios devem ser definidas as velocidades de ensaio para os vários tipos de junta. Nas juntas com o adesivo Araldite® AV138 foi utilizada uma velocidade de 0,5 mm/min. Por outro lado, nas juntas com o adesivo Araldite® 2015 foi utilizada uma velocidade de 1mm/min. O deslocamento das juntas é realizado a uma velocidade constante até se atingir a rotura total das juntas, ou seja, até ocorrer a separação total dos aderentes em L com o aderente base. O deslocamento é proporcionado 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 essa finalidade (Figura 85 (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 das barras do suporte em alumínio e do desaperto das garras superiores da máquina de ensaios.

3.1.5 Resultados obtidos

Para cada adesivo e valor de t_{p2} foram obtidos diversos 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 também realizada uma análise destes resultados.

3.1.5.1 Curvas $P-\delta$

3.1.5.1.1 Araldite® AV138

Da Figura 86 à Figura 89, estão representadas as curvas $P-\delta$ registadas nos ensaios dos provetes de juntas com o adesivo Araldite® AV138, para cada diferente valor de t_{p2} .

A partir da análise das curvas $P-\delta$ das juntas com o adesivo Araldite® AV138 verifica-se a existência uma concordância entre elas, no que diz respeito à rigidez inicial e valor de $P_{m\acute{a}x}$. Numa fase inicial, a junta apresenta um comportamento elástico até que seja atingido o valor de $P_{m\acute{a}x}$. O comportamento elástico é caracterizado por uma evolução aproximadamente linear dos valores de P em relação a δ . Após ser atingido 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.

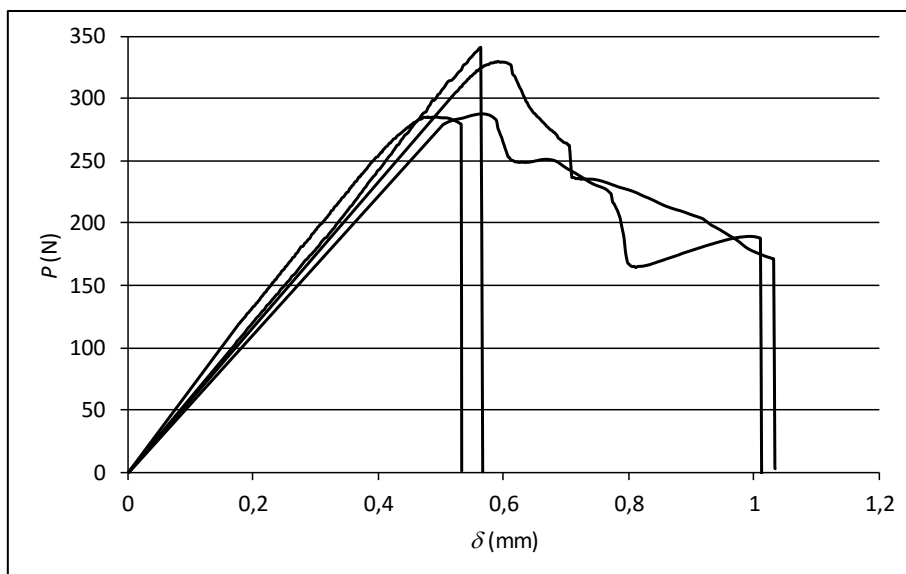


Figura 86 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm [1].

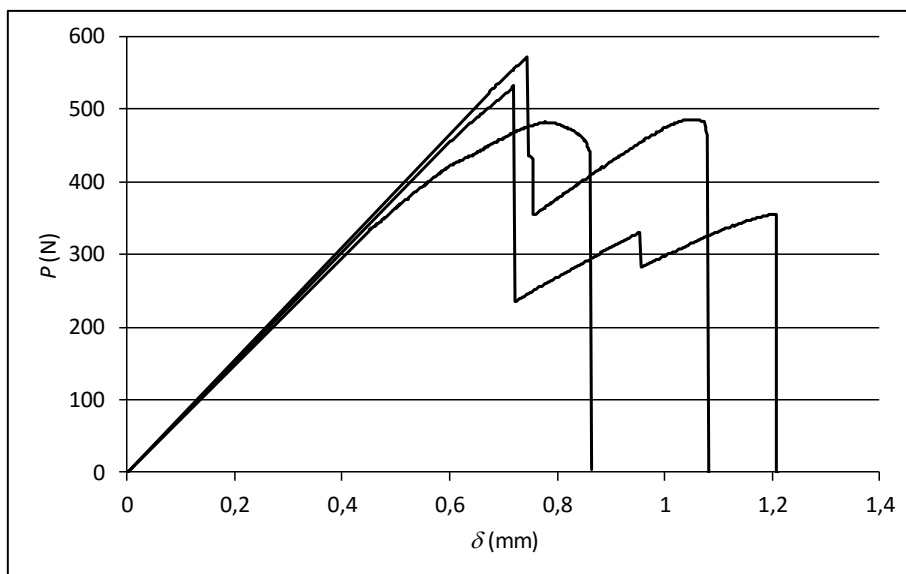


Figura 87 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm [1].

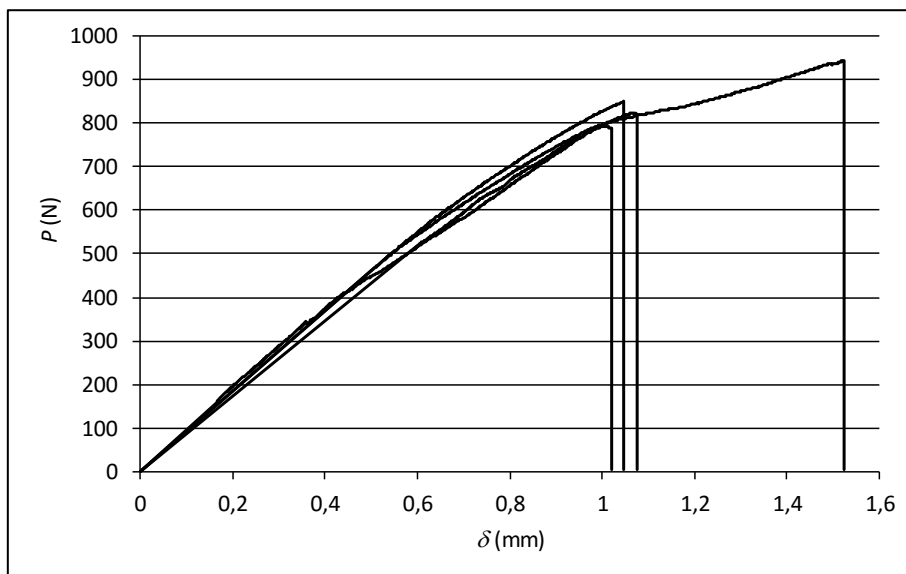


Figura 88 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm [1].

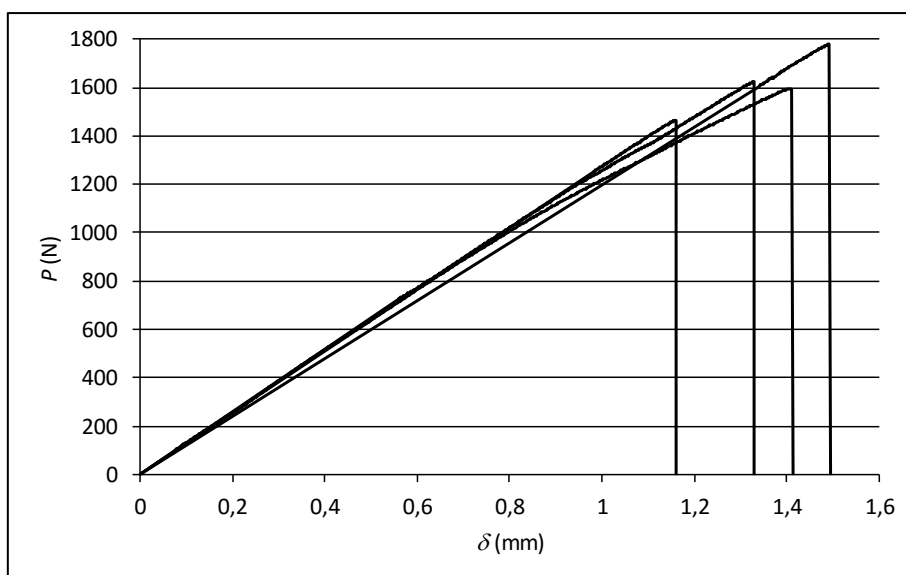


Figura 89 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm [1].

Como se pode verificar através da Figura 86 à Figura 89, as curvas P - δ dos diferentes provetes ensaiados apresentam uma correlação aceitável no que diz respeito à resistência máxima e respetivo deslocamento, e ainda deslocamento de rotura. Regista-se como exceção, na Figura 86, uma das juntas ensaiadas em que se obteve um deslocamento abaixo das restantes. Esta diferença pode ter sido originada pela 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 que os maiores valores foram obtidos para $t_{p2}=4$ mm. Conclui-se também que com o aumento dos valores de t_{p2} a resistência da junta aumenta.

3.1.5.1.2 Araldite® 2015

Da Figura 90 à Figura 93 estão representadas as curvas $P-\delta$ registadas nos ensaios dos provetes de juntas com o adesivo Araldite® 2015, para cada diferente valor de t_{p2} .

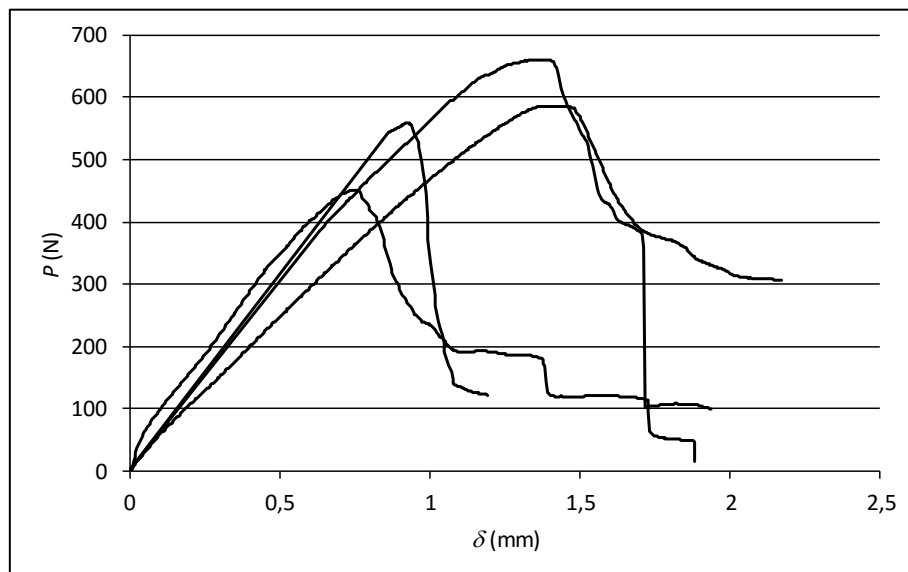


Figura 90 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm [1].

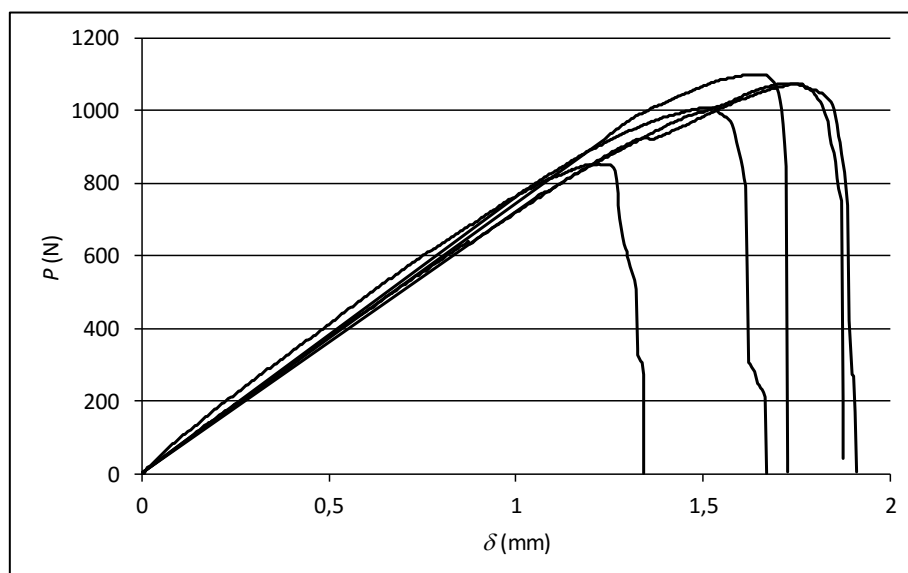


Figura 91 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=2$ mm [1].

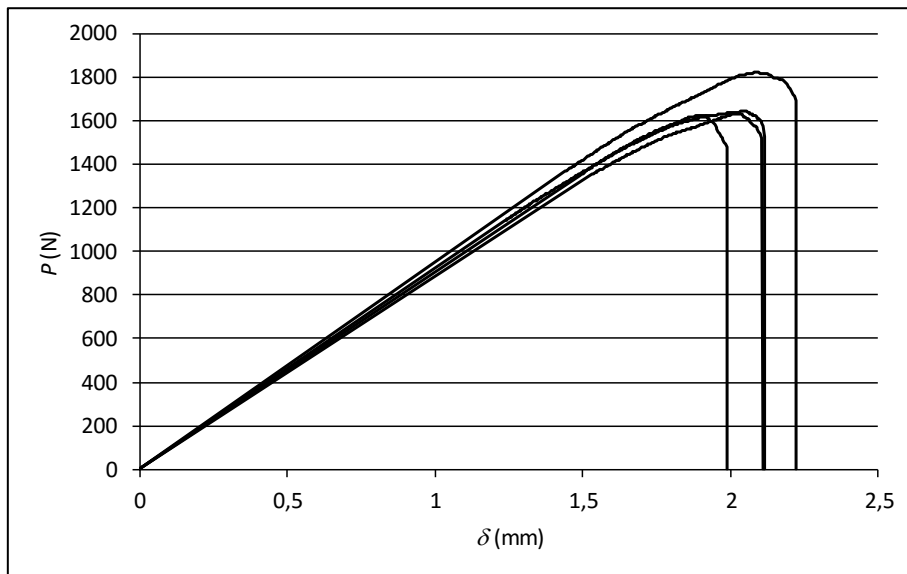


Figura 92 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=3$ mm [1].

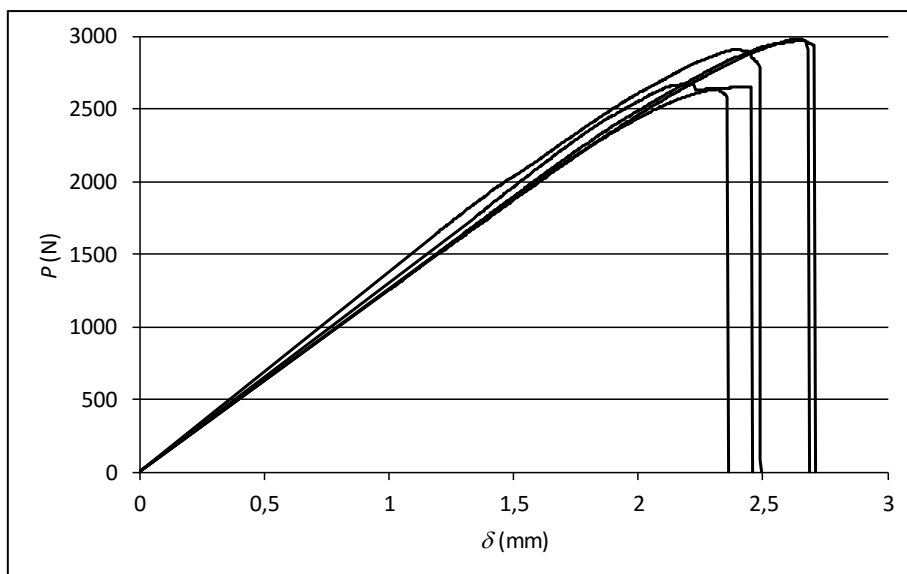


Figura 93 - Curvas P - δ registadas através dos ensaios de provetes de juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=4$ mm [1].

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

Fazendo uma breve análise da Figura 90 à Figura 93 verifica-se que os conjuntos de curvas P - δ de cada valor de t_{p2} apresentam concordância 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 provocou a plastificação dos

aderentes em L para $t_{p2}=1$ mm. Nas juntas com o adesivo de 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 era espectável, com o aumento de t_{p2} , a resistência aumenta, assim como o deslocamento de rotura.

3.1.5.2 Modos de rotura

Da Figura 94 à Figura 97 estão representados os 5 provetes de juntas com o adesivo Araldite® AV138 ensaiados para cada um dos quatro valores de t_{p2} .

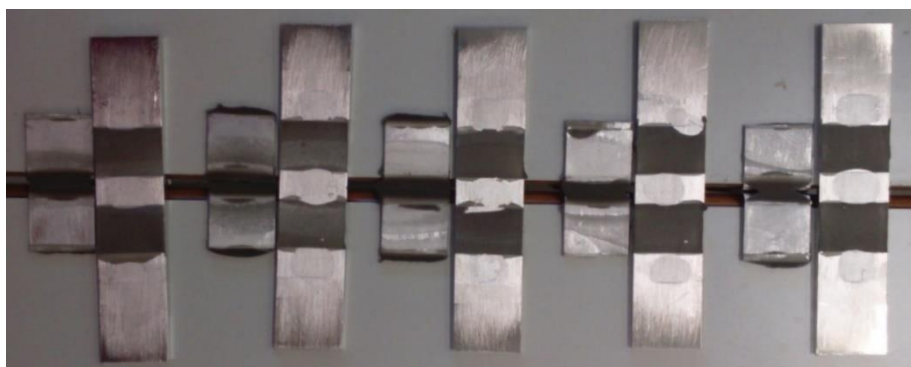


Figura 94 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm [1].



Figura 95 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm [1].

Os modos de rotura para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 apresentam semelhanças entre 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 tipo de rotura é resultado de uma boa preparação das superfícies dos aderentes, que permite uma melhor molhagem do adesivo nos aderentes. Nas juntas com o adesivo Araldite® AV138 pode-se observar em todas as juntas a existência de adesivo em ambas as superfícies de colagem. No entanto, nalguns casos, uma das superfícies ficou coberta com uma camada extremamente fina de adesivo, não visível nas figuras.



Figura 96 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm [1].

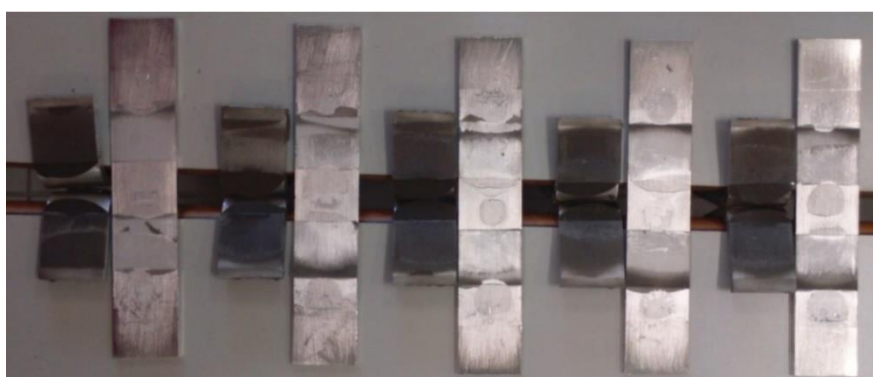


Figura 97 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm [1].

Da Figura 98 à Figura 101 são apresentados os 5 provetes de juntas com o adesivo Araldite® 2015 ensaiados para cada um dos quatro valores de t_{p2} . Tal como nos modos de rotura verificados para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, em todos os provetes de juntas 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.

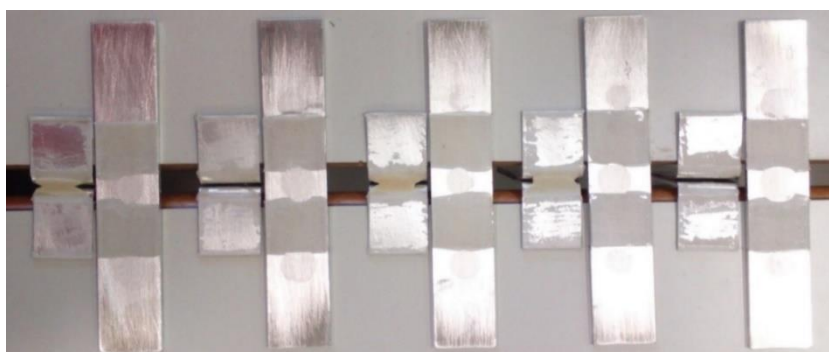


Figura 98 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm [1].



Figura 99 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=2$ mm [1].

