



# PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS EM L ENTRE ALUMÍNIO E MATERIAL COMPÓSITO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO

**JOÃO TIAGO DA SILVA XARÁ**

Outubro de 2016

**PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS EM L ENTRE ALUMÍNIO E  
MATERIAL COMPÓSITO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO  
(MEFX)**

João Tiago Silva Xará

Número: 1110236

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



**PREVISÃO DA RESISTÊNCIA DE JUNTAS ADESIVAS EM L ENTRE ALUMÍNIO E  
MATERIAL COMPÓSITO PELO MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS EXTENDIDO  
(MEFX)**

João Tiago Silva Xará

Número: 1110236

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.

**2016**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





## JÚRI

### **Presidente**

A definir

### **Orientador**

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

### **Arguente**

A definir



## AGRADECIMENTOS

O meu sincero agradecimento ao meu orientador Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho pela oportunidade concedida e pela dedicação e disponibilidade demonstradas ao longo da elaboração deste trabalho.

Ao Instituto Superior de Engenharia do Porto pela oportunidade que me concederam para a realização deste trabalho.



## PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas; juntas em L; ensaios experimentais; adesivo estrutural; Método dos Elementos Finitos Extendido.

## RESUMO

A tecnologia de ligações adesivas é um método de ligação cada vez mais utilizado na concepção de estruturas mecânicas já que apresenta diversas vantagens em comparação com os métodos de ligação tradicionais. A facilidade de fabricação, menor custo, redução de peso, possibilidade de unir diferentes materiais e redução de concentração de tensões são algumas das vantagens que esta técnica apresenta. Um outro tipo de tecnologia emergente na atualidade é a concepção e utilização de materiais compósitos. Por exemplo, os materiais compósitos reforçados com fibra de carbono são bastante utilizados em aplicações que requerem elevada resistência e rigidez específicas, como é o caso da indústria automóvel e aeronáutica. Este tipo de materiais pode ser combinado com metais ou plásticos trazendo vantagens no projeto de estruturas. É, por exemplo, neste tipo de aplicações que os adesivos, que variam desde rígidos e frágeis (por exemplo, Araldite® AV138) a altamente dúcteis e flexíveis (por exemplo, SikaForce® 7752), são fundamentais.

Este trabalho tem como objetivo o estudo de juntas adesivas em L entre componentes de alumínio e compósito de carbono-epóxico quando sujeitas a esforços de arrancamento, considerando uma variação da espessura do aderente em L ( $t_{p2}$ ) e adesivos de ductilidade distinta. O estudo foi realizado através de uma análise numérica segundo os critérios baseados em tensões e deformações do Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX), que foi validada com valores experimentais fornecidos anteriormente. A análise numérica permitiu o estudo da distribuição de tensões, do efeito do critério de iniciação de dano, do efeito da lei de propagação e também da resistência das juntas.

A análise por MEFX revelou que este método é bastante preciso utilizando o critério de iniciação QUADS e a lei de propagação triangular. Foi evidenciado que a geometria do aderente em L e o tipo de adesivo são os parâmetros mais importantes para a resistência de junta.



**KEYWORDS**

*Adhesive joints; single-L joints; experimental tests; structural adhesive; eXtended Finite Element Method*

**ABSTRACT**

The adhesive bonding technology is an increasingly common bonding method in the design of mechanical structures since it presents several advantages in comparison with more traditional bonding methods. The easier manufacturing, lower cost, weight reduction, capability of bonding different materials and stress reduction are some of the advantages that this technique presents. Another type of emergent technology is the conception and use of composite materials. For instance, carbon fiber-reinforced composite materials are widely used in applications that require high specific strength and stiffness, such as automotive and aeronautic industries. This type of materials can be combined with metals and plastics bringing advantages in structural design. It is, for example, in this type of applications that adhesives, ranging from stiff and brittle (such as the Araldite® AV138) to highly ductile and flexible (such as the SikaForce® 7752), are fundamental.

This work aims to study single-L adhesive joints between aluminum components and carbon-epoxy composites under peeling loads, considering the variation of the L-shaped adherend's thickness ( $t_{p2}$ ) and adhesives of distinct ductility. The study was conducted through a numerical analysis by the eXtended Finite Element Method (XFEM) based on stress and strain criteria, which was validated with previously obtained experimental results. The numerical analysis allowed the study of the stress distributions, the effect of the damage initiation criterion, the effect of the propagation law and also the joints' strength.

The XFEM analysis revealed that this method is very accurate when using the QUADS initiation criterion and the triangular propagation law. It was shown that the L-shaped adherend's geometry and the adhesive type are the most important parameters affecting the joints' strength.



## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

## Lista de Abreviaturas

---

2D	Duas dimensões
3D	Três dimensões
Al	Alumínio
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CFRP	<i>Carbon fiber reinforced polymers</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
EF	Elementos finitos
ESDU	<i>Engineering Society Data Unit</i>
FRP	<i>Fibre-reinforced plastics</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	Modelo de dano coesivo

---

MEFX	Método dos elementos finitos estendido
MFLE	Mecânica da fratura linear elástica
QUADE	Critério quadrático de deformação
QUADS	Critério quadrático de tensão
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i>

### Lista de Símbolos

$\bar{P}$	Força por unidade de largura
$\mathbf{a}_i$	Vetor dos graus de liberdade nodais enriquecidos
$b$	Largura da junta adesiva
$C$	Curva que rodeia a extremidade da fenda
$E$	Módulo de Young
$G$	Módulo de corte
$G_I$	Taxa de libertação de energia sob tração pura
$G_{IC}$	Taxa crítica de libertação de energia sob tração pura
$G_{II}$	Taxa de libertação de energia sob deslizamento
$G_{IIC}$	Taxa crítica de libertação de energia sob deslizamento
$G_{III}$	Taxa de libertação de energia sob rasgamento
$G_{IIIC}$	Taxa crítica de libertação de energia sob rasgamento
$H$	Funções de forma descontínuas

---

$k$	Fator de momento fletor
$l$	Comprimento de sobreposição
$L_A$	Altura do aderente de alumínio
$L_O$	Comprimento de sobreposição do alumínio/comprimento de adesivo
$L_T$	Comprimento do CFRP
$M$	Momento fletor no substrato no fim da sobreposição
$N_i$	Funções de forma nodais
$P$	Força
$P_m$	Força máxima
$R$	Raio de curvatura do alumínio em L
$S$	Comprimento do arco
$t$	Espessura dos substratos
$t_A$	Espessura de adesivo
$T_j$	Vetor de tração
$t_n$	Componente de tensão normal
$t_n^0$	Resistência coesiva à tração
$t_{p1}$	Espessura do aderente de CFRP
$t_{p2}$	Espessura do aderente de alumínio
$t_s$	Componente de tensão de corte
$t_s^0$	Resistência coesiva ao corte
$u$	Vetor de deslocamentos
$u_i$	Vetor de deslocamentos nodais
$w$	Densidade de energia

---

---

$x$	Distancia da extremidade esquerda da camada de adesivo
$x_1$	Sistema de coordenadas
$x_2$	Sistema de coordenadas
$\alpha$	Coefficiente para critério da mecânica da fratura
$\beta$	Coefficiente para critério da mecânica da fratura
$\gamma$	Coefficiente para critério da mecânica da fratura
$\gamma_f$	Deformação de rotura ao corte
$\delta$	Deslocamento imposto
$\delta_n^0$	Deslocamento normal correspondente a $t_n^0$
$\delta_s^0$	Deslocamento de corte correspondente a $t_s^0$
$\epsilon$	Deformação
$\epsilon_f$	Deformação de rotura
$\epsilon_{m\acute{a}x}$	Deformação principal máxima
$\epsilon_{m\acute{a}x}^0$	Deformação máxima de um material à tração
$\epsilon_n$	Componente de deformação normal
$\epsilon_n^0$	Limite da componente de deformação normal
$\epsilon_s$	Componente de deformação ao corte
$\epsilon_s^0$	Limite da componente de deformação ao corte
$\sigma_{avg}$	Tensão de arrancamento média
$\sigma_f$	Tensão de rotura
$\sigma_{max}$	Tensão principal máxima
$\sigma_{max}^0$	Resistência de um material à tração
$\sigma_y$	Tensão de cedência, tensão de arrancamento

---

---

$\tau_f$	Tensão de rotura ao corte
$\tau_{xy}$	Tensão de corte
$\tau_y$	Tensão de cedência ao corte
$\nu$	Coefficiente de Poisson

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - JUNTA ADESIVA E SEUS CONSTITUINTES [7].	8
FIGURA 2 - ESTRUTURA PRINCIPAL DA CAUDA DO BOEING 777 COMPOSTA POR DIFERENTES MATERIAIS [12].	11
FIGURA 3 - SATÉLITE DE TELECOMUNICAÇÕES LIGADO COM ADESIVOS [11].	12
FIGURA 4 - COMPONENTES DO MERCEDES-BENZ CLASSE S COUPÉ DE DIFERENTES MATERIAIS [13].	13
FIGURA 5 - DIFERENTES APLICAÇÕES DE ADESIVOS EM <i>BODY IN WHITE</i> [13].	13
FIGURA 6 - FABRICO DE UM CONVÉS [11].	14
FIGURA 7 - JUNTAS TÍPICAS EM BARCOS COM AS RESPECTIVAS SOLICITAÇÕES [14].	14
FIGURA 8 - POSSÍVEIS APLICAÇÕES DE SUBSTRUTURAS FRP [14].	15
FIGURA 9 - CONTRAPLACADO LIGADO COM ADESIVO NUM BARCO [11].	15
FIGURA 10 - MODOS DE CARREGAMENTO EM JUNTAS ADESIVAS: (A) COMPRESSÃO, (B) TRAÇÃO, (C) CORTE, (D) ARRANCAMENTO E (E) CLIVAGEM [16].	16
FIGURA 11 - MODOS DE ROTURA EM JUNTAS ADESIVAS: (A) ROTURA COESIVA, (B) ROTURA ADESIVA, (C) ROTURA DO SUBSTRATO E (D) ROTURA MISTA [9].	17
FIGURA 12 - TIPOS DE JUNTAS ADESIVAS MAIS COMUNS [9].	18
FIGURA 13 - CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS SEGUNDO O SEU DESEMPENHO [9].	20
FIGURA 14 - TENSÃO DE CORTE NUMA JSS [9].	25
FIGURA 15 - ANÁLISE DE VOLKERSEN [11].	25
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO GEOMÉTRICA DO FATOR DE MOMENTO FLETOR DE GOLAND E REISSNER [9].	26
FIGURA 17 - TENSÕES DE ARRANCAMENTO NUMA JSS [11].	26
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO ELASTO-PLÁSTICA DO ADESIVO [9].	27
FIGURA 19 - PROPAGAÇÃO DO DANO NO MEFX UTILIZANDO O CONCEITO DE NÓS FANTASMA: ANTES (A) E APÓS A PARTIÇÃO (B) DE UM ELEMENTO FRATURADO EM SUBELEMENTOS [48].	33
FIGURA 20 - MODELO DE EF COM CONDIÇÕES FRONTEIRA [49].	34
FIGURA 21 - FASE 1: A) COMPRIMENTO INICIAL DA FENDA, B) MODELO DEFORMADO E C) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES [49].	35
FIGURA 22 - FASE 2: A) COMPRIMENTO INICIAL DA FENDA, B) MODELO DEFORMADO E C) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES [49].	35

FIGURA 23 - FASE 3: A) COMPRIMENTO INICIAL DA FENDA, B) MODELO DEFORMADO E C) DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES [49].	36
FIGURA 24 - CONFIGURAÇÃO E DIMENSÕES DAS JUNTAS DO ENSAIO DCB (EM MM) [50].	37
FIGURA 25 – CURVAS $G_{IC}$ -A PARA CCM E CBT [50].	37
FIGURA 26 - MODELO DO ENSAIO DCB DURANTE A SIMULAÇÃO, COM CONDIÇÕES FRONTEIRA E CARREGAMENTO [50].	38
FIGURA 27 - PROPAGAÇÃO DA FENDA, NA SUA INICIAÇÃO (A) E AUMENTANDO AO LONGO DO ADESIVO (B) [50].	38
FIGURA 28 - CURVAS $P$ - $\Delta$ NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS DOS MODELOS DCB [50].	39
FIGURA 29 - CONFIGURAÇÃO DO LAMINADO GLARE [52].	39
FIGURA 30 - DIMENSÕES DO LAMINADO GLARE [52].	40
FIGURA 31 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E APLICAÇÃO NODAL DO CARREGAMENTO [52].	41
FIGURA 32 - CURVAS $P$ - $\Delta$ NUMÉRICAS, EXPERIMENTAIS E DE AIROLDI ET AL. [52].	41
FIGURA 33 - TENSÕES DE VON MISES PARA INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DA FENDA [52].	42
FIGURA 34 - DETALHE DA ABERTURA DA FENDA [52].	42
FIGURA 35 – PROPRIEDADES DOS BETÕES FA-00 E FA-20 [54].	43
FIGURA 36 – PROVETE COM A) CONFIGURAÇÃO DO CARREGAMENTO E DIMENSÕES E B) MALHA DE EF [54].	43
FIGURA 37 - CONDIÇÕES FRONTEIRA DO MODELO: U - DESLOCAMENTO; UR – ROTAÇÃO [54].	44
FIGURA 38 - FASES DO DESENVOLVIMENTO DA FENDA [54].	44
FIGURA 39 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES NA SEGUNDA FASE DO DESENVOLVIMENTO DA FENDA [54].	44
FIGURA 40 - CURVA $P$ - $\Delta$ PARA O BETÃO FA-20: (A) EXPERIMENTAL, (B) NUMÉRICA, (C) COMPARAÇÃO ENTRE NUMÉRICA E EXPERIMENTAL [54].	45
FIGURA 41 - FORMA DA FENDA OBTIDA: (A) EM ENSAIO EXPERIMENTAL, (B) EM SIMULAÇÃO NUMÉRICA [54].	45
FIGURA 42 - CONFIGURAÇÃO E DIMENSÕES DA JUNTA (EM MM) [55].	46
FIGURA 43 - CURVAS $P$ - $\Delta$ NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS PARA JUNTAS COLADAS COM ARALDITE® 2015 COM $L_0=37,5$ MM [55].	47
FIGURA 44 - CURVAS $P_M$ - $L_0$ NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS PARA OS TRÊS ADESIVOS [55].	47
FIGURA 45 - CURVAS $P_M$ - $L_0$ NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS PARA ARALDITE® AV138 E ARALDITE® 2015 [55].	48
FIGURA 46 - EFEITO DA INFLUÊNCIA DA MALHA NO MEFX PARA OS ADESIVOS A) ARALDITE® AV138 E B) SIKAFORCE® 7888 [55].	49

FIGURA 47 - CONFIGURAÇÃO E DIMENSÕES DA JUNTA ADESIVA [57].	50
FIGURA 48 - RELAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ADESIVO FM73-M [57].	50
FIGURA 49 - MALHA E CONDIÇÕES FRONTEIRA DO MODELO CONSIDERADO NA ANÁLISE NUMÉRICA [57].	51
FIGURA 50 - REGIÕES DOS ELEMENTOS COESIVOS E MEFX [57].	51
FIGURA 51 - CURVA $P-\Delta$ NUMÉRICA EM COMPARAÇÃO COM DADOS EXPERIMENTAIS [57].	51
FIGURA 52 - PROPAGAÇÃO DA FENDA PELAS DIFERENTES REGIÕES [57].	52
FIGURA 53 - INTERAÇÃO DAS FENDAS DAS REGIÕES DE MEFX E MDC [57].	52
FIGURA 54 - INICIAÇÃO E PROPAGAÇÃO DA FENDA NA CAMADA DO ADESIVO [57].	52
FIGURA 55 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DA LIGA AW6082-T651 E RESPECTIVA APROXIMAÇÃO PARA ANÁLISE ATRAVÉS DO MÉTODO DE EF [56].	58
FIGURA 56 - CURVAS TENSÃO-DEFORMAÇÃO REFERENTES AO ADESIVO ARALDITE® AV138 [60].	60
FIGURA 57 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO REFERENTE AO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [61].	61
FIGURA 58 - GEOMETRIA DA JUNTA EM L [3].	63
FIGURA 59 - A) MARCAÇÃO DOS PROVETES PARA DOBRAGEM, B) CHAPAS DE APOIO, C) ASPETO FINAL DOS PROVETES [3].	64
FIGURA 60 - A) AQUECIMENTO DE UMA CAMADA DE COMPÓSITO E B) PROCESSO DE EMPILHAMENTO [3].	65
FIGURA 61 - A) APLICAÇÃO DO DESMOLDANTE, B) PLACA DE COMPÓSITO ENTRE CHAPAS DE AÇO, C) PLACA DE COMPÓSITO NA PRENSA À TEMPERATURA DE 130°C [3].	65
FIGURA 62 - CICLO TÉRMICO DE CURA DAS PLACAS DE CFRP [3].	65
FIGURA 63 - A) MÁQUINA DE CORTE E B) PROVETES CORTADOS [3].	66
FIGURA 64 - ALINHAMENTO DAS FITAS CALIBRADAS DE 0,2 MM [3].	66
FIGURA 65 - COLOCAÇÃO DO ADERENTE DE ALUMÍNIO EM L SOBRE AS FITAS CALIBRADAS DE 0,2 MM E CFRP [3].	67
FIGURA 66 - JUNTAS EM L NO SEU ASPETO FINAL [3].	67
FIGURA 67 - BASE UTILIZADA NOS ENSAIOS DOS PROVETES [3].	68
FIGURA 68 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO DE UMA JUNTA EM L [3].	68
FIGURA 69 - CURVAS $P-\Delta$ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA JUNTAS LIGADAS COM ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=1$ MM [3].	69
FIGURA 70 - CURVAS $P-\Delta$ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA JUNTAS LIGADAS COM ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=4$ MM [3].	69

FIGURA 71 - CURVAS $P-\Delta$ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA JUNTAS LIGADAS COM SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2} = 1$ MM [3].	70
FIGURA 72 - CURVAS $P-\Delta$ OBTIDAS EXPERIMENTALMENTE PARA JUNTAS LIGADAS COM SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2} = 4$ MM [3].	70
FIGURA 73 - ROTURA COESIVA DO ADESIVO PARA JUNTAS LIGADAS COM ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=1$ MM [3].	71
FIGURA 74 - ROTURA COESIVA DO ADESIVO PARA JUNTAS LIGADAS COM ARALDITE® AV138 E $T_{P2}=4$ MM [3].	71
FIGURA 75 - ROTURA COESIVA DO ADESIVO PARA AS JUNTAS COLADAS COM SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=2$ MM [3].	72
FIGURA 76 - ROTURA COESIVA DO ADESIVO PARA AS JUNTAS COLADAS COM SIKAFORCE® 7752 E $T_{P2}=3$ MM [3].	72
FIGURA 77 - VALORES DE $P_M$ OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE DAS JUNTAS LIGADAS COM ARALDITE® AV138 EM FUNÇÃO DE $T_{P2}$ [3].	73
FIGURA 78 - VALORES DE $P_M$ OBTIDOS EXPERIMENTALMENTE DAS JUNTAS LIGADAS COM SIKAFORCE® 7752 EM FUNÇÃO DE $T_{P2}$ [3].	73
FIGURA 79 – TIPOS DE ELEMENTOS DOS CONSTITUINTES DA JUNTA ADESIVA NO ABAQUS®	75
FIGURA 80 - DETALHE DO REFINAMENTO DAS MALHAS PARA: A) ANÁLISE DE RESISTÊNCIA E B) ANÁLISE DE TENSÕES.	76
FIGURA 81 - EXEMPLO DO EFEITO <i>BIAS</i> [33].	76
FIGURA 82 - SENTIDO DO EFEITO <i>BIAS</i> DA MALHA NO ADERENTE DE ALUMÍNIO.	77
FIGURA 83 - SENTIDO DO EFEITO <i>BIAS</i> DA MALHA AO LONGO DA ESPESSURA DO ADERENTE DE CFRP.	77
FIGURA 84 - SENTIDO DO EFEITO <i>BIAS</i> DA MALHA AO LONGO DO COMPRIMENTO DO ADERENTE DE CFRP.	77
FIGURA 85 - CONDIÇÕES FRONTEIRA E DE CARREGAMENTO IMPOSTAS AOS MODELOS NUMÉRICOS.	78
FIGURA 86 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE ARRANCAMENTO NO PLANO MÉDIO DA ESPESSURA PARA JUNTAS LIGADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 EM FUNÇÃO DE $T_{P2}$ .	82
FIGURA 87 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE ARRANCAMENTO NO PLANO MÉDIO DA ESPESSURA PARA JUNTAS LIGADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 EM FUNÇÃO DE $T_{P2}$ .	83
FIGURA 88 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CORTE NO PLANO MÉDIO DA ESPESSURA PARA JUNTAS LIGADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 EM FUNÇÃO DE $T_{P2}$ .	83
FIGURA 89 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES DE CORTE NO PLANO MÉDIO DA ESPESSURA PARA JUNTAS LIGADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 EM FUNÇÃO DE $T_{P2}$ .	84

FIGURA 90 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO QUADS). .....	85
FIGURA 91 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXS). .....	85
FIGURA 92 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXPS). .....	86
FIGURA 93 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO QUADE). .....	86
FIGURA 94 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXE). .....	87
FIGURA 95 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXPE). .....	87
FIGURA 96 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO QUADS). .....	88
FIGURA 97 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXS). .....	88
FIGURA 98 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXPS). .....	89
FIGURA 99 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO QUADE). .....	89
FIGURA 100 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXE). .....	90
FIGURA 101 - CURVAS $P-\Delta$ NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ (CRITÉRIO MAXPE). .....	90
FIGURA 102 - VALORES DE $P_M$ EXPERIMENTAIS E RESPECTIVAS PREVISÕES NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ . .....	91
FIGURA 103 - VALORES DE $P_M$ EXPERIMENTAIS E RESPECTIVAS PREVISÕES NUMÉRICAS PARA JUNTAS LIGADAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ . .....	92
FIGURA 104 - COMPARAÇÃO DOS PARÂMETROS ENTRE A LEI TRIANGULAR E EXPONENCIAL. ....	93
FIGURA 105 - VALORES DE $P_M$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO ARALDITE® AV138 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ . .....	94
FIGURA 106 - VALORES DE $P_M$ EXPERIMENTAIS E PREVISÕES NUMÉRICAS DAS LEIS TRIANGULAR E EXPONENCIAL PARA AS JUNTAS COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752 FUNÇÃO DE $T_{P2}$ . .....	94
FIGURA 107 - VALORES DE $P_M$ EXPERIMENTAIS E RESPECTIVAS PREVISÕES NUMÉRICAS SEGUNDO O MEFX E MDC PARA JUNTAS LIGADAS COM ARALDITE® AV138. ....	95

---

FIGURA 108 - VALORES DE $P_M$ EXPERIMENTAIS E RESPECTIVAS PREVISÕES NUMÉRICAS SEGUNDO O MEFX E MDC PARA JUNTAS COLADAS COM SIKAFORCE® 7752. ....	96
--	----

## ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – DESENVOLVIMENTO HISTÓRICO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS [6, 7]. .....	7
TABELA 2 - VALORES DE $G_{IC}$ DE QUATRO PROVETES PARA CCM E CBT [50].....	38
TABELA 3 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO E LIGAS DE ALUMÍNIO [52]. .....	40
TABELA 4 - TENACIDADE À FRATURA NO MODO I DAS DIFERENTES INTERFACES DO LAMINADO [52]. ...	40
TABELA 5 - PROPRIEDADES DA FIBRA DE VIDRO-EPÓXIDO [52].....	40
TABELA 6 - VALORES DE DELAMINAÇÃO PARA UMA DETERMINADA CARGA E DESLOCAMENTO [52] .....	42
TABELA 7 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO [56].....	58
TABELA 8 - PROPRIEDADES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS DO CFRP [51]. .....	59
TABELA 9 - PROPRIEDADES MECÂNICAS MAIS RELEVANTES DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [51, 60, 61]. .....	60
TABELA 10 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [51, 60, 61]. .....	62
TABELA 11 - DIMENSÕES DAS JUNTAS (EM MM) [3].....	63
TABELA 12 - AUMENTO PERCENTUAL DE $P_M$ EM CADA ADESIVO PARA OS DIFERENTES $T_{P2}$ [3]. .....	74
TABELA 13 - PROPRIEDADES DA LIGA DE ALUMÍNIO USADAS NO ABAQUS®. .....	75
TABELA 14 - DEFINIÇÃO DE INCREMENTAÇÃO NO ABAQUS® .....	78
TABELA 15 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE MEFX PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138. ....	80
TABELA 16 - PARÂMETROS UTILIZADOS NA ANÁLISE DE MEFX PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	80



**ÍNDICE**

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1</b>	<b>Contextualização.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2</b>	<b>Objetivos .....</b>	<b>2</b>
<b>1.3</b>	<b>Organização do relatório .....</b>	<b>2</b>
<b>2</b>	<b>REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....</b>	<b>7</b>
<b>2.1</b>	<b>Ligações adesivas .....</b>	<b>7</b>
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas .....	8
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas .....	11
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas .....	15
2.1.4	Configurações possíveis de junta .....	17
2.1.5	Adesivos estruturais .....	20
<b>2.2</b>	<b>Previsão de resistência de juntas adesivas .....</b>	<b>24</b>
2.2.1	Mecânica dos meios contínuos .....	24
2.2.1.1	Modelos analíticos .....	24
2.2.1.2	Modelos de Elementos Finitos.....	27
2.2.1.3	Critérios de rotura.....	28
2.2.2	Mecânica da fratura .....	29
2.2.3	Modelos de dano coesivo.....	30
2.2.4	Mecânica do dano .....	30
2.2.5	Método de Elementos Finitos Extendido .....	31
2.2.5.1	Formulação .....	31
2.2.5.2	Critérios de início e propagação do dano .....	33
2.2.5.3	Aplicação a juntas adesivas.....	34

---

<b>3</b>	<b>DESENVOLVIMENTO.....</b>	<b>57</b>
<b>3.1</b>	<b>Trabalho experimental .....</b>	<b>57</b>
3.1.1	Materiais utilizados .....	57
3.1.1.1	Substratos .....	57
3.1.1.2	Adesivos.....	59
3.1.1.2.1	Araldite® AV138.....	59
3.1.1.2.2	SikaForce® 7752.....	61
3.1.2	Geometria das juntas .....	62
3.1.3	Processo de fabrico .....	64
3.1.4	Ensaio das juntas .....	68
3.1.5	Resultados obtidos .....	69
3.1.5.1	Curvas P- $\delta$ .....	69
3.1.5.2	Modos de rotura .....	71
3.1.5.3	Resistência das juntas .....	72
3.1.5.4	Análise dos resultados obtidos .....	74
<b>3.2</b>	<b>Trabalho numérico .....</b>	<b>74</b>
3.2.1	Condições da análise numérica .....	74
3.2.2	Modelo de dano utilizado .....	78
3.2.2.1	Determinação das propriedades de dano .....	79
3.2.2.1.1	Araldite® AV138 .....	79
3.2.2.1.2	SikaForce® 7752 .....	80
3.2.3	Análise de tensões na junta.....	81
3.2.3.1	Tensões de arrancamento .....	81
3.2.3.2	Tensões de corte.....	83
3.2.4	Previsão da resistência.....	84
3.2.4.1	Estudo do efeito do critério de iniciação .....	85
3.2.4.2	Estudo do efeito da lei de propagação .....	93
3.2.4.3	Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo.....	95
3.2.5	Análise dos resultados obtidos.....	96

---

4	CONCLUSÕES.....	101
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO .....	107



## INTRODUÇÃO



## 1 INTRODUÇÃO

### 1.1 Contextualização

As ligações adesivas têm vindo a crescer exponencialmente na indústria devido às diversas vantagens que apresentam em relação aos métodos de ligação mais tradicionais, tais como redução de peso, facilidade de fabricação, possibilidade de unir diferentes materiais e distribuição de tensões mais uniforme. Por outro lado, apresentam desvantagens como baixa resistência ao arrancamento e necessidade de cura e preparação de superfície. A indústria que mais tem contribuído para a utilização e desenvolvimento dos adesivos é a indústria aeronáutica. Os bons resultados que se têm obtido na aplicação desta técnica nesta indústria permitiram o crescimento das ligações adesivas, pois estas começaram a ser utilizadas por outras indústrias como automóvel, naval, componentes de desportos, entre outras.

Relativamente à sua natureza, os adesivos comerciais variam desde rígidos e frágeis, como é o caso do Araldite® AV138, a poliuretanos altamente dúcteis e flexíveis, como por exemplo o SikaForce® 7752. A resistência e a ductilidade dos adesivos são dois dos principais fatores que influenciam a resistência de juntas adesivas. A resistência mecânica do adesivo é responsável pela transferência de carga ao longo da junta e a ductilidade absorve as tensões localizadas nas extremidades das juntas. Para além dos adesivos existem outros parâmetros que influenciam a resistência de juntas adesivas tais como o tipo de junta, parâmetros geométricos (por exemplo, a variação do valor do comprimento de sobreposição ( $L_0$ )) e os materiais utilizados nos aderentes.

Os materiais compósitos reforçados com fibra de carbono também são cada vez mais utilizados em diversos tipos de aplicações. Normalmente, são utilizados em estruturas que requerem elevada resistência e rigidez específicas, permitindo assim um peso reduzido, mas mantendo a resistência e rigidez que são essenciais para suportar as cargas aplicadas. A indústria aeroespacial foi a primeira a utilizar materiais compósitos, que atualmente também são utilizados em aplicações navais, automóveis e militares. Os materiais compósitos são muitas vezes combinados com outro tipo de materiais como plásticos e metais pois esta combinação permite obter vantagens de projeto, redução de esforços e peso.

De uma forma geral, as juntas adesivas apresentam limitações quando solicitadas a esforços de arrancamento e por isso têm sido estudadas ao longo do tempo por autores como Kaelble [1] e Lin et al. [2]. Por isso, a existência de métodos numéricos devidamente validados capazes de prever a resistência de estas juntas com elevada precisão pode originar poupança de recursos e de tempo quando se pretende analisar a resistência de juntas adesivas, considerando diferentes condições materiais e geométricas.

## 1.2 Objetivos

A dissertação apresentada consistiu na simulação numérica pelo MEFX de juntas híbridas em L entre aderentes de uma liga de alumínio de alta resistência e compósito de carbono-epóxico, ligadas por dois adesivos, o Araldite® AV138 e o SikaForce® 7752. A simulação numérica foi realizada com recurso ao *software* ABAQUS®, onde foram analisados modelos com diferentes configurações de junta, nomeadamente quatro espessuras do aderente de alumínio (1, 2, 3 e 4 mm) e os dois tipos de adesivos referidos.

Este trabalho tem como objetivos estudar o comportamento dos dois tipos de adesivos utilizados, analisar a variação de resistência de acordo com diferentes configurações de junta e averiguar a fiabilidade do MEFX como técnica de previsão de resistência de juntas adesivas. O estudo numérico inclui o estudo das distribuições de tensões de arrancamento e de corte e a análise do critério de iniciação de dano e a lei de propagação mais adequados para prever a resistências de juntas.

A validação dos resultados numéricos obtidos nesta dissertação é realizada comparando estes com os valores experimentais e numéricos por modelos de dano coesivo (MDC) obtidos no trabalho de Domingues [3]. Com isto, deverá ser possível selecionar o adesivo ideal para solicitações de arrancamento e também apurar se o MEFX é uma técnica ajustada para a previsão de resistência de juntas adesivas em L sob as diversas condições impostas.

## 1.3 Organização do relatório

Esta dissertação foi dividida em 4 capítulos distintos. No primeiro capítulo foi apresentada a contextualização do tema seguida dos objetivos propostos para o trabalho e da apresentação da organização do relatório.

O segundo capítulo consiste na revisão bibliográfica, que aborda as vantagens e desvantagens das ligações adesivas, tipos de configurações de juntas adesivas, tipos de rotura, tipos de esforços presentes nas juntas e os diversos tipos de adesivos estruturais que são utilizados neste tipo de ligações. São ainda referenciados os principais métodos analíticos e numéricos de previsão de resistência de juntas adesivas.