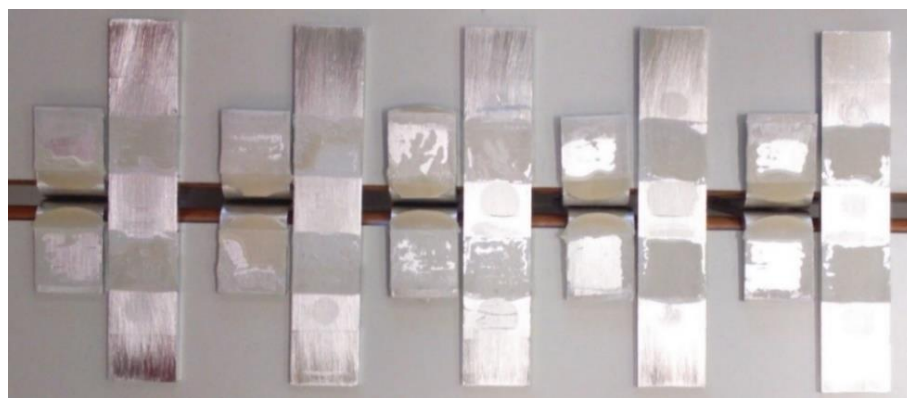


Figura 100 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=3$ mm [1].

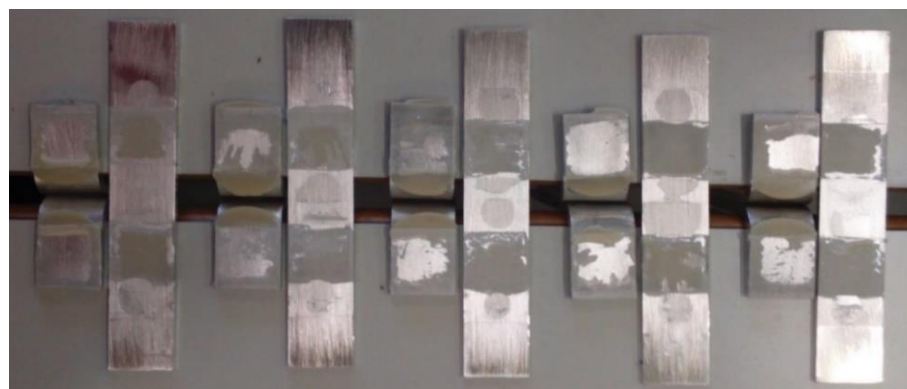


Figura 101 - Superfícies de rotura das juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=4$ mm [1].

3.1.5.3 Resistência das juntas

Neste subcapítulo são apresentados os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente. Foram considerados três provetes, como valor mínimo, para calcular as médias e o desvio padrão de cada configuração de junta. A Figura 102 é representativa dos valores experimentais de $P_{m\acute{a}x}$ em função de t_{p2} das juntas com o adesivo Araldite® AV138 ou Araldite® 2015.

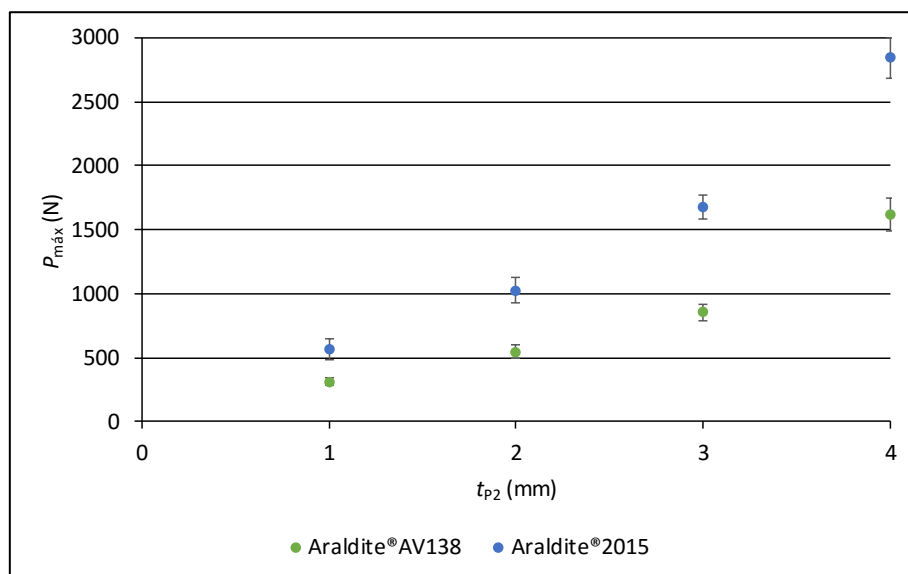


Figura 102 - Valores experimentais de $P_{máx}$ obtidos nas juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [1].

Analisando a Figura 102 pode-se observar que os valores de $P_{máx}$ aumentam com o aumento de t_{p2} , independente do tipo de adesivo. Contudo, a evolução foi idêntica para ambos os adesivos. Em ambos os adesivos se observou um grande aumento da resistência entre as juntas com $t_{p2} = 3$ e 4 mm. Na Figura 102 observa-se que os valores de $P_{máx}$ para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 são mais elevados do que aqueles obtidos com o adesivo Araldite® AV138. De facto, dependendo do valor de t_{p2} , a resistência pode adquirir o dobro da obtida com o adesivo Araldite® AV138, embora o último adesivo tenha um valor superior de resistência à tração.

Tendo como referência o valor de $P_{máx}$ para $t_{p2}=1$ mm nas juntas com o adesivo Araldite® AV138, o aumento percentual dos valores de $P_{máx}$ relativamente à 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). Em relação ao adesivo Araldite® 2015, o aumento percentual para $t_{p2}=2$ mm foi de 81,2%, para $t_{p2}=3$ mm de 197,8% e por fim para $t_{p2}=4$ mm o aumento foi de 403,7%, registando-se valores superiores aos encontrados para o adesivo Araldite® AV138. Em termos percentuais, o adesivo Araldite® 2015 atingiu valores de $P_{máx}$ medidos superiores em 81,3%, 87,7%, 97,2% e 75,9%, respetivamente, para valores de t_{p2} entre valores de 1 a 4 mm, relativamente às juntas com adesivo Araldite® AV138.

Tendo em conta as características de cada adesivo, considera-se que o adesivo Araldite® 2015 apresenta uma maior resistência aos efeitos de arrancamento devido a ser um adesivo mais dúctil e flexível. De facto, o adesivo Araldite® 2015 apresenta um valor de $E=1850$ MPa. Para além disso, o adesivo Araldite® AV138 é mais frágil, sendo mais sensível a esforços de arrancamento. Por outro lado, e tendo em conta que a junta é principalmente solicitada à tração, o adesivo Araldite® 2015 apresenta valores de G_{IC}

superiores, o que favorece a obtenção de valores de $P_{\text{máx}}$ superiores aos observados nas juntas com o adesivo Araldite® AV138.

3.2 Trabalho numérico

3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica foi realizada utilizando o MEFX com auxílio ao *software* ABAQUS®, com o objetivo de realizar uma previsão da resistência da junta em T. O MEFX tem vários critérios de iniciação de dano, descritos anteriormente no subcapítulo 2.2.2.5.2, sendo que todos foram utilizados na realização desta análise. Os modelos bidimensionais (2D) criados no *software* ABAQUS®, o adesivo e o aderente foram modelados como sólidos (Figura 103).

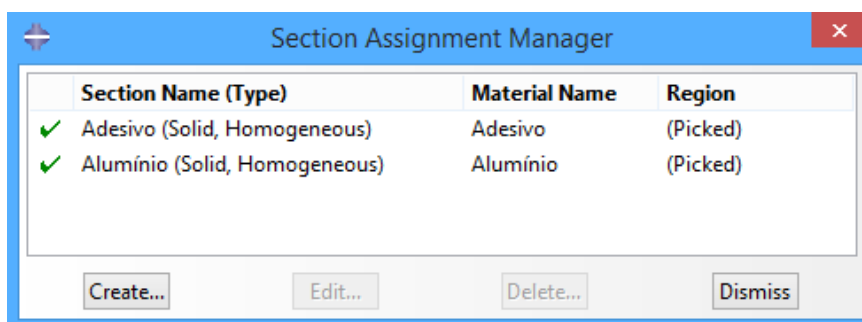


Figura 103 - Elementos constituintes da junta adesiva no *software* ABAQUS®.

O passo seguinte, após a criação dos modelos 2D e da atribuição do tipo de elementos a cada constituinte da junta, resume-se à atribuição das propriedades mecânicas dos materiais utilizados neste trabalho. Na Tabela 11 são apresentadas as propriedades mecânicas da liga de alumínio que foram usadas no *software* ABAQUS®.

Tabela 11 – Propriedades mecânicas da liga de alumínio utilizadas no *software* ABAQUS®.

E [GPa]	σ_y [MPa]	σ_f [MPa]	ν
70	261,67	324	0,3

As propriedades atribuídas aos adesivos no *software* ABAQUS® são apresentadas nos subcapítulos 3.2.2.1.1, 3.2.2.1.2 e 3.2.2.1.3 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

O refinamento da malha utilizado na análise de previsão de resistência é diferente da malha utilizada na análise de tensões. A malha utilizada na análise de tensões é uma malha muito mais refinada do que a malha dos modelos de análise de previsão de

resistência (Figura 104). Na Tabela 12 é apresentado o refinamento utilizado na análise de previsão de resistência e na análise de tensões, em função de t_{p2} . Este é um fator de elevada importância pois permite registrar com precisão os elevados gradientes de tensões que são gerados ao longo da camada de adesivo. A malha foi realizada de modo a ter maior refinamento nas zonas críticas da junta, tais como a zona dos aderentes mais próxima do adesivo, as extremidades da camada adesiva e a zona de curvatura do aderente de alumínio. O refinamento variável da malha possibilita a obtenção de resultados com maior precisão nas zonas com maiores variações de tensão e também diminui o esforço computacional, o que provoca uma diminuição do tempo de análise.

Tabela 12 - Refinamento utilizado na análise de previsão de resistência e na análise de tensões, em função de t_{p2} .

t_{p2}	Análise de previsão de resistência		Análise de tensões	
	Nós	Elementos	Nós	Elementos
1 mm	2129	1603	195401	192500
2 mm	2584	2051	259051	252000
3 mm	3101	2555	311461	308500
4 mm	3581	3032	364991	362000

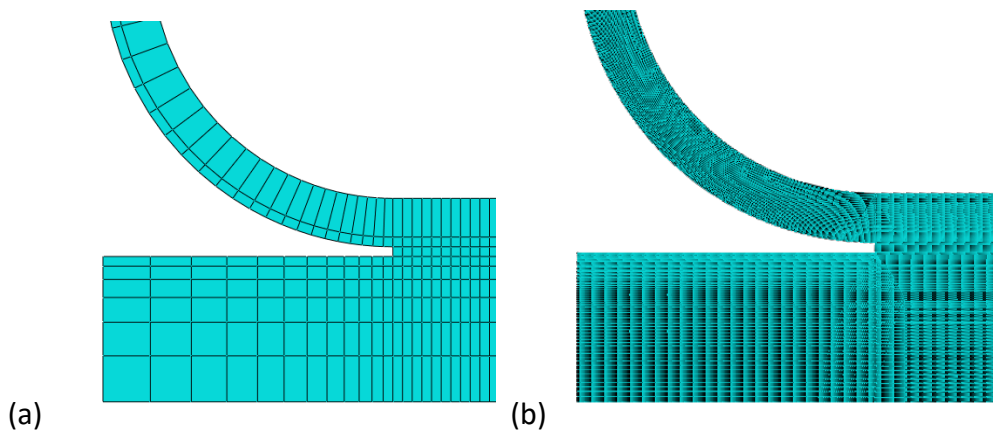
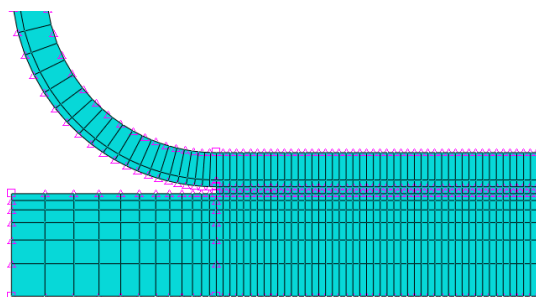
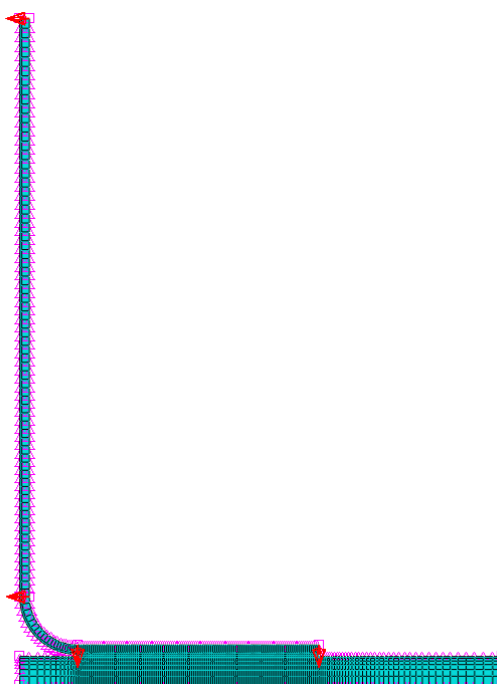


Figura 104 - Refinamento das malhas para: análise de resistência (a) e análise de tensões (b).

O refinamento da malha foi realizado através da função *bias*, que representa o rácio de refinamento ao longo de uma aresta do modelo. Esta função possibilita a gradação do tamanho dos elementos, e pode ser simples, quando se pretende refinar num sentido, ou dupla, quando se pretende refinar nos dois sentidos. A Figura 105 mostra um exemplo do efeito *bias*.

Figura 105 - Exemplo do efeito *bias*.

Em relação à malha da análise de resistência, a zona do adesivo é constituída por uma fila de elementos de tamanho $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$. No aderente em L foi aplicada gradação vertical simples no sentido da zona da camada de adesivo, com um tamanho de elementos a variar de 0,2 a 1 mm. Na Figura 106 é possível observar-se o efeito *bias* aplicado ao aderente em L, onde a aplicação do refinamento está a ser realizada na direção da camada de adesivo, zona mais crítica da junta.

Figura 106 - Sentido do efeito *bias* da malha no aderente em L.

O passo seguinte foi refinar a malha de forma crescente na região relativa ao seu comprimento do aderente inferior, fora da zona de ligação, no sentido da camada adesiva (Figura 107). Foi utilizado nos dois lados da camada adesiva um tamanho de elemento a variar de 0,2 a 1 mm. Ainda sobre o aderente inferior foi aplicado um refinamento crescente na região relativa à espessura, também no sentido da camada do adesivo (Figura 108). Foi aplicado um tamanho de elemento a variar de 0,2 a 1 mm.

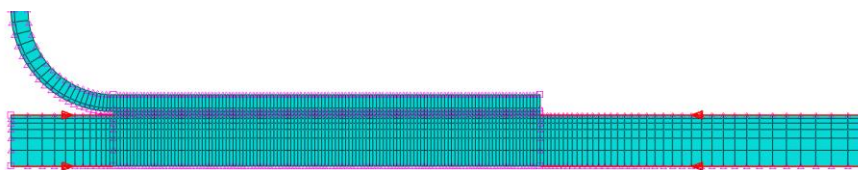


Figura 107 - Sentido do efeito *bias* da malha ao longo do comprimento do aderente inferior.

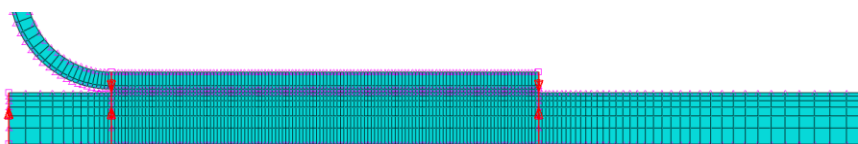


Figura 108 - Sentido do efeito *bias* da malha ao longo da espessura do aderente inferior e superior.

As condições fronteira e de carregamento impostas aos modelos numéricos foram aplicadas da seguinte forma: deslocamento vertical no aderente em L, encastramento na extremidade direita no aderente inferior e condição de simetria vertical ao longo do aderente inferior e do aderente em L. Na Figura 109 estão representadas as condições fronteira e de carregamento impostas aos modelos numéricos no *software* ABAQUS®.



Figura 109 - Condições fronteira e de carregamento impostas aos modelos numéricos no *software* ABAQUS®.

Depois de realizado o refinamento da malha e a aplicação das condições fronteira e de carregamento, foi necessário definir a incrementação da análise numérica. Definir um limite mínimo reduzido, torna-se um aspeto importante de modo a evitar problemas de

convergência na zona de propagação de dano e também um limite máximo elevado de forma a que a simulação termine sem que se obtenham os resultados pretendidos. Na Tabela 13 são apresentados os valores utilizados na incrementação da análise numérica no *software* ABAQUS®.

Tabela 13 - Definição de incrementação no ABAQUS®.

Incrementação	
Número máximo de incrementos	10000
Tamanho inicial do incremento	0,01
Tamanho mínimo do incremento	10^{-20}
Tamanho máximo do incremento	0,01

3.2.2 Modelo de dano utilizado

Neste presente subcapítulo pretende-se descrever o modelo de dano utilizado e as propriedades dos adesivos utilizadas para o estudo de MEFX, sendo que a formulação teórica do MEFX utilizada neste trabalho foi definida anteriormente nos subcapítulos 2.2.2.5.1 e 2.2.2.5.2. O MEFX considera que os materiais assumem um comportamento inicial linear elástico. O início da degradação é simulado através de critérios de iniciação de dano. Os critérios de iniciação de dano podem ser baseados nas tensões e deformações principais máximas (critério MAXPS e MAXPE, respetivamente), que são comparadas com os respetivos valores limite dos adesivos. Conforme apresentado nos subcapítulos 2.2.2.5.1 e 2.2.2.5.2, existe a possibilidade de considerar critérios distintos: nos critérios MAXS e MAXE a iniciação do dano tem lugar quando os valores de tensões ou deformações (normal ou de corte) atingem os valores limite, respetivamente, e nos critérios QUADS e QUADE o dano inicia quando o valor de f no critério respetivo atingir a unidade. Neste trabalho, foram testados estes seis critérios de iniciação de dano. Para os critérios MAXS, MAXE, QUADS e QUADE foi necessário especificar a direção da propagação do dano, que foi considerada como horizontal (direção do comprimento da camada de adesivo). As leis de tração-separação simulam a degradação do material e podem ser lineares ou exponenciais. Neste trabalho foi escolhida uma lei de degradação linear entre as tensões ou deformações (dependendo do critério utilizado) e deslocamentos, com uma redução proporcional das tensões transmitidas em função dos deslocamentos, até se dar a rotura completa. No caso dos critérios MAXPS e MAXPE, a propagação do dano tem lugar perpendicularmente às tensões ou deformações principais máximas, respetivamente.

3.2.2.1 Determinação das propriedades de dano

De forma a caracterizar os adesivos para a análise pelo MEFX nos modelos numéricos do ABAQUS®, é necessário conhecer os valores de E , ν , G_{IC} e tenacidade ao corte (G_{IIC}), mas também $\sigma_{m\acute{a}x}$ e $\epsilon_{m\acute{a}x}$, já que os critérios MAXPS e MAXPE utilizam o valor da tensão nominal máxima e deformação nominal máxima, respetivamente. Tendo em conta que as suas características são aproximadas, $\sigma_{m\acute{a}x}$ foi considerado igual à tensão de rotura à tração e $\epsilon_{m\acute{a}x}$ foi considerado igual à deformação de rotura à tração. Esta aproximação foi aplicada para ambos os adesivos.

3.2.2.1.1 Araldite® AV138

De forma a simular a iniciação da fenda na camada de adesivo Araldite® AV138, foram utilizados, nos critérios de tensão e deformação, os parâmetros que constam na Tabela 14.

Tabela 14 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® AV138

Parâmetros	
E [GPa]	4,89
G [GPa]	1,56
t_n^0 [MPa]	39,45
t_s^0 [MPa]	30,20
G_{IC} [N/mm]	0,20
G_{IIC} [N/mm]	0,38

Para os critérios baseados nas tensões (MAXPS, MAXS e QUADS) utilizaram-se os valores dos parâmetros t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} , G_{IIC} e $\sigma_{m\acute{a}x}$. Nos critérios baseados na deformação (MAXPE, MAXE e QUADE) utilizaram-se os valores dos parâmetros ϵ_n^0 , ϵ_s^0 , G_{IC} , G_{IIC} e $\epsilon_{m\acute{a}x}$.

3.2.2.1.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, para a lei de degradação linear com o adesivo Araldite® 2015 foram utilizados nos critérios de tensão e deformação os valores das propriedades presentes na Tabela 15.

Tabela 15 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® 2015.

Parâmetros	
E [GPa]	1,85
G [GPa]	0,56
t_n^0 [MPa]	21,63
t_s^0 [MPa]	17,90
G_{IC} [N/mm]	0,43
G_{IIC} [N/mm]	4,70

Os valores das propriedades usadas nos critérios de tensão ($\sigma_{m\acute{a}x}$ e t_s^0) são inferiores aos do Araldite® 2015, enquanto para os critérios de deformação os valores das propriedades ($\epsilon_{m\acute{a}x}$ e ϵ_s^0) são superiores, o que é indicativo de um adesivo menos resistente, mas mais dúctil do que o anterior.

3.2.2.1.3 Sikaforce® 7752

Os parâmetros utilizados nos critérios de tensão e deformação para a iniciação da fenda no adesivo Sikaforce® 7752 são apresentados na Tabela 16.

Tabela 16 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Sikaforce® 7752.

Parâmetros	
E [GPa]	0,49
G [GPa]	0,19
t_n^0 [MPa]	11,48
t_s^0 [MPa]	10,17
G_{IC} [N/mm]	2,36
G_{IIC} [N/mm]	5,41

O adesivo SikaForce® 7752, conforme se pode observar, é o adesivo que apresenta valores mais baixos de resistência mecânica mas, por outro lado, é o adesivo que apresenta maiores valores de tenacidade.

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 a distância normalizada ao longo do comprimento do adesivo (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} .

3.2.3.1 Tensões de arrancamento

A Figura 110, Figura 111 e Figura 112 representam o comportamento das tensões σ_y/σ_{med} ao longo de x/L_0 para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

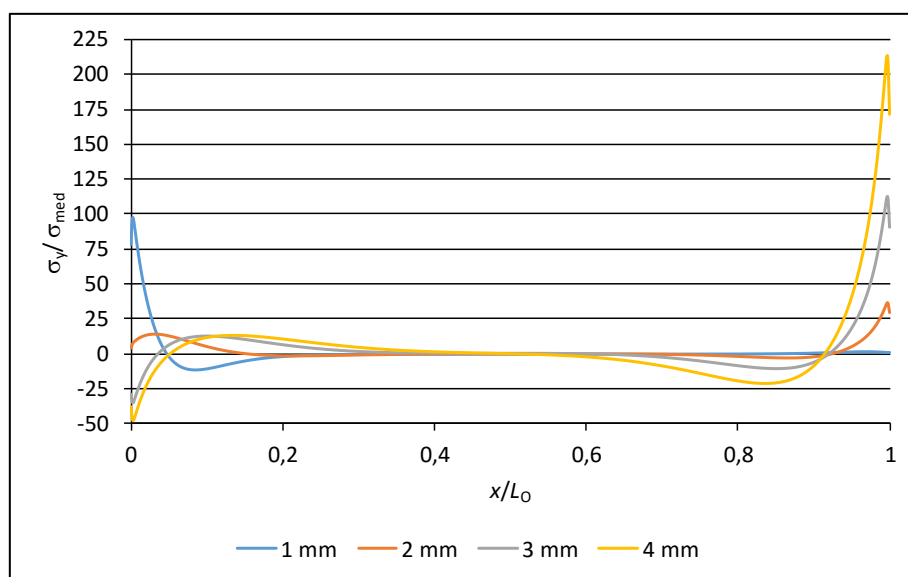


Figura 110 - Tensões σ_y para junta em T (Araldite® AV138).

Neste tipo de junta observa-se que, para cada valor de t_{p2} , as curvas de tensões apresentam dois picos de tensão localizados nas proximidades de $x/L_0=0$ e 1 mm. No que se refere ao comportamento das curvas de σ_y , este foi muito semelhante nos 3 adesivos em análise, apresentando variação na grandeza dos valores. Os valores registados nas juntas com o adesivo Araldite® AV138 foram superiores aos valores obtidos com o adesivo Araldite® 2015 e bastante superiores aos do adesivo Sikaforce® 7752. Este fenómeno deve-se ao facto da rigidez do adesivo Araldite® AV138 ser superior à rigidez dos outros adesivos em estudo. Verificou-se ainda que a partir de $t_{p2}=2$

mm ocorreu 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 $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm. Em relação 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.

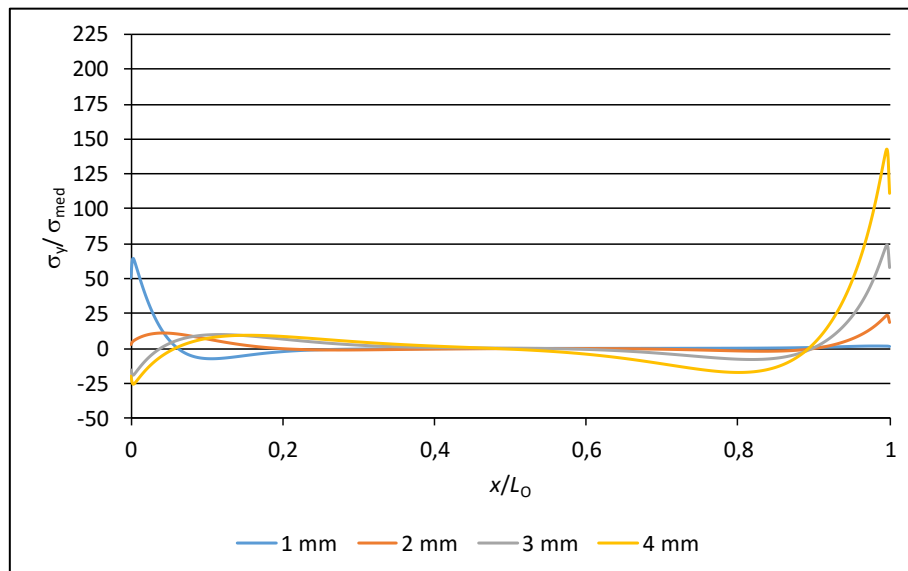


Figura 111 - Tensões σ_y para junta em T (Araldite® 2015).

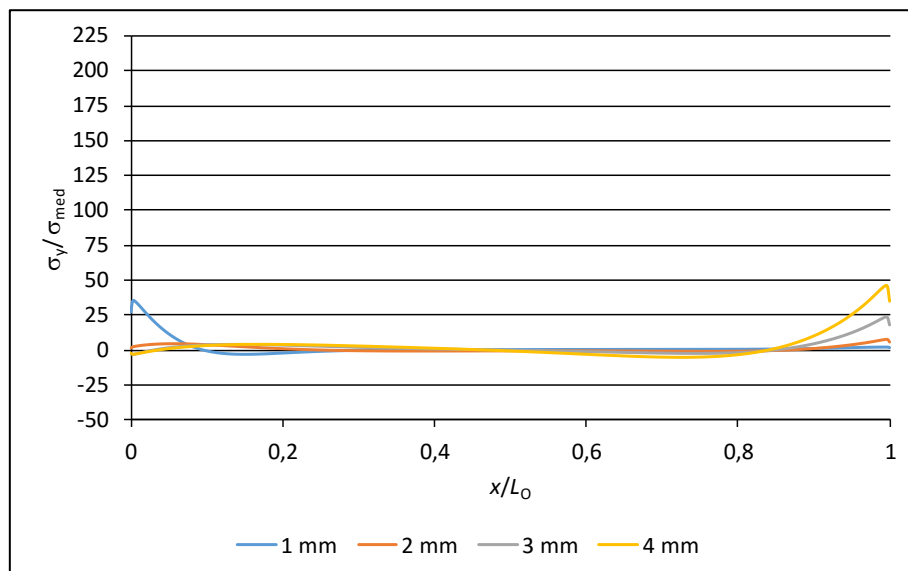


Figura 112 - Tensões σ_y para junta em T (Sikaforce® 7752).

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. Verificou-se que, nos três adesivos analisados, o comportamento das tensões σ_y/σ_{med} ao longo de x/L_0 é diferente em

função de t_{p2} , em termos de valores negativos e positivos, correspondentes a compressão e tração, respetivamente.

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). A análise dos resultados obtidos das tensões τ_{xy} consiste no estudo das referidas tensões ao longo de x/L_0 . A Figura 113, Figura 114 e Figura 115 representam as distribuições das tensões τ_{xy} nas juntas com o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente.

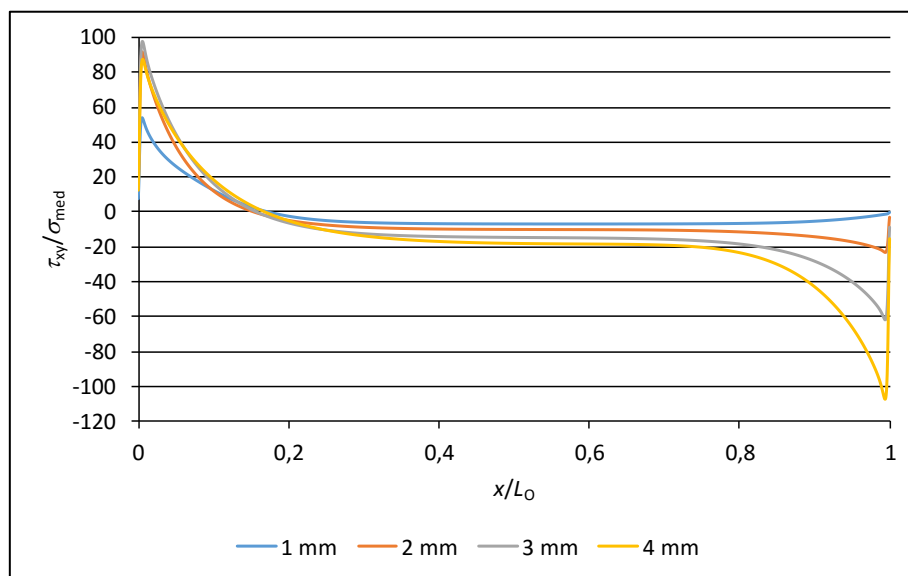


Figura 113 - Tensões τ_{xy} para junta em T (Araldite® AV138).

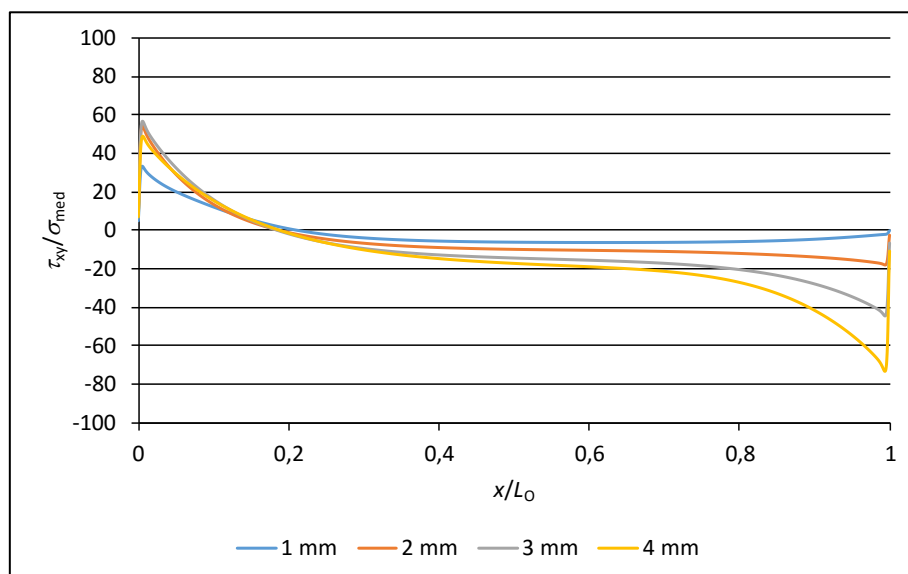


Figura 114 - Tensões τ_{xy} para junta em T (Araldite® 2015).

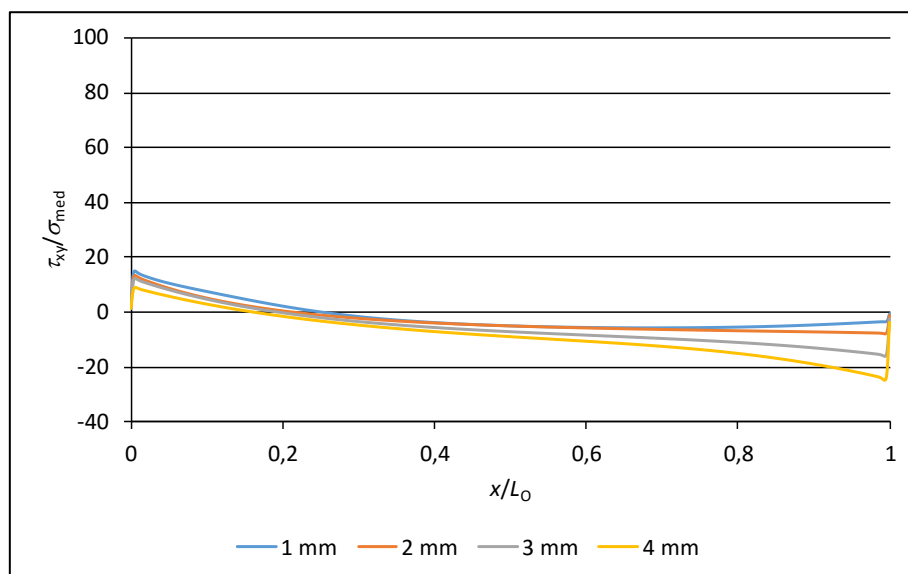


Figura 115 - Tensões τ_{xy} para junta em T (Sikaforce® 7752).

Nas juntas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015 é possível observar 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. Por outro lado, os valores obtidos para $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm foram praticamente iguais, podendo-se observar uma redução significativa para $t_{p2}=1$ mm. Relativamente ao pico na proximidade $x/L_0=1$, verificou-se um aumento gradual dos valores com o aumento de t_{p2} . Efetuando uma comparação entre os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, observou-se que com o aumento da flexibilidade do adesivo menores são os picos de tensão τ_{xy} registados.

Relativamente à junta 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. Relativamente aos valores de tensões τ_{xy} , observou-se que os valores obtidos no adesivo Sikaforce® 7752 foram bastante inferiores aos obtidos com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, devido à diferença de rigidez dos adesivos, tal como foi referido anteriormente.

Por fim, em todos os gráficos apresentados para as tensões τ_{xy} registou-se ao longo de x/L_0 uma inversão do sentido das tensões. Essa mesma inversão ocorreu na proximidade de $x/L_0=0,2$.

3.2.4 Estudo da variável de dano

Neste subcapítulo é descrito o estudo da variável do dano dos elementos coesivos do adesivo (SDEG). O objetivo do estudo apresentado é efetuar uma descrição da extensão

do dano ao longo do adesivo em diferentes fases de carregamento das juntas. No caso de $SDEG=0$ significa que o elemento coesivo ainda não sofreu degradação, e no caso de $SDEG=1$ significa que o elemento coesivo se encontra em degradação máxima, ou seja, após rotura. Um valor de $SDEG$ entre 0 e 1 indica que o elemento coesivo está em processo de amaciamento. Neste estudo são analisados os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Para cada adesivo utilizado nas juntas são analisadas as quatro geometrias de junta ($t_{p2}=1,2,3$ e 4 mm). O estudo da variável do dano tem como objetivo avaliar a propagação do dano e explicar as variações de resistência registadas numericamente e experimentalmente.

3.2.4.1 Araldite® AV138

A Figura 116 representa $SDEG$ 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 .

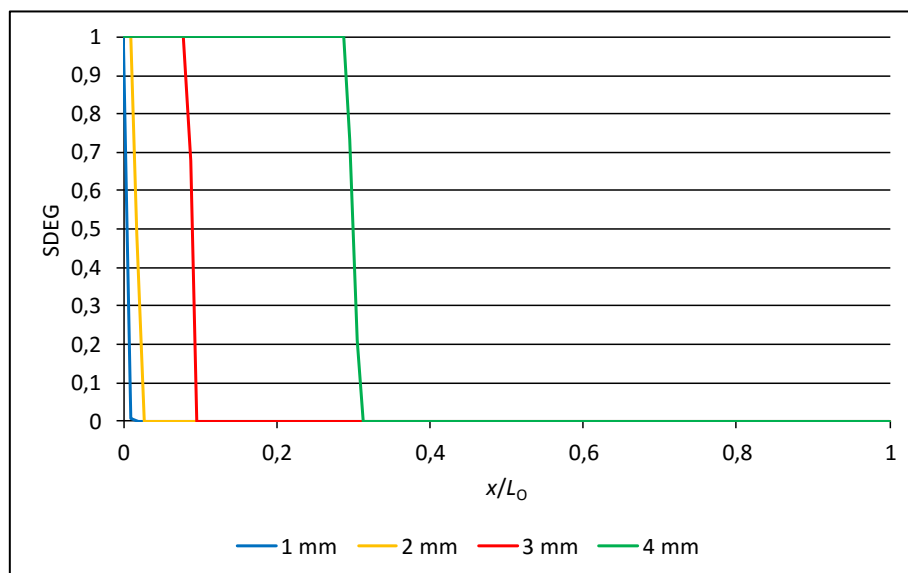


Figura 116 - Variável de dano $SDEG$ para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 no instante de $P_{m\acute{a}x}$, para diferentes valores de t_{p2} .

Analisando a Figura 116 observa-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} . No momento em que se atinge $P_{m\acute{a}x}$ para todos os valores de t_{p2} (1, 2, 3, 4 mm), a proporção de adesivo danificado é de 1,8; 2,6; 9,5 e 31,3%, respetivamente. Pode-se observar que a zona de dano em todos os casos é bastante reduzida, o que se relaciona com as grandes concentrações de tensões σ_y para $x/L_0 \approx 0$ (Figura 110) e também com a fragilidade deste adesivo. Contudo, 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 no momento da rotura.

Antes de se iniciar 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. A partir da Figura 117 pode-se verificar que as quatro juntas apresentam um comportamento idêntico, e também que o início de propagação de dano ocorre 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 brusco.

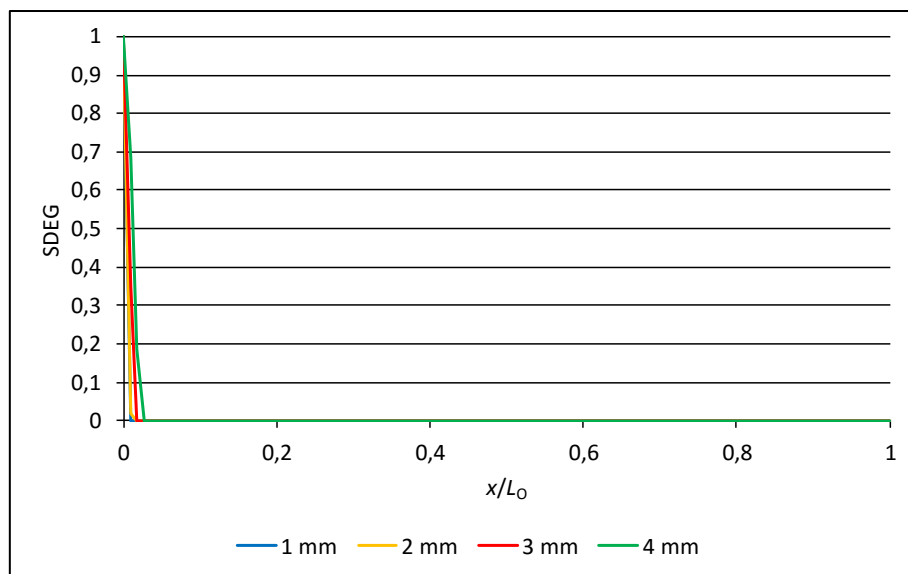


Figura 117 - Variável de dano SDEG para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 quando é atingido $SDEG=1$ pela primeira vez em qualquer zona da junta, para os diferentes valores de t_{p2} .

Para ser possível analisar a propagação de dano ao longo de x/L_0 em função do carregamento, da Figura 118 à Figura 121 está representada a distribuição da variável SDEG em função do valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}} \times 100$ (%) para os diferentes valores de t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm) das juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138. A variável δ corresponde ao deslocamento atual, enquanto que $\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ corresponde ao valor de deslocamento no momento em que é atingido $P_{m\acute{a}x}$.

Através da análise da Figura 118 pode-se verificar 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 muito reduzida, formando assim uma zona de dano muito localizada. Este comportamento ocorre devido ao adesivo Araldite® AV138 ser bastante rígido e frágil, o que resulta numa pequena zona de plastificação do adesivo na extremidade da fenda. Tendo em conta 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. No 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 119), a

evolução do dano ao longo de x/L_0 foi diferente da verificada na junta com $t_{p2}=1$ mm (Figura 118). Esta diferença deve-se à redução do valor de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ no momento da rotura de uma junta para a outra, uma vez que a junta com $t_{p2}=2$ mm sofreu uma rotura mais brusca do que com $t_{p2}=1$ mm ($\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}=125,8\%$ em comparação com $257,4\%$ e $\delta=0,880$ mm em vez de $\delta=1,253$ mm, para o instante de rotura). A diminuição dos valores está diretamente relacionada com a eliminação da deformação plástica do aderente em L.