O capítulo 3.1 corresponde à apresentação e descrição do trabalho experimental realizado num trabalho anterior [3]. Neste capítulo é apresentada a configuração e dimensões das juntas adesivas consideradas, bem como os materiais utilizados e respetivas propriedades e o processo de fabricação das juntas. São também apresentados os modos de rotura, resultados de resistência e curvas  $P-\delta$  obtidas.

No capítulo 3.2, relativo ao estudo numérico por MEFX, 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, e a previsão da resistência das juntas, onde são apresentadas as curvas  $P-\delta$ , realizados estudos do efeito

do critério de iniciação e da lei de propagação e feita uma comparação com resultados obtidos anteriormente por MDC. Posteriormente, é realizada uma análise dos resultados obtidos.

No quarto capítulo são apresentadas as conclusões finais, bem como propostas de trabalhos futuros.



## REVISÃO BIBLIOGRÁFICA



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

Embora não seja tão utilizada como a ligação aparafusada e por soldadura, a ligação adesiva é uma técnica antiga de ligação de materiais que remonta a um passado longínquo. Existem vários episódios onde é relatada a utilização de colas. Um destes episódios remonta ao tempo dos Egípcios (quinze séculos antes de Jesus Cristo), onde estes criavam colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores para serem usadas em aplicações de madeira e pedra [4]. Em 1963, foram encontradas ferramentas da era Neandertal com resíduos de uma substância adesiva datando de 80000 anos e obtida a partir de resina de bétula nas montanhas *Harz* em *Koenigsau* na Alemanha [5].

Tabela 1 – Desenvolvimento histórico de adesivos estruturais [6, 7].

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	Cianoacrilatos
	Anaeróbicos
	Poliimida
1960	Polibenzimidazole
	Poliquinoxaline
1970	Acrílicos (segunda geração)

Em 1754 na Inglaterra, foi atribuída a primeira patente a um adesivo, que se tratava de uma cola elaborada a partir de peixe [8]. As seguintes patentes foram atribuídas a colas baseadas em borracha natural, caseína, leite e goma. As exigências tecnológicas da primeira e segunda guerra mundial, promoveram a utilização de ligações adesivas [4]. Por exemplo, na segunda guerra mundial, foi usada resina de ureia-formaldeído para colar a estrutura de madeira do famoso caça britânico *Mosquito*. No entanto, este tipo de adesivos era muito frágil e de forma a ultrapassar este problema, de Bruyne e seus colegas, também nos anos 40, modificaram a química dos adesivos adicionando

polímeros com boa tenacidade, através da combinação de polivinilo formal com resol fenólico. Esta invenção representou um desenvolvimento muito importante na tecnologia dos adesivos já que permitiu a ligação de diferentes materiais com sucesso [9]. Atualmente, o processo de ligação por adesivos é usado em aplicações de elevada responsabilidade, nomeadamente, na indústria automóvel, aeroespacial, aeronáutica, construção civil e naval. A Tabela 1 apresenta a linha cronológica do desenvolvimento de adesivos entre 1910 e 1970.

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Representada na Figura 1, a junta adesiva é o conjunto formado pelo adesivo, substratos ou aderentes, os primários (se aplicados) e as interfases. O substrato é o material a ser ligado. Após a ligação, o substrato é designado por aderente. A região entre o adesivo e o aderente é designada por interfase. Esta é uma fina região na zona de contacto adesivo-aderente. A interfase apresenta características químicas e físicas diferentes da parte maciça do adesivo ou do aderente e a sua natureza é um fator crítico na determinação das propriedades e qualidade de uma ligação adesiva. A interface, contida na interfase, é o plano de contacto entre as superfícies dos dois materiais. Esta também é designada por camada limite (*boundary layer*) e nela podem estar contidas várias interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o aderente. O último componente de uma junta adesiva, o primário, é a substância que se utiliza por aplicação direta na superfície dos substratos com o objetivo de melhorar a adesão ou proteger as respetivas superfícies até à aplicação do adesivo [9].

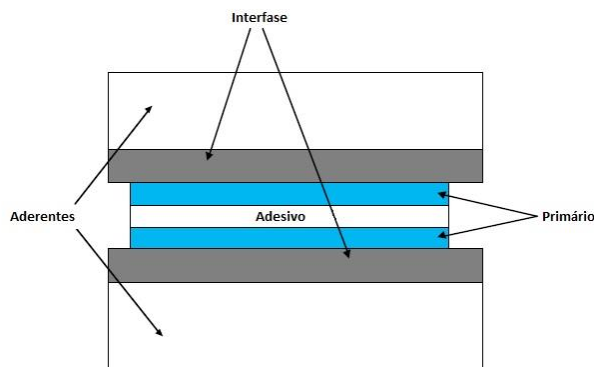


Figura 1 - Junta adesiva e seus constituintes [7].

As ligações adesivas, hoje em dia, não são tão utilizadas como os métodos tradicionais de ligação tais como ligações soldadas, rebitadas e aparafusadas, embora apresentem diversas vantagens em relações a estes, como por exemplo [7, 9]:

1. Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área ligada, permitindo assim uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando também uma redução de peso, menor custo e melhor resistência à fadiga;
2. Amortecimento de vibrações, permitindo que as tensões sejam parcialmente absorvidas, melhorando a resistência à fadiga dos componentes ligados;
3. Ligação de materiais diferentes, em composição química e propriedades físicas;
4. Ligação eficiente de chapas de espessura fina;
5. Permite ter estruturas com contornos regulares;
6. Permite ligar componentes com todas as formas e espessuras;
7. Maior flexibilidade no projeto de juntas, já que permite o uso de novos conceitos e materiais;
8. Minimização ou prevenção de corrosão galvânica entre metais dissimilares;
9. Contacto contínuo entre as superfícies ligadas;
10. Normalmente mais económico do que as ligações aparafusadas;
11. As temperaturas de processamento não afetam as propriedades dos materiais;
12. Permite ter estruturas com relações peso-resistência atrativas.

Por outro lado, as principais desvantagens inerentes a este tipo de ligação são [7, 9]:

1. É necessário um projeto de ligação que reduza ao máximo esforços de arrancamento, clivagem e impacto;
2. Quando um dos dois materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a esforços de arrancamento e quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a esforços de clivagem;
3. É fundamental utilizar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões. Se as tensões não estiverem perpendiculares ao adesivo, podem-se originar esforços de arrancamento ou de clivagem;
4. Resistência limitada a condições de temperatura e humidade extremas devido à natureza polimérica do adesivo;
5. 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;
6. Para se poder obter resultados em ótimas condições, é necessária uma preparação cuidada das superfícies através de abrasão mecânica, desgorduramento com solvente, ataques químicos, entre outros;
7. Dificuldades no controlo de qualidade e segurança;
8. Os adesivos são frequentemente curados a elevadas temperaturas e por isso é necessária a utilização de forno ou prensa;
9. Inexistência de um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura.

O processo de ligação de juntas adesivas passa pelas seguintes etapas:

1. Seleção do adesivo;
2. Projeto da junta;
3. Preparação da superfície;
4. Fabrico da junta;
5. Controlo do processo.

A seleção do adesivo deve obedecer a um conjunto de critérios definidos pela aplicação em vista. Geralmente, os parâmetros mais importantes são a resistência mecânica, a temperatura de serviço, o meio ambiente e o método de aplicação [9].

O projeto de ligação é um dos parâmetros mais importantes para que o adesivo escolhido seja o mais eficiente possível [4]. Conhecendo as propriedades do adesivo, é possível projetar a junta garantindo que o nível de tensão no adesivo não excede a sua resistência. É necessário recorrer a métodos de dimensionamento que têm em conta a resistência estática, à fadiga e à fluência. Tendo conhecimento do tipo de adesivo e substrato a ligar, é conveniente preparar a superfície de modo a garantir uma boa adesão inicial e, posteriormente, em serviço [7]. O fabrico da junta envolve a aplicação do adesivo sobre os substratos a ligar e a cura do adesivo sob determinadas condições de temperatura e pressão. Uma vez que o adesivo é aplicado no estado líquido, é necessário garantir que os substratos a ligar estão fixos [9]. Por fim, para garantir que a junta tem uma resistência satisfatória a curto e longo prazo, as juntas devem ser sujeitas a um processo de controlo através de ensaios destrutivos e não destrutivos [10].

Um adesivo pode ser definido como uma substância capaz de ligar pelo menos duas superfícies de uma forma resistente e permanente. Os adesivos têm de ser capazes de resistir ao seu ambiente operacional e as suas propriedades são fortemente dependentes da forma como são aplicados e processados [7].

Este material de ligação deve apresentar as seguintes características [7]:

- Comportar-se como líquido, durante a formação da ligação, de forma a ocorrer uma boa molhagem;
- Formar uma ligação entre superfícies através da adesão;
- Endurecer de forma a suportar cargas constantes ou variáveis durante o seu tempo de utilização (*pot-life*);
- Transmitir e distribuir cargas aos componentes de uma estrutura;
- Preencher fendas e cavidades.

Os adesivos são utilizados pela sua capacidade de ligação e resistência. São, normalmente, materiais com elevada resistência à tração e ao corte. Adesivo estrutural é um termo utilizado para definir um adesivo cuja resistência é crucial para o sucesso de uma estrutura, sendo responsável pela sua resistência e rigidez. Este termo é reservado para adesivos com elevada resistência ao corte (aproximadamente 6,9 MPa) e boa resistência a diversos ambientes. Exemplos de adesivos estruturais são os epóxidos,

fenólicos e poliuretanos. Os adesivos não-estruturais são adesivos com menor resistência e durabilidade. São normalmente utilizados para ligações temporárias ou para ligar substratos menos resistentes. Exemplos deste tipo de adesivos são elastômeros e cola de madeira [7].

Os adesivos funcionam pela propriedade de adesão. A adesão é a atração entre duas substâncias resultante das forças intermoleculares que se estabelecem entre elas. Este conceito é diferente de coesão, que só envolve as forças intermoleculares dentro de uma substância. As forças intermoleculares que atuam na adesão e na coesão são principalmente forças de van der Waals [11].

### 2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Atualmente, os adesivos são utilizados em diversas indústrias: construção, automóvel, têxtil, aeroespacial, naval, embalagem, móveis, entre outras. Por exemplo, nos Estados Unidos apenas, existem mais de 1500 empresas dedicadas à produção de vários tipos de produtos adesivos. Estima-se que o mercado dos adesivos neste país ronda os 10 mil milhões de euros [7].

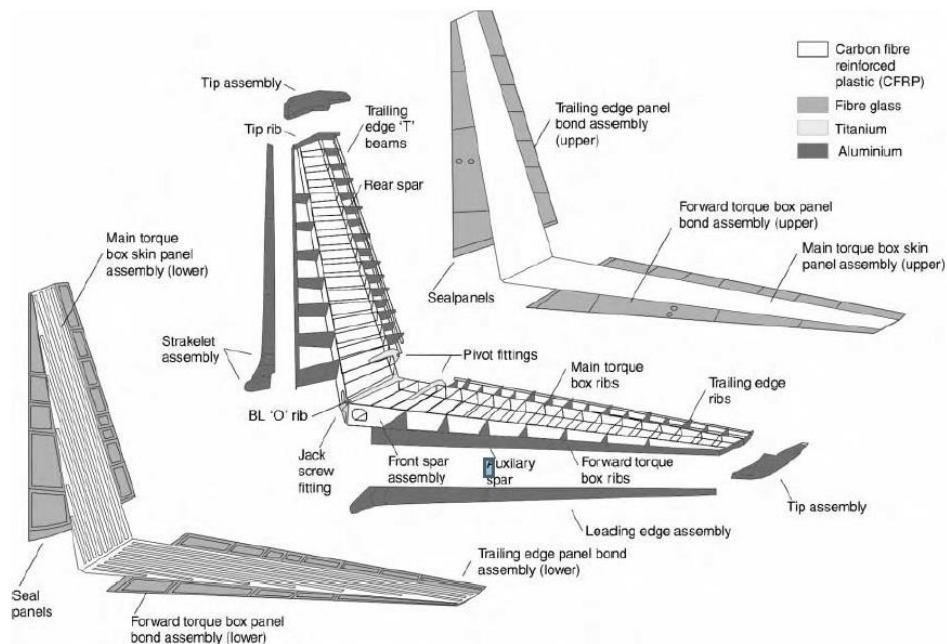


Figura 2 - Estrutura principal da cauda do Boeing 777 composta por diferentes materiais [12].

Na indústria aeroespacial existem duas classes de juntas adesivas: estrutural e de selagem. As juntas adesivas estruturais, com adesivo epóxico, fenólico ou acrílico, que têm como objetivo transferir as cargas entre os membros das estruturas e as juntas adesivas de selagem, que protegem as interfaces da corrosão. O uso deste tipo de ligação é muito importante nesta indústria pois permite redução de peso, amortecimento de vibrações e um bom isolamento, e porque oferece uma boa resistência à fadiga [12]. A Figura 2 apresenta a estrutura da cauda do Boeing 777, que

é composta por diferentes materiais ligados com adesivos. Um outro exemplo da aplicação de ligações adesivas na indústria aeroespacial está representado na Figura 3 e trata-se de um satélite de telecomunicações, cujos componentes são ligados por adesivos.

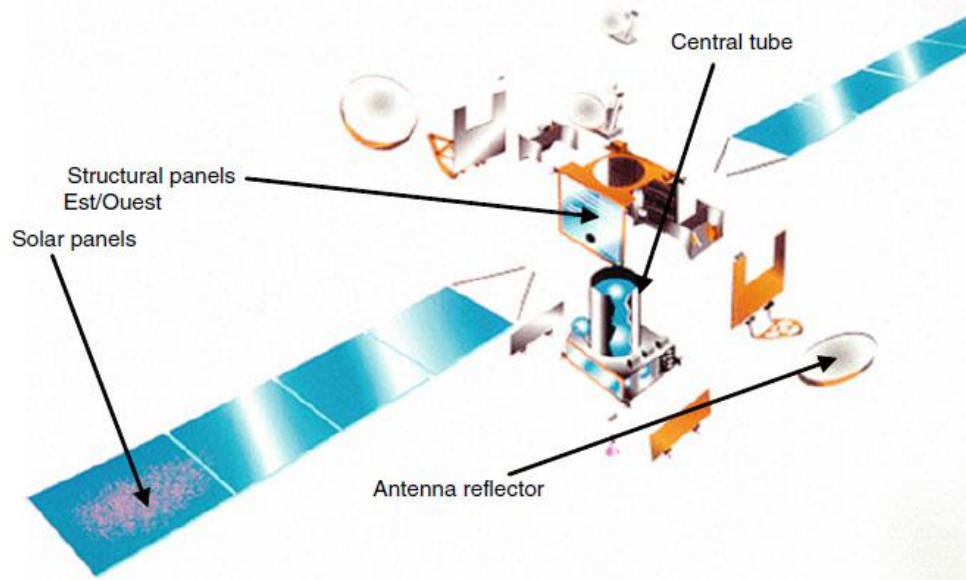


Figura 3 - Satélite de telecomunicações ligado com adesivos [11].

A indústria aeronáutica influenciou outras indústrias no que toca à utilização de adesivos visto que permitiu desenvolver substancialmente as ligações adesivas. Um bom exemplo desta influência é a indústria automóvel. O uso de adesivos nesta indústria teve início há décadas com a colagem de para-brisas. Para além desta aplicação, os adesivos começaram a ser usados também nas janelas traseiras e no preenchimento de falhas nas soldaduras de forma a prevenir a corrosão. À medida que o uso dos adesivos nos componentes do automóvel aumentava, verificou-se um aumento de resistência. Com isto, a estrutura do veículo passou a ser ligada com adesivos, o que permitiu a otimização da rigidez à torção. A tendência para um *design* leve através do uso de ligas de alumínio e magnésio, estruturas *sandwich* e FRP (*fibre-reinforced plastics*) acelerou o uso de adesivos na indústria automóvel. Por exemplo, o classe S Coupé da Mercedes-Benz tem mais de 100 m de ligações estruturais em aplicações *body in white*. Visto que a sua estrutura é composta por diferentes materiais, a ligação adesiva teve que ser usada (Figura 4) [13]. A Figura 5 apresenta aplicações de adesivos em *body in white*.

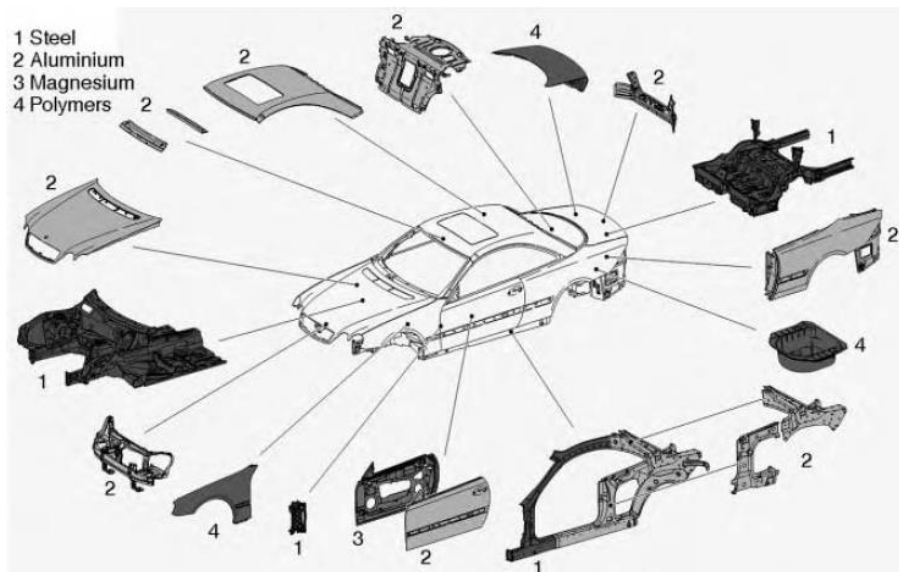


Figura 4 - Componentes do Mercedes-Benz classe S Coupé de diferentes materiais [13].

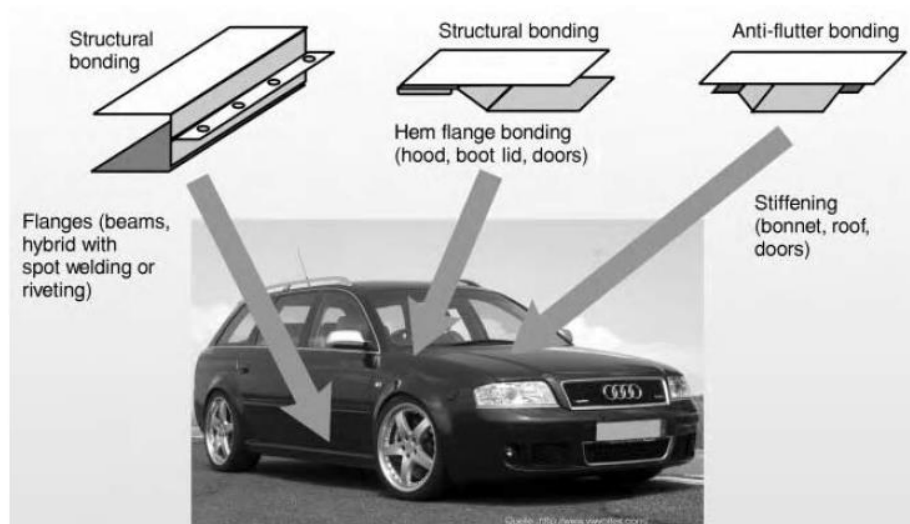


Figura 5 - Diferentes aplicações de adesivos em *body in white* [13].

Na indústria naval, existe uma grande necessidade de utilizar ligações adesivas. Este tipo de ligações pode ser utilizado para ligar partes críticas de uma estrutura ou então para atuar como um vedante com uma função estrutural secundária. O tamanho dos aderentes e as condições ambientais rigorosas são aspetos típicos em aplicações navais. O tempo de serviço dos navios e barcos é, normalmente, de várias décadas e as falhas que possam ocorrer na ligação da estrutura podem ser críticas para a segurança das pessoas. Por isso, juntas com uma robustez confiável e um comportamento à prova de falhas é essencial para aplicações navais. Os materiais típicos usados nos cascos e convés (Figura 6) de navios e barcos são FRP com uma matriz termoendurecível (poliéster ou

epóxico), ligas de alumínio especializadas para aplicações marinhas (por exemplo AlMg3) e aços, como por exemplo AISI 304 e AISI 316 [14].



Figura 6 - Fabrico de um convés [11].

Neste tipo de aplicações as estruturas *sandwich* são bastante utilizadas nas quais o núcleo é composto por PVC, normalmente. As estruturas *honeycomb* também são utilizadas mas apenas em aplicações de elevada qualidade e conseqüentemente com um elevado custo associado. Os adesivos são normalmente utilizados para fazer o seguinte tipo de ligações: FRP-FRP, FRP-PVC, FRP-metal e alumínio-alumínio. A Figura 7 é representativa de alguns tipos de ligações que são realizadas em barcos e a Figura 8 apresenta possíveis aplicações de subestruturas FRP [14].

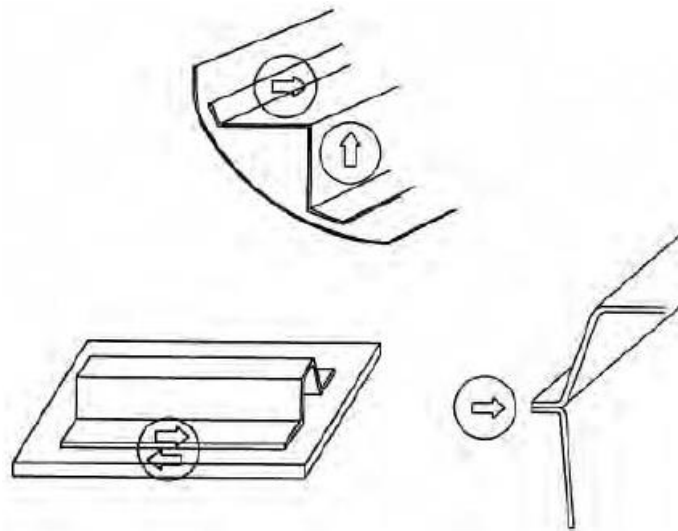


Figura 7 - Juntas típicas em barcos com as respetivas solicitações [14].

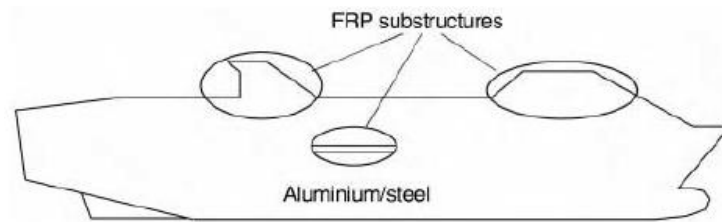


Figura 8 - Possíveis aplicações de estruturas FRP [14].

A Figura 9 mostra a utilização de um adesivo na ligação de contraplacado num barco.



Figura 9 - Contraplacado ligado com adesivo num barco [11].

As ligações adesivas também são utilizadas na indústria de calçado. A sua utilização teve início nos anos 50 e é uma alternativa à costura e à utilização de pregos ou grampos. A tecnologia dos adesivos nesta área apresenta vantagens tais como juntas mais homogêneas e flexíveis, melhor distribuição de cargas ao longo da junta e uma melhoria em termos estéticos. No entanto, a ligação por adesivos apresenta limitações, como por exemplo, a necessidade de um controlo rigoroso em todas as etapas da conceção das juntas de forma a serem evitados problemas de adesão. Neste tipo de ligações é necessário haver uma boa durabilidade e resistência mecânica [15].

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

Os tipos de esforços a que as ligações adesivas podem estar sujeitas são (Figura 10) [9]:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem;
- Arrancamento.

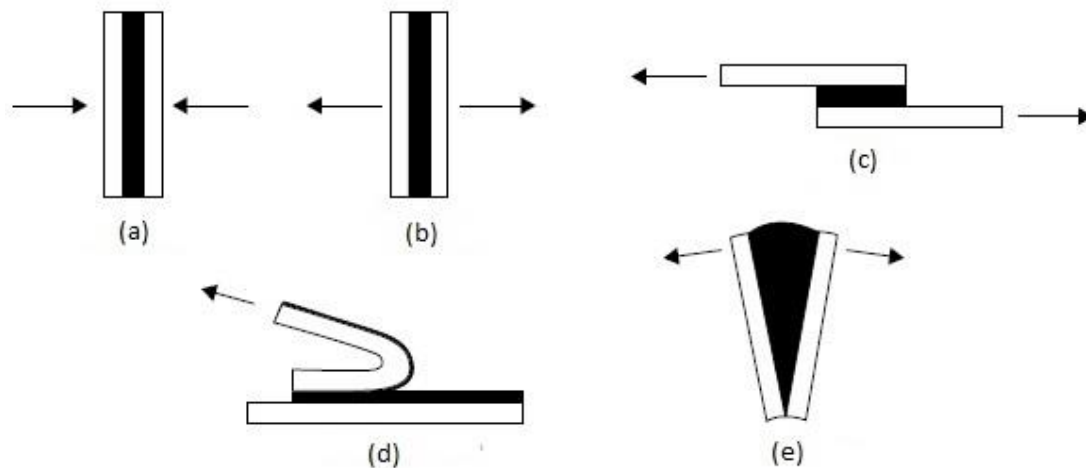


Figura 10 - Modos de carregamento em juntas adesivas: (a) compressão, (b) tração, (c) corte, (d) arrancamento e (e) clivagem [16].

As tensões de tração e compressão desenvolvem-se quando as solicitações atuam perpendicularmente ao plano da junta, como ilustra a Figura 10, e são distribuídas uniformemente ao longo da área colada. Para solicitações de tração e compressão devem-se projetar as juntas com guias de forma a garantir um carregamento axial contínuo, e os substratos também devem ser suficientemente rígidos para garantir a uniformidade da distribuição de tensões [9].

As tensões de corte são originadas quando as solicitações aplicadas às juntas que atuam no plano do adesivo tendem a separar os substratos. As juntas são geralmente mais resistentes quando solicitadas a esforços de corte já que a maior parte da área da zona onde é aplicado o adesivo contribui para a resistência da junta e é relativamente fácil manter os substratos alinhados.

As tensões de clivagem e arrancamento são muito prejudiciais para a resistência das juntas adesivas. A clivagem é definida como a tensão que ocorre quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de modo a separar os substratos. As tensões de arrancamento assemelham-se às tensões de clivagem embora se apliquem onde um ou ambos os substratos são flexíveis [9]. Conseqüentemente, o ângulo de separação pode ser muito maior para o arrancamento do que para a clivagem. As juntas sob este tipo de esforços apresentam uma menor resistência do que aquelas sujeitas a esforços de corte já que a tensão está concentrada numa área reduzida [3].

Os adesivos mais dúcteis e flexíveis são geralmente mais resistentes que os adesivos frágeis e rígidos pois permitem uma distribuição de tensões menos concentrada [11].

A finalidade de uma ligação adesiva é a transmissão de carga entre os substratos ligados, mantendo-se estável sob solicitações estáticas e ou dinâmicas e condições ambientais adversas.

De um modo geral, existem quatro modos de rotura em juntas coladas (Figura 11) [9]:

- Rotura coesiva;
- Rotura adesiva;
- Rotura do substrato;
- Rotura mista.

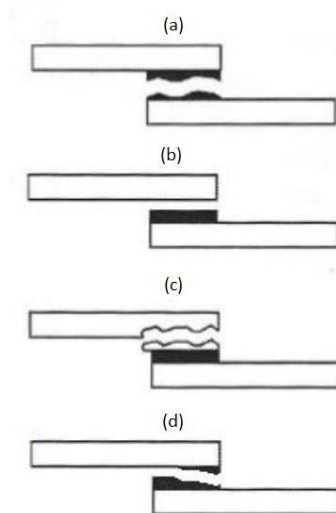


Figura 11 - Modos de rotura em juntas adesivas: (a) rotura coesiva, (b) rotura adesiva, (c) rotura do substrato e (d) rotura mista [9].

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, fazendo com que as superfícies de ambos os substratos fiquem cobertas de adesivo. A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos substratos, dando origem a uma superfície isenta de adesivo num dos substratos. Geralmente a rotura adesiva ocorre devido a uma má preparação das superfícies dos substratos. A rotura do substrato ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais resistente do que o próprio substrato, originando a rotura total ou parcial do substrato, mas mantendo-se a camada de adesivo intacta. A rotura mista consiste numa combinação de rotura coesiva e adesiva. Este tipo de rotura pode ocorrer quando é realizada uma má preparação da superfície em apenas uma parte da zona de ligação.

#### 2.1.4 Configurações possíveis de junta

A ligação adesiva ideal é aquela em que, sob todas as condições de carregamento, o adesivo é sujeito a esforços na direção mais resistente. A Figura 12 mostra os tipos de juntas adesivas mais comuns.

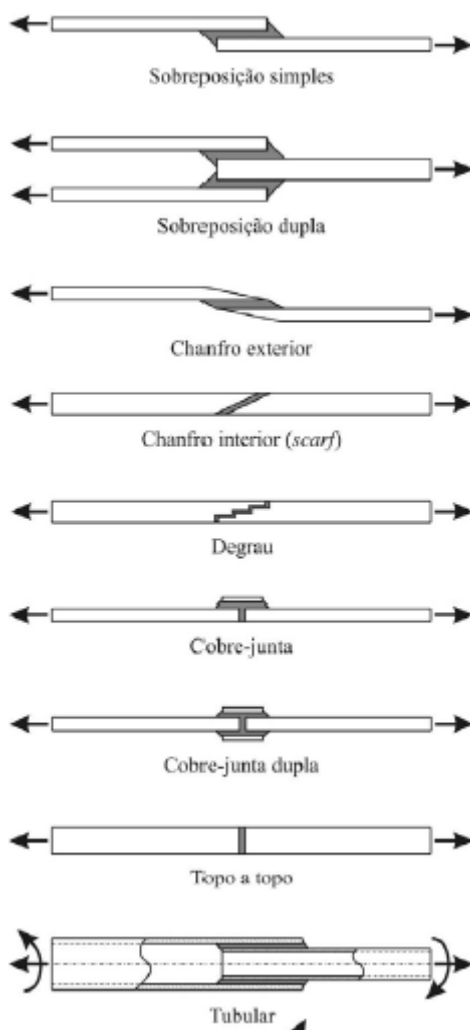


Figura 12 - Tipos de juntas adesivas mais comuns [9].

A junta de sobreposição simples (JSS) é a mais utilizada em aplicações industriais devido à sua facilidade de fabricação. No entanto, as forças aplicadas não são colineares, provocando efeitos de flexão que originam o aparecimento de tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição, reduzindo assim a resistência da junta. De forma a minimizar este problema, recorre-se a juntas de sobreposição dupla (JSD) visto que o efeito de flexão gerado é muito inferior devido à configuração. Isto faz com que a resistência de uma JSD seja superior ao dobro da resistência de uma JSS [17]. Todavia, este tipo de juntas são de fabricação mais morosa e complexa [4, 16]. Outra forma de garantir o alinhamento das cargas aplicadas numa JSS é utilizar uma junta de ressalto. Este tipo de junta pode ser realizado quinando os aderentes. A junta de ressalto também providencia a colinearidade dos aderentes, o que facilita a aplicação da carga [16].

As juntas de chanfro exterior também são mais eficientes do que as JSS. Os chanfros permitem a maior flexão das extremidades ligadas dos aderentes durante o carregamento, reduzindo tensões de arrancamento nessas zonas [16]. Neste tipo de

juntas, é importante ter em conta que a resistência depende do ângulo do chanfro, sendo que quanto maior este for, maior será a resistência [3].

A utilização de juntas com chanfro interior (*scarf*) ou em degraus permite a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, elevando assim a sua resistência. No entanto, este processo de fabrico é encarecido devido à dificuldade de maquinar os degraus ou rampas. No caso das juntas em degrau, utilizando substratos em material compósito, é mais económico executar os degraus durante o empilhamento antes da cura. Este procedimento elimina as operações de maquinagem, evitando assim a danificação das fibras [4].