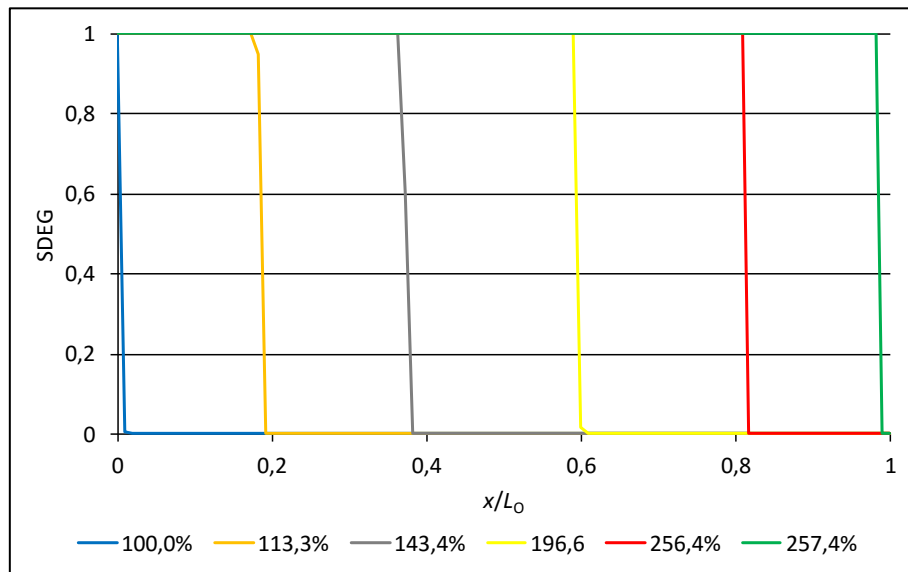


Figura 118 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=1$ mm.

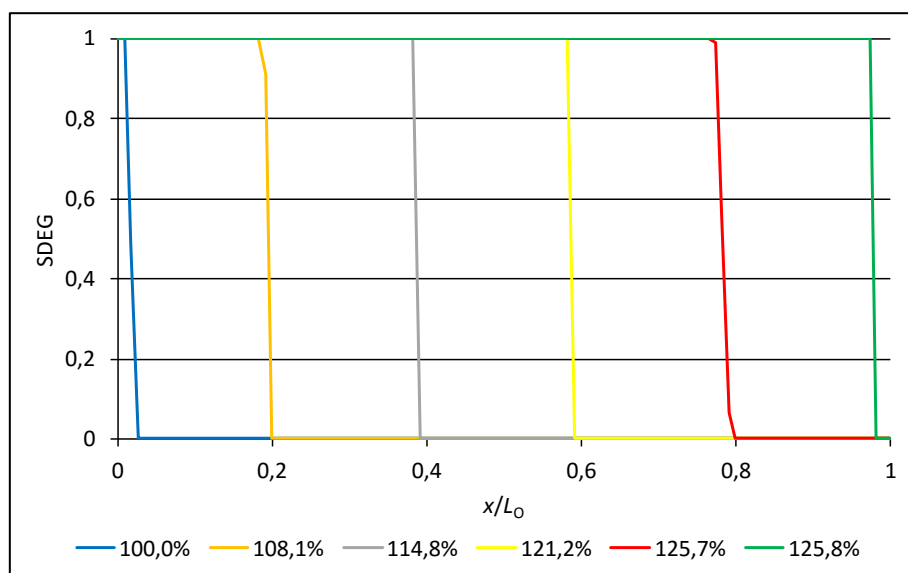


Figura 119 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=2$ mm.

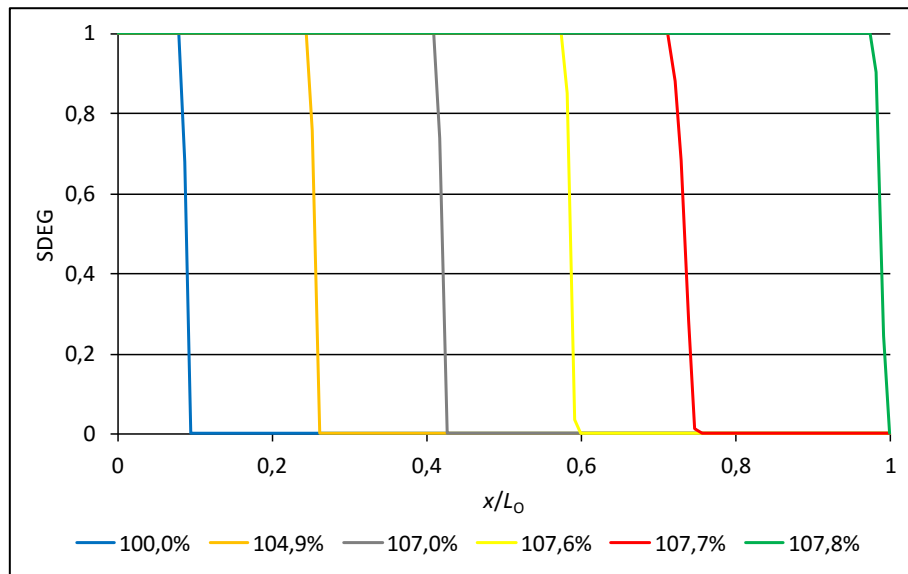


Figura 120 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=3$ mm.

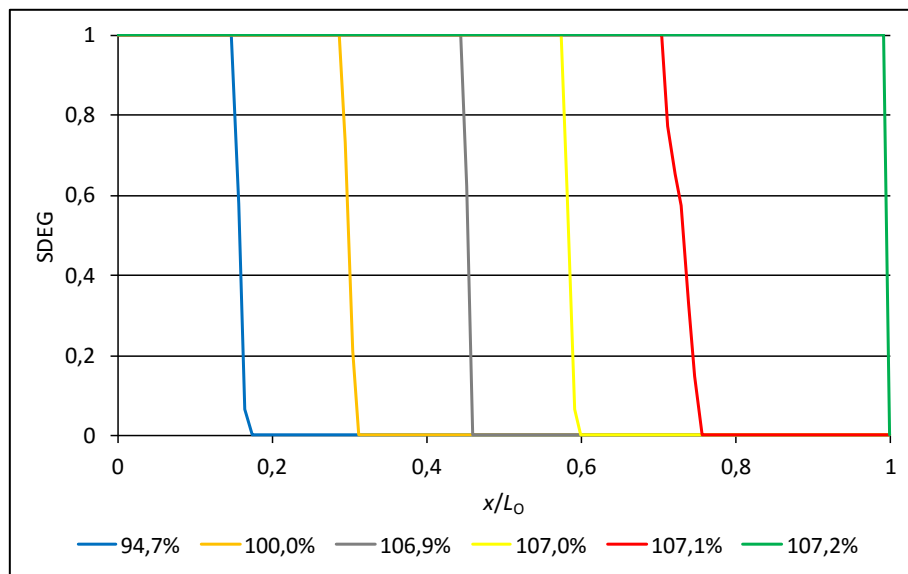


Figura 121 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 e $t_{p2}=4$ mm.

Em relação à junta com $t_{p2}=3$ mm (Figura 120) registou-se um valor de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ inferior ao valor registado na junta com $t_{p2}=2$ mm (107,8%). De igual 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 $t_{p2}=1$ mm para $t_{p2}=2$ mm. Na junta com $t_{p2}=4$ mm (Figura 121) registou-se um valor de δ na rotura superior ao da junta com $t_{p2}=2$ mm e $t_{p2}=3$ mm (1,252 mm). A razão para este aumento deve-se a uma ligeira plastificação do aderente base devido a um valor superior de $P_{m\acute{a}x}$.

3.2.4.2 Araldite® 2015

Na Figura 122 é apresentada 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 .

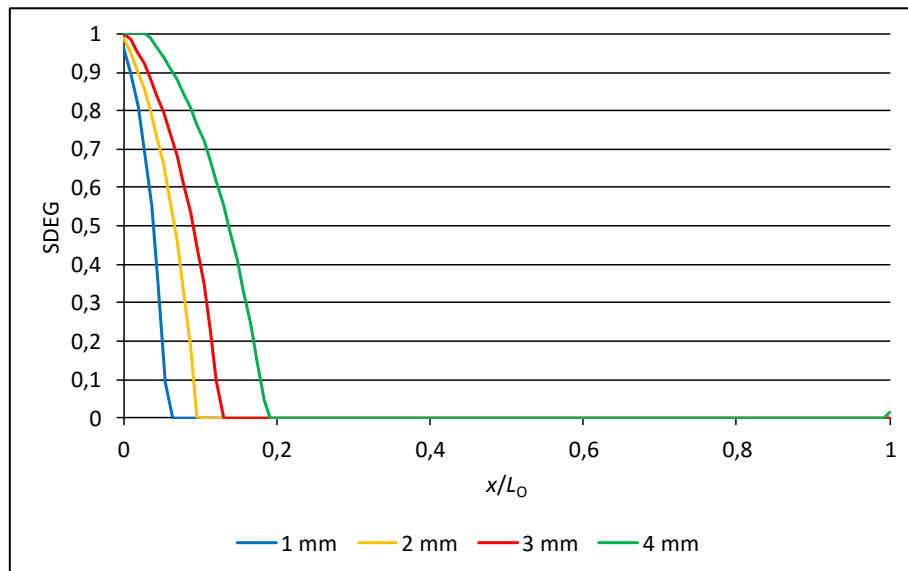


Figura 122 - Variável de dano SDEG para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 no instante de $P_{m\acute{a}x}$, para diferentes valores de t_{p2} .

Analisando a Figura 122, verifica-se que o aumento de t_{p2} promove uma expansão da região danificada quando é atingido $P_{m\acute{a}x}$, tal como foi verificado para o adesivo Araldite® AV138. Neste instante, a quantidade de adesivo danificado é de 6,3; 9,5; 13,0 e 19,1% para $t_{p2}=1, 2, 3$ e 4 mm, respetivamente. Fazendo uma comparação com as juntas com o adesivo Araldite® AV138 verifica-se a existência de uma diferença na zona em processo de dano (medido entre SDEG=0 e SDEG=1), uma vez que a zona danificada apresenta uma extensão muito superior. Este acontecimento deve-se a dois fatores: as tensões σ_y apresentam gradientes de tensão inferiores (Figura 111 em comparação com a Figura 110) e o adesivo Araldite® 2015 possui valores de G_{IC} e G_{IIC} superiores, o que permite a plastificação da camada de adesivo. Este comportamento é mais favorável para este tipo de sollicitação, devido ao facto de a sollicitação de arrancamento concentrar, normalmente, as tensões numa porção reduzida de sobreposição. Este comportamento indica que uma área maior resiste à sollicitação de arrancamento, o que antecipa uma maior resistência de junta. Além disso, na junta com $t_{p2}=4$ mm pode-se verificar que, no instante em que é atingido $P_{m\acute{a}x}$, existe dano muito reduzido na proximidade de $x/L_0=1$.

Na Figura 123 é apresentada a variável de dano SDEG para as juntas 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} . Através da análise da Figura 123 verifica-se que as quatro juntas têm um comportamento semelhante, verificando-se o início de dano

entre $x/L_0=0$ e $x/L_0=0,2$, dependendo de t_{p2} . Contudo, é notório que com o aumento de t_{p2} a extensão do dano na proximidade de $x/L_0=0$ aumenta. Tal como verificado na Figura 122, no momento em que é atingido $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}=100\%$, a junta com $t_{p2}=4$ mm registou existência de dano ($SDEG=0,01$) próximo de $x/L_0=1$.

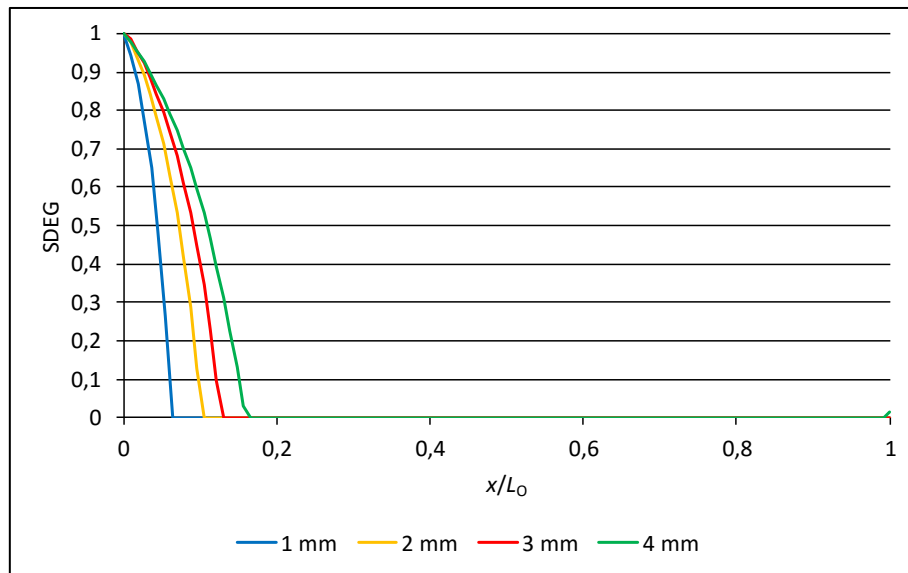


Figura 123 - Variável de dano SDEG para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 quando é atingido $SDEG=1$ pela primeira vez em qualquer zona da junta, para os diferentes valores de t_{p2} .

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

Da Figura 124 à Figura 127 está representada a distribuição da variável SDEG em função do valor de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x} \times 100$ (%) para os quatro valores de t_{p2} das juntas com o adesivo Araldite® 2015, tendo como objetivo analisar o comportamento de propagação de dano ao longo de x/L_0 . Tal como para o caso da junta com o adesivo Araldite® AV138, analisando a Figura 124 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.

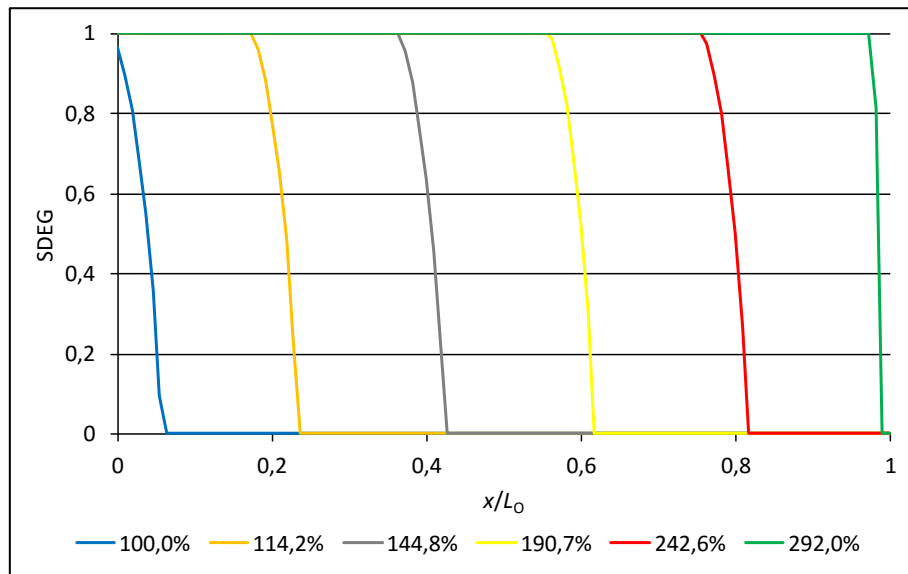


Figura 124 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p_{m\acute{a}x}}$ para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=1$ mm.

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

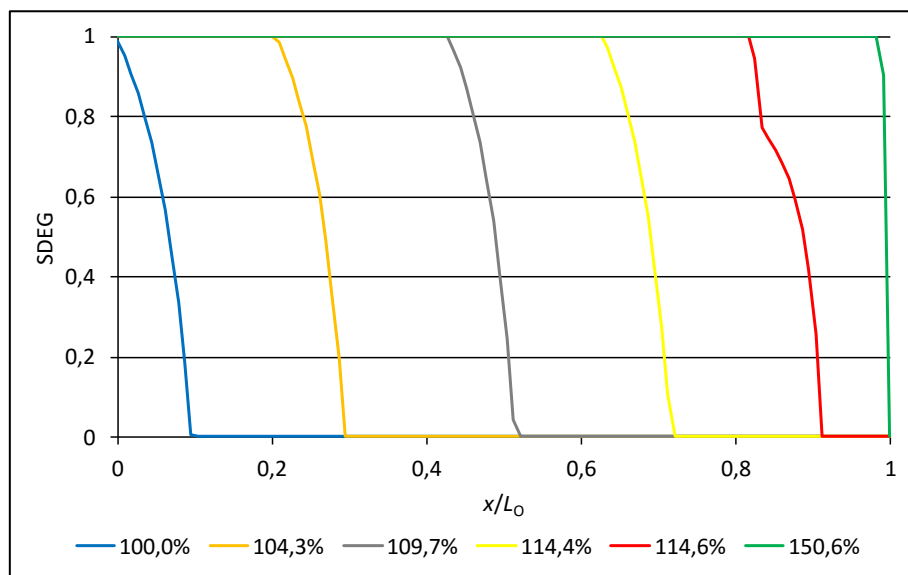


Figura 125 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{p_{m\acute{a}x}}$ para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=2$ mm.

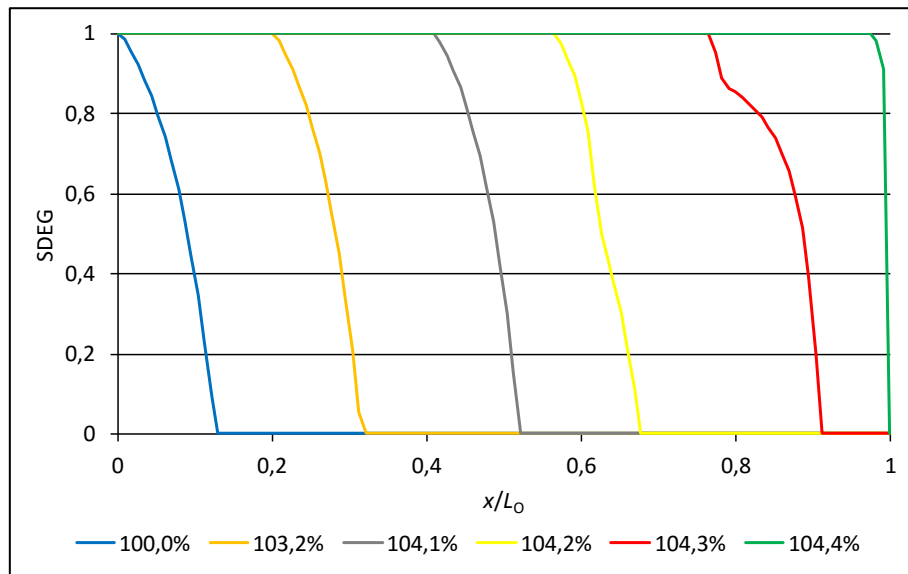


Figura 126 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=3$ mm.

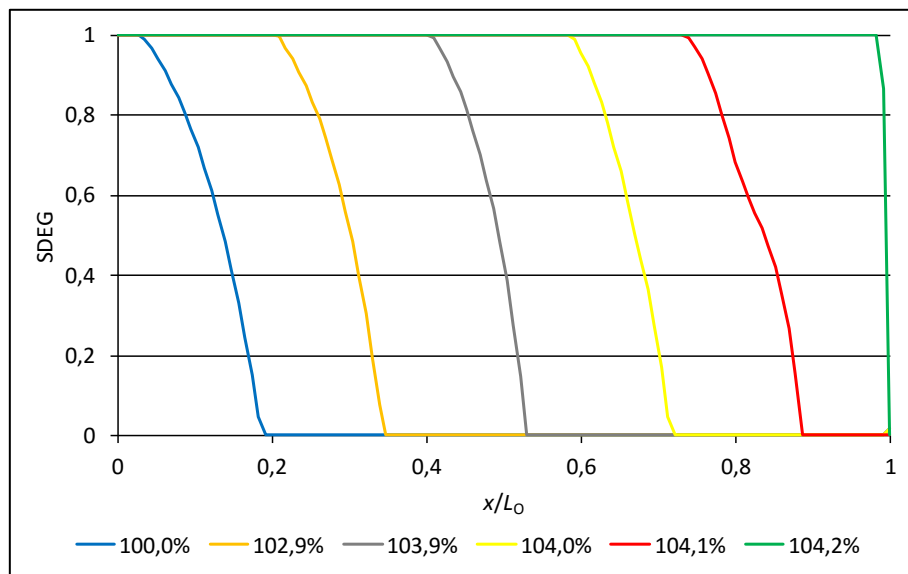


Figura 127 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e $t_{p2}=4$ mm.

A elevada flexibilidade do adesivo Araldite® 2015 possibilita um aumento da extensão da zona de rotura. Por outro lado, o aumento de t_{p2} tem como consequência a diminuição de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ 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 $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ no instante em que é atingida a rotura nas juntas com $t_{p2}=3$ e 4 mm é inferior quando comparada à verificada nas juntas com $t_{p2}=1$ e 2 mm. O valor de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ na rotura para $t_{p2}=1$ mm é superior a 2 mm devido à plastificação do aderente em L. No que se refere às juntas com $t_{p2}=3$ e 4 mm, a diferença de $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ não foi tão elevada. Contudo, o aumento do valor de δ na rotura para a junta $t_{p2}=4$ mm deve-se a uma ligeira plastificação do aderente

base, que não ocorreu somente para este caso de t_{p2} . Os fatores referidos são indicadores claros de que o adesivo Araldite® 2015 é um adesivo de maior ductilidade que o Araldite® AV138.

3.2.4.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 128 está representada 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 .

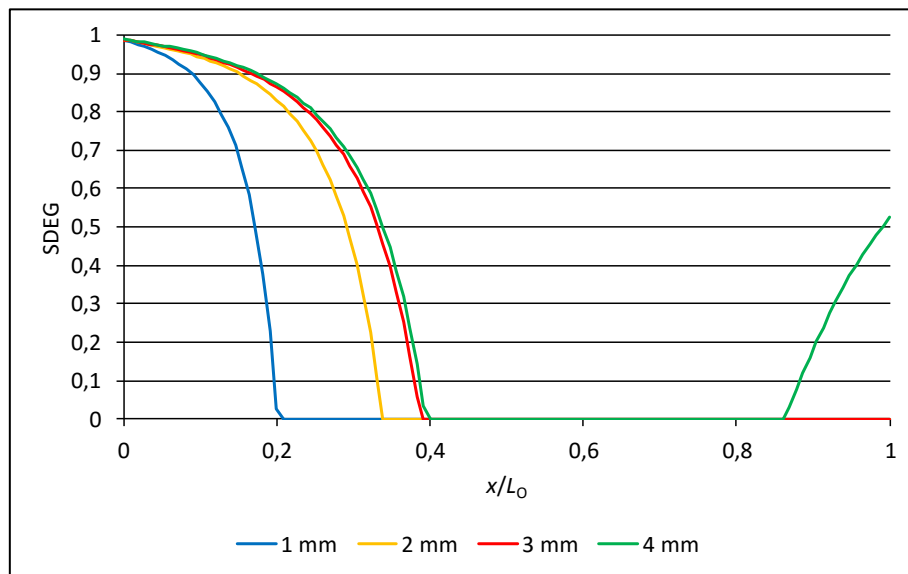


Figura 128 - Variável de dano SDEG para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 no instante de $P_{m\acute{a}x}$, para diferentes valores de t_{p2} .

Com o aumento dos valores de t_{p2} , a zona danificada correspondente a $P_{m\acute{a}x}$ apresenta uma extensão crescente. Além disso, a variável SDEG para todos os valores de t_{p2} não atinge SDEG=1, ou seja, a rotura não é atingida em nenhum ponto do adesivo no momento em que se atingiu $P_{m\acute{a}x}$. Neste instante, a proporção de adesivo danificado é 20,9; 33,9; 39,1 e 40,0% para valores de t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm), respetivamente. Em comparação com os resultados obtidos com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, existe uma diferença significativa na zona de dano (entre SDEG=0 e SDEG=1). Esta diferença resume-se numa extensão superior da zona de dano, que é tanto maior quanto maior a ductilidade do adesivo. Analisando os três adesivos em estudo, o Sikaforce® 7752 é o mais flexível e também possui valores de G_{IC} e G_{IIC} superiores aos do adesivo Araldite® 2015 e muito superiores aos valores do adesivo Araldite® AV138. Assim sendo, as curvas de dano deste adesivo apresentam uma variação mais suave ao longo de x/L_0 . Este comportamento é característico de uma área ainda maior em relação ao adesivo Araldite® 2015 que resiste à solicitação de arrancamento. Isto permite prever uma maior resistência da junta. Nas juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=4$ mm foi possível observar a existência de dano também na proximidade de $x/L_0=1$, apesar de

o valor máximo de SDEG só tenha atingido 0,520. Este comportamento está relacionado com o aumento de rigidez do aderente em L para valores superiores de t_{p2} , o que se traduz em picos maiores de tensão σ_y na proximidade de $x/L_0=1$ e consequentemente na existência de dano nesta zona.

Na Figura 129 está representado o comportamento das juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 quando é atingido SDEG=1 em qualquer ponto do adesivo, para os diferentes valores de t_{p2} .

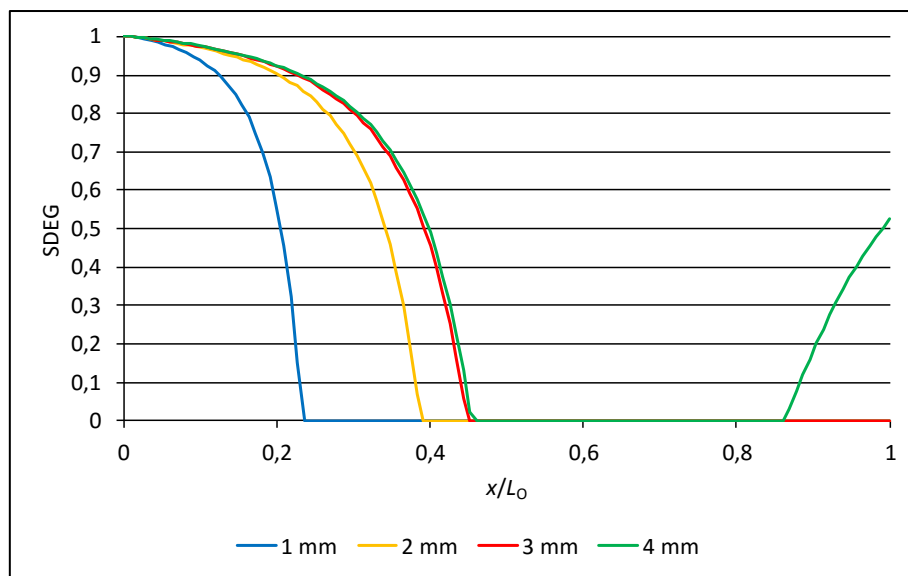


Figura 129 - Variável de dano SDEG para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 quando é atingido SDEG=1 pela primeira vez em qualquer zona da junta, para os diferentes valores de t_{p2} .

Verifica-se que as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 apresentam um comportamento diferente 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 comprova 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. Em comparação com as curvas de dano obtidas para $P_{máx}$ (Figura 128) é possível observar que na junta com a $t_{p2}=4$ mm, também se verifica a existência de 2 zonas com dano ao longo de x/L_0 , em particular nas duas extremidades da ligação (Figura 129). Observou-se ainda um ligeiro aumento dos valores de x/L_0 para a condição da Figura 129 (início de SDEG=1) relativamente à da Figura 128 ($P_{máx}$). Geralmente, a diferença entre as curvas apresentadas na Figura 128 e Figura 129 resume-se à existência, no caso das curvas da Figura 129, de uma pequena secção na proximidade de $x/L_0=0$ na qual o valor de SDEG=1.

Da Figura 130 à Figura 133 está representada a distribuição da variável SDEG em função do valor de $\delta/\delta_{P_{máx}} \times 100$ (%) para os quatro valores diferentes de t_{p2} das juntas com

adesivo Sikaforce® 7752, com objetivo de analisar o comportamento de propagação de dano ao longo de x/L_0 .

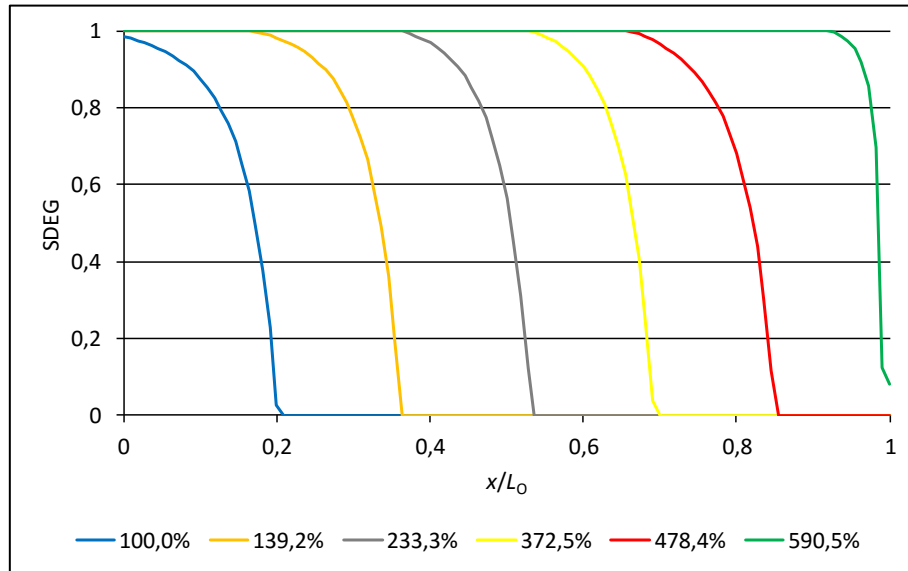


Figura 130 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=1$ mm.

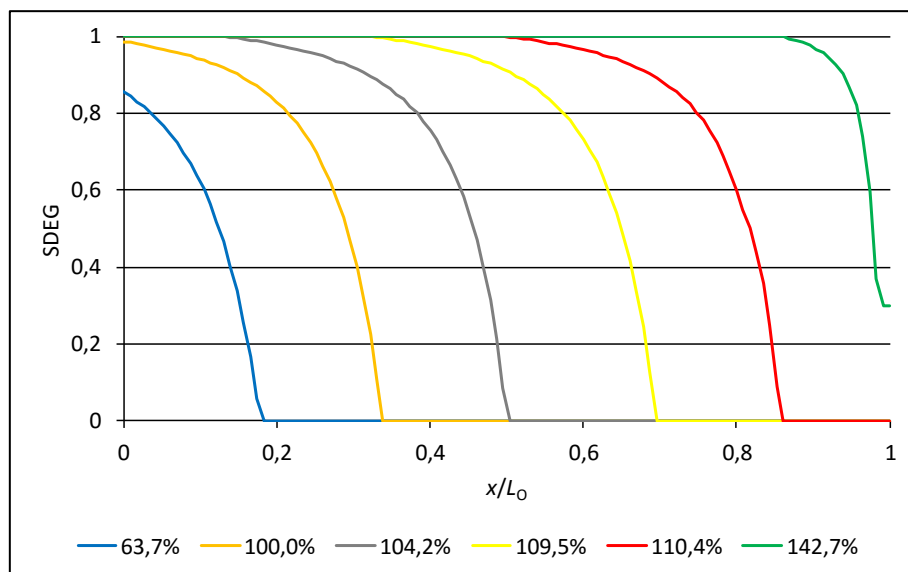


Figura 131 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=2$ mm.

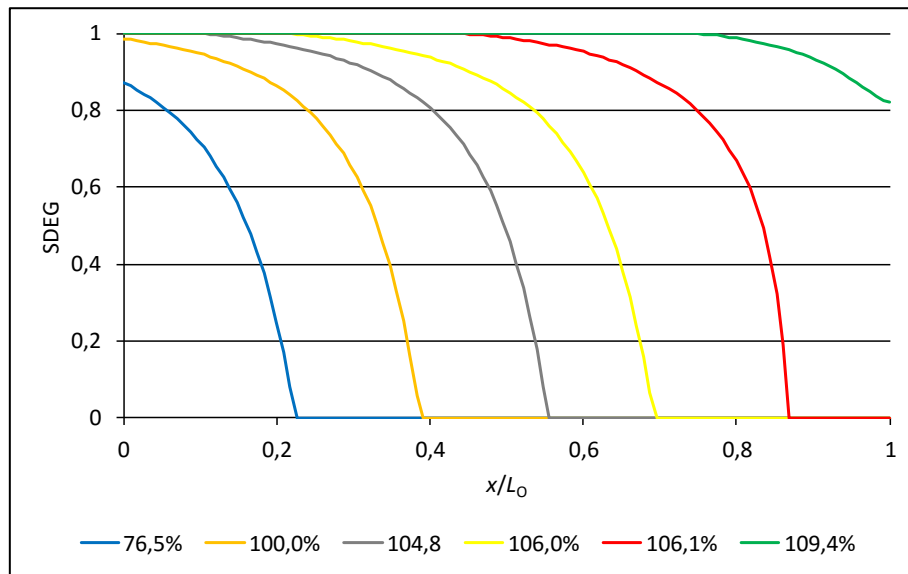


Figura 132 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=3$ mm.

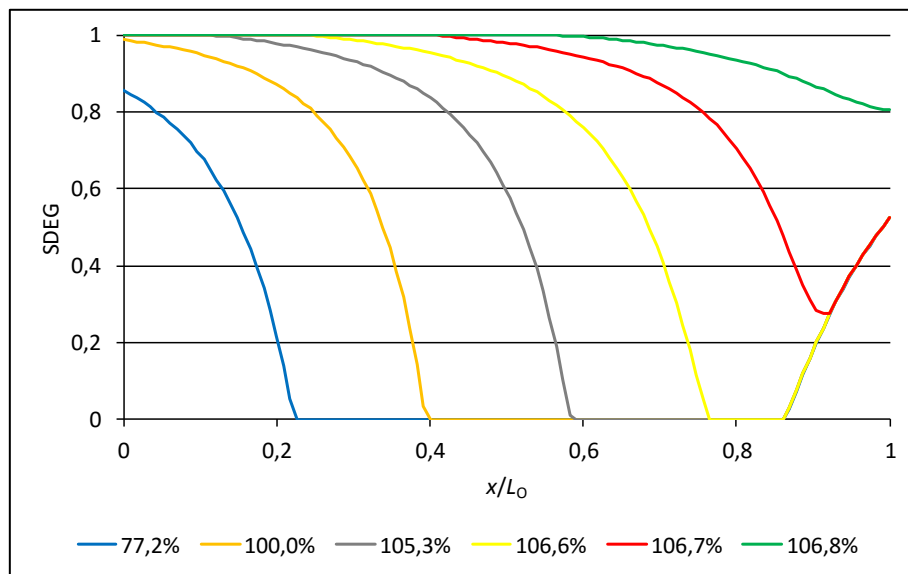


Figura 133 - Evolução da variável de dano com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 e $t_{p2}=4$ mm.

Analisando a evolução de SDEG com $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x}$ ao longo de x/L_0 para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752, verifica-se que o comportamento das curvas de dano é bastante diferente do comportamento verificado nas juntas com Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Nas juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 verifica-se que o dano se propaga de um modo mais suave à medida que o carregamento é aplicado. A transição de SDEG=0 para SDEG=1 acontece numa extensão mais elevada para todos os valores de t_{p2} . Assim sendo, a localização do dano ao longo de x/L_0 torna-se menos precisa. Na Figura 133 observa-se que para valores $\delta/\delta_{Pm\acute{a}x} \times 100$ (%)=61,6 se verifica uma região danificada para $x/L_0 > 0,9$. Este facto prova que, para as juntas com $t_{p2}=4$ mm, o adesivo

além de sofrer rotura em $x/L_0=0$ também apresenta sinais de uma possível rotura na outra extremidade do adesivo ($x/L_0=1$ mm). Este comportamento pode ser justificado pelo aumento das tensões σ_y nesta zona (Figura 112). Os valores de δ na rotura para este adesivo foram de 12,046; 4,791; 4,541 e 4,945 mm para valores de $t_{p2}=1, 2, 3$ e 4 mm, respetivamente, o que mostra que, quanto maior a flexibilidade do adesivo, maiores serão os valores de δ na rotura para todos os valores de t_{p2} . De outro modo, 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 são justificados através da grande plastificação do aderente em L para $t_{p2}=1$ mm e à ligeira plastificação do aderente base para $t_{p2}=4$ mm. Dos três adesivos em estudo, o adesivo Sikaforce® 7752 é o que apresenta uma maior flexibilidade e ductilidade, o que se torna ideal quando é pretendida uma rotura mais faseada.

3.2.5 Previsão da resistência

Neste subcapítulo é apresentado um estudo que tem como objetivo principal efetuar uma avaliação à capacidade do MEFX em prever a resistência das juntas adesivas em estudo, bem como explicar de forma mais cuidada e detalhada os resultados obtidos para os diferentes tipos de junta. Foram utilizadas as juntas com os diferentes valores de t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm) e os três adesivos em estudo. Neste subcapítulo são apresentados dois pontos muito importantes na avaliação da previsão da resistência de juntas adesivas utilizando o MEFX. O primeiro ponto descreve o estudo do efeito do critério de iniciação que consiste na aplicação dos seis critérios de dano do MEFX (QUADS, MAXS, MAXPS, QUADE, MAXE e MAXPE) e conseqüentemente a comparação com os resultados obtidos experimentalmente. O segundo ponto descreve o estudo da lei de propagação que tem como objetivo comparar a lei de propagação triangular, utilizada no estudo do efeito do critério de iniciação, com a lei de propagação exponencial e os resultados obtidos experimentalmente.

3.2.5.1 Estudo do efeito do critério de iniciação

Na Figura 134 são apresentadas as curvas $P-\delta$ numéricas para juntas com o adesivo Araldite® AV138 para cada valor de t_{p2} , para o critério de dano QUADS. Na Figura 135 é apresentada uma comparação entre as curvas $P-\delta$ numéricas para todos os critérios de dano do MEFX, apenas para o valor de $t_{p2}=1$ mm, para juntas com o adesivo Araldite® AV138.

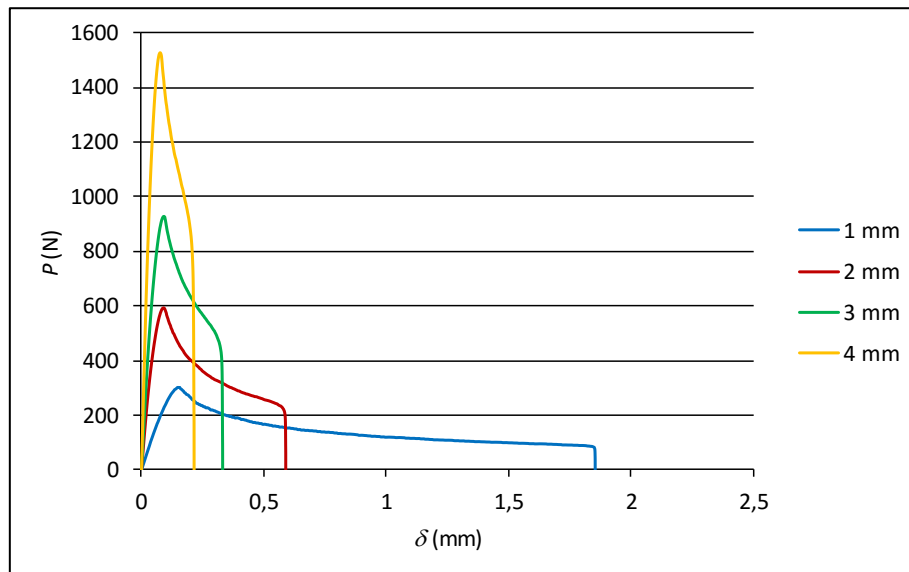


Figura 134 - Curvas P - δ numéricas para juntas com o adesivo Araldite® AV138 em função de t_{p2} (critério de dano QUADS).

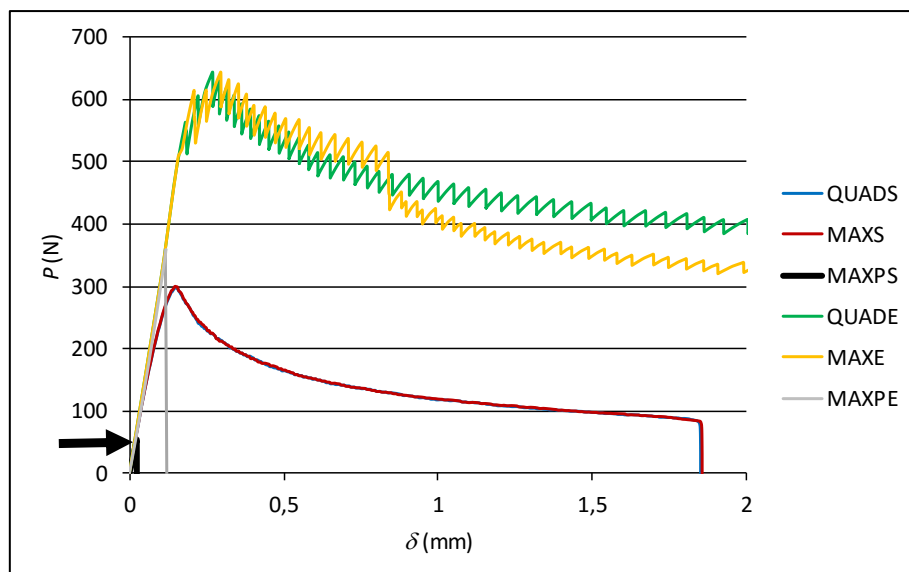


Figura 135 - Curvas P - δ numéricas (critérios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Araldite® AV138 para valor de $t_{p2}=1$ mm.