As ligações tipo cobre-junta mantêm as cargas aplicadas alinhadas e são geralmente usadas quando as juntas de sobreposição são impraticáveis devido à espessura dos aderentes. Tal como no caso das JSS, a ligação do tipo cobre-junta está sujeita a tensões de arrancamento provocadas por efeitos de flexão. Quando se utilizam ligações do tipo cobre-junta dupla, verificam-se tensões de flexão inferiores àquelas que são registadas quando são utilizadas ligações do tipo cobre-junta simples [16].

As juntas topo a topo planas são as mais simples de fabricar. No entanto, não são capazes de suportar esforços de flexão porque, sob este esforço, o adesivo estaria sujeito a clivagem. Apesar da sua simplicidade de fabricação, este tipo de juntas não apresenta uma eficácia elevada devido às acentuadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação [4].

Quando se pretende projetar uma junta adesiva, deve-se ter em consideração os seguintes aspetos [9]:

1. Minimizar a concentração de tensões no adesivo;
2. Sempre que possível, projetar a junta de forma a que as cargas aplicadas provoquem tensões de corte;
3. Minimizar as tensões de arrancamento e clivagem;
4. Distribuir as tensões de forma mais uniforme possível por toda a área de ligação;
5. A resistência do adesivo é diretamente proporcional à largura de ligação. Aumentando a largura a resistência de ligação também aumenta. Aumentando o comprimento da área colada, nem sempre se aumenta a resistência da ligação;
6. Geralmente, os adesivos rígidos apresentam melhor comportamento ao corte e os adesivos flexíveis apresentam melhor comportamento ao arrancamento;
7. Embora, geralmente, um adesivo mais resistente produza uma junta mais resistente, um adesivo com elevada capacidade de deformação e baixa resistência coesiva pode produzir uma junta mais resistente para aplicações em que as tensões não são distribuídas uniformemente;
8. A rigidez dos aderentes e adesivo influencia a resistência de uma junta. Geralmente, quanto mais rígido o aderente for em relação ao adesivo, mais uniforme é a distribuição dos esforços na junta e maior é a resistência da ligação;

9. Quanto maior for o produto entre o módulo de Young e a espessura do aderente, menor é a deformação durante o carregamento e mais resistente é a junta.

### 2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos podem ser classificados segundo vários métodos. A mais ampla classificação é distinguir entre um adesivo fabricado a partir de produtos sintéticos ou naturais. No entanto, esta classificação é demasiado ampla para muitas das aplicações e por isso, na indústria, são utilizados outros métodos para classificar os adesivos de acordo com os seus objetivos. Essas classificações são feitas utilizando critérios como o tipo de estrutura molecular, composição química, função, custo, entre outros. Atualmente, a classificação mais utilizada é a classificação segundo a função do adesivo. Nesta classificação, os adesivos dividem-se em adesivos estruturais ou adesivos não estruturais.

Tal como foi mencionado anteriormente, os adesivos estruturais são materiais de elevada resistência e desempenho. Geralmente, os adesivos estruturais possuem uma resistência ao corte superior a, aproximadamente, 6,9 MPa e uma boa resistência aos meios ambientes comuns. A sua principal função é ligar estruturas, assim como resistir a carga elevadas sem uma deformação elevada.

A Figura 13 representa a divisão dos principais tipos de adesivos segundo a sua função.

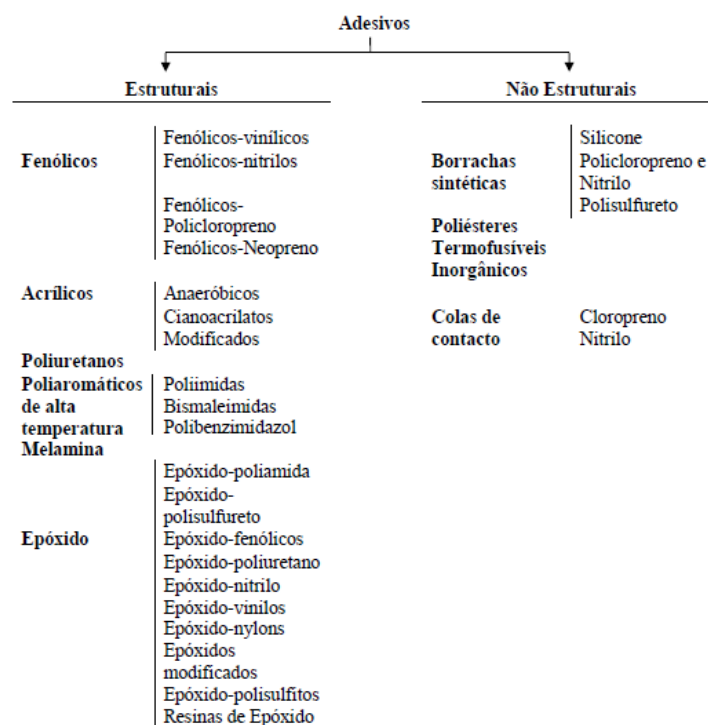


Figura 13 - Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho [9].

No grupo dos adesivos estruturais, o destaque vai para os epóxidos visto que são provavelmente a família de adesivos mais versátil já que, de uma forma geral, aderem bem a diferentes tipos de substratos e podem ser modificados de forma a atingir uma grande variedade de propriedades. Os epóxidos apresentam uma excelente resistência à tração e ao corte mas uma fraca resistência ao arrancamento. Apresentam também uma excelente resistência ao óleo, humidade e solventes. Estes adesivos estruturais têm uma baixa contração na cura e uma elevada resistência à fluência, não apresentam evaporação de voláteis na cura e são úteis em aplicações de preenchimento de espaços. Os epóxidos comerciais são compostos por resina epóxido e um endurecedor. O endurecedor pode ser incorporado na resina dando origem a um adesivo de um só componente ou então pode ser fornecido de forma separada para depois ser misturado com a resina antes da aplicação. Os adesivos de uma parte curam a temperaturas elevadas enquanto os adesivos de duas partes podem curar à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas. Os epóxidos que curam a temperaturas elevadas têm maior resistência ao corte mas, no entanto, têm menos tenacidade e resistência ao arrancamento que os epóxidos que curam à temperatura ambiente. Estes epóxidos podem endurecer em alguns segundos mas geralmente é necessário um período de 18 a 72 horas [9].

Nos adesivos epóxidos podem ser incorporados aditivos que incluem diluentes reativos para ajustar a viscosidade, cargas minerais para diminuir o custo ou modificar o coeficiente de expansão térmica e cargas fibrosas para melhorar a tixotropia e resistência coesiva. Os epóxidos são frequentemente modificados com outras resinas para melhorar algumas propriedades necessárias para uma determinada aplicação. Exemplos dessas resinas são poliamida, *nylon*, polisulfito, fenólicos, nitrilos, entre outras [9].

Os adesivos epóxido-fenólico são feitos através da mistura de resinas de epóxido com resinas fenólicas com o objetivo de melhorar a resistência a temperaturas elevadas, até 175°C de uma forma contínua e até 260°C com intervalos. Estes adesivos apresentam uma resistência ao meio ambiente, óleo, solventes e humidade bastante boa. Os epóxido-fenólicos apresentam baixa resistência ao impacto e ao arrancamento e uma resistência a choques térmicos limitada, devido à natureza rígida dos seus constituintes. Este tipo de adesivos foi desenvolvido com o objetivo de ligar juntas metálicas em aplicações de elevadas temperaturas, mais especificamente na indústria aeronáutica nos anos 50. São também utilizados para ligar compósitos em ninho de abelha [9].

Os epóxido-nylons foram desenvolvidos com o objetivo de possuir uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento. Estas características foram alcançadas com sucesso misturando resinas de epóxidos com copolímeros da família das poliamidas, que são conhecidos por terem elevada tenacidade e resistência à tração. Os epóxidos-nylons em filme são bastante eficazes quando utilizados em aplicações onde o meio ambiente não é severo. Por outro lado, apresentam baixa resistência à humidade e à fluência. Devido à sua excelente capacidade de formar filetes (*filleting*) e à sua elevada resistência

ao arrancamento, os adesivos de epóxido-nylon são muitas vezes usados para colar folhas de alumínio e estruturas em ninho de abelha na indústria aeronáutica [7].

As resinas de polisulfito combinam-se com o epóxido dando origem a um adesivo com excelente flexibilidade e elevada resistência química. No entanto, apresentam baixa resistência ao corte e a temperaturas elevadas. Os adesivos epóxido-polisulfitos possuem uma resistência a óleo e gordura, solventes, ao ambiente exterior e ao envelhecimento superior à maior parte dos elastómeros termoplásticos [9].

Os adesivos epóxido-vinilos apresentam elevada resistência ao impacto e ao arrancamento. Geralmente, estes adesivos apresentam-se sob a forma de filmes ou soluções de solvente. São bastante utilizados como adesivos laminados para metais em folha [9].

As resinas fenólicas são o produto da condensação de fenol e formaldeído. Os adesivos fenólicos e os fenol-formaldeído são usados principalmente para colar madeira. No entanto, devido à sua resistência ao calor e boa estabilidade dimensional, também são utilizados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição. Uma junta ligada com um adesivo fenólico apresenta uma boa durabilidade e boa resistência a fungos e água a elevadas temperaturas. As resinas fenólicas também têm sido utilizadas quando se pretende colar metal a madeira. No entanto, este tipo de ligação é frágil e tende a estilhaçar sob impacto ou vibração. Por conseguinte, os adesivos fenólicos são muitas vezes modificados pela adição de elastómeros com o objetivo de melhorar a tenacidade e a resistência ao arrancamento [9].

Tal como os epóxidos, os poliuretanos podem apresentar-se 100% sólidos ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes. Estes adesivos podem curar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas. Ao contrário dos epóxidos, os adesivos poliuretanos são flexíveis, e também apresentam alta resistência ao corte e ao arrancamento. Estes adesivos formam ligações com boa tenacidade. Possuem melhor resistência a temperaturas criogénicas do que todos os outros tipos de adesivos. Os poliuretanos apresentam boa resistência química mas, por outro lado, apresentam uma fraca resistência a elevadas temperaturas, já que a máxima temperatura de trabalho ronda os 150°C. Quando expostos a altos níveis de humidade, os poliuretanos degradam-se consideravelmente. Devido à sua boa molhabilidade e boa flexibilidade, os poliuretanos aderem a diversos tipos de substratos. Sendo muito flexíveis, são bastantes vezes utilizados para ligar filmes, folhas metálicas e elastómeros. Os uretanos estruturais são muito utilizados na indústria automóvel devido às suas boas propriedades de adesão com painéis moldados por *Sheet Molding Compound* (SMC) e polímeros de uretano moldados por *Reaction Injection Molding* (RIM) [7].

Os adesivos acrílicos dividem-se em acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados. Os acrílicos anaeróbicos baseiam-se no monómero acrilato e designam-se desta forma pois curam quando o ar é excluído da resina. Estes materiais podem ligar todos os metais comuns, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis. Podem ser

aplicados a três tipos de superfície: ativa, inativa e inibidora. As superfícies ativas, que os metais limpos e os plásticos termoendurecíveis possuem, produzem as curas mais rápidas. As superfícies metálicas aceleram a polimerização na ausência do ar. Devem ser usados primários ou calor para possibilitar a cura em superfícies inativas e em superfícies inibidoras, tais como revestimentos brilhantes, cromatos, óxidos, e algumas anodizações. Os anaeróbicos são conhecidos por serem de uma parte, fáceis de usar, com uma cura rápida à temperatura ambiente e muito caros, em termos de custo por kg. A velocidade da cura destes adesivos depende da natureza química das partes a ligar, pode variar entre alguns minutos ou horas sem primário à temperatura ambiente. Os adesivos anaeróbicos são utilizados em aplicações estruturais e de maquinaria. As classes adequadas para maquinaria apresentam elevada resistência em conjuntos roscados e outras juntas. As classes estruturais permitem elevada resistência ao corte em juntas planas. As principais aplicações dos anaeróbicos são atuar como travão líquido de porca para parafusos e vedação de flanges. A temperatura máxima de trabalho é, geralmente, 150°C. Os anaeróbicos apresentam boa resistência à humidade e solventes e a resistência à pulverização do sal é excelente [9]. Os cianoacrilatos, normalmente designados por “supercola”, tornaram-se bastante conhecidos após serem introduzidos no mercado nos anos 70, por permitirem colagens muito rápidas. Caracterizam-se pela cura rápida e excelente resistência ao corte e tração. No entanto, apresentam desvantagens como baixa resistência ao calor, à humidade e a esforços de arrancamento, e são bastante frágeis. Normalmente são utilizados na indústria ótica e eletrónica e, de uma forma geral, em aplicações onde o meio ambiente não é muito severo e quando é necessária uma ligação rápida. Os acrílicos modificados apresentam uma boa resistência ao arrancamento, ao impacto e ao corte entre -100°C e 120°C. Quando sujeitos a elevadas temperaturas, a sua resistência diminui. As juntas ligadas com acrílicos modificados possuem uma elevada resistência à humidade. Estes adesivos têm uma vasta gama de aplicações, devido à boa resistência que apresentam sob diversos tipos de esforços e à excelente resistência à humidade [7].

As resinas bismaleimidadas, que pertencem ao grupo dos poliaromáticos de alta temperatura, são utilizadas no fabrico de painéis de circuitos eletrónicos e em aplicações que necessitam de resistência a temperaturas superiores àquelas que são permitidas pelos epóxidos. As bismaleimidadas são adequadas para exposições prolongadas até 200°C e para exposições curtas até 230°C. Estas resinas oferecem melhorias significativas no que toca ao processamento. No que diz respeito à cura, assemelham-se mais com os epóxidos do que com as poliimidadas, que são outro tipo de poliaromáticos de elevada temperatura. No processo de cura das resinas bismaleimidadas, não são gerados voláteis já que estas resinas curam por reações de adição. Normalmente, a cura dura várias horas a 175°C sob pressão. De seguida, é realizada uma pós-cura à temperatura máxima de serviço, no entanto, sem pressão. [18].

## 2.2 Previsão de resistência de juntas adesivas

Atualmente, são cada vez mais utilizadas técnicas de previsão de resistência de juntas adesivas, quer sob a forma de modelos analíticos quer de modelos numéricos. No passado, não havia tanto conhecimento e tanta facilidade em utilizar este tipo de técnicas fazendo com que não houvesse o rigor no dimensionamento destas juntas que existe atualmente.

A previsão de resistência de juntas adesivas pode ser feita através das seguintes técnicas:

- Mecânica dos meios contínuos;
- Mecânica da fratura;
- MDC;
- Mecânica do dano;
- MEFX.

### 2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

De acordo com a mecânica dos meios contínuos, os valores máximos de tensão, deformação ou energia de deformação, previstos analiticamente ou por uma análise de elementos finitos (EF), são geralmente usados em critérios de rotura e são comparados com os valores limites dos materiais. Inicialmente, foram propostas as tensões principais máximas para materiais muito frágeis, cujo modo de rotura ocorre a 90° da direção da tensão principal máxima. Este critério ignora as restantes tensões principais embora estas não sejam nulas. Adams et al. [19] usaram o critério da tensão principal máxima para prever com sucesso a resistência de juntas adesivas, utilizando adesivos frágeis. O tamanho da malha é um aspeto importante para a análise de tensões e deformações uma vez que existe uma singularidade de tensões nas extremidades das juntas. No entanto, o critério da tensão principal máxima é, de qualquer forma, um critério fidedigno quando se estudam juntas com adesivos frágeis [20].

#### 2.2.1.1 Modelos analíticos

De forma a prever a resistência de uma junta adesiva são necessários a distribuição de tensões e um critério de rotura adequado. A distribuição de tensões pode ser obtida através da análise de numérica ou de modelos analíticos. Para geometrias complexas e modelos de materiais elaborados, a análise de EF é preferível. No entanto, se for necessária uma resposta fácil e rápida é mais apropriado utilizar modelos analíticos [21]. Nesta secção são referenciados e descritos alguns modelos analíticos utilizados na previsão de resistência de juntas adesivas.

A análise mais simples e limitada para se obter as tensões numa JSS baseia-se na suposição de que os substratos são rígidos e que o adesivo se deforma apenas em corte. A tensão de corte,  $\tau$ , considerando a junta da Figura 14, é dada por:

$$\tau = \frac{P}{bl}, \quad (1)$$

onde  $P$  é a força aplicada,  $b$  é a largura da junta adesiva e  $l$  é o comprimento de sobreposição [9].

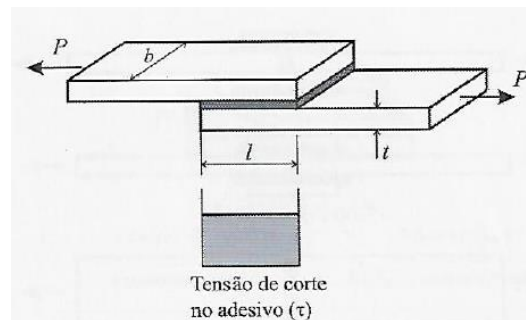


Figura 14 - Tensão de corte numa JSS [9].

Volkersen introduziu na análise o que se designa por deformação diferencial. Se os substratos forem elásticos e houver continuidade na interface adesivo/substrato, os paralelogramos da junta sem carga, representada na Figura 15 a), ficam distorcidos, tal como se pode verificar na Figura 15 b). A solução analítica desenvolvida por Volkersen para a tensão de corte encontra-se representada na Figura 15 c). A tensão de corte no adesivo é máxima nas extremidades da junta e mínima a meio [9].

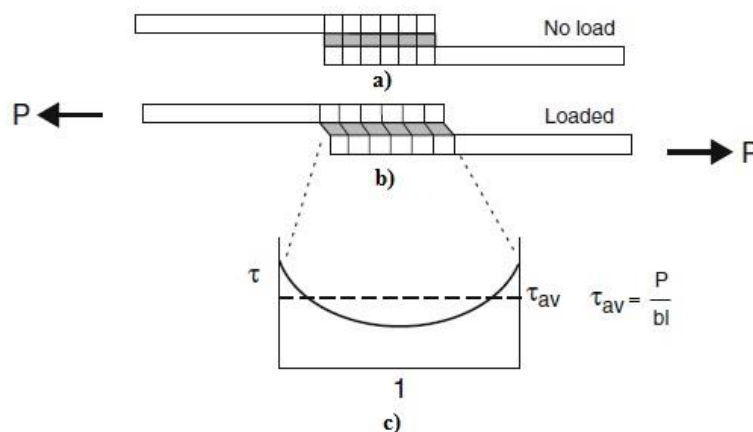


Figura 15 - Análise de Volkersen [11].

Na análise de Volkersen foi desprezada a rotação da junta. Na Figura 14 as duas forças não são colineares, o que provoca um momento fletor da junta. Os substratos sofrem flexão e a direção da linha de carregamento altera-se devido à rotação da junta. Os

deslocamentos deixam de ser proporcionais à força aplicada e por isso existe uma não linearidade geométrica. Na análise de Goland e Reissner [22] foi incluída a rotação da junta. Nesta análise é utilizado um fator de momento fletor,  $k$ , que relaciona o momento no substrato no fim da sobreposição,  $M$ , com a força aplicada de acordo com a seguinte equação [9]:

$$M = k \bar{P} \frac{t}{2}, \quad (2)$$

onde  $t$  é a espessura do substrato e  $\bar{P}$  é a força aplicada por unidade de largura. O fator de momento fletor de Goland e Reissner está representado na Figura 16. Quando a força aplicada é muito reduzida, não há rotação da junta e a linha de carregamento aproxima-se do limite dos substratos, neste caso  $k \approx 1$ . À medida que a força aumenta, a zona de sobreposição roda ficando a linha de ação da carga mais próxima do centro dos substratos, reduzindo o momento fletor. A análise de Goland e Reissner apresentou resultados semelhantes aos de Volkersen em termos de tensão de corte. No entanto, esta análise permite a obtenção das tensões transversais de arrancamento no adesivo, como também está representado na Figura 17 [9].

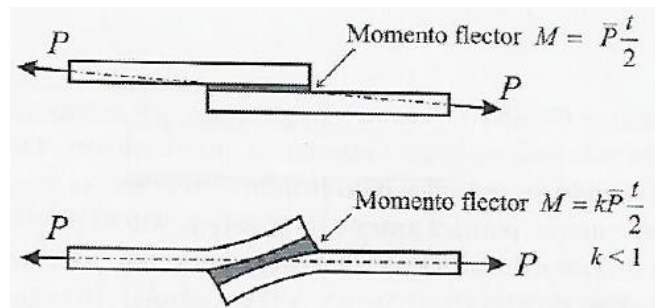


Figura 16 - Representação geométrica do fator de momento fletor de Goland e Reissner [9].

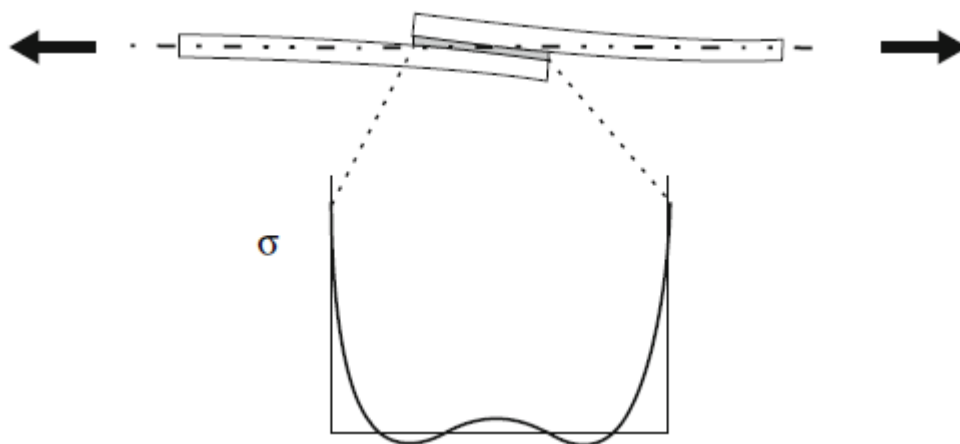


Figura 17 - Tensões de arrancamento numa JSS [11].

As análises de Volkersen e Goland e Reissner consideram um comportamento elástico. No entanto, o adesivo e o substrato podem deformar-se plasticamente. Adesivos estruturais como, por exemplo, os epóxicos modificados com borracha, podem ter uma deformação plástica importante antes de sofrer rotura. Hart-Smith desenvolveu as teorias de Volkersen e de Goland e Reissner para JSS [23] e JSD [24], tendo em conta o comportamento plástico do adesivo. O adesivo é modelado como sendo elasto-plástico, com uma área circunscrita à curva tensão-deformação igual à área da curva real e com a mesma tensão e deformação de rotura. Esta representação está evidenciada na Figura 18 [9].

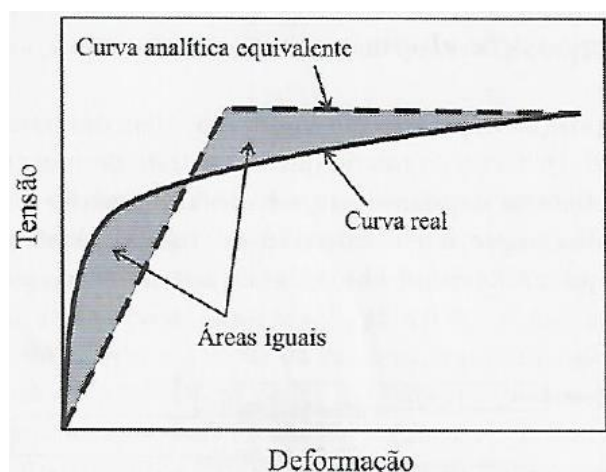


Figura 18 - Representação elasto-plástica do adesivo [9].

A influência do adesivo na resistência da junta é determinada pela energia de deformação. Hart-Smith mostrou que a plasticidade do adesivo aumenta a resistência de uma junta relativamente a uma análise elástica. Um adesivo dúctil cede plasticamente e pode suportar uma força adicional até atingir a sua deformação de rotura. Para além de ser mais resistente, este é mais seguro já que se deforma plasticamente antes de sofrer rotura, redistribuindo e reduzindo os picos de deformação de corte [9].

### 2.2.1.2 Modelos de Elementos Finitos

A análise da resistência de juntas adesivas, utilizando a mecânica dos meios contínuos, também pode ser feita através de modelos de EF. Tal como foi referido no capítulo 2.2.1, os primeiros trabalhos no âmbito deste método utilizaram as tensões principais máximas cuja rotura ocorre perpendicularmente em relação à direção da tensão principal máxima e ignora todas as outras tensões principais embora não sejam nulas. Também referenciado acima, Adams et al. [19] usaram este critério com sucesso para prever a resistência de juntas adesivas. No entanto, devido à singularidade de tensões nos cantos reentrantes das juntas, as tensões dependem do tamanho da malha utilizado e da proximidade a que são tomadas as tensões dos pontos singulares. Foram utilizados

os valores de tensões calculados em pontos de Gauss próximos da singularidade de tensões ou extrapolados os valores de pontos de Gauss para as zonas de singularidade. Tendo em conta este aspeto, é necessário cuidado ao utilizar este critério devido à tensão principal máxima. Embora este critério seja sensível ao tamanho da malha utilizado, a perceção física do processo de rotura é clara, já que a tensão principal máxima é a mais responsável pela rotura de juntas ligadas com adesivos frágeis. No entanto, deve-se ter em conta que os cantos dos substratos não apresentam normalmente arestas vivas. De uma forma geral, os cantos dos substratos são ligeiramente arredondados devido ao processo de fabrico das juntas. Este aspeto pode afetar a distribuição de tensões na região do canto do substrato e por consequência a resistência da junta, já que as tensões são sensíveis à variação da geometria. Uma consequência do arredondamento dos substratos é não existir singularidade de tensões, que facilita a aplicação de um critério de tensão ou deformação limites [20].

### 2.2.1.3 Critérios de rotura

Quando se pretende analisar a resistência de juntas adesivas podem-se considerar diversos critérios de rotura. Alguns destes critérios são descritos neste capítulo. von Mises propôs um critério de rotura que afirma que um material cede sob tensões multi-axiais quando a sua energia de distorção atinge um valor crítico, que é

$$\sigma_{VM}^2 = (\sigma_1 - \sigma_2)^2 + (\sigma_2 - \sigma_3)^2 + (\sigma_3 - \sigma_1)^2 = \text{constante}, \quad (3)$$

onde  $\sigma_i$  ( $i = 1, 2, 3$ ) são as tensões principais. Este critério foi utilizado por Ikegami et al. [25] para estudar a resistência de juntas em chanfro com compósitos de fibra de vidro e metais [20].

As tensões de corte têm sido muito utilizadas para prever a resistência de junta de sobreposição especialmente em análises de forma fechada, considerando uma tensão máxima de corte igual à resistência ao corte do adesivo maciço. Greenwood [26] usou a tensão máxima de corte calculada na análise de Goland e Reissner [22] para prever a resistência da junta adesiva. A *Engineering Sciences Data Unit* (ESDU)[27] implementou este critério num *software* comercial. Mais recentemente, John et al. [28] usou tensões de corte juntamente com uma distância crítica para prever a resistência de JSD. Lee e Lee [29] também usaram a tensão de corte máxima em juntas tubulares. da Silva et al. [21, 30] demonstraram que, para JSS, este critério só é válido para adesivos frágeis e comprimentos de sobreposição reduzidos. Esta abordagem despreza as tensões normais existentes nas juntas de sobreposição e, por isso, sobrestima a resistência das juntas [20].

Quando são utilizados adesivos dúcteis, os critérios baseados em tensões não são apropriados porque as juntas ainda conseguem suportar cargas elevadas após a cedência do adesivo. Para adesivos dúcteis, Adams e Harris [31] usaram a deformação

principal máxima como critério de rotura para prever a resistência das juntas. Este critério também permite prever o modo de rotura, mas é igualmente sensível ao tamanho da malha [20].

### 2.2.2 Mecânica da fratura

A mecânica dos meios contínuos assume que a estrutura e os seus materiais são contínuos. Esta suposição e a aplicação deste método origina problemas quando se verifica, por exemplo, a existência de pontos de descontinuidade de tensão resultando em singularidades de tensões e deformações. As fendas são o defeito mais comum em estruturas e, com o objetivo de resolver estes problemas, desenvolveu-se a mecânica da fratura. Neste método, é aceite que as tensões calculadas utilizando a mecânica dos meios contínuos são singulares na extremidade da fenda. Foi verificado teoricamente que existe uma singularidade sempre que o ângulo da fenda é inferior a 180° [32] e isto também se aplica para a singularidade de tensões entre dois materiais ligados. A descontinuidade de tensões continua a existir embora não existam superfícies livres.

Em materiais dúcteis, uma grande quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda e esta propaga-se de uma forma estável antes de ocorrer a rotura final. Assim, a mecânica de fratura linear elástica (MFLE) não resulta para tais materiais [20]. A mecânica da fratura tem sido aplicada com sucesso em diversas áreas da engenharia. O conceito de projeto com tolerância ao dano, adotado na indústria aeronáutica, foi baseado no conceito da MFLE e tem-se expandido para outros campos da engenharia [20].

Relativamente aos critérios de rotura clássicos, os critérios de rotura em modo misto podem ser desenvolvidos de uma forma análoga aos critérios de rotura clássicos, embora deva ser introduzido o conceito de superfície de fratura. De forma a ajustar os resultados obtidos experimentalmente, têm sido propostas várias funções matemáticas como o caso do critério 3D descrito pela seguinte expressão [33]:

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^\alpha + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^\beta + \left(\frac{G_{III}}{G_{IIIC}}\right)^\gamma = 1. \quad (4)$$

Nesta expressão  $G_I$ ,  $G_{II}$  e  $G_{III}$  são os valores de taxa de libertação de energia sob tração pura, deslizamento e rasgamento.  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  e  $G_{IIIC}$  são os respetivos valores críticos. O critério linear ( $\alpha = \beta = \gamma = 1$ ) e o critério quadrático ( $\alpha = \beta = \gamma = 2$ ) são os mais utilizados. A escolha do critério deve ser feita de modo a ajustar os resultados experimentais. Quando os materiais deformam plasticamente, os conceitos da MFLE têm de ser estendidos para a mecânica da fratura elasto-plástica. O integral  $J$  é apropriado para resolver estes problemas [20]. Este integral é definido pela seguinte expressão [33]:

$$J = \int_C w dx_2 - T_j \frac{\partial u_j}{\partial x_1} dS. \quad (5)$$

Nesta expressão,  $C$  indica a curva à volta da extremidade da fenda,  $S$  o comprimento de arco,  $w$  a densidade de energia,  $T_j$  o vetor tração,  $u_j$  o vetor deslocamento e  $x_1 - x_2$  o sistema de coordenadas. Este integral foi aplicado com sucesso por vários pesquisadores para prever a resistência de juntas adesivas. No entanto, para adesivos dúcteis, os valores críticos de taxa de libertação de energia não são independentes da geometria da junta. Chen et al. [34] comprovaram que o integral  $J$  para uma junta adesiva depende comprimento da interface.

### 2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de zona coesiva, proposto pelos estudos de Barenblatt [35, 36] e Dugdale [37], descreve o dano sob cargas estáticas na zona de processo coesiva à frente da extremidade da fenda. Desde então, os MDC começaram a ser testados e refinados para simular a iniciação e propagação de fenda em problemas de rotura na zona coesiva e interfacial ou até em delaminação de compósitos. Os MDC são baseados em elementos coesivos que ligam elementos sólidos de estruturas em 2D e 3D. Estes modelos podem ser facilmente incorporados em *softwares* com base no método de EF e assim avaliar o comportamento à fratura de diversos materiais, incluindo ligações adesivas. Os MDC são baseados no pressuposto de que uma ou mais regiões de fratura podem ser introduzidas artificialmente em estruturas em que o crescimento do dano é permitido pela introdução de uma possível descontinuidade no campo de deslocamentos. Esta técnica consiste no estabelecimento de leis de tração-separação para modelar interfaces ou regiões finitas [20].

Os MDC têm sido bastante utilizados para simular o comportamento de estruturas até ocorrer rotura, uma vez que permitem incluir várias possibilidades de rotura nos modelos numéricos, dentro de diferentes regiões ou entre interfaces de materiais, como por exemplo as interfaces de ligações adesivas [20].

### 2.2.4 Mecânica do dano

A mecânica do dano permite a simulação passo-a-passo do dano e da fratura numa região de fenda pré-definida ou arbitrariamente dentro de uma região [38]. Esta área de investigação é inovadora e continua a ser desenvolvida de forma a serem criadas técnicas de modelação mais precisas e métodos de determinação de parâmetros fiáveis e também aumentar a robustez e eliminação de problemas de convergência [39]. As técnicas de mecânica do dano podem ter duas abordagens distintas: locais ou contínuas. Na abordagem local, o dano é confinado a uma superfície, permitindo a simulação de uma rotura interfacial entre materiais, por exemplo, entre a ligação adesiva e o aderente, a rotura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases

sólidas dos materiais. Pela abordagem contínua, o dano é modelado ao longo de uma região finita nos elementos sólidos finitos de estruturas de forma a simular uma rotura ou ao longo de uma ligação adesiva de forma a modelar uma rotura coesiva do adesivo. Associados à mecânica do dano, os MDC são o método de previsão de dano mais utilizado em aplicações de juntas adesivas [20].

Nas metodologias baseadas na mecânica do dano, um parâmetro de dano é estabelecido para modificar a resposta dos materiais pela depreciação da rigidez ou resistência, por exemplo para camadas finas de adesivo [40], de forma a representar a severidade do dano no material durante o carregamento. Esta variável pode ser utilizada numa lei de evolução de dano de forma a modelar a absorção do dano pré-fenda e a propagação da fenda. As variáveis de dano podem ser divididas em dois grupos: (1) variáveis que preveem a quantidade do dano pela redefinição das propriedades dos materiais e (2) variáveis ligadas à definição física de um tipo de dano específico, tais como porosidades ou a área relativa de micro-cavidades [41]. Em todos os casos, os diferentes mecanismos de dano que ocorrem simultaneamente num material podem ser considerados neste tipo de modelos, cada um deles por uma variável de dano independente. Na mecânica do dano, o crescimento do dano é definido como uma função do carregamento para modelação estática [42] ou para análises de fadiga [43, 44]. Em comparação com a fadiga dos MDC, as técnicas da mecânica do dano não permitem distinguir claramente as fases de iniciação e de propagação da fadiga, embora providenciem uma base para análises de previsão [40]. De qualquer forma, pode ser simulada a evolução do dano antes do crescimento da fenda.

## 2.2.5 Método de Elementos Finitos Estendido

### 2.2.5.1 Formulação

O MEFX é uma melhoria em relação ao método de EF na modelação do crescimento do dano em estruturas. Este método utiliza leis de dano que se baseiam na resistência em bruto de materiais para a iniciação do dano e deformações com o objetivo de prever a rotura (definida por  $G_{IC}$ ) em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  utilizados nos MDC. Em relação aos MDC, o MEFX tem a vantagem de não necessitar que a fenda siga um trajeto pré-definido. A fenda pode propagar-se livremente dentro do material sem que seja necessário que a malha corresponda à geometria das descontinuidade ou também que seja necessário refazer a malha em zonas próximas da fenda [45]. Este método é uma extensão do método de EF cujas características fundamentais foram apresentadas pela primeira vez por Belytschko e Black [46]. O MEFX baseia-se no conceito de partição de unidade e pode ser implementado no tradicional método de EF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos nodais na proximidade da fenda, de forma a permitir o seu crescimento e a separação entre as faces da fenda [47]. Devido ao crescimento do dano, a extremidade da fenda muda constantemente de posição e orientação dependendo das condições de carregamento e da geometria da

estrutura, simultaneamente à criação das funções de enriquecimento necessárias para os nós dos EF na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte dos elementos fraturados. O dano e rotura são simulados no MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós reais e nós fantasma de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões máximas principais (MAXPS) ou das deformações máximas principais (MAXPE), enquanto as leis de tração-separação que simulam a degradação do material até à rotura podem ser lineares ou exponenciais. No ABAQUS®, a iniciação de dano pode ser avaliada segundo vários critérios que são apresentadas posteriormente.

Como extensão do método de EF, o MEFX é baseado na integração de funções de enriquecimento na formulação de EF, o que permite a modelação do salto de deslocamentos entre as faces da fenda que ocorre durante a propagação da mesma [20]. A expressão fundamental do vetor deslocamentos  $\mathbf{u}$ , incluindo o enriquecimento dos deslocamentos, é dada por [33]:

$$\mathbf{u} = \sum_{i=1}^N N_i(x) \left[ \mathbf{u}_i + H(x)\mathbf{a}_i + \sum_{\alpha=1}^4 F_{\alpha}(x)b_i^{\alpha} \right]. \quad (6)$$

$N_i(x)$  e  $\mathbf{u}_i$  correspondem às funções de forma nodais e ao vetor de deslocamento nodais, respetivamente. O termo  $H(x)\mathbf{a}_i$  só está ativo para os nós nos quais 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,  $\mathbf{a}_i$ , com as funções de forma descontínuas associadas,  $H(x)$ , nas superfícies da fenda [20].

Na presença de propagação de dano, 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 é tornada 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. Estes dois subelementos, que têm campos de deslocamentos completamente independentes, substituem o elemento original. A partir deste ponto, cada par de nó real/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 o crescimento do dano (Figura 19) [20].

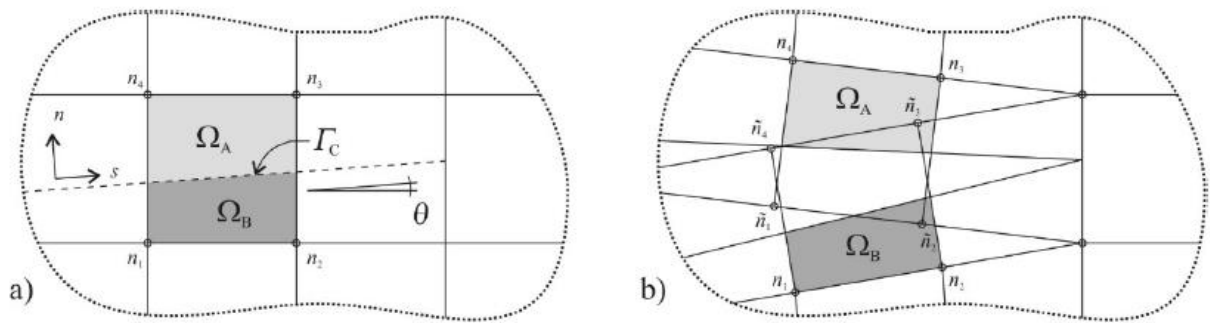


Figura 19 - Propagação do dano no MEFX utilizando o conceito de nós fantasma: antes (a) e após a partição (b) de um elemento fraturado em subelementos [48].

### 2.2.5.2 Critérios de início e propagação do dano

Tal como foi referido no capítulo 2.2.5.1., a iniciação do dano pode ser avaliada segundo diferentes critérios. Os critérios da tensão principal máxima (MAXPS) e deformação principal máxima (MAXPE) baseiam-se nas seguintes funções de dano, respetivamente [33]:

$$f = \left\{ \frac{\langle \sigma_{\max} \rangle}{\sigma_{\max}^0} \right\} \text{ e } f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_{\max} \rangle}{\varepsilon_{\max}^0} \right\}, \quad (7)$$

onde  $\sigma_{\max}$  é a tensão principal máxima num dado ponto de integração,  $\sigma_{\max}^0$  é a resistência de um material à tração,  $\varepsilon_{\max}$  é a deformação principal máxima num dado ponto de integração e o  $\varepsilon_{\max}^0$  é a deformação máxima de um material à tração. Os critérios de tensão nominal máxima (MAXS) e deformação nominal máxima (MAXE) baseiam-se nas seguintes funções, respetivamente [33]:

$$f = \max \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0}, \frac{t_n}{t_n^0} \right\} \text{ e } f = \max \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0}, \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}, \quad (8)$$

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,  $\varepsilon_n$  e  $\varepsilon_s$  são as componentes de deformação normal e de corte e  $\varepsilon_n^0$  e  $\varepsilon_s^0$  são os respetivos valores limite. Os critérios quadráticos de tensão (QUADS) e deformação (QUADE) são dados pelas seguintes funções, respetivamente [33]:

$$f = \left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 \text{ e } f = \left\{ \frac{\langle \varepsilon_n \rangle}{\varepsilon_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{\varepsilon_s}{\varepsilon_s^0} \right\}^2. \quad (9)$$

### 2.2.5.3 Aplicação a juntas adesivas

Premchand et al. [49] realizaram um estudo sobre a análise da fratura de ligações adesivas com fenda central. Neste trabalho foi utilizado o MEFX para analisar a propagação da fenda. Os substratos utilizados são de alumínio com as seguintes características:  $E = 69$  GPa,  $\nu = 0,4$  e espessura de 0,4625 mm. O adesivo utilizado é o FM300-2:  $E = 2,3$  GPa,  $\nu = 0,3$  e espessura de 0,075 mm. O modelo de EF foi realizado com recurso ao MatLab 7.0 e apresenta 1521 nós e 1600 elementos. A extremidade inferior é fixa enquanto é aplicada uma carga de 500 N na extremidade superior, como mostra a Figura 20.

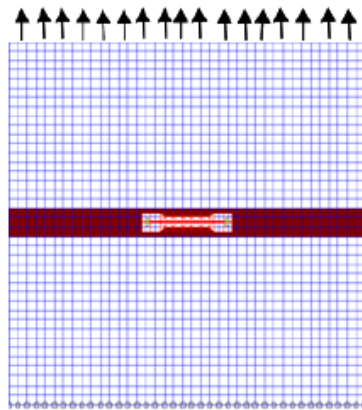
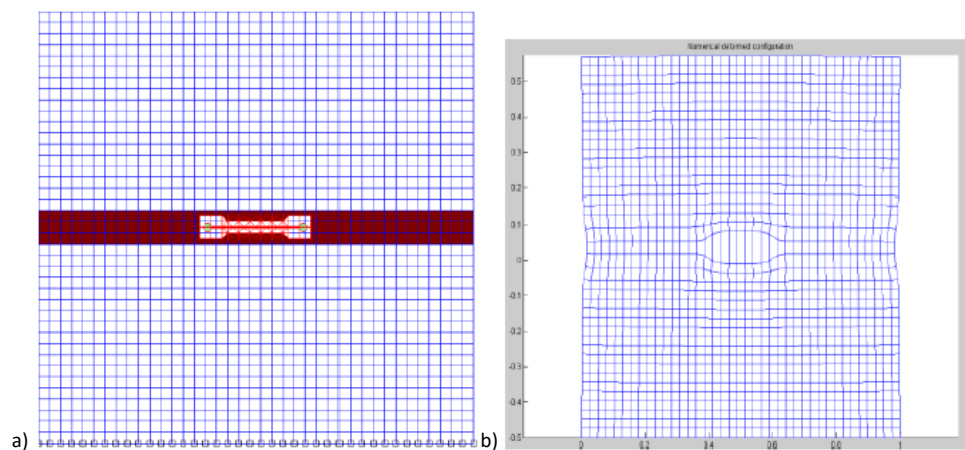


Figura 20 - Modelo de EF com condições fronteira [49].

O comprimento inicial da fenda obtido foi 0,11 mm e foi incrementado em três fases, em que o valor do incremento foi de 0,055 mm. A Figura 21 apresenta o comprimento inicial da fenda, o modelo deformado e a distribuição de tensões na fase 1.



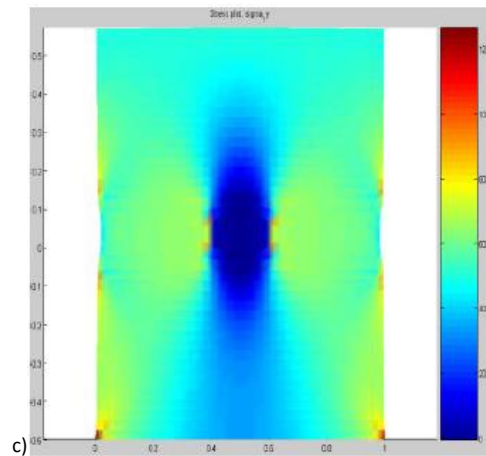


Figura 21 - Fase 1: a) comprimento inicial da fenda, b) modelo deformado e c) distribuição de tensões [49].

A tensão máxima obtida na extremidade da fenda na fase 1 foi  $1100 \text{ N/mm}^2$ . Na fase 2, foi adicionado o valor incremental e foi registada uma tensão máxima de  $1250 \text{ N/mm}^2$ . A Figura 22 apresenta o comprimento inicial da fenda, o modelo deformado e a distribuição de tensões para a fase 2.

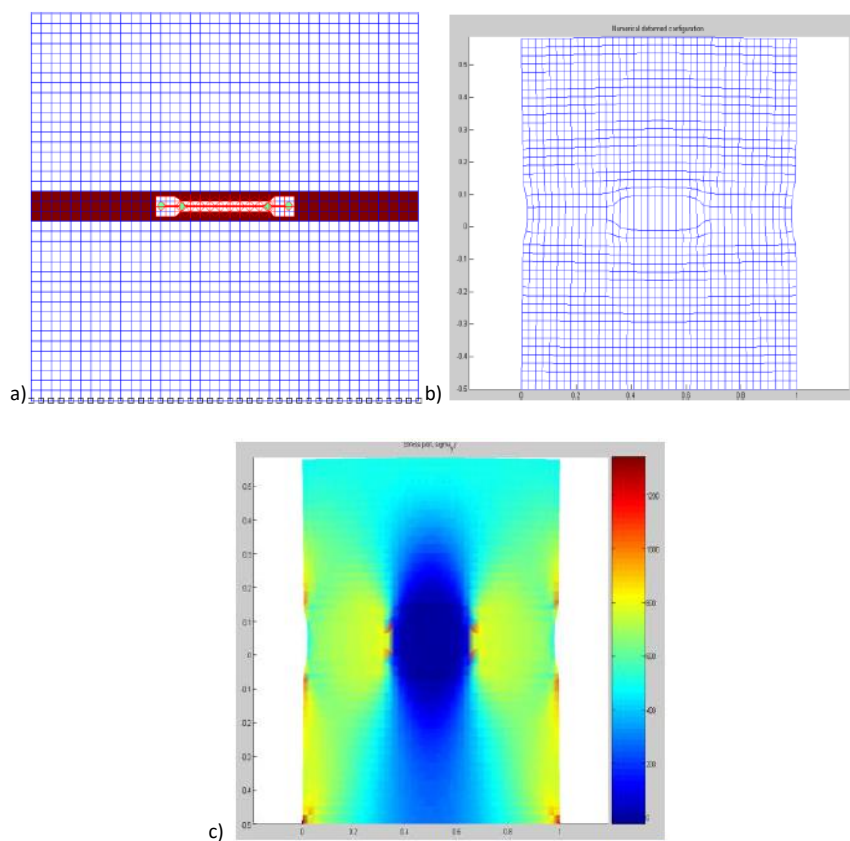


Figura 22 - Fase 2: a) comprimento inicial da fenda, b) modelo deformado e c) distribuição de tensões [49].

Para a fase 3, foi também adicionado à fenda o valor incremental. A tensão máxima obtida foi  $1400 \text{ N/mm}^2$ . A Figura 23 apresenta o comprimento inicial da fenda, o modelo deformado e a distribuição de tensões na fase 3.

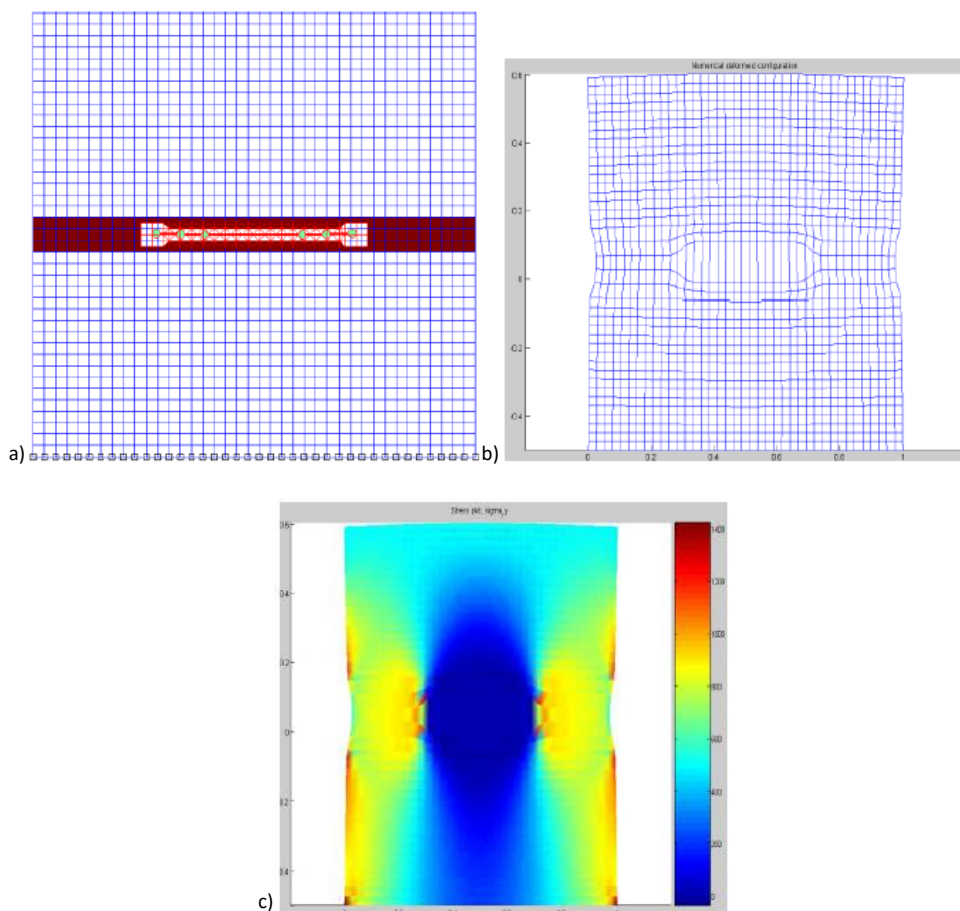


Figura 23 - Fase 3: a) comprimento inicial da fenda, b) modelo deformado e c) distribuição de tensões [49].

Pelos resultados obtidos, é possível afirmar que este modelo é adequado quando se pretende modelar uma junta com uma configuração simples sujeita a um esforço axial.

Campilho et al. [50] estudaram a viabilidade da aplicação do MEFX em ligações adesivas utilizando materiais compósitos. Este trabalho propõe e valida uma lei de dano para modelar a propagação do dano numa camada de adesivo epóxico utilizando uma abordagem por MEFX. A tenacidade à tração ( $G_{IC}$ ) e resistência à tração coesiva ( $\sigma_n^0$ ) foram determinados em ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e ensaios de tração, respetivamente. Estas propriedades permitiram modelar a lei de dano. As juntas adesivas utilizadas neste trabalho consistiam em dois substratos de carbono-epóxico ligados com Araldite® 2015. A Figura 24 apresenta a configuração e dimensões dos provetes para o ensaio DCB. As propriedades mecânicas do adesivo [51] utilizadas neste trabalho foram as seguintes:  $E = 1,85 \pm 0,21 \text{ GPa}$ ,  $\sigma_f = 21,63 \pm 1,61 \text{ MPa}$ ,  $\varepsilon_f = 4,77 \pm 0,15\%$ .

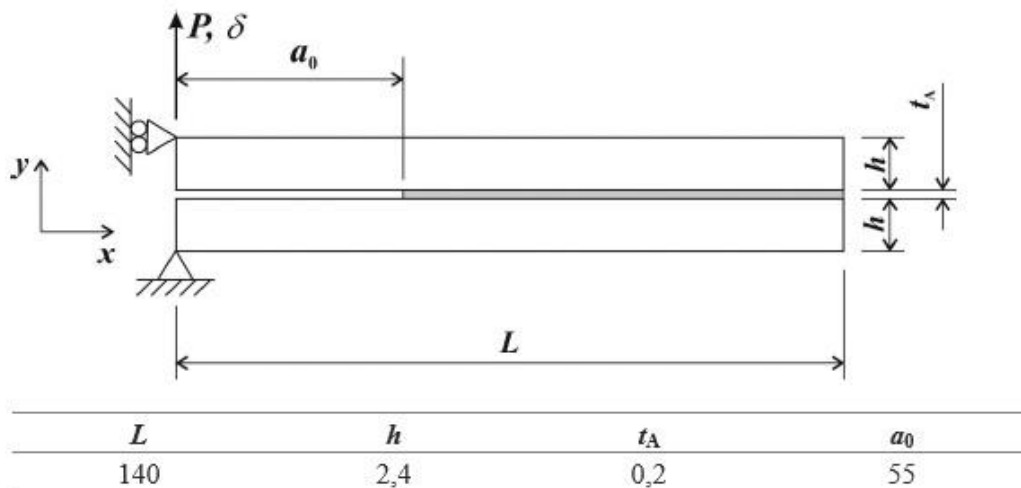


Figura 24 - Configuração e dimensões das juntas do ensaio DCB (em mm) [50].

Para a determinação de  $G_{IC}$  foram utilizados dois métodos da MFLE: *Compliance Calibration Method* (CCM) e *Corrected Beam Theory* (CBT). A Figura 25 apresenta a comparação das curvas  $G_{IC}$ - $a$  dos dois métodos.

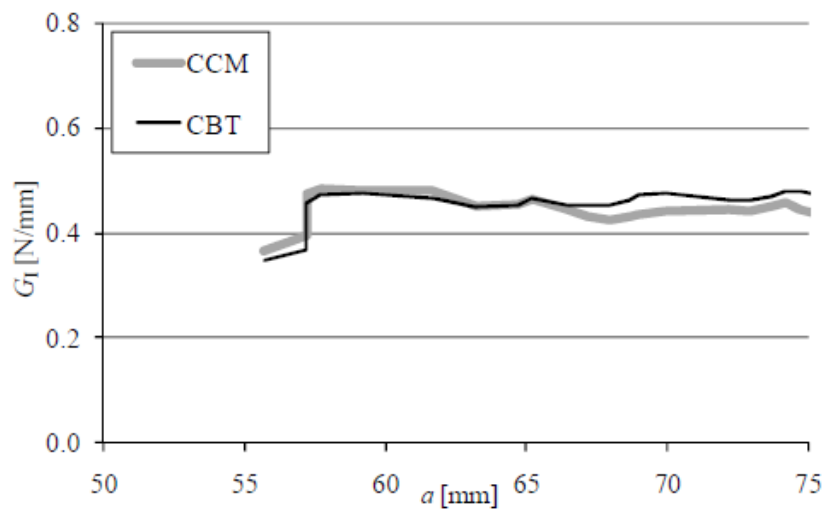


Figura 25 – Curvas  $G_{IC}$ - $a$  para CCM e CBT [50].

Os resultados obtidos foram bastante aproximados entre os dois métodos embora o CCM tenha apresentado maiores flutuações. A Tabela 2 apresenta os valores de  $G_{IC}$  obtidos para cada um dos quatro provetes utilizando os dois métodos diferentes, bem como a média e o desvio-padrão.

Tabela 2 - Valores de  $G_{IC}$  de quatro provetes para CCM e CBT [50].

Provete	CCM	CBT
1	0,401	0,468
2	0,394	0,420
3	0,433	0,444
4	0,328	0,404
<b>Média</b>	0,389	0,434
<b>Desvio-padrão</b>	0,044	0,028

A análise numérica foi realizada, utilizando o *software* ABAQUS®, para definir uma lei de dano de forma a simular uma fina camada de adesivo pelo MEFX. A lei de dano foi considerada triangular e foram utilizadas as propriedades obtidos do ensaio DCB e do ensaio de tração. Os substratos de CFRP foram considerados como sendo elásticos ortotrópicos e a fratura do adesivo foi modelada pelo MEFX. A Figura 26 apresenta o modelo deformado, assim como a malha utilizada e as condições fronteira e de carregamento. É possível verificar a propagação da fenda pela camada de adesivo na Figura 27.

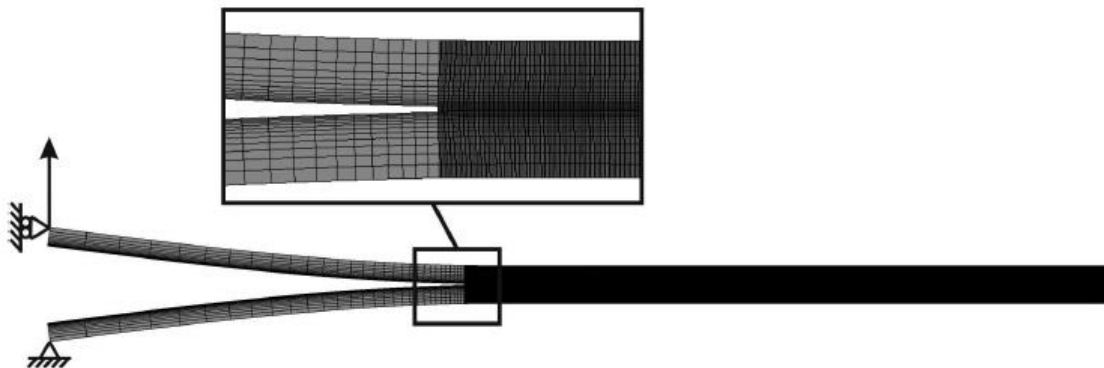


Figura 26 - Modelo do ensaio DCB durante a simulação, com condições fronteira e carregamento [50].

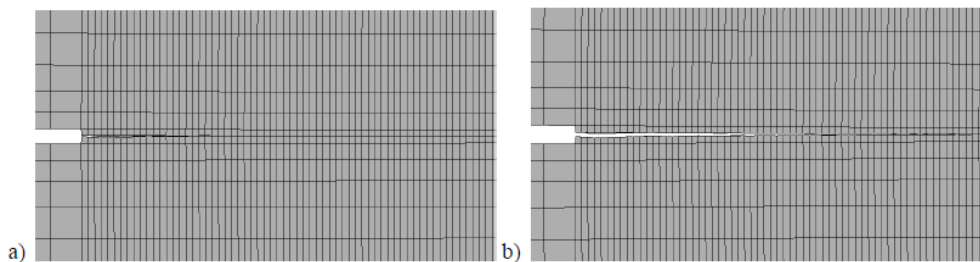


Figura 27 - Propagação da fenda, na sua iniciação (a) e aumentando ao longo do adesivo (b) [50].

A validação das leis de dano propostas foi conseguida através da comparação das curvas  $P$ - $\delta$  obtidas a partir do ensaio DCB com os resultados obtidos numericamente pelo MEFX. A Figura 28 apresenta a comparação das curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais dos modelos DCB.

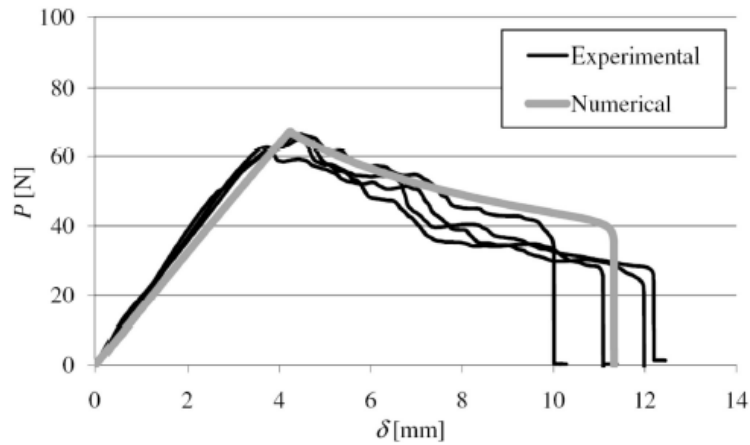


Figura 28 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais dos modelos DCB [50].

Com a realização deste trabalho e através dos resultados obtidos que são apresentados na Figura 28, é possível verificar que, em termos de curvas  $P$ - $\delta$ , a simulação numérica foi consistente com os resultados experimentais, apresentando uma boa precisão. Com isto, conclui-se que a análise pelo MEFX é uma alternativa adequada quando se pretende prever a resistência de uma junta adesiva sob um carregamento de modo I.

Curiel Sosa et al. [52] estudaram a aplicação do MEFX na modelação da delaminação de laminados de fibra de metal. Neste trabalho foi considerada uma configuração DCB composta por um laminado de fibras metálicas na qual foram analisados a iniciação da fenda em modo I e respetiva propagação. O laminado de fibra de metal utilizado neste trabalho é GLARE, que consiste num laminado de alumínio reforçado com fibra de vidro. O laminado em questão apresenta a configuração apresentada na Figura 29. As suas dimensões estão representadas na Figura 30.

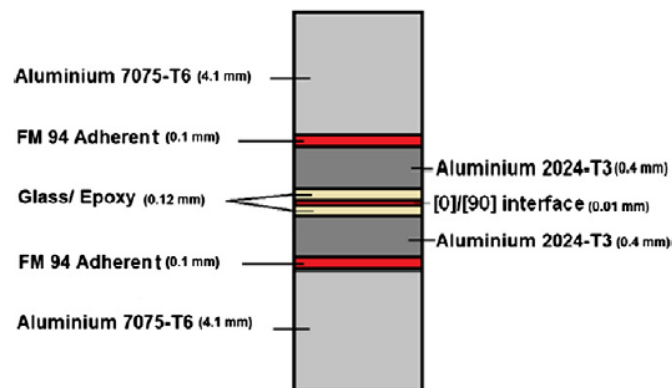


Figura 29 - Configuração do laminado GLARE [52].

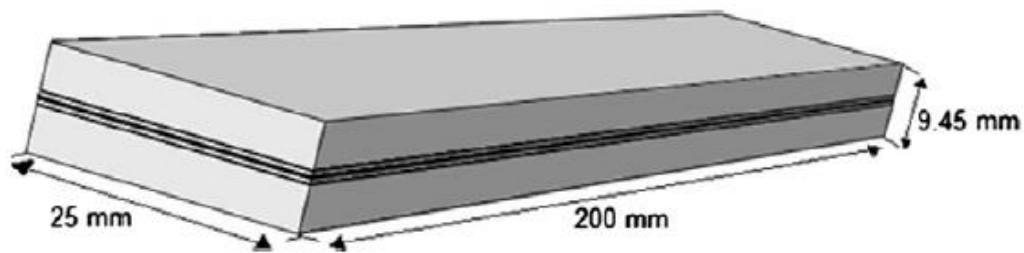


Figura 30 - Dimensões do laminado GLARE [52].

As propriedades mecânicas do adesivo e das ligas de alumínio utilizadas estão na Tabela 3. Na Tabela 4, encontram-se os valores de tenacidade à fratura das interfaces do GLARE. As propriedades das camadas de fibra de vidro/epóxico são apresentadas na Tabela 5.

Tabela 3 - Propriedades mecânicas do adesivo e ligas de alumínio [52].

Material	Módulo de Young (N/mm <sup>2</sup> )	Coefficiente de Poisson	Tenacidade à fratura (N/mm <sup>3/2</sup> )
Alumínio 2024-T3	73800	0,33	-
Alumínio 7075-T6	71700	0,33	-
Adesivo FM94	1900	0,38	5

Tabela 4 - Tenacidade à fratura no modo I das diferentes interfaces do laminado [52].

Interface	$G_{IC}$ (J/m <sup>2</sup> )
Alumínio/fibra de vidro-epóxico	3067
Fibra de vidro-epóxico	3545

Tabela 5 - Propriedades da fibra de vidro-epóxico [52].

Parâmetro	$E_1$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_2$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E_3$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\nu_{12}$	$\nu_{13}$	$\nu_{23}$	$G_{12}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{13}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G_{23}$ (N/mm <sup>2</sup> )
Valor	53980	9412	9412	0,33	0,33	0,33	5548	3000	5548

O carregamento foi simulado aplicando uma velocidade constante em ambas as extremidades do modelo. Estas velocidades nodais foram aplicadas em três nós em cada uma das extremidades, o que permite a medição da força externa total. As condições fronteira e a aplicação do carregamento encontram-se representadas na Figura 31.