Na Figura 136 são apresentadas as curvas P - δ numéricas para juntas com o adesivo Araldite® 2015 para cada valor de t_{p2} , para o critério de dano QUADS. Na Figura 137 é apresentada uma comparação entre as curvas P - δ numéricas para todos os critérios de dano do MEFX, apenas para o valor de $t_{p2}=1$ mm, para juntas com o adesivo Araldite® 2015.

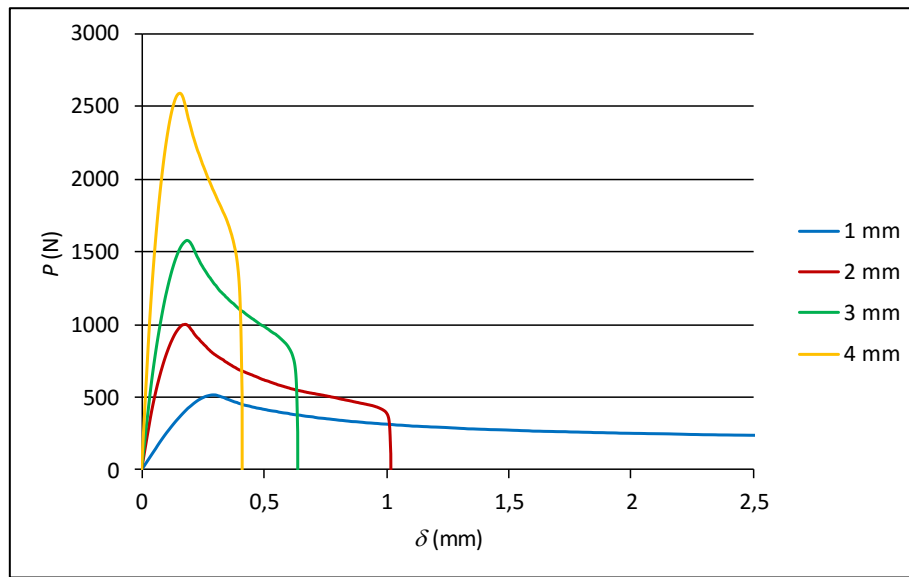


Figura 136 - Curvas P - δ numéricas para juntas com o adesivo Araldite® 2015 em função de t_{P2} (critério de dano QUADS).

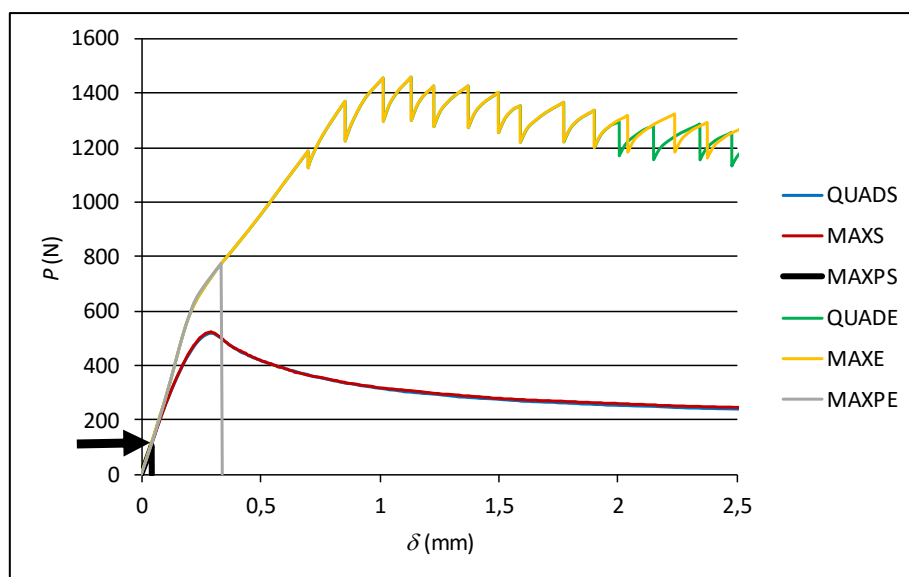


Figura 137 - Curvas P - δ numéricas (critérios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Araldite® 2015 para valor de $t_{P2}=1$ mm.

Na Figura 138 são apresentadas as curvas P - δ numéricas para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 para cada valor de t_{P2} , para o critério de dano QUADS. Na Figura 139 é apresentada uma comparação entre as curvas P - δ numéricas para todos os critérios de dano do MEFX, apenas para o valor de $t_{P2}=1$ mm, para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

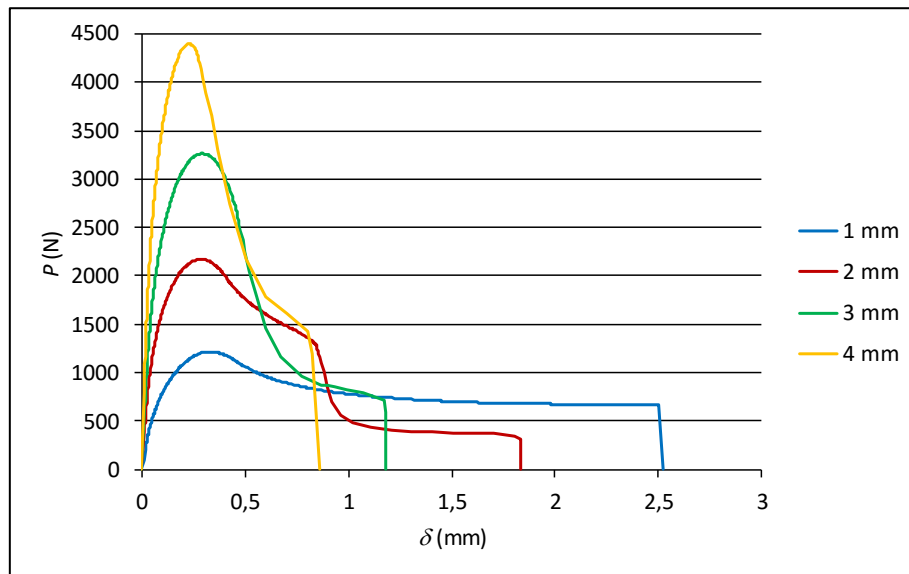


Figura 138 - Curvas P - δ numéricas para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função de t_{p2} (critério de dano QUADS).

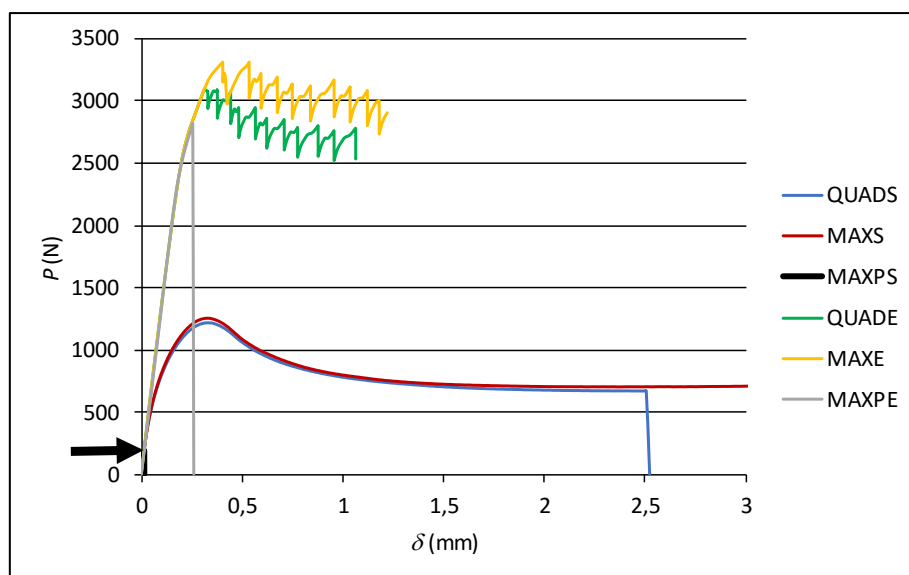


Figura 139 - Curvas P - δ numéricas (critérios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 para valor de $t_{p2}=1$ mm.

Na curva referente ao critério MAXPS, devido ao baixo valor obtido de $P_{m\acute{a}x}$, foi adicionada uma seta indicativa do local exato do valor de $P_{m\acute{a}x}$ para todos os adesivos em estudo. De referir que as curvas referentes aos critérios QUADS e MAXS estão praticamente coincidentes (exceto para o adesivo Sikaforce® 7752, uma vez que a partir de um $\delta > 2,5$ mm as curvas apresentam comportamentos distintos). A previsão segundo os critérios de dano baseados nas deformações (QUAE, MAXE e MAXPE) apresenta valores elevados de $P_{m\acute{a}x}$, sendo que os dois primeiros apresentam valores muito

similares e um comportamento da curva pouco adequado, concluindo-se que não são critérios adequados.

A Figura 140 mostra a comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e as respectivas previsões numéricas para os diferentes critérios de dano do MEFX, em função de t_{p2} , para as juntas com o adesivo Araldite® AV138.

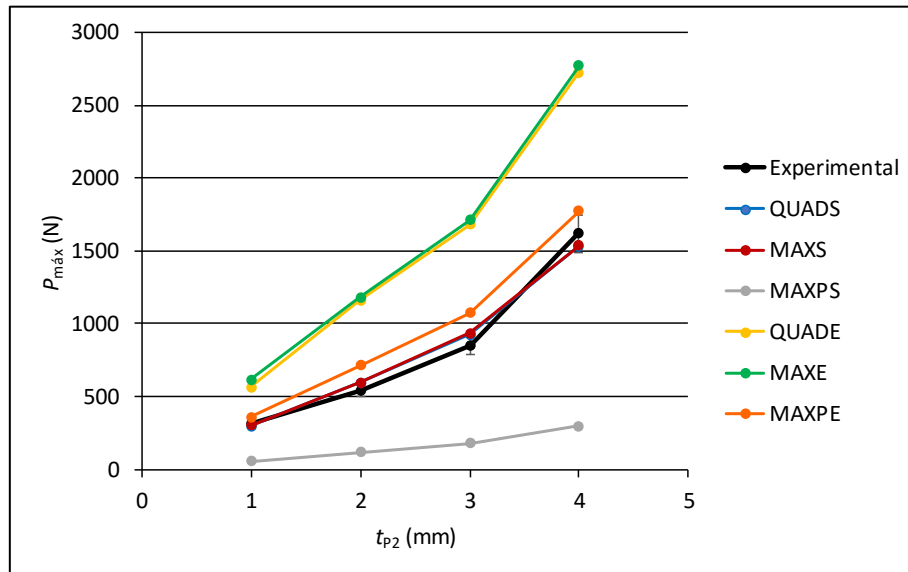


Figura 140 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e previsões numéricas (critérios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Araldite® AV138 em função de t_{p2} .

Tabela 17 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}$ das previsões numéricas (critérios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Araldite® AV138.

t_{p2}	QUADS	MAXS	MAXPS	QUADE	MAXE	MAXPE
1 mm	-4,1%	-3,5%	-82,5%	81,2%	97,5%	15,3%
2 mm	8,8%	9,5%	-78,8%	113,3%	117,3%	31,3%
3 mm	8,7%	9,5%	-79,2%	97,4%	101,0%	25,8%
4 mm	-5,4%	-5,0%	-81,6%	68,5%	71,3%	9,8%

Na Tabela 17 são apresentadas as variações percentuais dos critérios de dano do MEFX, tendo como base os valores obtidos experimentalmente, para as juntas com o adesivo Araldite® AV138. Os critérios QUADS e MAXS são os mais aproximados aos valores obtidos experimentalmente, sendo que para $t_{p2}=2$ e 3 mm, o critério QUADS apresenta melhores resultados uma vez que a variação percentual é menor. A diferença de valores entre ambos os critérios é tão reduzida que as curvas se sobrepõem (Figura 140). O critério MAXPS é um critério pouco adequado, uma vez que as variações percentuais são bastante elevadas e os valores de $P_{m\acute{a}x}$ são muito baixos. Em relação aos critérios

baseados na deformação (QUADE, MAXE e MAXPE), estes apresentam valores muito elevados de $P_{m\acute{a}x}$. Apresentam tamb\em varia\c{c}es percentuais muito elevadas sendo que, dos tr\^es crit\^erios, o MAXPE \u00e9 o que apresenta valores de varia\c{c}o percentual inferiores.

A Figura 141 mostra a compara\c{c}o entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente e as respetivas previs\c{o}es num\^ericas para os diferentes crit\^erios de dano do MEFX, em fun\c{c}o de t_{p2} , para juntas com o adesivo Araldite^{\u2122} 2015.

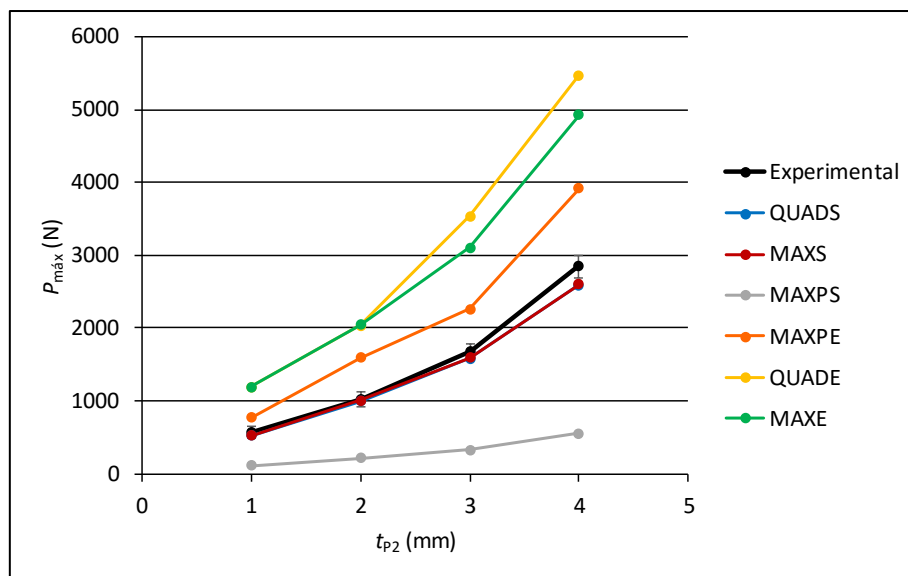


Figura 141 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e previs\c{o}es num\^ericas (crit\^erios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Araldite^{\u2122} 2015 em fun\c{c}o de t_{p2} .

Tabela 18 - Varia\c{c}o percentual de $P_{m\acute{a}x}$ das previs\c{o}es num\^ericas (crit\^erios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Araldite^{\u2122} 2015.

t_{p2}	QUADS	MAXS	MAXPS	QUADE	MAXE	MAXPE
1 mm	-7,9%	-7,0%	-81,3%	110,7%	110,7%	36,8%
2 mm	-2,3%	-2,1%	-79,0%	98,8%	99,5%	55,2%
3 mm	-5,8%	-5,5%	-80,5%	110,6%	84,9%	34,2%
4 mm	-8,9%	-8,6%	-80,6%	92,5%	73,1%	37,9%

Na Tabela 18 \u00e9 poss\u00edvel observarem-se as varia\c{c}es percentuais dos crit\^erios de dano do MEFX, tendo como valores base os valores obtidos experimentalmente, para as juntas com o adesivo Araldite^{\u2122} 2015. Tal como se verificou para o adesivo Araldite^{\u2122} AV138, os crit\^erios de dano QUADS e MAXS s\u00e3o os crit\^erios que apresentam melhores resultados, devido a uma baixa varia\c{c}o percentual, o que significa valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais pr\u00f3ximos dos obtidos experimentalmente. O crit\^erio MAXS apresenta menor varia\c{c}o

percentual, quando comparado ao critério QUADS, para todos os valores de t_{p2} . Mais uma vez as curvas de ambos os critérios se sobrepõem (Figura 141). O critério MAXPS é um critério pouco adequado, devido às variações percentuais bastante elevadas e valores de $P_{m\acute{a}x}$ muito baixos. Quanto aos critérios baseados na deformação (QUADE, MAXE e MAXPE), estes proporcionam variações percentuais e valores de $P_{m\acute{a}x}$ bastante elevados, tornando-se em critérios pouco adequados.

A Figura 142 mostra a comparação entre valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos numericamente, através do MDC [1] e as respectivas previsões numéricas para os diferentes critérios de dano do MEFX, em função de t_{p2} , para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

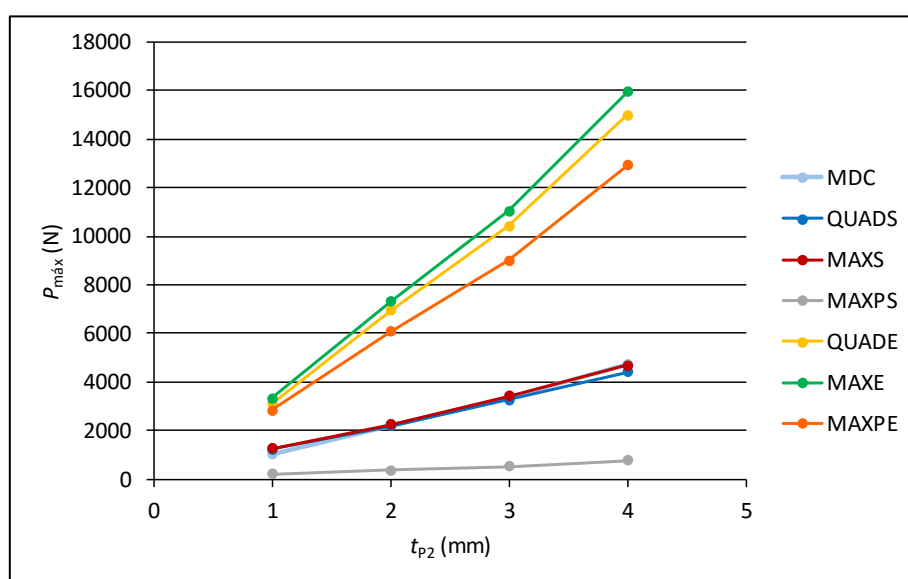


Figura 142 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ por MDC e previsões numéricas (critérios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 em função de t_{p2} .

Tabela 19 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}$ das previsões numéricas (critérios de dano do MEFX) para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

t_{p2}	QUADS	MAXS	MAXPS	QUADE	MAXE	MAXPE
1 mm	16,4%	19,7%	-81,5%	195,6%	217,2%	169,1%
2 mm	-2,1%	1,6%	-83,5%	213,3%	229,4%	174,1%
3 mm	-3,1%	1,3%	-84,8%	209,5%	227,4%	167,2%
4 mm	-6,5%	-0,6%	-83,8%	218,4%	239,2%	174,5%

Na Tabela 19 são apresentadas as variações percentuais dos critérios de dano do MEFX, tendo como base os valores obtidos numericamente através do MDC [1], para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752. À semelhança dos adesivos referidos anteriormente, os critérios de dano QUADS e MAXS apresentam valores bastante próximos dos valores

obtidos numericamente através do MDC. O critério MAXS apresenta variações percentuais menores, ou seja, valores de $P_{m\acute{a}x}$ mais pr\'oximos dos obtidos através do MDC para valores de $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm. Outra semelhança em relaça\~o aos adesivos referidos anteriormente \u00e9 que as curvas se sobrep\~oem (Figura 142). O crit\u00e9rio MAXPS \u00e9 novamente um crit\u00e9rio pouco adequado, j\u00e1 que apresenta variações percentuais bastante elevadas e valores de $P_{m\acute{a}x}$ baixos. No que se refere aos crit\u00e9rios baseados na deformaça\~o (QUADE, MAXE e MAXPE), estes apresentam valores bastante elevados de $P_{m\acute{a}x}$, pelo que se tornam crit\u00e9rios pouco adequados.

3.2.5.2 Estudo do efeito da lei de propagaça\~o

A utilizaça\~o das leis de propagaça\~o triangular e exponencial necessitou de efetuar algumas alteraça\~es em determinados par\u00e2metros nos modelos do ABAQUS^{\u2122}. Um dos par\u00e2metros a ser alterado designa-se por *softening* (amaciamento), onde se opta por *Linear* (lei de propagaça\~o triangular) e *Exponential* (lei de propagaça\~o exponencial). O outro par\u00e2metro a sofrer alteraça\~o designa-se por *Power*, sendo que neste caso se consideram valores de $Power=0,5, 1$ e 2 para a lei de propagaça\~o triangular e $Power=1$ para a lei de propagaça\~o exponencial. Na Figura 143 \u00e9 poss\u00edvel verificar as alteraça\~es referidas anteriormente.