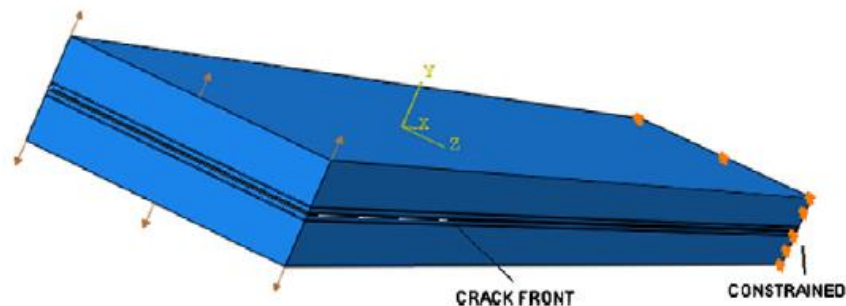


Figura 31 - Condições fronteira e aplicação nodal do carregamento [52].

Os resultados numéricos obtidos, sob a forma de curvas  $P-\delta$ , são apresentados na Figura 32. De forma a validar a simulação do MEFX, as curvas  $P-\delta$  obtidas foram comparadas com os resultados experimentais obtidos no trabalho de Airoidi et al. [53].

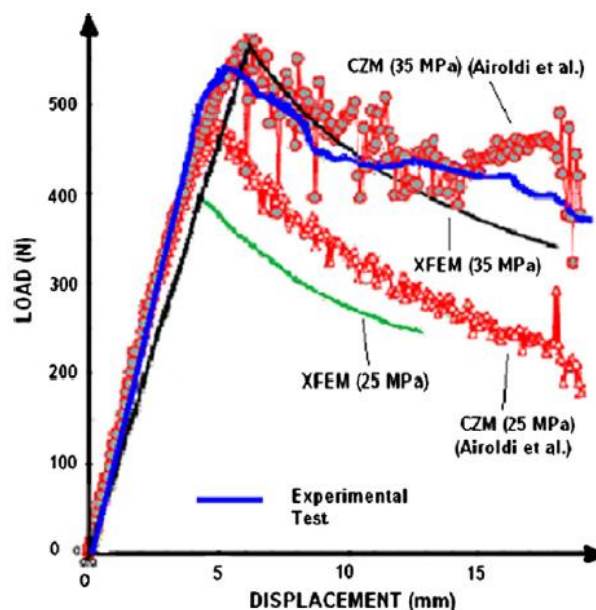


Figura 32 - Curvas  $P-\delta$  numéricas, experimentais e de Airoidi et al. [52].

É possível verificar que o MEFX subestima ligeiramente a energia de fratura enquanto o MDC, modelo utilizado no trabalho de Airoidi et al., sobrestima os resultados experimentais. As tensões de von Mises são mostradas na Figura 33e a abertura da fenda é representada na Figura 34. A Tabela 6 mostra os valores de delaminação comparados com o deslocamento e a carga aplicada.

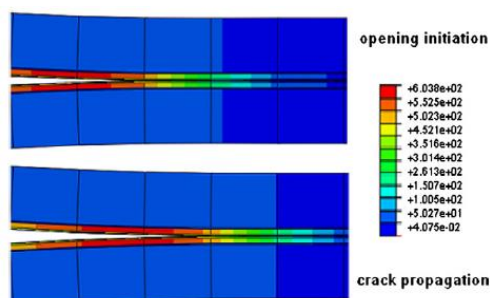


Figura 33 - Tensões de von Mises para iniciação e propagação da fenda [52].

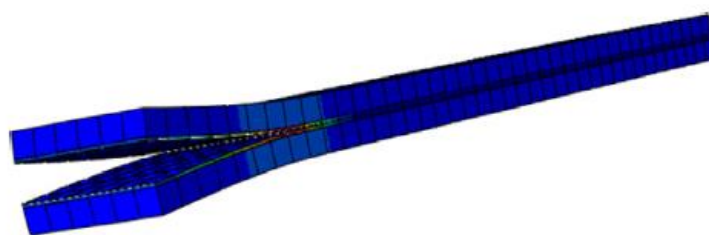


Figura 34 - Detalhe da abertura da fenda [52].

Tabela 6 - Valores de delaminação para uma determinada carga e deslocamento [52]

Delaminação, $a$ (mm)	Deslocamento, $\delta$ (mm)	Carga (N)	$\delta/a$
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

A comparação entre os resultados obtidos experimentalmente, numericamente e num trabalho anterior [53], demonstrou uma boa aproximação. Embora tenha sido utilizado apenas num ensaio DCB, o MEFX aparentou ser uma boa técnica para modelar rotura em materiais compósitos.

Golewski et al. [54] realizaram um trabalho focado em estimar experimentalmente a tenacidade à fratura,  $K_{IIc}$ , de compósitos de betão modificados com aditivos de cinzas

volantes e modelar a propagação da fenda sob o modo II utilizando o MEFX. Foram utilizados dois tipos de betão: sem aditivos de cinzas volantes (FA-00) e com 20% de aditivos de cinzas volantes (FA-20), cujas características são apresentadas na Figura 35.

Analysed parameter	Type of concrete	
	FA-00	FA-20
<i>Compressive strength on cubes</i>		
$f_{cm}$ (MPa)	47.51	48.96
$s$ (MPa)	2.55	3.02
$\nu$ (%)	4.58	7.53
<i>Tensile strength by splitting</i>		
$f_{ctm}$ (MPa)	3.58	3.36
$s$ (MPa)	0.13	0.35
$\nu$ (%)	4.62	11.6
<i>Coefficient of elasticity</i>		
$E_{cm}$ (GPa)	37.27	36.24
$s$ (GPa)	2.25	3.68
$\nu$ (%)	4.85	7.54

Figura 35 – Propriedades dos betões FA-00 e FA-20 [54].

A Figura 36 apresenta a configuração do carregamento e a malha utilizada no modelo de EF. As condições fronteira impostas ao modelo são apresentadas na Figura 37, em que U representa deslocamento e UR representa rotação.

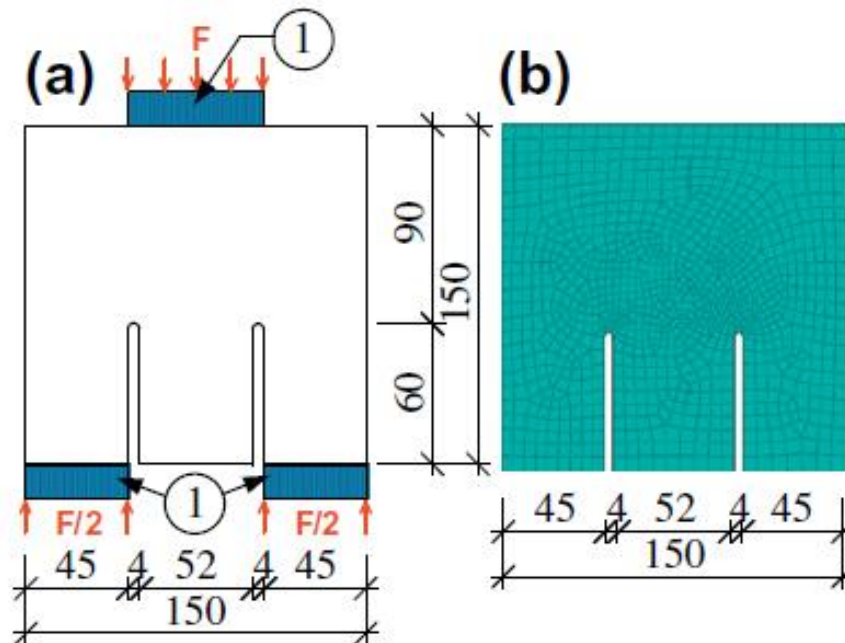


Figura 36 – Provete com a) configuração do carregamento e dimensões e b) malha de EF [54].

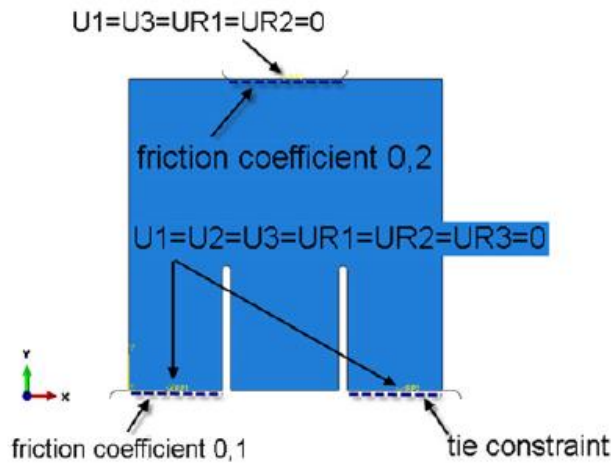


Figura 37 - Condições fronteira do modelo: U - deslocamento; UR – rotação [54].

A Figura 38 apresenta as diversas fases do desenvolvimento da fenda e a Figura 39 mostra a distribuição de tensões na segunda fase do desenvolvimento da fenda.

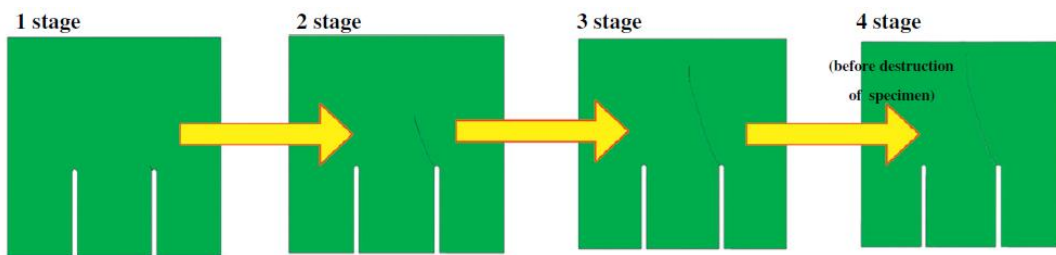


Figura 38 - Fases do desenvolvimento da fenda [54].

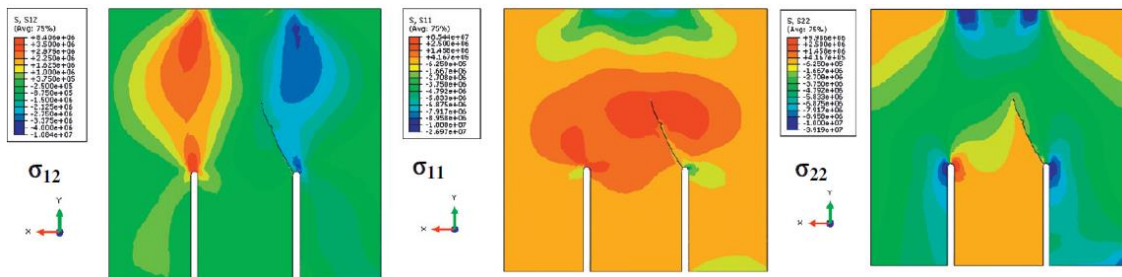


Figura 39 - Distribuição de tensões na segunda fase do desenvolvimento da fenda [54].

Os resultados numéricos obtidos no ABAQUS® foram coerentes com os resultados experimentais. A Figura 40 a) mostra a curva  $P-\delta$  obtida no ensaio experimental enquanto a Figura 40 b) mostra também a curva  $P-\delta$  obtida na simulação numérica para o betão do tipo FA-20. A Figura 40 c) compara os dois resultados. Esta figura, mostra que os resultados são bastante próximos.

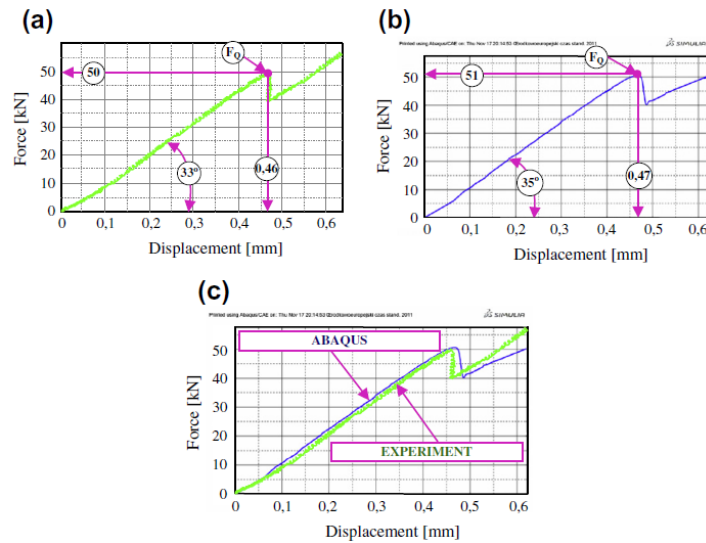


Figura 40 - Curva  $P-\delta$  para o betão FA-20: (a) experimental, (b) numérica, (c) comparação entre numérica e experimental [54].

A Figura 41 compara a forma das fendas originadas no ensaio experimental (Figura 41 a)) e na simulação numérica (Figura 41 b)). É possível verificar que os resultados são coerentes.

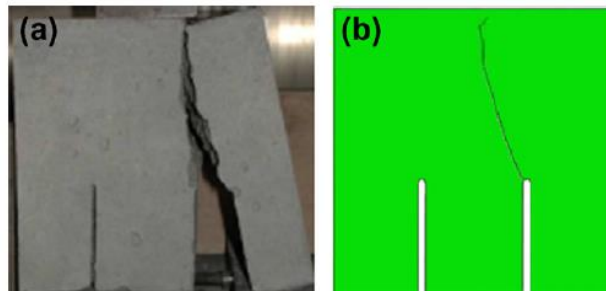


Figura 41 - Forma da fenda obtida: (a) em ensaio experimental, (b) em simulação numérica [54].

Os resultados obtidos neste trabalho permitem concluir que a adição de 20% de cinzas volantes ao betão faz aumentar a tenacidade à fratura em 3,5% após 28 dias de cura. Quanto à aplicação do MEFX, pode-se concluir que o modelo é muito eficaz, visto que os resultados numéricos foram muito aproximados aos resultados experimentais.

Campilho et al. [55] realizaram um trabalho com o objetivo de estudar a distribuição de tensões e resistência de ligações adesivas em JSS utilizando dois modelos diferentes: MDC e MEFX.

Este trabalho teve uma componente experimental em que foram utilizadas JSS. Os substratos utilizados são da liga de alumínio AA6082 T651. Na ligação adesiva foram utilizados três tipos de adesivos diferentes: Araldite® AV138 (epóxico frágil), Araldite®

2015 (epóxico dúctil) e SikaForce® 7888 (poliuretano de elevada resistência e ductilidade).

A geometria e as dimensões da junta utilizada são apresentadas na Figura 42. À exceção de  $L_0$ , que assume quatro valores diferentes, todas as restantes dimensões são fixas.

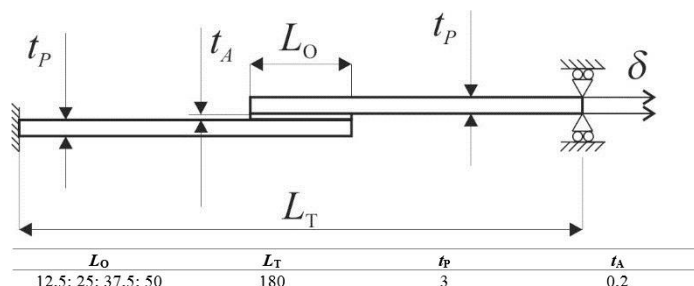


Figura 42 - Configuração e dimensões da junta (em mm) [55].

A análise numérica foi realizada com recurso ao *software* ABAQUS®. Os substratos foram modelados como sendo sólidos elasto-plásticos e o adesivo com elementos coesivos na abordagem de MDC ou elementos sólidos com uma formulação enriquecida para MEFX. Em ambas as abordagens, MDC e MEFX, apenas um elemento foi considerado na direção da espessura do adesivo. Para os dois casos, a malha utilizada foi construída com o efeito *bias* a partir da região central do adesivo em direção às extremidades de sobreposição e à camada de adesivo na direção da espessura da junta.

As condições fronteira impostas aos modelos consistiram no encastramento da junta numa extremidade e na aplicação de uma restrição vertical e um deslocamento na outra extremidade.

Após a realização dos testes experimentais, os modos de rotura obtidos foram todos rotura coesiva, embora tenha ocorrido deformação plástica nos substratos em alguns provetes, principalmente naqueles com maior carga de rotura. À exceção das juntas com  $L_0=50$  mm ligadas com SikaForce® 7888, as curvas  $P-\delta$  foram predominantemente lineares até à rotura. Os resultados obtidos na análise numérica foram consistentes com os resultados experimentais.

Na análise numérica de MDC, a camada de adesivo foi modelada com apenas uma fila de elementos coesivos, o dano iniciou nas extremidades da sobreposição e propagou em direção à região central do adesivo. A Figura 43 apresenta um exemplo dos resultados obtidos por MDC. Na Figura 43, está representada a correlação entre as curvas  $P-\delta$  obtidas na análise numérica e nos testes experimentais, para juntas ligadas com Araldite® 2015 com um  $L_0=37,5$  mm.

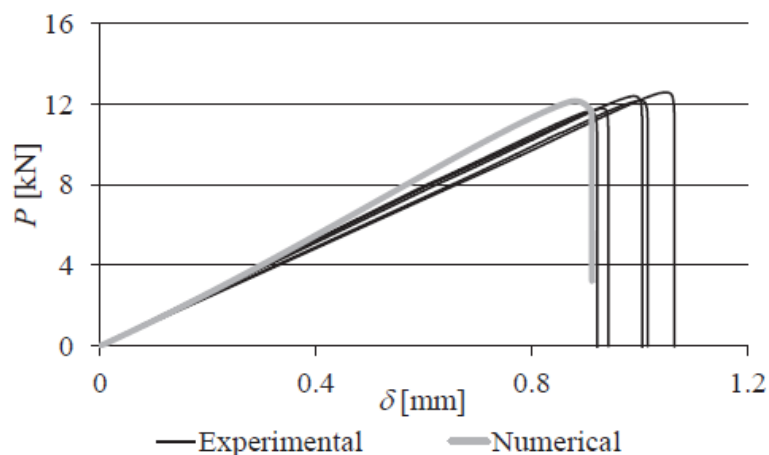


Figura 43 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais para juntas coladas com Araldite® 2015 com  $L_0=37,5$  mm [55].

A Figura 44 mostra a relação carga máxima ( $P_m$ )- $L_0$  para os três adesivos, considerando a média e desvio-padrão dos valores experimentais obtidos (representados com pontos) e os resultados obtidos numericamente (representados com linhas).

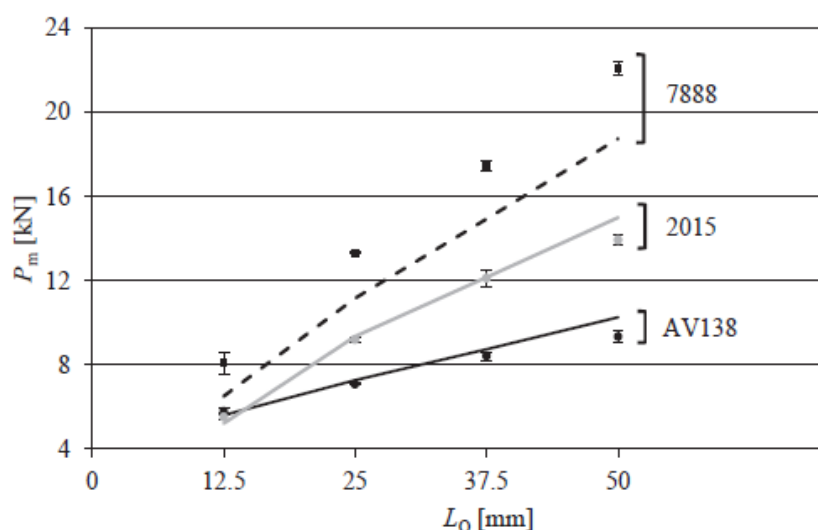


Figura 44 - Curvas  $P_m$ - $L_0$  numéricas e experimentais para os três adesivos [55].

Pelos resultados obtidos, é possível verificar que a carga máxima até à rotura aumenta à medida que se aumenta  $L_0$ . O adesivo SikaForce® 7888, sendo um adesivo com elevada resistência e ductilidade, é o adesivo que consegue suportar cargas mais elevadas enquanto um adesivo frágil, como é o Araldite® AV138, apresenta menor resistência. Para os adesivos Araldite® 2015 e AV138 os resultados numéricos são consistentes com os resultados experimentais visto que não se verificam grandes variações entre eles, enquanto os resultados numéricos do SikaForce® 7888 são inferiores aos resultados experimentais, verificando-se uma variação considerável.

Na análise numérica para uma abordagem com o MEFX, foram apenas utilizados critérios de dano baseados na deformação (MAXE, MAXPE e QUADE), isto porque as variações percentuais de  $P_m$  utilizando os critérios MAXS, MAXPS e QUADS são muito elevadas, tal como foi verificado num trabalho anterior [56].

A Figura 45 apresenta os resultados obtidos nesta análise sob a forma da relação  $P_m-L_0$  para os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138 e para cada critério de dano utilizado, e respetiva comparação com os resultados experimentais.

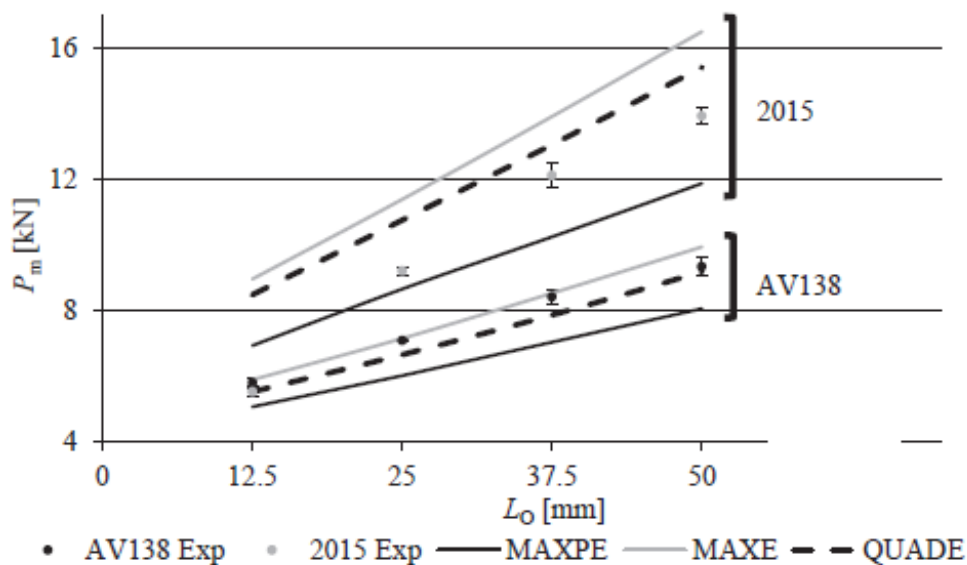


Figura 45 - Curvas  $P_m-L_0$  numéricas e experimentais para Araldite® AV138 e Araldite® 2015 [55].

Pelos resultados obtidos na Figura 45, é possível verificar que o MEFX apresenta uma boa precisão quando se simulam ligações adesivas utilizando adesivos frágeis como o Araldite® AV138. Para adesivos com uma ductilidade moderada como o Araldite® 2015, o MEFX é menos preciso mas apresenta uma precisão aproximada, enquanto utilizando adesivos com elevada ductilidade como o SikaForce® 7888, este método não é adequado.

Também foi possível constatar que o tamanho da malha influencia os resultados obtidos e, por isso, foi realizado um estudo para verificar este efeito, cujos resultados são apresentados na Figura 46. Pela Figura 46, conclui-se que, para ambos adesivos, o valor de  $P_m$  aumenta à medida que o tamanho de malha aumenta. Os resultados mais precisos foram obtidos utilizando Araldite® AV138 para um tamanho de malha igual a  $t_A$  (0,2 mm) e isto é característico dos adesivos frágeis [56]. As análises a juntas adesivas ligadas com adesivos altamente dúcteis não apresentam boas previsões por esta aproximação.

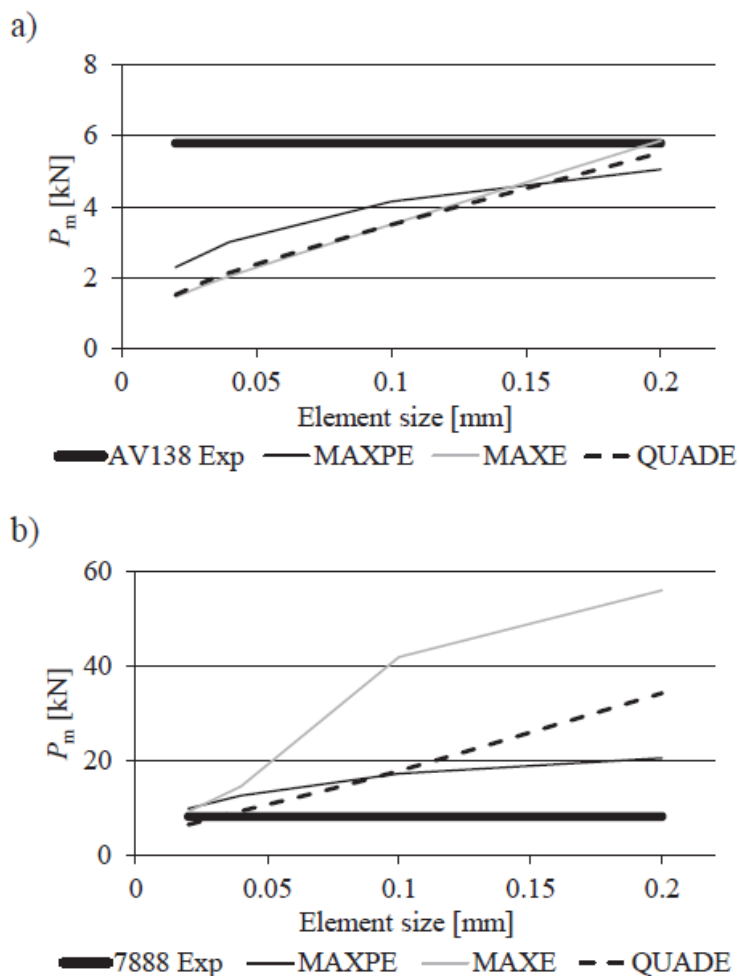


Figura 46 - Efeito da influência da malha no MEFX para os adesivos a) Araldite® AV138 e b) SikaForce® 7888 [55].

Com este trabalho foi possível concluir diversos aspetos. A análise experimental demonstrou um comportamento distinto entre os três adesivos. O adesivo Araldite® AV138 apresentou um pequeno aumento de  $P_m$  à medida que o  $L_0$  aumenta devido à falta de plastificação nas regiões de iniciação do dano. O adesivo Araldite® 2015 apresentou um valor de  $P_m$  reduzido para  $L_0=12,5$  mm mas conseguiu suportar a plastificação nas extremidades de sobreposição e, com isso, aumentar a resistência de uma forma mais acentuada que o adesivo frágil. O adesivo SikaForce® 7888 apresentou a maior resistência e aumento de  $P_m$  mais acentuado. A abordagem do MDC provou ser altamente precisa para adesivos frágeis e adesivos moderadamente dúcteis, enquanto que, utilizando o poliuretano de elevada ductilidade, os resultados foram subestimados. O estudo do efeito da influência da malha provou que este modelo é estável a variações do tamanho da malha.

A análise pelo MEFX demonstrou que não é possível modelar a propagação do dano devido ao modo de rotura ser predominantemente em corte ao longo da camada de adesivo. Os critérios de dano baseados em deformações são mais adequados neste caso

e demonstraram uma precisão aproximada no que toca à carga máxima até à rotura, à exceção do polituretano. O estudo do efeito da influência da malha demonstrou as variações de  $P_m$ , que prova que o método é limitado nestas condições.

Mubashar et al.[57] estudaram a modelação de dano e rotura de juntas adesivas utilizando a combinação de dois métodos: MEFX e MDC. O MEFX foi utilizado para modelar a fenda na região de *fillet* onde não é conhecida a trajetória da fenda enquanto os elementos coesivos foram utilizados para modelar a progressão da fenda e do dano ao longo da interface da ligação adesiva. Foram consideradas JSS compostas por substratos da liga de alumínio 2024 T3 ligados com o adesivo epóxico FM73-M. As propriedades mecânicas da liga de alumínio são:  $E = 73$  GPa,  $\nu = 0,33$ ,  $\sigma_y = 345$  MPa. As dimensões das juntas adesivas utilizadas são apresentadas na Figura 47.

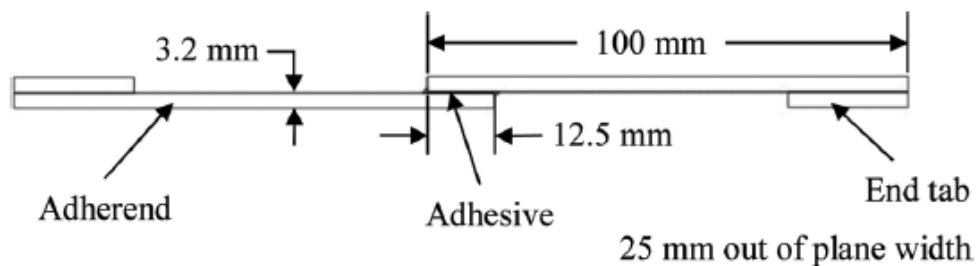


Figura 47 - Configuração e dimensões da junta adesiva [57].

Na análise numérica, o adesivo foi modelado com propriedades elasto-plásticas baseado em ensaios de tração, cujos resultados são apresentados na Figura 48. Os substratos de alumínio foram modelados com propriedades elásticas. As condições fronteira e malha do modelo utilizado no ABAQUS® são apresentados na Figura 49.

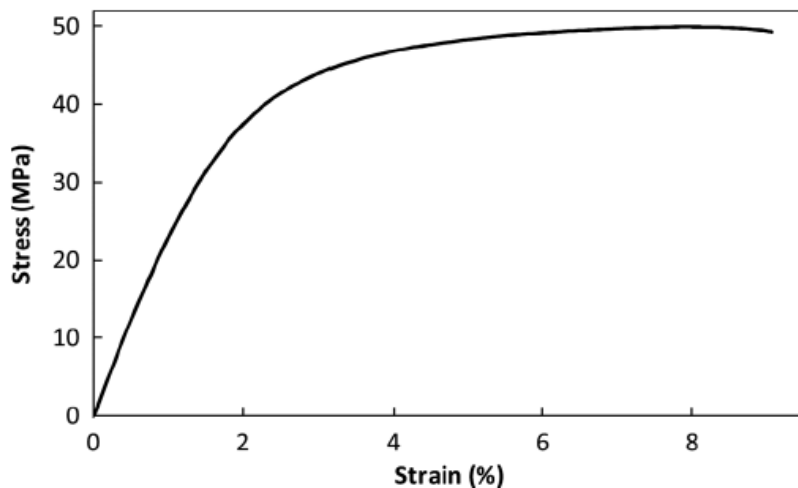


Figura 48 - Relação tensão-deformação do adesivo FM73-M [57].

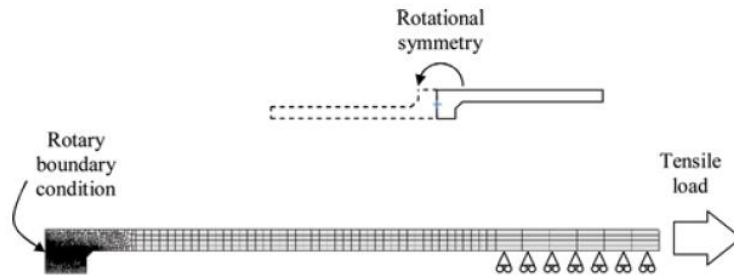


Figura 49 - Malha e condições fronteira do modelo considerado na análise numérica [57].

No modelo de EF da JSS, foi criada uma camada de elementos coesivos de espessura 0,001 mm ao longo da interface entre o adesivo e os substratos. A camada de adesivo foi definida como uma região de elementos enriquecidos onde uma fenda pode propagar-se numa direção arbitrária. A Figura 50 é representativa das regiões onde são aplicados os elementos coesivos e o MEFX (referido na figura como XFEM).

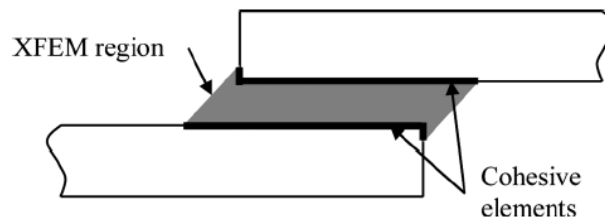


Figura 50 - Regiões dos elementos coesivos e MEFX [57].

A Figura 51 mostra a curva  $P-\delta$  retirada da análise numérica em comparação com os resultados obtidos experimentalmente. Verifica-se que a carga máxima até à rotura coincide com o intervalo de carga máxima dos resultados experimentais.

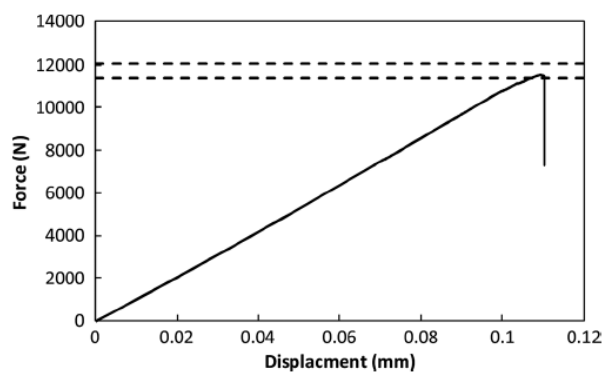


Figura 51 - Curva  $P-\delta$  numérica em comparação com dados experimentais [57].

A fenda e respetiva propagação pode ser observada na Figura 52 e na Figura 53. É visível a propagação da fenda nas duas regiões diferentes sem que seja estrangida pelos limites dos diferentes elementos.

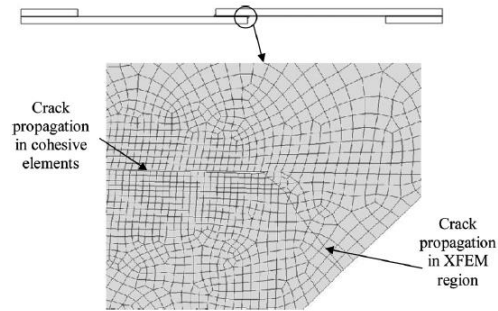


Figura 52 - Propagação da fenda pelas diferentes regiões [57]

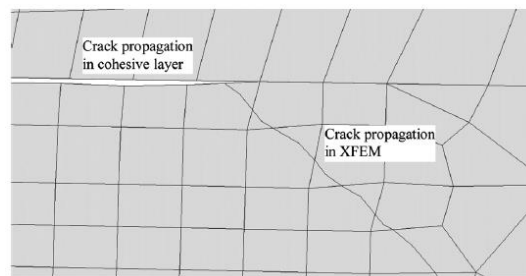


Figura 53 - Interação das fendas das regiões de MEFX e MDC [57]

A iniciação da fenda ocorreu na região do MEFX, como se pode observar na Figura 54 a), e estende-se em direção à camada de adesivo e ao substrato superior à medida que o carregamento aumenta, como é visível na Figura 54 b). À medida que a fenda se aproxima dos elementos coesivos a propagação da fenda na região do MEFX termina e é observável dano na zona coesiva. A rotura dos elementos coesivos é evidenciada na Figura 54 c).

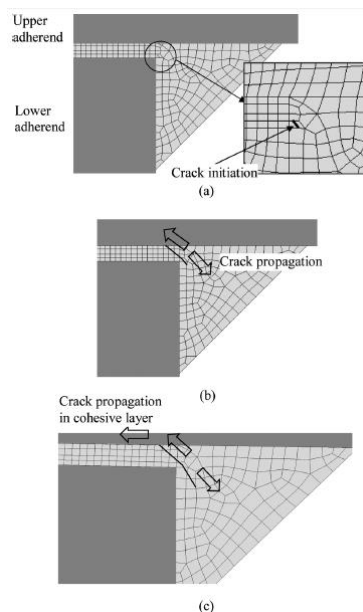


Figura 54 - Iniciação e propagação da fenda na camada do adesivo [57].

Como conclusão, pode-se afirmar que o MEFX demonstrou ser capaz de prever com precisão a trajetória de uma fenda na região do adesivo numa junta adesiva. O MEFX e o MDC podem ser combinados com o propósito de prever de uma forma precisa a iniciação e desenvolvimento da fenda desde o *fillet* até a uma região mais central de uma camada adesiva, incluindo a interface. No entanto esta abordagem tem limitações, nomeadamente uma potencial descontinuidade na fenda aquando da transição MEFX-MDC. De qualquer forma, ficou provado que este modelo híbrido é capaz de prever de forma eficaz a iniciação e propagação de uma fenda e a resistência de juntas adesivas.



DESENVOLVIMENTO



### 3 DESENVOLVIMENTO

#### 3.1 Trabalho experimental

Os ensaios descritos neste capítulo correspondem a ensaios realizados noutra trabalho [3]. No trabalho prático referido foram utilizados aderentes de alumínio dobrados em forma de L cuja espessura variou entre quatro valores (1, 2, 3 e 4 mm) e aderentes retilíneos de compósito reforçado a fibra de carbono ou *carbon fiber reinforced polymers* (CFRP) com uma espessura de 3 mm. Para a ligação foram utilizados dois tipos de adesivos, Araldite® AV138 e SikaForce® 7752. O  $L_0$ , ou comprimento de adesivo, foi de 25 mm. De forma a obter a carga máxima de rotura das juntas foram realizados ensaios de tração. Utilizaram-se cinco provetes para cada valor de espessura do aderente de alumínio, ou seja, 20 provetes para cada tipo de adesivo perfazendo um total de 40 provetes. O trabalho realizado na presente dissertação, consistiu no tratamento dos dados em bruto dos ensaios realizados e respetiva análise.

##### 3.1.1 Materiais utilizados

###### 3.1.1.1 Substratos

No trabalho prático foram utilizados dois tipos de substratos: um de liga de alumínio e um de CFRP. O alumínio é muito utilizado, por exemplo, na indústria automóvel e aeronáutica, devido às suas características de leveza, boa condutividade elétrica, resistência à corrosão, durabilidade e facilidade de conformação [58]. O CFRP começa a ser cada vez mais utilizado em diversas áreas de engenharia, mais especificamente em estruturas que requerem elevada resistência, rigidez e leveza [59].

A liga de alumínio utilizada foi a liga AW6082–T651. Como principais propriedades destacam-se a alta resistência à corrosão, boa condutividade térmica e baixo peso. As curvas de tensão–deformação desta liga foram obtidas de acordo com a norma ASTM–E8M–04 e são apresentadas na Figura 55 [56]. Este material apresenta uma resistência à tração de aproximadamente 340 MPa, obtida através do envelhecimento artificial sob uma temperatura de 180°C [3]. Na Figura 55 também está representada a aproximação numérica usada no modelo de método de EF.

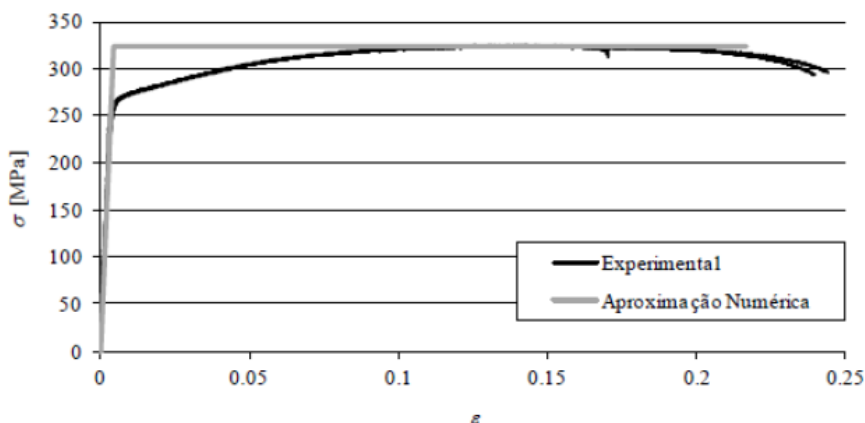


Figura 55 - Curva tensão–deformação da liga AW6082–T651 e respetiva aproximação para análise através do método de EF [56].

A liga de alumínio apresenta as propriedades mecânicas referidas na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio [56].

Propriedade	Valor
Módulo de Young, $E$ [GPa]	$70,07 \pm 0,83$
Tensão de cedência, $\sigma_y$ [MPa]	$261,67 \pm 7,65$
Tensão de rotura, $\sigma_f$ [MPa]	$324 \pm 0,16$
Deformação de rotura, $\epsilon_f$ [%]	$21,7 \pm 4,24$
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,3

O material compósito utilizado é uma matriz de resina epóxida reforçada com fibra de carbono. A fibra de carbono confere ao compósito uma resistência e rigidez elevadas. O CFRP usado foi obtido a partir de pré-impregnado da SEAL® Texipreg HS 160 RM. As propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP, obtidas previamente [51], estão descritas na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP [51].

Propriedade	Valor
$E_1$ [MPa]	109000
$E_2$ [MPa]	8819
$E_3$ [MPa]	8819
$\nu_{12}$	0,342
$\nu_{13}$	0,342
$\nu_{23}$	0,38
$G_{12}$ [MPa]	4315
$G_{13}$ [MPa]	4315
$G_{23}$ [MPa]	3200

### 3.1.1.2 Adesivos

Os adesivos utilizados no trabalho prático foram o epóxico Araldite® AV138, que é um adesivo frágil com elevada resistência mecânica, e o poliuretano SikaForce® 7752, um adesivo dúctil com menor resistência.

#### 3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 endurecido com HV 998 é um adesivo de duas partes que, quando combina na proporção 100g:40g, apresenta elevada rigidez e resistência mecânica e permite a cura à temperatura ambiente. Este adesivo suporta elevadas temperaturas de trabalho e ambientes agressivos. As suas principais vantagens são [3]:

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

As curvas de tensão–deformação obtidas num trabalho anterior [60] estão apresentadas na Figura 56. O resultado obtido demonstra o comportamento frágil do adesivo.

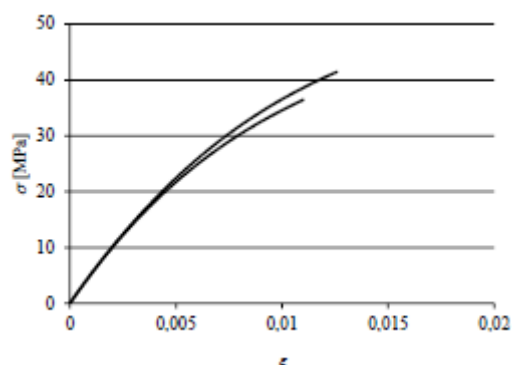


Figura 56 - Curvas tensão–deformação referentes ao adesivo Araldite® AV138 [60].

A Tabela 9 apresenta as propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo Araldite® AV138 [51, 60, 61].

Tabela 9 - Propriedades mecânicas mais relevantes do adesivo Araldite® AV138 [51, 60, 61].

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

<sup>a</sup> - Dados do fabricante.

<sup>b</sup> - Estimado na referência [60].

### 3.1.1.2.2 SikaForce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um poliuretano de dois componentes: resina e endurecedor. Este adesivo apresenta uma estrutura estável e flexível, possui uma boa resistência térmica e elevada resistência ao corte e ao arrancamento. As suas principais vantagens são [3]:

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

A Figura 57 apresenta a curva tensão–deformação do adesivo SikaForce® 7752 obtida num trabalho anterior [61]. Pelo resultado obtido e evidenciado na figura, é possível verificar o comportamento dúctil deste adesivo.

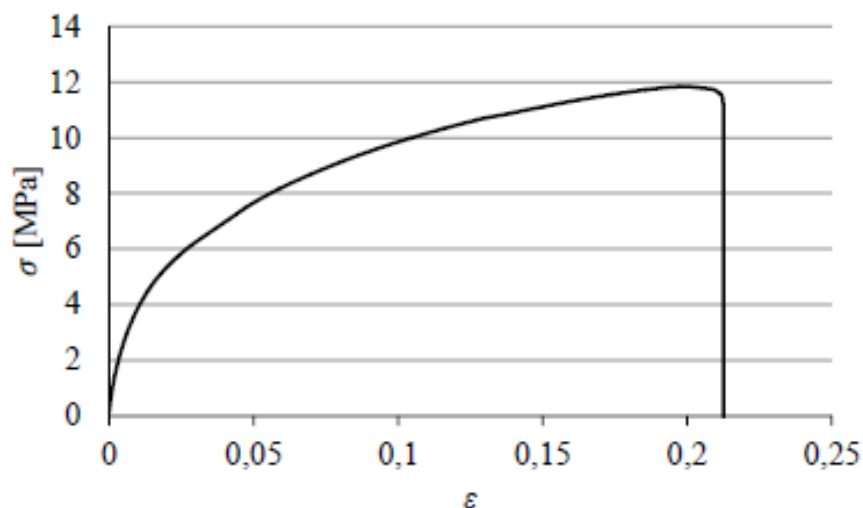


Figura 57 - Curva tensão–deformação referente ao adesivo SikaForce® 7752 [61].

A Tabela 10 apresenta as propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [51, 60, 61].

Tabela 10 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752 [51, 60, 61].

Propriedade	Valor
Módulo de Young, $E$ [MPa]	493,81±89,60
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,32
Tensão de cedência, $\sigma_y$ [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura, $\sigma_f$ [MPa]	11,49±0,25
Deformação de rotura, $\epsilon_f$ [%]	13,92±9,14
Módulo de corte, $G$ [GPa]	187,75±16,35
Tensão de cedência de corte, $\tau_y$ [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura de corte, $\tau_f$ [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura de corte, $\gamma_f$ [%]	54,82±6,39
Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	5,41±0,47

### 3.1.2 Geometria das juntas

A junta adesiva considerada no trabalho experimental em questão, é a junta em  $L$ , cuja geometria é apresentada na Figura 58. A geometria apresentada consiste na ligação de um aderente retilíneo de CFRP com um aderente de alumínio dobrado em forma de  $L$ . Como se pode observar na Figura 58, o carregamento aplicado à junta adesiva é de arrancamento. A Tabela 11 apresenta as dimensões de cada configuração de junta.

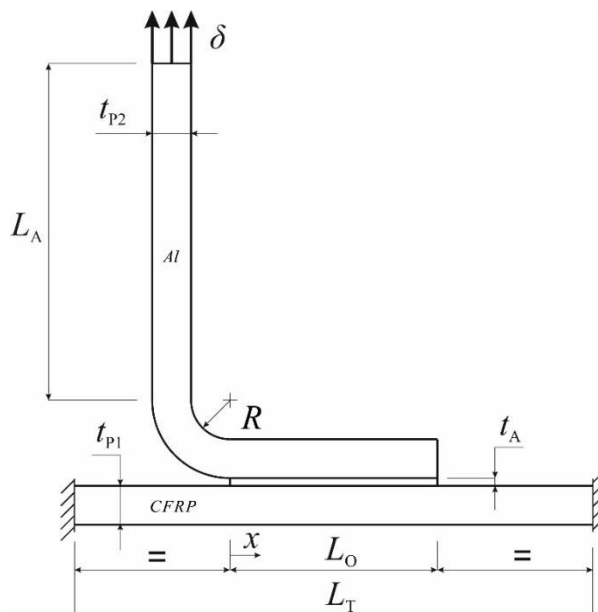


Figura 58 - Geometria da junta em L [3].

A nomenclatura utilizada é a seguinte:

$L_T$  – Comprimento entre apoios do aderente de CFRP;

$L_O$  – Comprimento de sobreposição;

$t_A$  – Espessura de adesivo;

$R$  – Raio de curvatura do aderente de alumínio;

$t_{P1}$  – Espessura do aderente de CFRP;

$t_{P2}$  – Espessuras do aderente de alumínio;

$L_A$  – Altura do aderente de alumínio;

$\delta$  – Deslocamento imposto;

$x$  – Eixo x para efeitos de estudo numérico de tensão.

Tabela 11 - Dimensões das juntas (em mm) [3]

$L_T$	$L_O$	$t_A$	$R$	$t_{P1}$	$t_{P2}$	$L_A$
80	25	0,2	5	3	1, 2, 3 e 4	60

### 3.1.3 Processo de fabrico

#### Dobragem dos substratos de alumínio

Os provetes de alumínio foram dobrados em L utilizando uma máquina de dobragem manual existente nas oficinas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). De seguida procedeu-se à marcação de  $L_0$  nos provetes (Figura 59 a)). Tendo em conta que os aderentes tendem a sofrer rotura antes do processo de dobra a  $90^\circ$ , foi necessária a utilização de chapas de apoio de forma a promover um aumento do raio de curvatura do aderente de alumínio ( $R$ ) e evitar a rotura dos aderentes (Figura 59 b)). A Figura 59 c) mostra os provetes de alumínio na sua forma final [3].

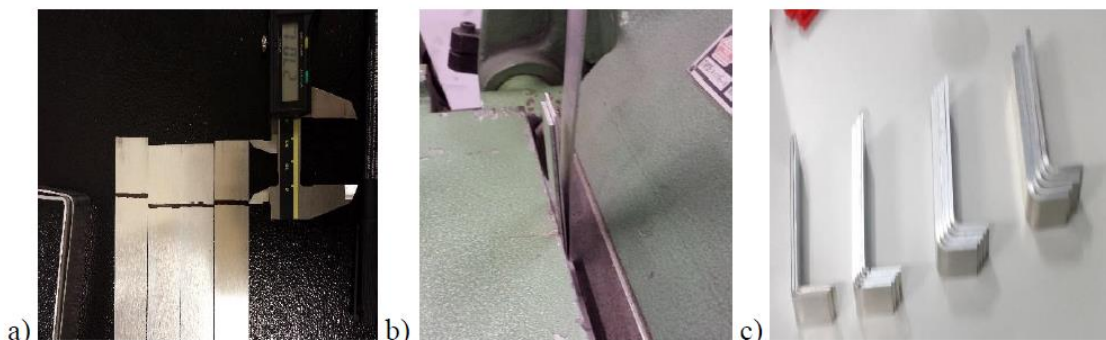


Figura 59 - a) Marcação dos provetes para dobragem, b) chapas de apoio, c) aspeto final dos provetes [3].

#### Placas de CFRP

As placas de CFRP foram fabricadas da seguinte forma:

1. Retirou-se o pré-impregnado de fibra de carbono de uma câmara frigorífica a uma temperatura de  $-18^\circ\text{C}$ , deixando-o a estabilizar à temperatura ambiente;
2. Cortaram-se 20 camadas de CFRP com as dimensões  $300 \times 300 \times 0,15 \text{ mm}^3$ ;
3. Fez-se o empilhamento manual das 20 camadas utilizando uma pistola de ar quente para aquecer a folha em toda a sua área de modo a que resina melhore a aderência entre camadas;
4. Efetuou-se o passo anterior para uma nova folha e procedeu-se à sua sobreposição na folha anterior com um ângulo de  $0^\circ$  com as faces quentes viradas uma para a outra (Figura 60);
5. Repetiu-se o passo anterior para as restantes camadas obtendo no final uma placa de 3 mm;
6. Após o empilhamento, colocou-se a placa numa prensa para curar. Neste passo utilizaram-se placas de aço revestidas com desmoldante de forma a garantir a remoção da placa após a cura. A placa de CFRP é colocada entre as chapas de aço e posteriormente na prensa (Figura 61);
7. A cura foi efetuada a uma pressão e temperatura de 4 bar e  $130^\circ\text{C}$ , respetivamente, durante uma hora, cujo esquema é ilustrado na Figura 62;

Após atingir a temperatura ambiente, a placa é retirada da prensa e posteriormente cortada utilizando uma mesa de corte guiada com disco diamantado (Figura 63).

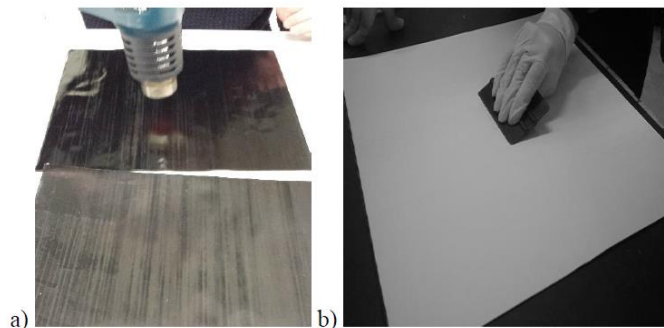


Figura 60 - a) Aquecimento de uma camada de compósito e b) processo de empilhamento [3].

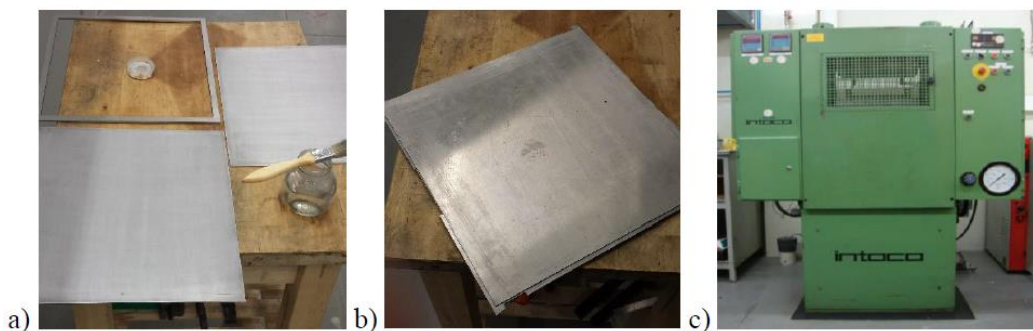


Figura 61 - a) Aplicação do desmoldante, b) placa de compósito entre chapas de aço, c) placa de compósito na prensa à temperatura de 130°C [3].

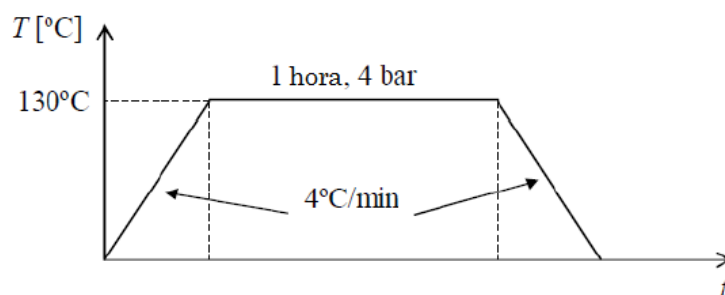


Figura 62 - Ciclo térmico de cura das placas de CFRP [3].

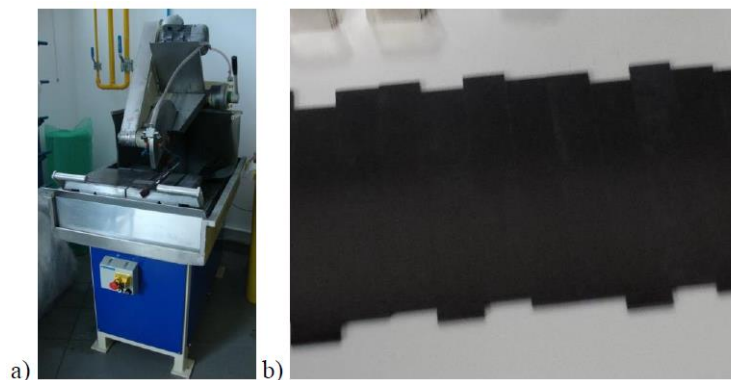


Figura 63 - a) Máquina de corte e b) provetes cortados [3].

### Fabrico das juntas adesivas

As placas de CFRP foram lixadas, utilizando uma lixa de índice 220, na zona de contacto com o adesivo de modo a melhorar a molhagem do adesivo ao substrato e, por conseguinte, a adesão. Os aderentes de alumínio foram sujeitas a granalhagem na zona de contacto com o adesivo, conferindo melhores propriedades de adesão. De seguida, marcou-se o valor de  $L_0$  nos aderentes de alumínio e CFRP. De modo a tentar garantir  $t_A=0,2$  mm, utilizaram-se fitas calibradas com a mesma espessura para delimitar a área a colar. Estas fitas foram coladas numa tira de alumínio recorrendo a cianoacrilato (Figura 64) [3].



Figura 64 - Alinhamento das fitas calibradas de 0,2 mm [3].

A preparação do adesivo Araldite® AV138 consiste na mistura da resina e endurecedor na razão 100g:40g (resina:endurecedor). Na preparação do adesivo SikaForce® 7752, a razão é de 100g:20g. Após a pesagem dos dois componentes, estes foram colocados numa misturadora de forma a homogeneizar a mistura. De seguida, procedeu-se à aplicação do adesivo posicionando os aderentes o mais rigorosamente possível usando

basculamento de forma a evitar o aprisionamento de ar no interior da junta. De forma a garantir  $t_A=0,2$  mm bem como  $L_0=25$  mm, o aderente de alumínio ficou posicionado com 1 ou 2 mm de cada lado em cima de cada fita, como se pode observar na Figura 65 [3].



Figura 65 - Colocação do aderente de alumínio em L sobre as fitas calibradas de 0,2 mm e CFRP [3]

Utilizou-se o mesmo processo para todos os provetes e no final colocaram-se pesos sobre os mesmos para garantir a espessura de adesivo desejada ao longo de toda a área de ligação. As juntas foram curadas durante uma semana e o seu aspeto final é apresentado na Figura 66 [3].

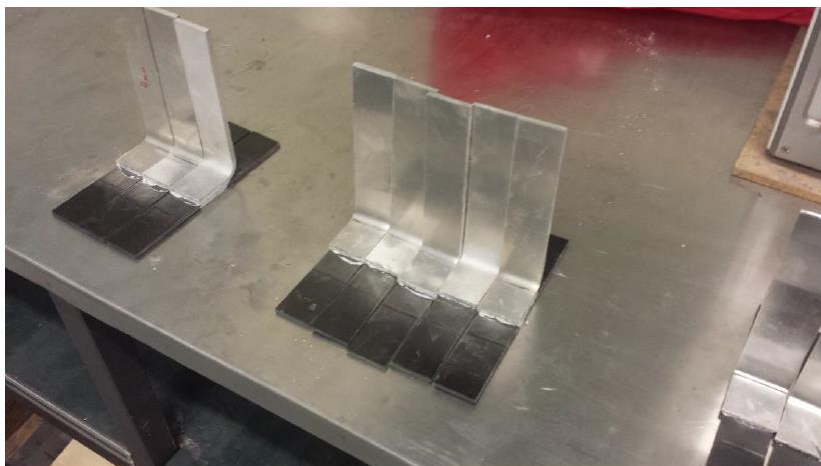


Figura 66 - Juntas em L no seu aspeto final [3].

### 3.1.4 Ensaio das juntas

Os ensaios de arrancamento foram realizados numa máquina *Instron* 3367 equipada com uma célula de carga de 30 kN. De forma a assentar os provetes, foi necessário fabricar uma base composta por furos deslizantes para abranger o maior número de comprimentos possível. Esta base foi fabricada em liga de alumínio AW6052-T651 e é composta por quatro parafusos M10 sextavado, dois blocos para o CFRP, quatro anilhas e quatro porcas [3]. A Figura 67 ilustra a base utilizada.



Figura 67 - Base utilizada nos ensaios dos provetes [3].

Nos ensaios, os provetes são fixos à máquina de tração de forma manual. A base da junta (CFRP) é fixa à base da ferramenta através de dois blocos fixos por parafusos. O aderente de alumínio é fixo à amarra superior da máquina *Instron* e apertado a uma distância do CFRP de 60 mm. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente e uma velocidade constante de 1 mm/min. A Figura 68 mostra a configuração do ensaio com um provete pronto a ser solicitado.



Figura 68 - Ensaio de arrancamento de uma junta em L [3].

### 3.1.5 Resultados obtidos

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos experimentalmente e a respetiva análise, para as juntas ligadas com Araldite® AV138 e SikaForce® 7752.

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

A Figura 69 e a Figura 70 apresentam as curvas  $P-\delta$  para as juntas ligadas com Araldite® AV138 e  $t_{p2}=1$  e 4 mm, respetivamente.

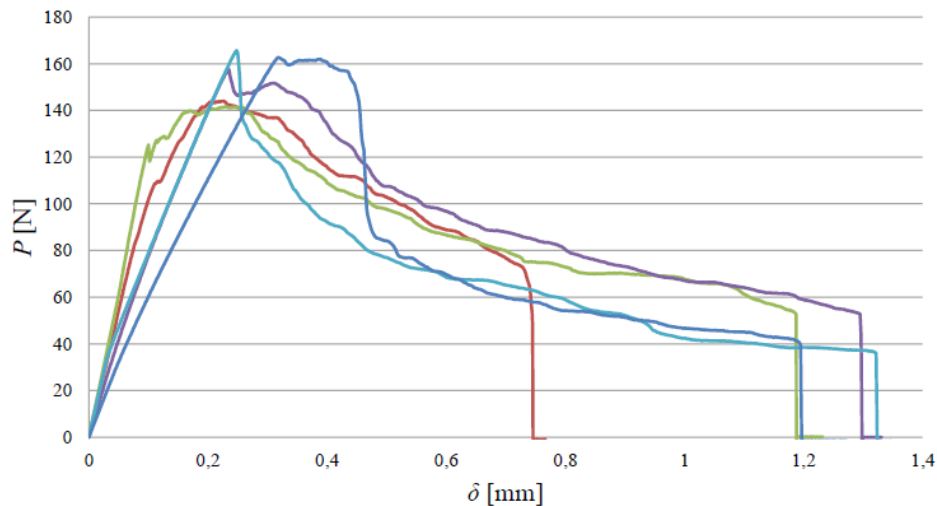


Figura 69 - Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para juntas ligadas com Araldite® AV138 e  $t_{p2}=1$  mm [3].

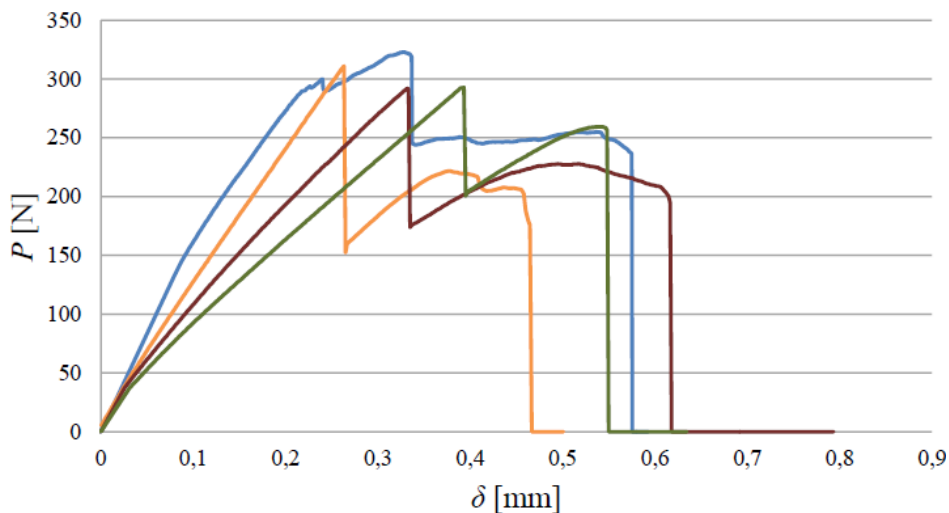


Figura 70 - Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para juntas ligadas com Araldite® AV138 e  $t_{p2}=4$  mm [3].