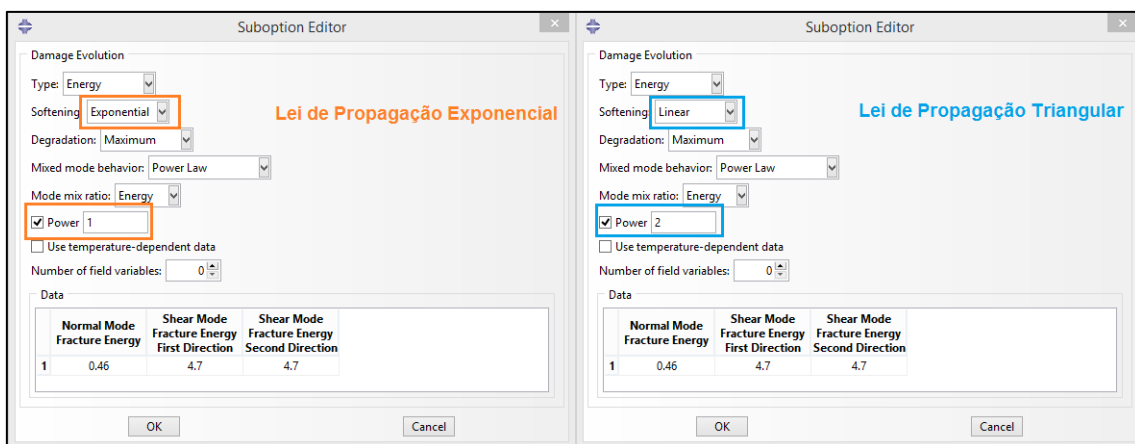


Figura 143 - Par\u00e2metros para lei de propagaça\~o triangular e exponencial.

Na Figura 144, Figura 145 e Figura 146 s\u00e3o apresentadas as comparaç\~es entre os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos atrav\u00e9s da lei de propagaça\~o triangular, com os valores obtidos utilizando a lei de propagaça\~o exponencial e tamb\u00e9m com os valores obtidos experimentalmente. Estas comparaç\~es foram efetuadas para os adesivos Araldite^{\u2122} AV138, Araldite^{\u2122} 2015 e Sikaforce^{\u2122} 7752, sendo que o \u00faltimo n\u00e3o \u00e9 realizado a comparaça\~o com os valores experimentais uma vez que estes n\u00e3o est\u00e3o dispon\u00edveis. A lei de propagaça\~o triangular com valor de $Power=1$ \u00e9 representada pelos valores obtidos com o crit\u00e9rio QUADS, pois este crit\u00e9rio obteve melhores resultados e um maior grau de precis\u00e3o. S\u00e3o apresentadas tamb\u00e9m as variaç\~es percentuais, correspondentes a

cada valor de t_{p2} , obtidas para cada lei de propagação em estudo. As variações percentuais que apresentam valores negativos significam que os valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos através das leis de propagação são inferiores aos valores de $P_{m\acute{a}x}$ obtidos experimentalmente.

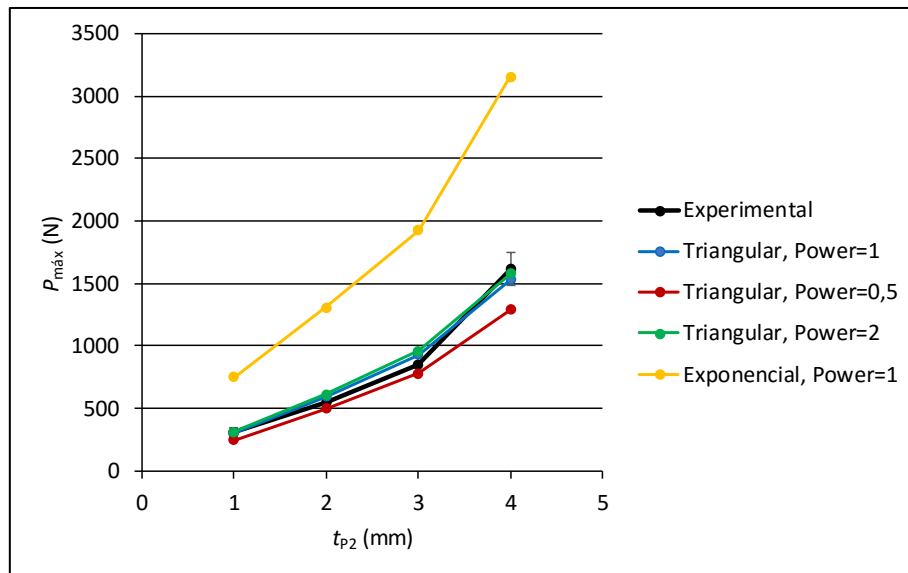


Figura 144 - Valores de $P_{m\acute{a}x}$ experimentais e previsões numéricas das leis triangular e exponencial para juntas com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 20 - Variação percentual de $P_{m\acute{a}x}$ das previsões numéricas das leis triangular e exponencial para juntas com o adesivo Araldite® AV138.

t_{p2}	Triangular, <i>Power=1</i>	Triangular, <i>Power=0,5</i>	Triangular, <i>Power=2</i>	Exponencial, <i>Power=1</i>
1 mm	-4,1%	-21,6%	-0,2%	140,5%
2 mm	8,8%	-8,7%	12,2%	140,0%
3 mm	8,7%	-8,8%	12,5%	126,2%
4 mm	-5,4%	-20,3%	-2,5%	95,1%

No caso das juntas com o adesivo Araldite® AV138 (Figura 144), conclui-se que a lei de propagação triangular com valor de $Power=1$ apresenta valores mais próximos dos valores obtidos experimentalmente, uma vez que apresenta menor variação percentual, quando comparada com as outras leis de propagação em estudo. De referir ainda que a lei de propagação exponencial apresenta valores muito superiores de variação percentual, ou seja, apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ muito superiores aos valores obtidos experimentalmente. Na Tabela 20 é possível observar-se as variações percentuais obtidas com as leis de propagação triangulares e exponencial para cada valor de t_{p2} .

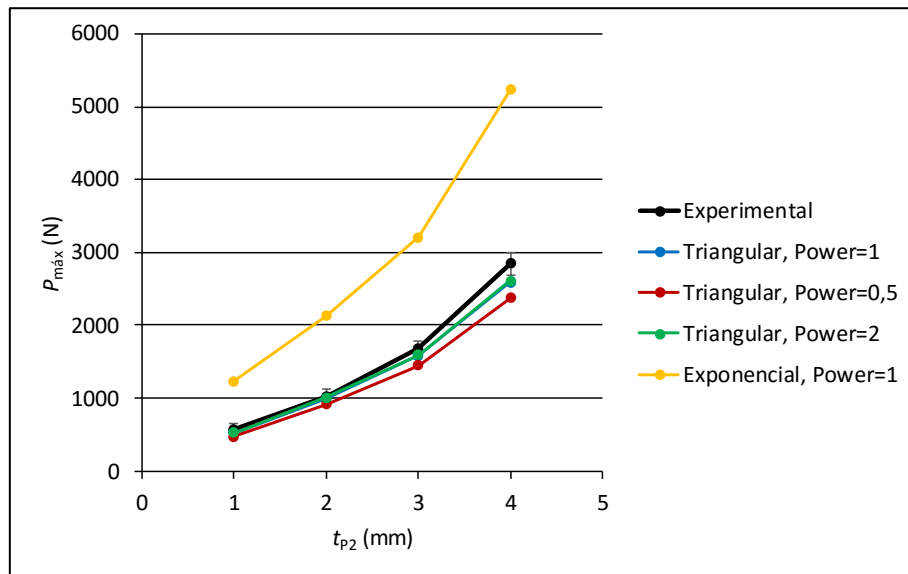


Figura 145 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e previsões numéricas das leis triangular e exponencial para juntas com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 21 - Variação percentual de $P_{máx}$ das previsões numéricas das leis triangular e exponencial para juntas com o adesivo Araldite® 2015.

t_{p2}	Triangular, Power=1	Triangular, Power=0,5	Triangular, Power=2	Exponencial, Power=1
1 mm	-7,9%	-16,5%	-7,3%	117,7%
2 mm	-2,3%	-10,5%	-1,7%	107,5%
3 mm	-5,8%	-14,0%	-5,2%	90,7%
4 mm	-8,9%	-16,5%	-8,3%	84,2%

Em relação às juntas com o adesivo Araldite® 2015 (Figura 145), a previsão numérica utilizando as leis de propagação triangular com valores de $Power=0,5$, 1 e 2 apresenta valores de $P_{máx}$ inferiores aos valores obtidos experimentalmente, mas com uma ligeira vantagem para a lei de propagação triangular com valor de $Power=2$, pois apresenta valores de variação percentual mais baixos, ou seja, valores de $P_{máx}$ mais próximos dos valores experimentais. Tal como acontece em juntas com o adesivo Araldite® AV138, a previsão numérica utilizando a lei de propagação exponencial sobrestima os valores de $P_{máx}$. Na Tabela 21 é possível observar-se as variações percentuais obtidas para juntas com o adesivo Araldite® 2015.

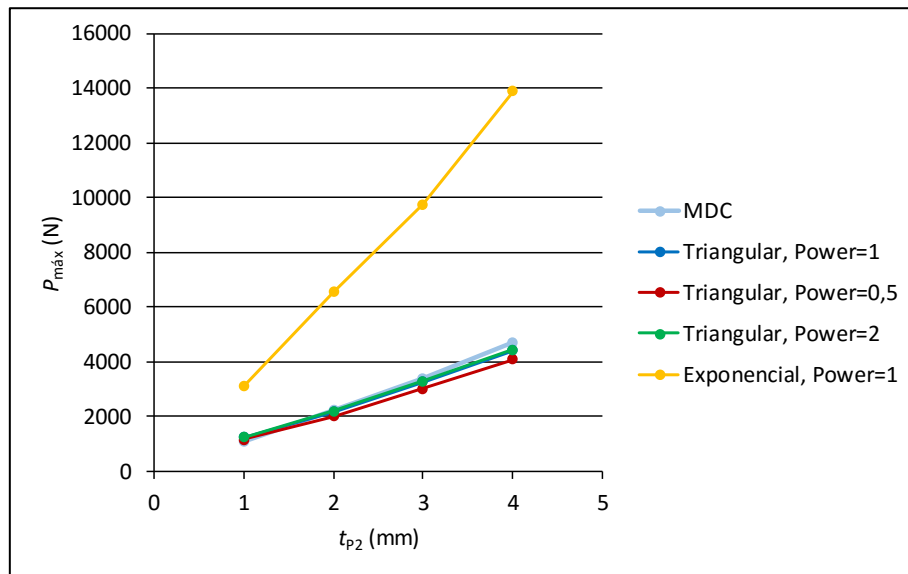


Figura 146 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e previsões numéricas das leis triangular e exponencial para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 22 - Variação percentual de $P_{máx}$ das previsões numéricas das leis triangular e exponencial para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752

t_{p2}	Triangular, Power=1	Triangular, Power=0,5	Triangular, Power=2	Exponencial, Power=1
1 mm	16,4%	8,0%	16,8%	195,0%
2 mm	-2,1%	-9,5%	-1,5%	196,0%
3 mm	-3,1%	-11,1%	-2,5%	189,6%
4 mm	-6,5%	-13,1%	-5,9%	195,4%

No que se refere a juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 146), a previsão numérica utilizando as leis de propagação triangular com valor de $Power=0,5$, 1 e 2 apresenta valores de $P_{máx}$ superiores aos valores obtidos através do MDC apenas para valor de $t_{p2}=1$ mm, uma vez que para os restantes valores de t_{p2} apresenta valores inferiores. É importante referir que, para $t_{p2}=1$ mm, a lei de propagação triangular com valor de $Power=0,5$ apresenta um valor de $P_{máx}$ mais próximo do obtido através do MDC. Para os restantes valores de t_{p2} , as leis de propagação triangular com valor de $Power=1$ e 2 apresentam valores muito semelhantes, mas, tal como acontece nas juntas com o adesivo Araldite® 2015, com uma ligeira vantagem para a lei de propagação triangular com valor de $Power=2$. Na Tabela 22 são apresentadas as variações percentuais obtidas para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

3.2.6 Comparação dos resultados obtidos com MDC

Neste subcapítulo é realizada uma comparação de resultados entre o MEFX e resultados obtidos numericamente utilizando o MDC, obtidos num trabalho anterior [1]. Da Figura 147 à Figura 149 são apresentadas as comparações entre os resultados numéricos do MEFX, utilizando o critério de iniciação de dano QUADS e a lei de propagação triangular, MDC e resultados experimentais das juntas com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. No caso do adesivo Sikaforce® 7752 apenas são apresentados os resultados numéricos do MEFX e do MDC, uma vez que os resultados experimentais não estão disponíveis.

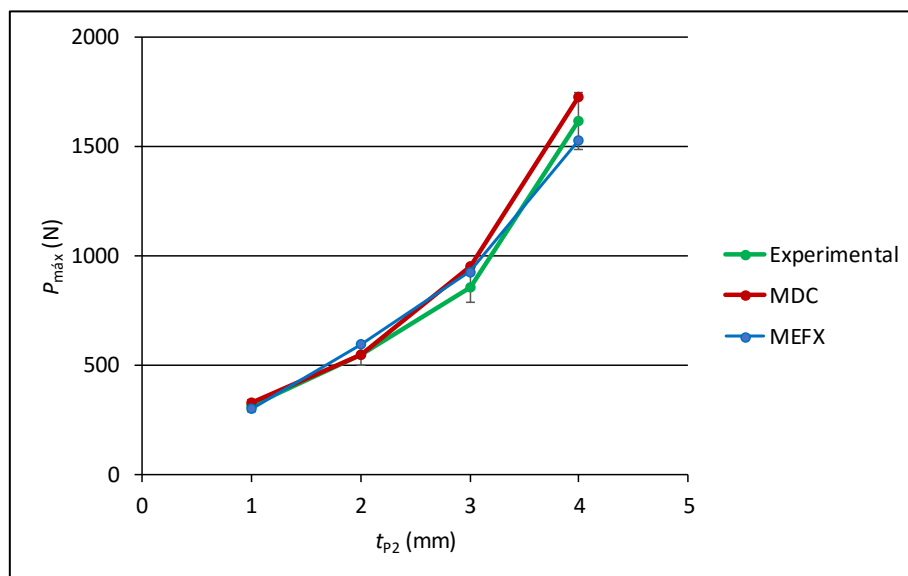


Figura 147 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e valores numéricos obtidos através do MDC e MEFX para juntas com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 23 - Variação percentual de $P_{máx}$ para juntas com o adesivo Araldite® AV138.

t_{p2}	MEFX (Experimental)	MEFX (MDC)
1 mm	-4,1%	-8,3%
2 mm	8,8%	9,2%
3 mm	8,7%	-2,5%
4 mm	-5,4%	-11,4%

Na Figura 147 pode-se observar que, para as juntas com o adesivo Araldite® AV138, o MEFX apenas apresenta valor superior de $P_{máx}$ quando $t_{p2} = 2$ mm quando comparado com o MDC. Quando comparado aos valores experimentais, o MEFX apresenta um valor superior de $P_{máx}$ para valores de $t_{p2} = 2$ e 3 mm. O MEFX, em comparação com o MDC,

apenas apresenta melhores resultados quando $t_{p2}=3$ mm, uma vez que apesar de a variação percentual ser negativa, é de menor valor quando comparada com a variação percentual verificada na comparação com os valores experimentais (Tabela 23).

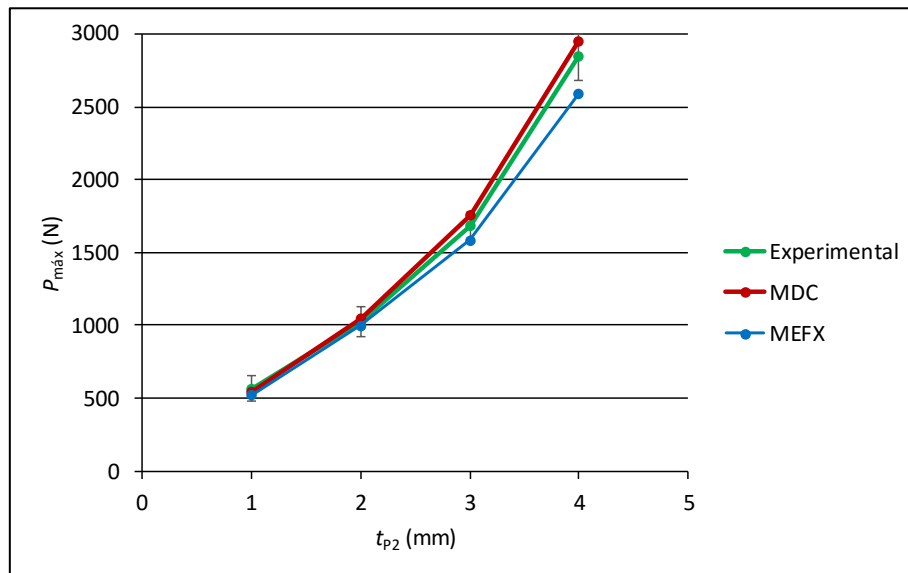


Figura 148 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e valores numéricos obtidos através do MDC e MEFX para juntas com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 24 - Variação percentual de $P_{máx}$ para juntas com o adesivo Araldite® 2015.

t_{p2}	MEFX (Experimental)	MEFX (MDC)
1 mm	-7,9%	-3,9%
2 mm	-2,3%	-4,5%
3 mm	-5,8%	-10,0%
4 mm	-8,9%	-12,1%

Na Figura 148 é possível observar que, para as juntas com o adesivo Araldite® 2015, o MEFX apresenta valores inferiores $P_{máx}$ para todos os valores de t_{p2} quando comparado com os valores obtidos pelo MDC e experimentais, uma vez que as variações percentuais apresentam valores negativos (Tabela 24). O MEFX apresenta valores mais próximos aos valores experimentais para valores de $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm, sendo que apresenta uma variação percentual mais baixa do que a verificada no MDC.

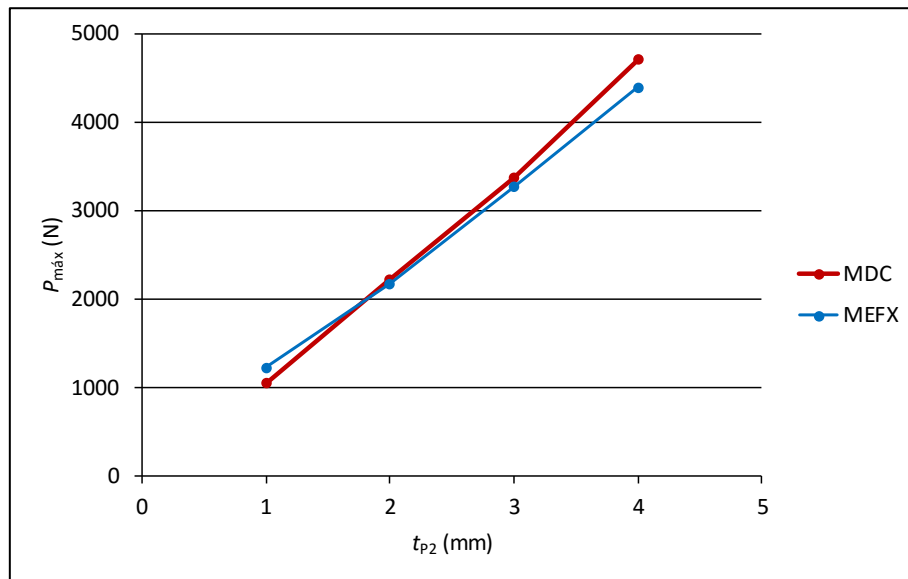


Figura 149 - Valores de $P_{máx}$ experimentais e valores numéricos obtidos através do MDC e MEFX para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

Tabela 25 - Variação percentual de $P_{máx}$ para juntas com o adesivo Sikaforce® 7752.

t_{p2}	MEFX (MDC)
1 mm	16,4%
2 mm	-2,1%
3 mm	-3,1%
4 mm	-6,5%

No caso das juntas com o adesivo Sikaforce® 7752 (Figura 149) o resultado é ligeiramente diferente do verificado para os adesivos anteriormente referenciados. Em termos de variação percentual, os valores de $P_{máx}$ obtidos pelo MEFX são inferiores para valores de $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm e superior para um valor de $t_{p2}=1$ mm (Tabela 25). A variação percentual apresenta um valor em módulo mais elevado para um valor de $t_{p2}=1$ mm.

3.2.7 Análise dos resultados obtidos

Através dos resultados obtidos nesta dissertação, mais propriamente a análise de tensões (arrancamento e corte), variável de dano, curvas $P-\delta$ e previsão de resistência, pode-se concluir que os três adesivos utilizados neste estudo apresentam comportamentos distintos. Os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 são os que apresentam maior semelhança, mas com diferenças notáveis em determinados aspetos. Isto deve-se ao facto de o adesivo Araldite® AV138 ser caracterizado pelo seu comportamento frágil, mas de elevada resistência, e o adesivo Araldite® 2015

caracterizar-se pelo seu comportamento moderadamente dúctil e elevada resistência ao corte e à clivagem. Por outro lado, o adesivo Sikaforce® 7752 é um adesivo altamente dúctil.