Conforme se pode constatar, os resultados obtidos foram positivos visto que as curvas  $P-\delta$  dos vários provetes são consistentes, isto é, apresentam uma boa correlação em termos de deslocamento de rotura e carga máxima. Apenas uma junta difere bastante

das restantes em termos de deslocamento de rotura, como se verifica na Figura 69. Este fenómeno pode dever-se a uma eventual má preparação da junta. Pode-se verificar que à medida que se aumenta o  $t_{p2}$ , o valor de carga máxima também aumenta, ou seja, a resistência da junta é maior. Os maiores deslocamentos de rotura obtidos foram para  $t_{p2}=1$  mm e variam entre aproximadamente 0,8 e 1,3 mm.

A Figura 71 e Figura 72 apresentam as curvas  $P-\delta$  para as juntas ligadas com SikaForce® 7752 e  $t_{p2}=1$  e 4 mm, respetivamente.

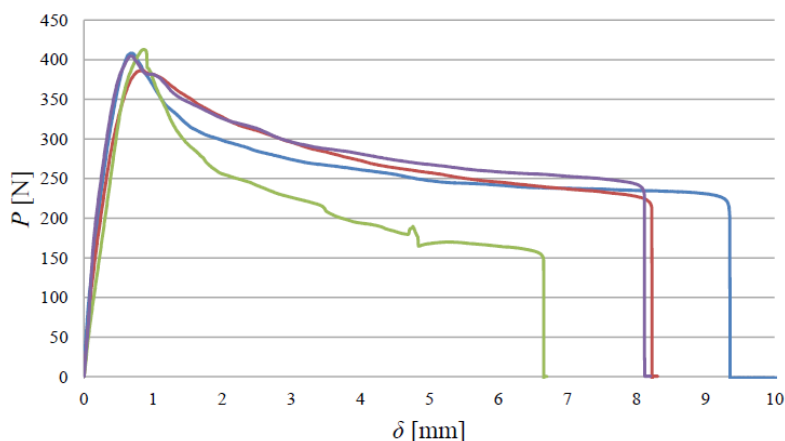


Figura 71 - Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para juntas ligadas com SikaForce® 7752 e  $t_{p2} = 1$  mm [3].

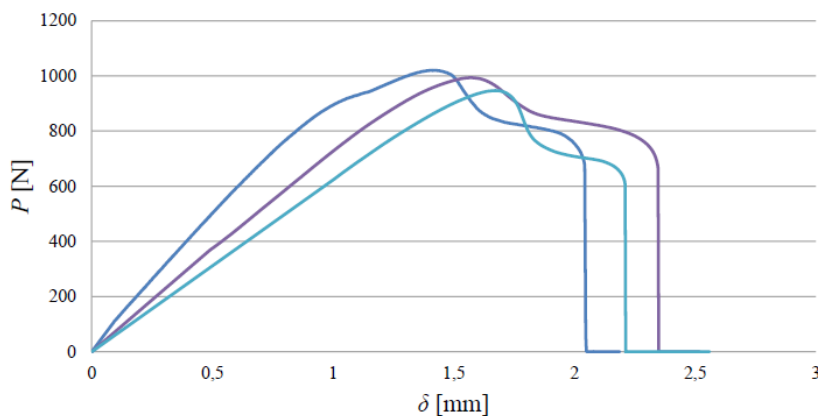


Figura 72 - Curvas  $P-\delta$  obtidas experimentalmente para juntas ligadas com SikaForce® 7752 e  $t_{p2} = 4$  mm [3].

Como se pode observar na Figura 71 e Figura 72, as curvas  $P-\delta$  apresentam uma boa correlação entre elas em termos de carga máxima e deslocamento de rotura. Verifica-se que o valor de carga máxima para  $t_{p2}=1$  mm é aproximadamente 400 N enquanto para  $t_{p2}=4$  mm é aproximadamente 1000 N. Em comparação com os resultados obtidos com Araldite® AV138 para  $t_{p2}=1$  mm e para  $t_{p2}=4$  mm, verifica-se que o SikaForce® 7752 apresenta valores de carga máxima superiores. Este fenómeno explica-se pela natureza dúctil do poliuretano.

### 3.1.5.2 Modos de rotura

Os modos de rotura obtidos no ensaio experimental são apresentados neste capítulo. A Figura 73 e a Figura 74 ilustram a rotura dos provetes ligados com Araldite® AV138 para  $t_{p2}=1$  mm e  $t_{p2}=4$  mm, respetivamente.

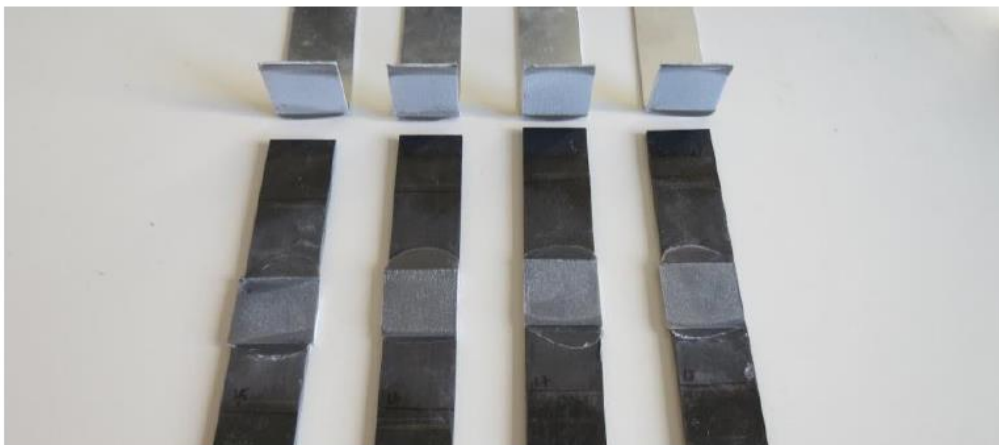


Figura 73 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Araldite® AV138 e  $t_{p2}=1$  mm [3].



Figura 74 - Rotura coesiva do adesivo para juntas ligadas com Araldite® AV138 e  $t_{p2}=4$  mm [3].

Tal como se observa na Figura 73 e Figura 74, as roturas dos provetes ocorreram de forma coesiva na camada adesiva, resultando na presença de adesivo na superfície de ambos os aderentes. Este modo de rotura permite inferir que a ligação entre os aderentes e o adesivo é mais forte do que a resistência interna do adesivo. Para os provetes com  $t_{p2}=2$  mm e  $t_{p2}=3$  mm, também ocorreu rotura coesiva.

A Figura 75 e Figura 76 apresentam as roturas dos provetes ligados com SikaForce® 7752 para  $t_{p2}=2$  mm e  $t_{p2}=3$  mm, respetivamente.

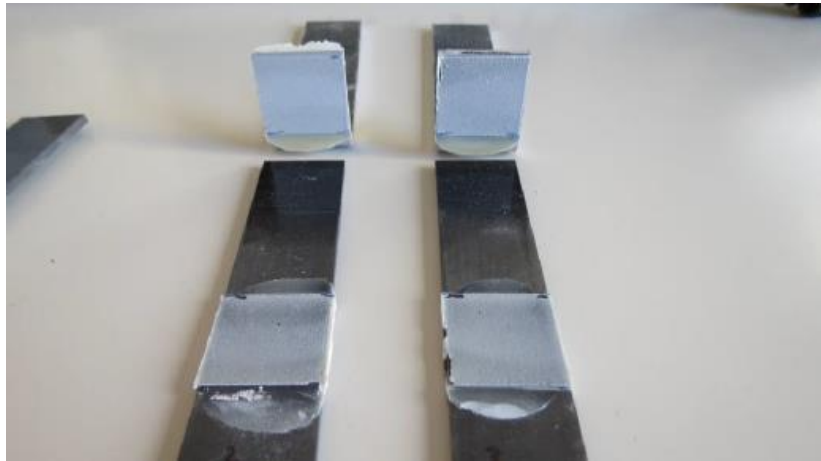


Figura 75 - Rotura coesiva do adesivo para as juntas coladas com SikaForce® 7752 e  $t_{p2}=2$  mm [3].

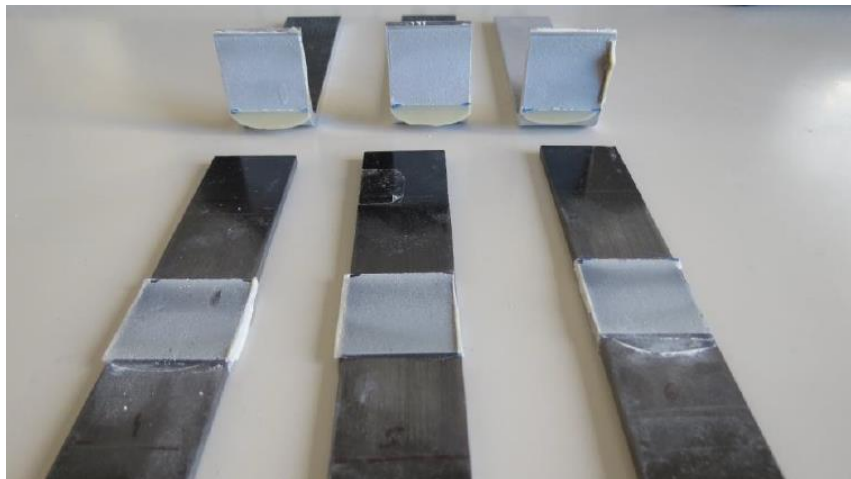


Figura 76 - Rotura coesiva do adesivo para as juntas coladas com SikaForce® 7752 e  $t_{p2}=3$  mm [3].

Como se pode observar na Figura 75 e Figura 76, as roturas dos provetes ligados com SikaForce® 7752 também foram coesivas. No provete à esquerda apresentado na Figura 76, é possível observar a ausência de adesivo numa pequena zona, fenómeno que poderá ter ocorrido devido a uma preparação superficial deficiente. Para os provetes com  $t_{p2}=2$  mm e  $t_{p2}=3$  mm, também ocorreu rotura coesiva.

### 3.1.5.3 Resistência das juntas

A Figura 77 apresenta a média e desvio padrão de  $P_m$  das juntas ligadas com Aradite® AV138 em função de  $t_{p2}$ .

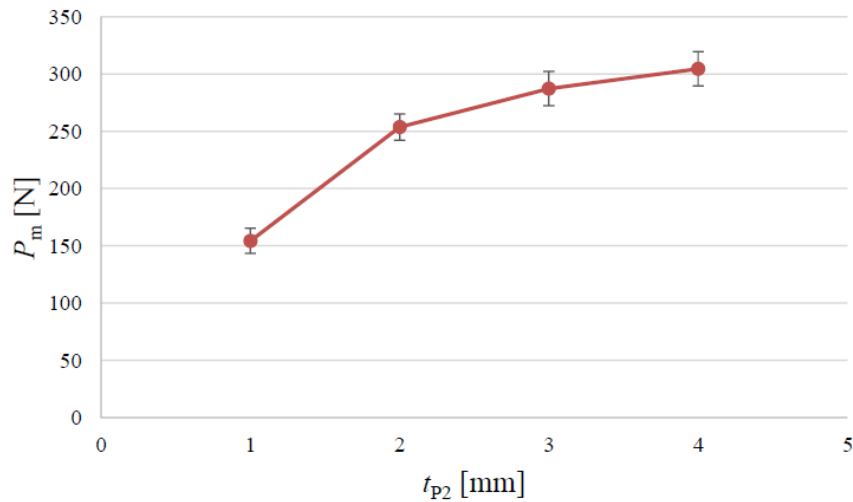


Figura 77 - Valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente das juntas ligadas com Araldite® AV138 em função de  $t_{p2}$  [3].

Como se pode observar na Figura 77, à medida que  $t_{p2}$  aumenta, a carga máxima também aumenta, ou seja, também aumenta a resistência da junta. Mas, pelo que é possível observar, a curva tende a atingir um valor constante.

A Figura 78 apresenta a média e desvio padrão de  $P_m$  das juntas ligadas com SikaForce® 7752 em função de  $t_{p2}$ .

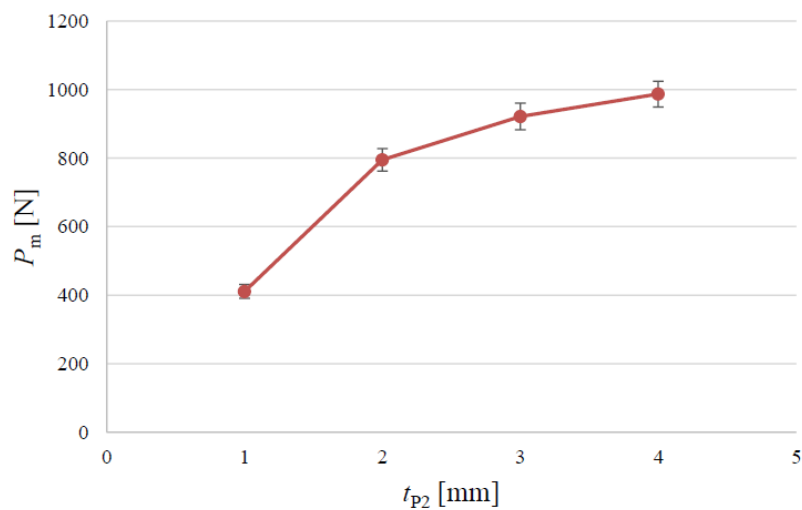


Figura 78 - Valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente das juntas ligadas com SikaForce® 7752 em função de  $t_{p2}$  [3].

Como se pode verificar na Figura 78, à medida que aumenta  $t_{p2}$  também aumenta  $P_m$ . Tal como foi verificado no caso das juntas ligadas com Araldite® AV138, o valor de  $P_m$  também tende a atingir um valor constante com o aumento de  $t_{p2}$ , no entanto, entre  $t_{p2}=1$  mm e  $t_{p2}=2$  mm verifica-se um declive maior nas juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752.

### 3.1.5.4 Análise dos resultados obtidos

Pelos resultados obtidos, verifica-se que, à medida que o valor de  $t_{p2}$  aumenta, o valor de  $P_m$  também aumenta e este comportamento é semelhante para ambos os adesivos. Para as duas situações, ou seja, utilizando qualquer um dos adesivos, entre  $t_{p2}=1$  mm e  $t_{p2}=2$  mm, foi observado um aumento acentuado da resistência da junta, embora, à medida que o  $t_{p2}$  aumenta,  $P_m$  tende para um valor constante.

Recorrendo aos resultados apresentados no trabalho prático, a Tabela 12 apresenta os valores de aumento percentual de  $P_m$  para juntas ligadas com os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, tendo como referência o valor de  $P_m$  para  $t_{p2}=1$  mm nos dois tipos de juntas. Pelos resultados obtidos na Tabela 12, verifica-se um aumento percentual de  $P_m$  maior no caso das juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 12 - Aumento percentual de  $P_m$  em cada adesivo para os diferentes  $t_{p2}$  [3].

Adesivo	Aumento percentual de $P_m$ (%)			
	$t_{p2}=1$ mm	$t_{p2}=2$ mm	$t_{p2}=3$ mm	$t_{p2}=4$ mm
<b>Araldite® AV138</b>	-	93,5	124,3	140,1
<b>SikaForce® 7752</b>	-	64,5	86,6	97,5

Comparando a resistência entre o Araldite® AV138 e o SikaForce® 7752, verifica-se que o SikaForce® 7752 atingiu valores de  $P_m$  superiores em 266,3%, 313,4%, 320,7% e 323,9% para os valores de  $t_{p2}$  de 1, 2, 3 e 4 mm, respetivamente. Tendo em conta a natureza dos dois adesivos, os resultados obtidos experimentalmente são coerentes visto que o adesivo SikaForce® 7752 é altamente dúctil e por isso resiste mais aos efeitos de arrancamento do que o Araldite® AV138 que é um adesivo frágil e, portanto, mais sensível a este tipo de solicitações.

## 3.2 Trabalho numérico

### 3.2.1 Condições da análise numérica

A análise numérica presente neste estudo, cujo objetivo foi prever a resistência de juntas em L, foi realizada utilizando o MEFX com recurso ao *software* ABAQUS®. O MEFX possui diversos critérios de iniciação de dano, que foram descritos previamente no capítulo 2.2.5, e todos eles são aplicados nesta análise. Nos modelos bidimensionais (2D) criados no *software*, o adesivo e os aderentes foram modelados como sólidos (Figura 79).

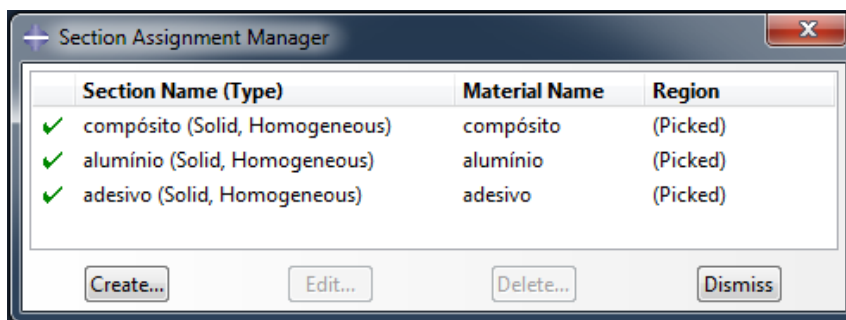


Figura 79 – Tipos de elementos dos constituintes da junta adesiva no ABAQUS®.

Após a criação dos modelos 2D e a atribuição do tipo de elementos a cada constituinte da junta, foram atribuídas as propriedades mecânicas dos materiais utilizados neste estudo. A Tabela 13 apresenta as propriedades mecânicas da liga de alumínio que foram usadas no *software*.

Tabela 13 - Propriedades da liga de alumínio usadas no ABAQUS®.

$E$ [GPa]	$\sigma_y$ [MPa]	$\sigma_f$ [MPa]	$\nu$
70,07	261,67	324	0,3

As propriedades do CFRP utilizadas no ABAQUS® são as mesmas que foram apresentadas anteriormente na Tabela 8. As propriedades atribuídas aos adesivos no ABAQUS® são apresentadas nos capítulos 3.2.2.1.1. e 3.2.2.1.2. para o Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, respectivamente.

O refinamento da malha considerada na análise de previsão de resistência difere da malha considerada na análise de tensões. No caso da análise de previsão de resistência é utilizada uma malha com 3810 nós e 3254 elementos. A malha utilizada na análise de tensões possui 78684 nós e 76780 elementos, ou seja, é muito mais refinada do que a malha dos modelos de análise de previsão de resistência, como demonstra a Figura 80. Este aspecto é importante pois permite registrar com precisão os elevados gradientes de tensões que são gerados ao longo da camada de adesivo. Para ambos os casos, a malha foi construída de forma a ser mais refinada nas zonas críticas da junta, sendo estas a zona dos aderentes mais próximas do adesivo, as extremidades da camada adesiva e a zona de curvatura do aderente de alumínio. O refinamento variável da malha permite obter resultados mais precisos nas zonas com maiores variações de tensão, que são aquelas com maior relevância, e também diminui o esforço computacional, o que permite uma redução de tempo de análise.

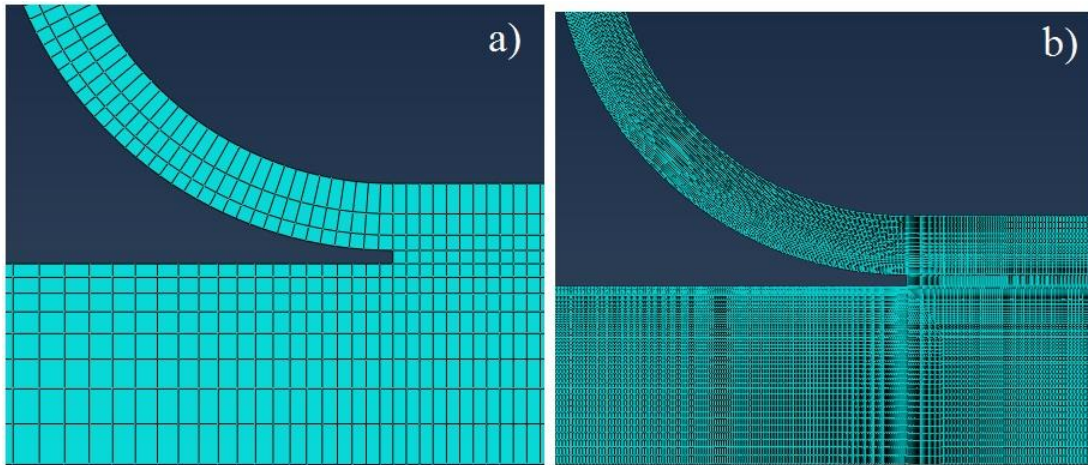


Figura 80 - Detalhe do refinamento das malhas para: a) análise de resistência e b) análise de tensões.

O refinamento da malha foi feito com recurso à função *bias*, que representa o rácio de refinamento ao longo de uma aresta do modelo. Esta função permite a gradação do tamanho dos elementos, podendo ser simples, quando se pretende refinar em apenas num sentido, ou dupla, quando se pretende refinar nos dois sentidos. A Figura 81 mostra um exemplo do efeito de gradação simples e dupla.

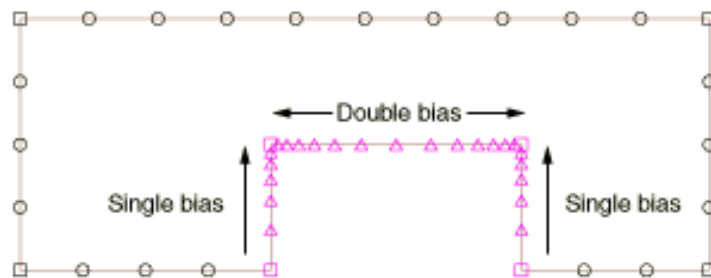


Figura 81 - Exemplo do efeito *bias* [33].

No caso da malha da análise de resistência, a camada de adesivo é composta por uma fila de elementos de tamanho  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ . No aderente em forma de L foi aplicada gradação simples no sentido da zona da camada de adesivo. Para este aderente foram utilizados 3 elementos e um rácio de *bias* de 2. A Figura 82 mostra o efeito *bias* aplicado ao aderente de alumínio, onde é possível observar que o refinamento está a ser aplicado na direção da camada de adesivo, a zona mais crítica da junta.

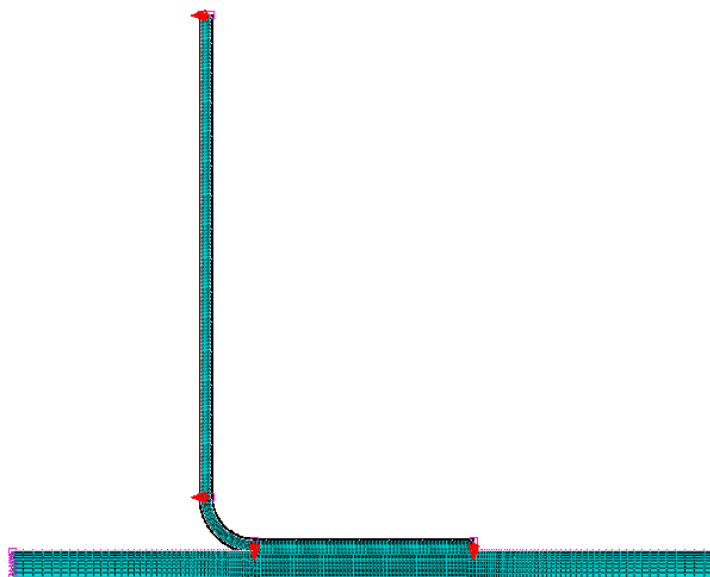


Figura 82 - Sentido do efeito bias da malha no aderente de alumínio.

Posteriormente, a malha foi refinada de forma crescente na região relativa à espessura do aderente de CFRP no sentido da camada de adesivo (Figura 83). O refinamento nesta região foi feito com 8 elementos e um rácio de *bias* de 3. Ainda no aderente de CFRP, foi aplicado um refinamento crescente na região relativa ao seu comprimento, também no sentido da camada adesiva (Figura 84). Neste refinamento, foram utilizados 50 elementos e um rácio de *bias* de 6.

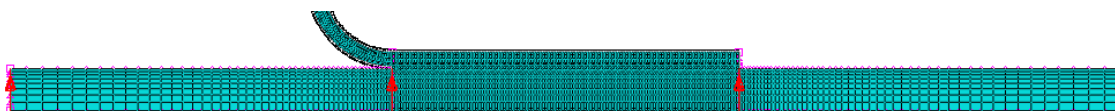


Figura 83 - Sentido do efeito *bias* da malha ao longo da espessura do aderente de CFRP.

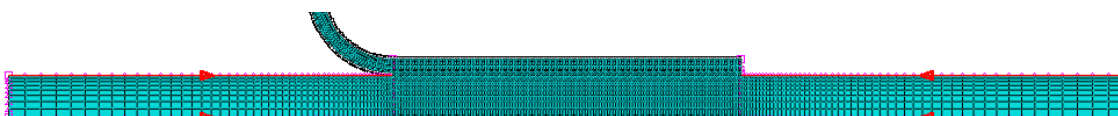


Figura 84 - Sentido do efeito *bias* da malha ao longo do comprimento do aderente de CFRP.

De forma a simular as condições reais dos ensaios experimentais, as condições fronteira e de carregamento impostas aos modelos numéricos foram aplicadas da seguinte forma: encastramento das extremidades do aderente de CFRP e restrição horizontal e deslocamento de tração na extremidade superior do aderente de alumínio. A Figura 85 apresenta as condições fronteira e de carregamento impostas aos modelos numéricos no ABAQUS®.

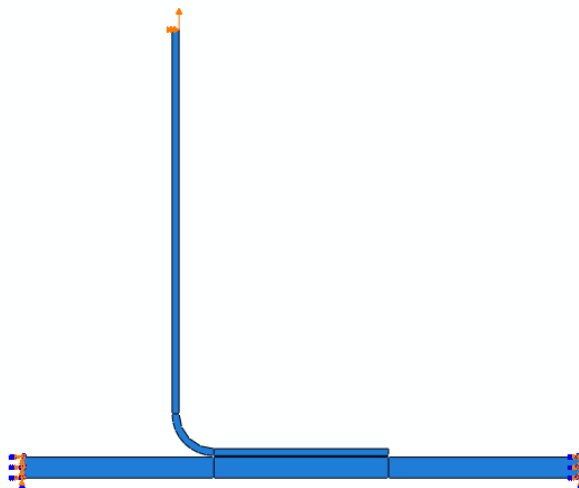


Figura 85 - Condições fronteira e de carregamento impostas aos modelos numéricos.

Após o refinamento da malha e a aplicação das condições fronteira e de carregamento, foi necessário definir a incrementação da análise numérica. É importante definir um limite mínimo reduzido de forma a evitar problemas de convergência na zona de propagação de dano e também um limite máximo elevado para que a simulação não termine sem que se obtenham os resultados pretendidos. A Tabela 14 apresenta os valores utilizados na incrementação da análise numérica no ABAQUS®.

Tabela 14 - Definição de incrementação no ABAQUS®.

<b>Número máximo de incrementos</b>	10000
<b>Tamanho inicial do incremento</b>	0,0025
<b>Tamanho mínimo do incremento</b>	$10^{-20}$
<b>Tamanho máximo do incremento</b>	0,0025

### 3.2.2 Modelo de dano utilizado

Enquanto a formulação teórica do MEFX utilizada neste trabalho foi definida anteriormente nos capítulos 2.2.5.1 e 2.2.5.2, no presente subcapítulo pretende-se descrever o modelo de dano utilizado e as propriedades dos adesivos utilizadas para o estudo de MEFX. 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

comparados com os respectivos valores limite dos adesivos. Conforme apresentado nos capítulos 2.2.5.1 e 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 QUAE 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. 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. Para os restantes critérios, como será detalhado posteriormente, será possível escolher a direção de propagação de dano entre as duas direções principais locais dos elementos enriquecidos.

### 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  $E$ ,  $\nu$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  mas também  $\sigma_{max}$  e  $\epsilon_{max}$ , 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,  $\sigma_{max}$  foi considerado igual à tensão de rotura à tração e  $\epsilon_{max}$  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 15.

Tabela 15 - Parâmetros utilizados na análise de MEFX para o adesivo Araldite® AV138.

<b><math>E</math> [MPa]</b>	4890
<b><math>\nu</math></b>	0,3
<b><math>t_n^0</math> [MPa]</b>	39,45
<b><math>t_s^0</math> [MPa]</b>	30,2
<b><math>\epsilon_n^0</math> [%]</b>	1,21
<b><math>\epsilon_s^0</math> [%]</b>	7,8
<b><math>G_{IC}</math> [N/mm]</b>	0,2
<b><math>G_{IIC}</math> [N/mm]</b>	0,38
<b><math>\sigma_{max}</math> [MPa]</b>	39,45
<b><math>\epsilon_{max}</math> [%]</b>	1,21

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  $\sigma_{max}$ . Nos critérios baseados na deformação (MAXPE, MAXE e QUADE) utilizaram-se os valores dos parâmetros  $\epsilon_n^0$ ,  $\epsilon_s^0$ ,  $G_{IC}$ ,  $G_{IIC}$  e  $\epsilon_{max}$ .

### 3.2.2.1.2 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.

<b><math>E</math> [MPa]</b>	493,81
<b><math>\nu</math></b>	0,32
<b><math>t_n^0</math> [MPa]</b>	11,49
<b><math>t_s^0</math> [MPa]</b>	10,17
<b><math>\epsilon_n^0</math> [%]</b>	13,92
<b><math>\epsilon_s^0</math> [%]</b>	54,82
<b><math>G_{IC}</math> [N/mm]</b>	2,36
<b><math>G_{IIC}</math> [N/mm]</b>	5,41
<b><math>\sigma_{max}</math> [MPa]</b>	11,49
<b><math>\epsilon_{max}</math> [%]</b>	13,92

Para a análise de MEFX em juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752, conforme o critério de iniciação de dano a utilizar, usaram-se os valores dos mesmos parâmetros utilizados no caso das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138.

### 3.2.3 Análise de tensões na junta

A análise de tensões nas juntas, realizada com recurso ao *software* ABAQUS®, consiste em estudar a distribuição de tensões de arrancamento ( $\sigma_y$ ) e de corte ( $\tau_{xy}$ ) considerando os quatro diferentes valores que  $t_{p2}$  pode assumir, de forma a compreender a variação de resistência para as diversas configurações de junta. A análise foi realizada no plano médio da espessura de adesivo  $e$ , de forma a obter uma maior precisão nos resultados, tal como foi referido anteriormente, foi necessário refinar a malha. Nesta análise, as distribuições de tensões estão normalizadas. Para isso, dividiram-se as tensões  $\sigma_y$  e  $\tau_{xy}$  pela tensão de arrancamento média ( $\sigma_{avg}$ ) para o valor de  $t_{p2}$  respetivo. O comprimento de adesivo  $L_0$  também foi normalizado ( $x/L_0$ ), dividindo a distância desde a extremidade solicitada da camada de adesivo pelo comprimento total (Figura 58). O intervalo do gráfico é dado por  $0 \leq x/L_0 \leq 1$ , em que  $x/L_0=0$  representa a extremidade solicitada da camada de adesivo e  $x/L_0=1$  representa a extremidade mais distante da solicitação.

#### 3.2.3.1 Tensões de arrancamento

A Figura 86 e a Figura 87 mostram a distribuição de tensões de arrancamento na junta adesiva ligada com os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, respetivamente, em função de  $t_{p2}$ . Pelos resultados obtidos, verifica-se que para as quatro configurações de junta diferentes, ou seja, diferentes valores de  $t_{p2}$ , é gerada uma maior concentração de tensões na extremidade sujeita à solicitação, visto que os picos de tensões são registados quando  $x/L_0$  é aproximadamente nulo. Isto deve-se ao facto da solicitação aplicada ser de arrancamento, o que faz com que as tensões fiquem concentradas numa região reduzida na extremidade esquerda da camada de adesivo. Este fenómeno é característico das solicitações de arrancamento [62]. A partir de  $x/L_0=0$ , a tensão começa a diminuir de uma forma similar para os diferentes valores de  $t_{p2}$  até atingir um valor de tensão nulo, que acontece entre  $0,2 \leq x/L_0 \leq 0,4$  no caso da junta com Araldite® AV138, e entre  $0,4 \leq x/L_0 \leq 0,6$ , no caso da junta com SikaForce® 7752. Portanto, para juntas ligadas com Araldite® AV138, as tensões apenas são significativas até 40% de  $L_0$  enquanto para juntas ligadas com SikaForce® 7752, as tensões são significativas até 60% de  $L_0$ . Por outro lado, regista-se um valor de tensão aproximadamente nulo até  $x/L_0=1$ , ou seja, até à outra extremidade da camada de adesivo. Os resultados apresentados na Figura 86 e na Figura 87, no que toca à forma das curvas, são semelhantes aos resultados obtidos num trabalho anterior para a mesma geometria de junta [62].