Com a análise de tensões, é possível chegar a várias conclusões sobre os resultados obtidos para os adesivos em estudo. Neste tipo de junta é possível observar-se que, para cada valor de t_{p2} , as curvas de tensões apresentam dois picos de tensão situados nas proximidades de $x/L_0=0$ e 1 mm. Em todos os adesivos em estudo, as curvas de σ_y apresentam um comportamento muito idêntico, embora se distingam nos valores de pico. Os resultados obtidos para juntas com o adesivo Araldite® AV138 foram superiores aos obtidos para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e muito superiores aos obtidos no adesivo Sikaforce® 7752. Isto deve-se ao facto de o adesivo Araldite® AV138 ser o adesivo mais rígido. Verificou-se ainda a existência de um aumento dos valores de pico σ_y/σ_{med} , a partir de $t_{p2}=2$ mm. Para o valor de $t_{p2}=1$ mm, o pico de tensão na proximidade de $x/L_0=0$ foi mais elevado, quando comparado aos valores de $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm. Na proximidade de $x/L_0=1$, os picos de tensão apresentam um crescimento gradual com o aumento de t_{p2} . Contudo, este crescimento gradual diminui com o aumento da flexibilidade do adesivo. Nos adesivos utilizados neste estudo, o comportamento das tensões σ_y/σ_{med} ao longo de x/L_0 é diferente em função de t_{p2} , a nível de valores negativos e positivos, referentes a compressão e tração, respetivamente. Ainda na análise de tensões é possível observar-se, para juntas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, que com o aumento de t_{p2} se verifica um aumento dos picos em $x/L_0=0$. Em relação ao pico na proximidade $x/L_0=1$, verificou-se um aumento gradual dos valores com o aumento de t_{p2} . Realizando uma breve comparação entre estes dois adesivos, observou-se que com o aumento da flexibilidade do adesivo menores são os picos de tensão τ_{xy} registados. Em relação à junta com o adesivo Sikaforce® 7752 é possível observar que, com o aumento dos valores de t_{p2} , se verifica uma diminuição dos valores de pico para $x/L_0=0$ e um aumento dos respetivos valores para $x/L_0=1$. Para este adesivo as tensões τ_{xy} , foram bastante inferiores às registadas no adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, devido à diferença de rigidez dos adesivos.

Relativamente à comparação da evolução da variável de dano, os adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752) apresentaram um aumento da porção de junta danificada quando $P_{máx}$ é atingido em simultâneo com o aumento de t_{p2} , enquanto que no momento da rotura se verifica uma diminuição dos valores $\delta/\delta_{Pmáx}$. Este decréscimo dos valores $\delta/\delta_{Pmáx}$ não foi proporcional, pelo que se conclui que a plastificação do aderente em L para as juntas com $t_{p2}=1$ mm é um fator favorável para um aumento dos valores $\delta/\delta_{Pmáx}$ na rotura. Para um valor de $t_{p2}=4$ mm verifica-se um aumento dos valores $\delta/\delta_{Pmáx}$ na rotura comparativamente a $t_{p2}=2$ e 3 mm, devido a uma ligeira plastificação do aderente base. Analisando os valores obtidos para os três adesivos, é possível observar que as juntas com o adesivo Araldite® AV138 obtiveram

valores de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ inferiores aos obtidos no adesivo Araldite® 2015 e muito inferiores aos do adesivo Sikaforce® 7752. A ductilidade é um fator determinante no valor de porção de zona danificada no momento em que se atinge a rotura.

A análise de resistência mostrou que, para o adesivo Araldite® AV138, se registaram valores de $P_{m\acute{a}x}$ inferiores comparativamente aos adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752. Por outro lado, o adesivo Sikaforce® 7752 registou os valores mais elevados de $P_{m\acute{a}x}$ para todos os valores de t_{P2} . Estes resultados contrariam o que seria expectável, uma vez que o adesivo Araldite® AV138 é, teoricamente, o adesivo que possui maior resistência. Estes resultados podem ser explicados devido ao facto de o adesivo Araldite® AV138 atingir uma tensão elevada na extremidade solicitada da junta adesiva ($x/L_0=0$), aplicando uma carga reduzida, com consequência de não permitir uma distribuição do esforço para o interior da região de sobreposição. Por norma, os adesivos considerados muito dúcteis e flexíveis (Sikaforce® 7752) apresentam uma resistência reduzida mas, neste caso, apresentam uma resistência superior a adesivos resistentes e frágeis (Araldite® AV138 e Araldite® 2015). Este acontecimento deve-se ao facto de estes permitirem uma distribuição de tensões mais uniforme, o que ocorre devido à deformação plástica.

De um modo geral, as juntas com adesivos dúcteis e flexíveis possuem uma resistência à fadiga superior, quando comparadas com adesivos que sejam rígidos e frágeis, devido a uma distribuição de tensões mais uniforme o que os torna capazes de suportar esforços de arrancamento e clivagem maiores. Ainda sobre os adesivos rígidos e frágeis, são adesivos com maior suscetibilidade ao surgimento de defeitos [62]. Em juntas adesivas, quando sujeitas a esforços estáticos, os adesivos frágeis também são mais sensíveis à propagação de fendas até à rotura, enquanto os adesivos considerados dúcteis, como o adesivo Sikaforce® 7752, têm maior resistência à sua propagação de fendas, o que resulta numa maior resistência [63], tal como se pode verificar nesta dissertação.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

A dissertação apresentada teve como objetivo realizar um estudo do comportamento de juntas adesivas em T com aderentes em alumínio, tendo em consideração diferentes condições geométricas (t_{p2}) e diferentes adesivos com características distintas de resistência e ductilidade. Neste estudo foi utilizado o adesivo Araldite® AV138, considerado um adesivo de comportamento rígido e frágil, o adesivo Araldite® 2015, caracterizado pelo seu comportamento moderadamente dúctil, com menor resistência, mas com maior flexibilidade e, por último, o adesivo Sikaforce® 7752, com elevada resistência, flexibilidade e ductilidade. A nível numérico foi realizado um estudo do modelo de dano baseado em tensões e deformações, uma análise de tensões, da variável de dano e a previsão de resistência das juntas, onde estão inseridos os estudos do efeito do critério de iniciação e da lei de propagação. A análise numérica (MEFX) foi realizada através do *software* ABAQUS® e comparada com resultados experimentais obtidos num trabalho anterior [1] de modo a validar a técnica numérica.

A análise de tensões permitiu entender de uma melhor forma o comportamento dos adesivos em estudo (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752). As curvas de σ_y apresentam um comportamento semelhante, diferindo apenas no valor de pico, para cada valor de t_{p2} . As curvas de tensões apresentam dois picos de tensão localizados nas proximidades de $x/L_0=0$ e 1 mm. Realizando uma análise mais pormenorizada aos resultados obtidos para os diferentes adesivos, as juntas com o adesivo Araldite® AV138 obtiveram valores de pico superiores e bastante superiores aos resultados obtidos para as juntas com o adesivo Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752, respetivamente. Estes resultados só foram possíveis devido ao facto de o adesivo Araldite® AV138 ser o adesivo com maior rigidez. Para valores iguais ou superiores a $t_{p2}=2$ mm verificou-se um aumento dos valores de pico σ_y/σ_{med} . Para $t_{p2}=1$ mm, o pico de tensão na proximidade de $x/L_0=0$ é superior comparativamente a valores de $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm. Os picos de tensão na proximidade de $x/L_0=1$ crescem de forma gradual com o aumento de t_{p2} . No entanto, este crescimento diminui com o facto de o adesivo ser mais flexível. Nas juntas com o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, com o aumento de t_{p2} , verificou-se um aumento dos picos em $x/L_0=0$. Em $x/L_0=1$ verificou-se um crescimento gradual com o aumento de t_{p2} . Comparando os dois adesivos, pode-se afirmar que, com o aumento da flexibilidade do adesivo, menores foram os picos de tensão τ_{xy} . No que se refere ao adesivo Sikaforce® 7752, o aumento de t_{p2} provocou uma diminuição dos valores de pico para $x/L_0=0$ e um aumento dos respetivos valores para $x/L_0=1$. As tensões τ_{xy} foram

muito inferiores às verificadas no adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015, devido à diferença de rigidez dos adesivos.

Realizou-se uma comparação da evolução da variável de dano para os adesivos utilizados neste estudo. Foi possível verificar, nos três adesivos, um aumento da porção de junta danificada quando $P_{m\acute{a}x}$ é atingido com o aumento de t_{p2} , o que se traduziu na diminuição dos valores $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ no instante em que se atinge a rotura. Esta diminuição não foi proporcional, o que leva a concluir que a plastificação do aderente em L para as juntas com $t_{p2}=1$ mm é favorável para um aumento dos valores de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ na rotura. Quando $t_{p2}=4$ mm, observa-se um aumento dos valores $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ na rotura ao comparar com $t_{p2}=2$ e 3 mm, uma vez que ocorre uma ligeira plastificação do aderente base. Para todos os valores de t_{p2} , as juntas com o adesivo Araldite® AV138 obtiveram valores de $\delta/\delta_{P_{m\acute{a}x}}$ inferiores aos do adesivo Araldite® 2015 e muito inferiores aos do adesivo Sikaforce® 7752. Com o aumento da ductilidade dos adesivos, isto permite atingir porções de zona danificada superiores no momento em que se atinge a rotura. A maior ductilidade (Sikaforce® 7752) possibilita à junta acomodar gradualmente o carregamento imposto, o que se tornou favorável em termos de resistência da junta.

Com o estudo do efeito do critério de iniciação de dano foi possível concluir que os critérios QUADS e MAXS são os que mais se adequam, uma vez que foram os que obtiveram maior concordância com os resultados experimentais. No caso das juntas com o adesivo Araldite® AV138, tendo como termo de comparação os resultados obtidos experimentalmente num trabalho anterior, para o critério de dano QUADS e para todos os valores de t_{p2} (1, 2, 3 e 4 mm), obteve-se uma variação percentual baixa, sendo que o maior valor de variação em módulo foi obtido para $t_{p2}=2$ mm (8,8%) e o menor para $t_{p2}=1$ mm (4,1%). No critério MAXS foi obtido o maior valor de variação percentual quando $t_{p2}=2$ e 3 mm (9,5%). Nas juntas com o adesivo Araldite® 2015, tal como acontece no adesivo Araldite® AV138, os critérios QUADS e MAXS são os mais adequados, que apresentam valores muito próximos e com mais baixa variação percentual, quando comparados com os valores experimentais. Para as juntas com o adesivo Sikaforce® 7752, a comparação foi realizada com valores numéricos de um trabalho anterior, uma vez que os valores experimentais não estão disponíveis. Também neste caso os critérios QUADS e MAXS foram os que apresentaram melhores resultados apesar de, para valores de $t_{p2}=1$ mm, se ter registado maior variação percentual entre adesivos (16,4% e 19,7% para os critérios QUADS e MAXS, respetivamente). Por outro lado, o adesivo Sikaforce® 7752 apresenta menores valores de variação percentual (critério MAXS), quando comparado com os outros adesivos usados neste estudo, para valores de $t_{p2}=2, 3$ e 4 mm (1,6%, 1,3% e -0,6%). O critério MAXPS mostrou ser um critério pouco adequado, uma vez que apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ baixos para todos os tipos de adesivos e de t_{p2} . Este critério apresenta resultados pouco adequados para todos os adesivos usados em estudo. Os critérios QUADE, MAXE e MAXPE apresentaram

valores de $P_{m\acute{a}x}$ demasiado elevados para todos os adesivos. No caso do adesivo Araldite® AV138, a variação percentual máxima, tendo como base resultados experimentais, foi de 113,3%, 117,3% e 31,3% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente. No caso do adesivo Araldite® 2015, para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente, a variação percentual máxima foi de 110,7%, 110,7% e 55,2%. No caso do adesivo Sikaforce® 7752, a variação percentual máxima, tendo como base resultados experimentais, foi de 218,4%, 239,2% e 174,5% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

O estudo da lei de propagação de dano revelou que a lei triangular, independentemente do parâmetro *Power* (0,5, 1 e 2), apresenta resultados com maior grau de precisão do que a lei exponencial. A lei triangular utilizada no estudo do critério de iniciação de dano (*Power*=1) foi a que obteve melhores resultados quando comparada com os resultados experimentais. No caso do adesivo Araldite® AV138, a variação percentual máxima em módulo foi de 8,8% (Triangular, *Power*=1), 21,6% (Triangular, *Power*=0,5), 12,5% (Triangular, *Power*=2) e 140,5% (Exponencial, *Power*=1). Em relação ao adesivo Araldite® 2015, a variação percentual máxima em módulo foi de 8,9% (Triangular, *Power*=1), 16,5% (Triangular, *Power*=0,5), 8,3% (Triangular, *Power*=2) e 117,7% (Exponencial, *Power*=1). No caso do adesivo Sikaforce® 7752, tendo como base os resultados obtidos numericamente num trabalho anterior [1], a variação percentual máxima em módulo foi de 16,4% (Triangular, *Power*=1), 13,1% (Triangular, *Power*=0,5), 16,8% (Triangular, *Power*=2) e 196,0% (Exponencial, *Power*=1).

Para além da validação do MEFX pelos resultados experimentais, os resultados numéricos obtidos neste trabalho também foram comparados com os resultados obtidos numericamente num trabalho anterior [1], mais concretamente através do MDC. No caso do adesivo Araldite® AV138 o MEFX apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ superiores para um valor de t_{p2} = 2 mm (9,2%) e inferiores para valores de t_{p2} = 1, 3 e 4 mm (8,3%, 2,5% e 11,4%, respetivamente). Em relação ao adesivo Araldite® 2015 o MEFX apresenta valores de $P_{m\acute{a}x}$ inferiores para valores de t_{p2} = 1, 2, 3 e 4 mm, com variações percentuais de 3,9%, 4,5%, 10,0% e 12,1%, respetivamente. No caso do adesivo Sikaforce® 7752, para o MEFX os valores obtidos de $P_{m\acute{a}x}$ são inferiores para valores de t_{p2} = 2, 3 e 4 mm (2,1%, 3,1% e 6,5%, respetivamente) e superior para um valor de t_{p2} = 1 mm (16,4%).

Com a realização desta dissertação foi possível concluir que o adesivo Sikaforce® 7752 é o que se adequa mais para juntas adesivas em T sujeitas a esforços de arrancamento, uma vez que apresentou valores de resistência da junta maiores que os valores obtidos para o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015. De referir ainda que o valor de t_{p2} e o tipo de adesivo aplicado são os parâmetros que têm maior influência na resistência das juntas. É possível concluir ainda que a técnica de MEFX (QUADS e lei triangular, *Power*=1) é ferramenta com elevado grau de precisão na previsão de resistência de juntas em T.

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

- Aumentar o valor de t_{P2} ;
- Seleção de materiais diferentes para os substratos;
- Seleção de adesivos com propriedades diferentes;
- Averiguar o efeito da variação do raio de curvatura do aderente em L;
- Estudo do efeito dos parâmetros geométricos na resistência à fadiga nas juntas em T.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Carneiro, M.A.S., *Estudo experimental e numérico de juntas adesivas em T com aderentes de alumínio*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
2. Fay, P.A., *History of adhesive bonding*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England
3. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill
4. Hartshorn, S.R., *Structural Adhesives - Chemistry and Technology*. 1986, New York: Plenum Publishing
5. Silva, L.F.M.d., A.G.d. Magalhães, and M.F.S.F.d. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007: Publindústria
6. Xará, J.T.S., *Previsão da resistência de juntas adesivas em L entre alumínio e material compósito pelo método de elementos finitos estendido (MEFX)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
7. da Silva, L.F.M., et al., *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. 2012, Germany: Wiley-VCH
8. Bishopp, J., *Aerospace: a pioneer in structural adhesive bonding*, in *Handbook of Adhesive and Sealants*, P. Cognard, Editor. 2005, Elsevier: Amesterdão
9. Hart-Smith, L.J., *Aerospace*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England
10. Digler, K., *Automobiles*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England
11. Hentinen, M., *Boats and marine*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England
12. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011
13. Martín-Martínez, J.M., *Shoe industry*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England

14. Ebnesaijad, S., *Adhesives technology handbook*. 2008, William Andrew Inc.: Norwich.
15. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2007, Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
16. Santos, T.F., *Aplicação do método de Elementos Finitos Extendido (MEFX) para a previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição dupla*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
17. Montes, J.R., C.M. Lucas, and J.C.R. Romero, *Procesos industriales para materiales no metálicos*. Madrid España: Edutirial Vision Net
18. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonguerschnitten*. 1938. **15**: p. 41-47.
19. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. *Journal of Applied Mechanics*, 1944: p. 66:A17-A27.
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.
21. Duan K, H.X. and M. Y.W., *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2004. **18**: p. 39-53.
22. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, Heidelberg: Springer
23. Ikegami, K., et al., *Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metals*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1997. **10**: p. 199-206.
24. Weißgraeber, P.a.W.B., *Crack Initiation at Weak Stress Singularities – Finite Fracture Mechanics Approach*. Vol. 3. 2014: Procedia Materials Science. 153-158
25. Kuna, M., *Finite Elements in Fracture Mechanics*, ed. G.L. Gladwell. 2013: Springer
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**: p. 2125-2142.
28. Ji, G., et al., *Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2010. **47**(18-19): p. 2445-2458.

29. Yang, Q.D. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**.
30. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer* International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
31. Khoramishad, H., et al., *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**: p. 1146-1158.
32. Daudeville, L. and P. Ladeveze, *A damage mechanics tool for laminate delamination*, in *Composite Structures*. 1993. p. 547-555. ISBN:
33. Voyiadjis, G.Z. and P.I. Kattan, *Damage Mechanics*. 2005, New York: Marcell Dekker
34. Raghavan, P.G.S., *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial de-bonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**: p. 955-977.
35. Imanaka, M., et al., *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**: p. 981-994.
36. Wahab, M.M.A., et al., *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**: p. 763-781.
37. Shenoy, V., et al., *Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**: p. 1073-1090.
38. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing
39. Belytschko, T. and T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
40. Dolbow, J., T. Belytschko, and N. Moës, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
41. *Abaqus Documentation*. 2013, Vélizy-Villacoublay: Dassault Systèmes
42. Campilho, R.D.S.G., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
43. Campilho, R.D.S.G., et al., *Feasibility of the extended finite element method for the simulation of composite bonded joints*. Materials Science Forum, 2013. **730-732**: p. 513-518.

44. Fernandes, T.A.B., et al., *Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimentation and Advanced Techniques for Strength Prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
45. Mubashar, A., I.A. Ashcroft, and A.D. Crocombe, *Modelling damage and failure in adhesive joints using a combined XFEM-cohesive element methodology*. The Journal of Adhesion, 2014. **90**(8): p. 682-697.
46. Sosa, J.L.C. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**: p. 788-791.
47. Airoidi, A., et al., *Damage in GLARE laminates under indentation loads: experimental and numerical results*, in *Proceedings of the 17th international conference on composite materials*. 2009.
48. 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.
49. Domingues, N.R.E., et al., *Experimental and numerical failure analysis of aluminium/composite single-L joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015. **64**: p. 86-96.
50. Carneiro, M.A.D.S. and R.D.S.G. Campilho, *Analysis of adhesively-bonded T-joints by experimentation and cohesive zone models*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2017. **31**: p. 1998-2014.
51. Burns, L.A., et al., *Bio-inspired design of aerospace composite joints for improved damage tolerance*. Composite Structures, 2012. **94**(3): p. 995-1004.
52. Hu, P., et al., *Experimental and numerical analysis on load capacity and failure process of T-joint: Effect produced by the bond-line length*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **38**: p. 17-24.
53. Castagnetti, D., E. Dragoni, and A. Spaggiari, *Failure analysis of bonded T-peel joints: Efficient modelling by standard finite elements with experimental validation*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**: p. 306-312.
54. Lumley, R., *Fundamentals of aluminium metallurgy: Production, processing and applications*. 2010: Elsevier
55. Domingues, N.R.E., *Estudo da resistência de juntas adesivas em L entre alumínio e material compósito*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
56. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
57. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M.d. Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.

-
58. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**: p. 2351-2368.
 59. Nunes, S.L.S., *Estudo comparativo da resistência à tração de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
 60. Zygmund, S., *Araldite industrial adhesives*, in *Adhesives technology*, H. Corporation, Editor. 2014: Switzerland
 61. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
 62. da Silva, L.F.M., et al., *Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength*. The Journal of Adhesion, 2006. **82**(11): p. 1091-1115.
 63. Corporation, H., *Design Guide for Bonding Plastics*. Vol. 6. 2011: Henkel Corporation - Engineering Adhesives