O pico de tensão com maior magnitude verifica-se na junta com  $t_{p2}=1$  mm e, à medida que o valor de  $t_{p2}$  aumenta, o pico de tensões regista uma magnitude progressivamente inferior. Estes resultados são validados pelos resultados obtidos anteriormente [63], nos

quais também se verifica que quanto maior for a espessura do aderente em L, menor é o valor de tensão na junta. Tendo como base o valor de tensão de arrancamento normalizada máxima para  $t_{p2}=1$  mm, para as juntas ligadas com Araldite® AV138, o decréscimo percentual para  $t_{p2}=2$  mm foi de 33,2%, para  $t_{p2}=3$  mm foi de 39,9% e para  $t_{p2}=4$  mm foi de 42,9%. No caso das juntas ligadas com SikaForce® 7752, o decréscimo percentual para  $t_{p2}=2$  mm foi de 32,1%, para  $t_{p2}=3$  mm foi de 38,7% e para  $t_{p2}=4$  mm foi de 40,9%. Nesta análise de tensões de arrancamento, verifica-se que as tensões geradas nas juntas ligadas com SikaForce® 7752 são menores do que as tensões nas juntas ligadas com Araldite® AV138, fenómeno que se deve ao facto do Araldite® AV138 ser mais rígido. Tendo como base os valores de tensão normalizada máxima das juntas ligadas com Araldite® AV138, o decréscimo percentual da tensão normalizada máxima nas juntas com SikaForce® 7752 foi de 47,3% para  $t_{p2}=1$  mm, 46,5% para  $t_{p2}=2$  mm, 46,2% para  $t_{p2}=3$  mm e 45,4% para  $t_{p2}=4$  mm.

Como se pode observar na Figura 87, as tensões estendem-se mais para o interior da junta no caso de juntas ligadas com SikaForce® 7752, ou seja, este adesivo é capaz de distribuir as tensões de uma forma mais uniforme e por uma área de sobreposição superior. Este fenómeno ocorre devido à deformação plástica e resulta em juntas mais resistentes do que aquelas ligadas com adesivos frágeis como o Araldite® AV138.

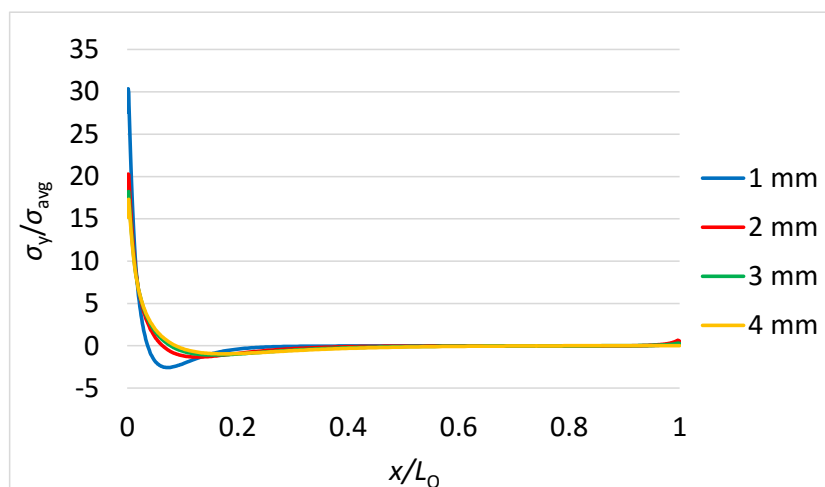


Figura 86 - Distribuição de tensões de arrancamento no plano médio da espessura para juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 em função de  $t_{p2}$ .

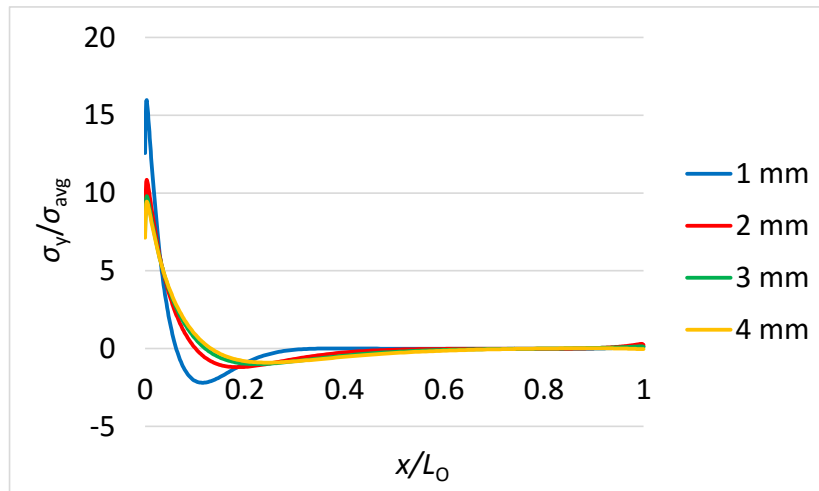


Figura 87 - Distribuição de tensões de arrancamento no plano médio da espessura para juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de  $t_{P2}$ .

### 3.2.3.2 Tensões de corte

A Figura 88 e a Figura 89 mostram a distribuição de tensões de corte na junta adesiva ligada com os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, respetivamente, em função de  $t_{P2}$ .

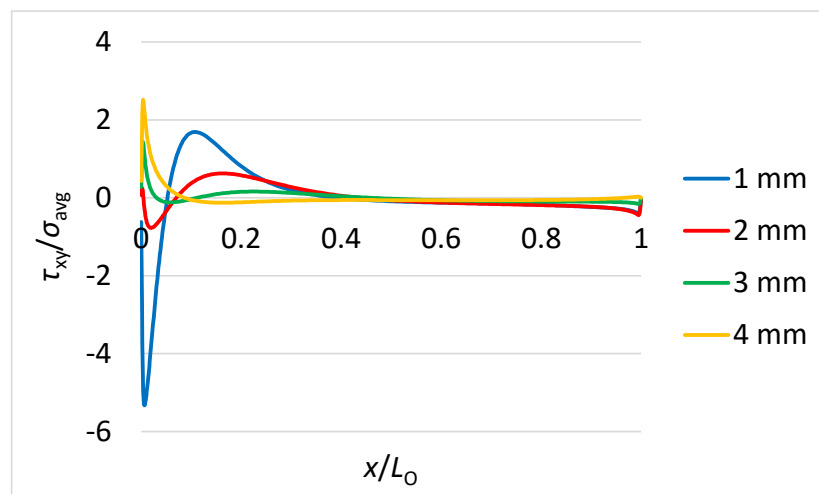


Figura 88 - Distribuição de tensões de corte no plano médio da espessura para juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 em função de  $t_{P2}$ .

Pela Figura 88 verifica-se que a tensão normalizada máxima varia entre um valor negativo de cerca de 5,5 até um valor positivo de aproximadamente 2,5, no caso das juntas ligadas com Araldite® AV138. Como se pode observar, o pico de tensão com maior magnitude regista-se na junta com  $t_{P2}=1$  mm, seguido pelas juntas com um valor de  $t_{P2}$  de 4, 3 e por fim 2 mm. As tensões de corte registadas apenas são significativas até 40% de  $L_0$ .

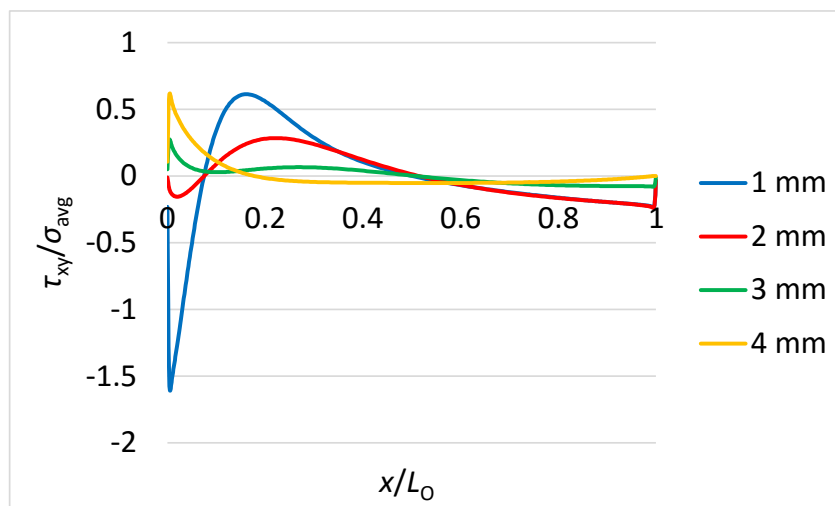


Figura 89 - Distribuição de tensões de corte no plano médio da espessura para juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 em função de  $t_{p2}$ .

Conforme se pode observar na Figura 89, nas juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 o pico de tensão de corte com maior magnitude ocorre para  $t_{p2}=1$  mm, seguindo-se as juntas com um valor de  $t_{p2}$  de 4, 2 e 3 mm, pela ordem apresentada. A queda de tensão de corte ocorre de uma forma mais gradual quando se utiliza o SikaForce® 7752 quando comparado com o Araldite® AV138. Esta característica comprova a natureza flexível do poliuretano. Tal como acontece com as tensões de arrancamento, registam-se picos de tensão mais elevados nas juntas ligadas com Araldite® AV138 quando se realiza uma análise de tensões de corte. Este comportamento é representativo da maior rigidez do adesivo Araldite® AV138, em comparação com o SikaForce® 7752.

Das análises de tensões de arrancamento e de corte, conclui-se que as tensões de corte são residuais já que, pela geometria e pelos resultados obtidos, esta junta está principalmente sujeita a arrancamento, e por isso as propriedades que mais influenciam a resistência das juntas são a resistência à tração e a tenacidade à tração [64].

#### 3.2.4 Previsão da resistência

O presente subcapítulo tem como objetivo avaliar a capacidade do MEFX em prever a resistências das juntas adesivas estudadas nesta dissertação e explicar de forma detalhada os resultados obtidos. Foram consideradas as juntas com os diferentes valores de  $t_{p2}$  (1, 2, 3 e 4 mm) e os dois adesivos em estudo. De forma a avaliar a previsão da resistência de juntas adesivas utilizando o MEFX, foi realizado um estudo do efeito do critério de iniciação e um estudo do efeito da lei de propagação. O estudo do efeito do critério de iniciação consiste na aplicação dos seis critérios de dano do MEFX, apresentados anteriormente, e na comparação entre estes e os resultados obtidos experimentalmente. O estudo do efeito da lei de propagação 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. Os resultados numéricos obtidos neste trabalho utilizando o MEFX são posteriormente comparados com os resultados numéricos obtidos num estudo anterior [3] em que são aplicados MDC.

### 3.2.4.1 Estudo do efeito do critério de iniciação

Da Figura 90 à Figura 95 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas em função de  $t_{p2}$  para cada critério de iniciação de dano considerado nas juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138.

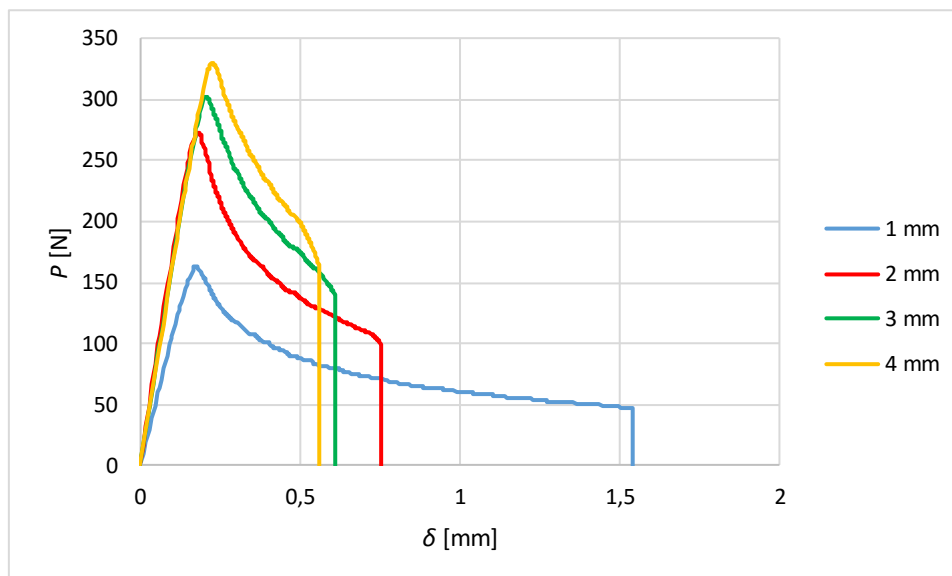


Figura 90 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$  (critério QUADS).

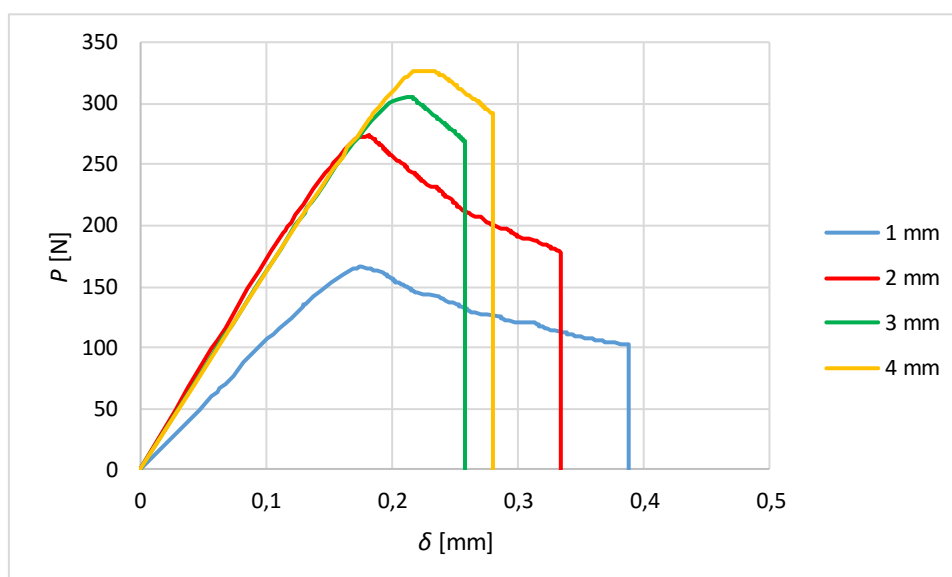


Figura 91 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$  (critério MAXS).

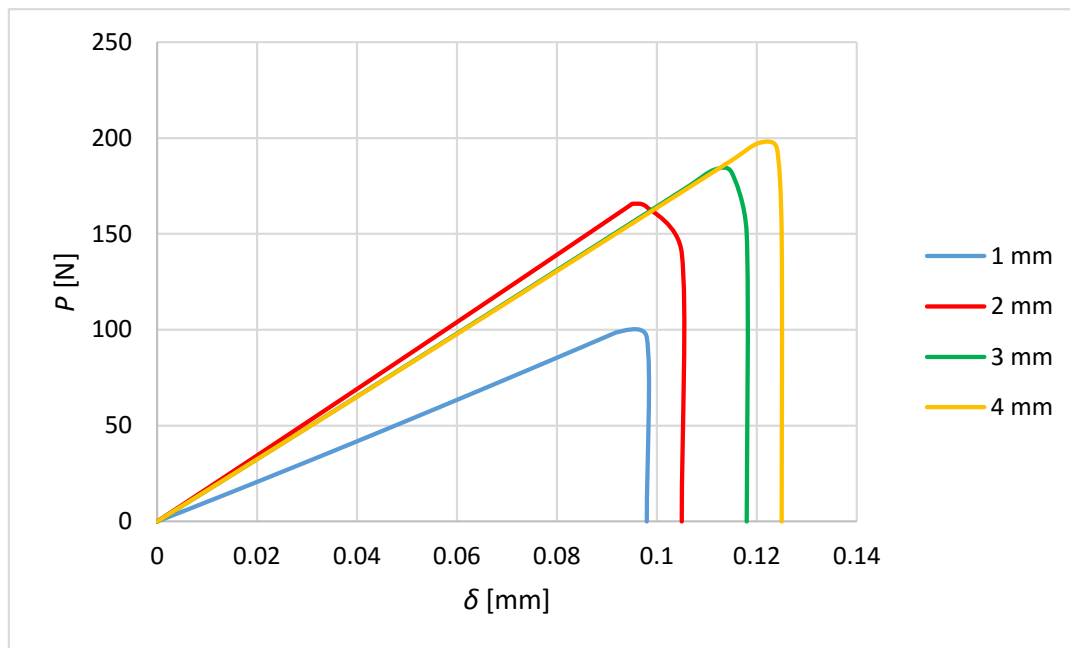


Figura 92 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$  (critério MAXPS).

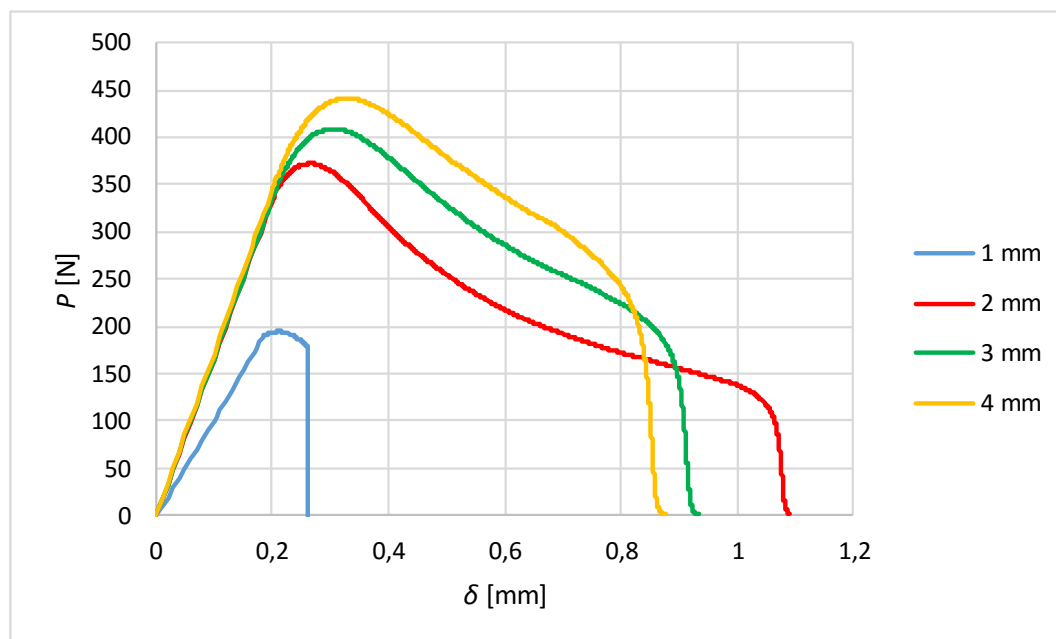


Figura 93 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$  (critério QUADE).

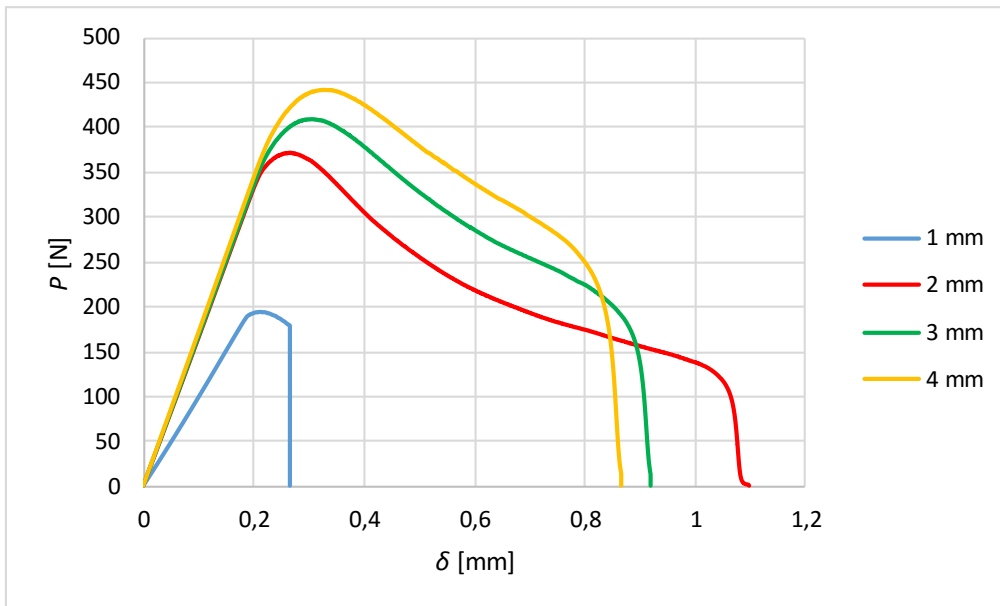


Figura 94 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$  (critério MAXE).

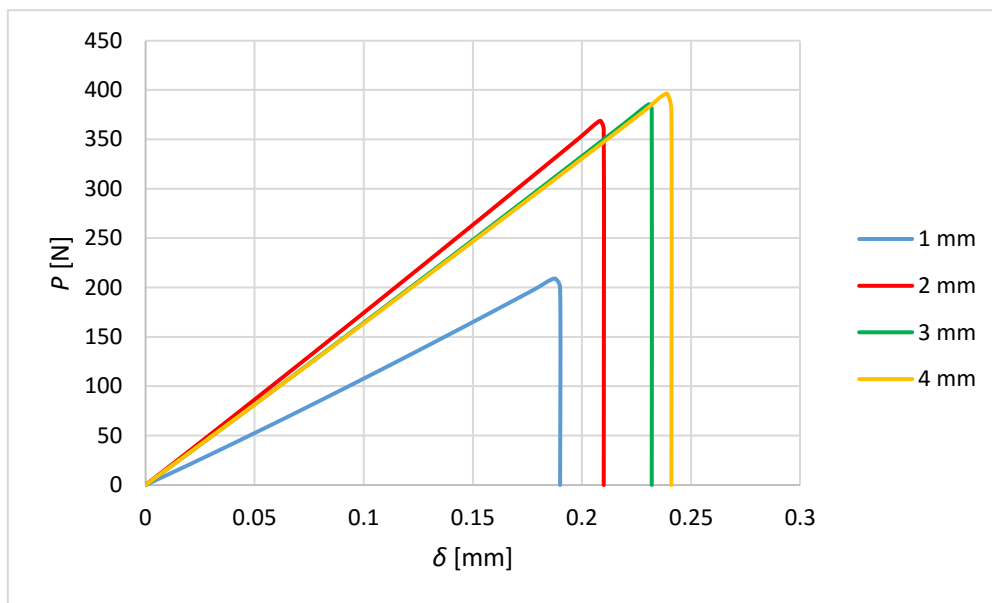


Figura 95 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$  (critério MAXPE).

Da Figura 96 à Figura 101 são apresentadas as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas em função de  $t_{p2}$  para cada critério de iniciação de dano considerado nas juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752.

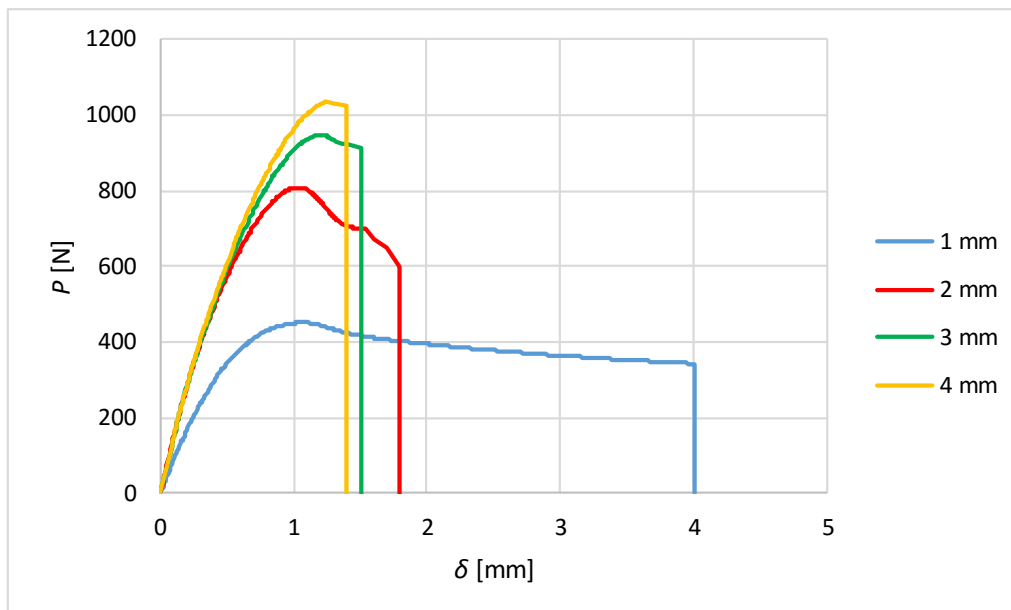


Figura 96 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o SikaForce® 7752 função de  $t_{p2}$  (critério QUADS).

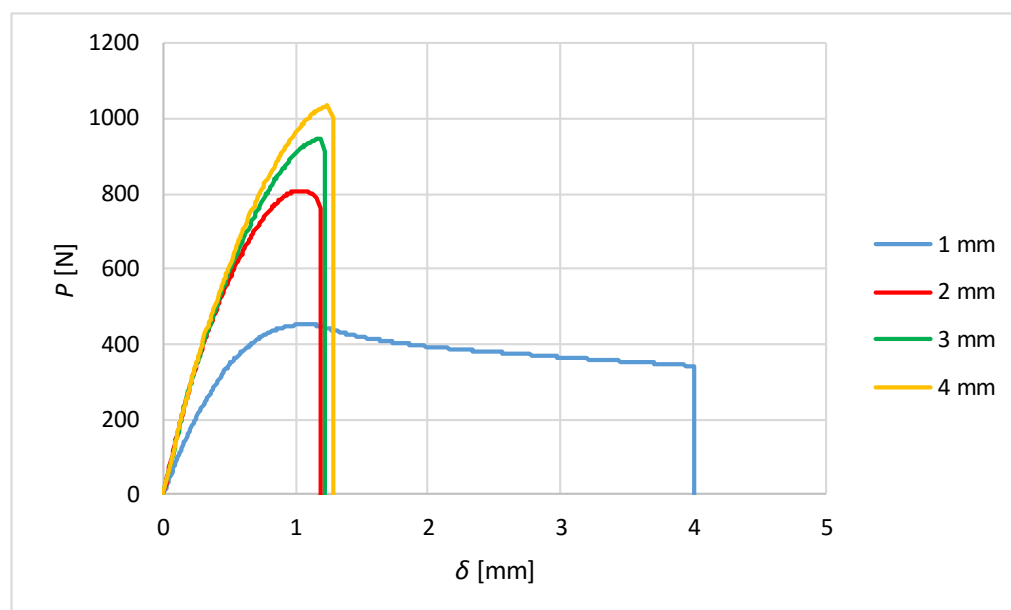


Figura 97 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o SikaForce® 7752 função de  $t_{p2}$  (critério MAXS).

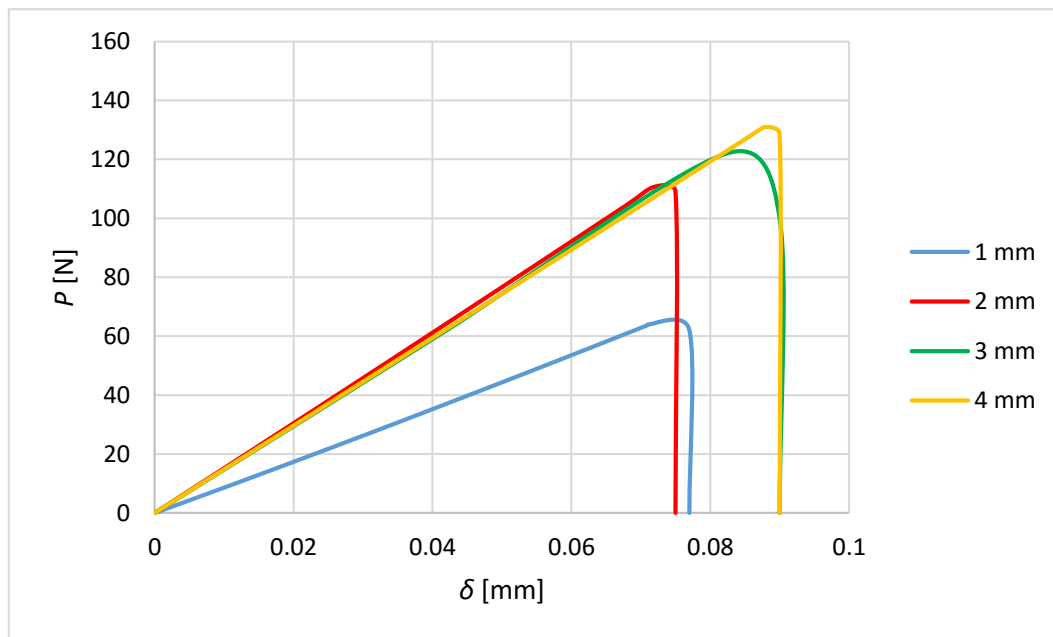


Figura 98 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o SikaForce<sup>®</sup> 7752 função de  $t_{p2}$  (critério MAXPS).

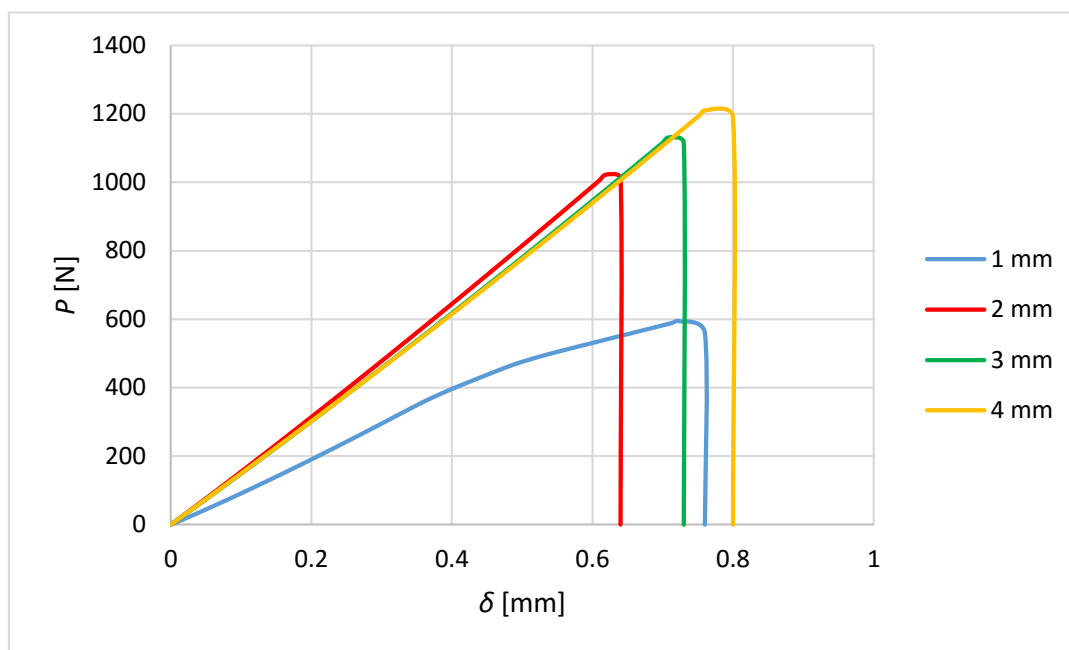


Figura 99 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o SikaForce<sup>®</sup> 7752 função de  $t_{p2}$  (critério QUADE).

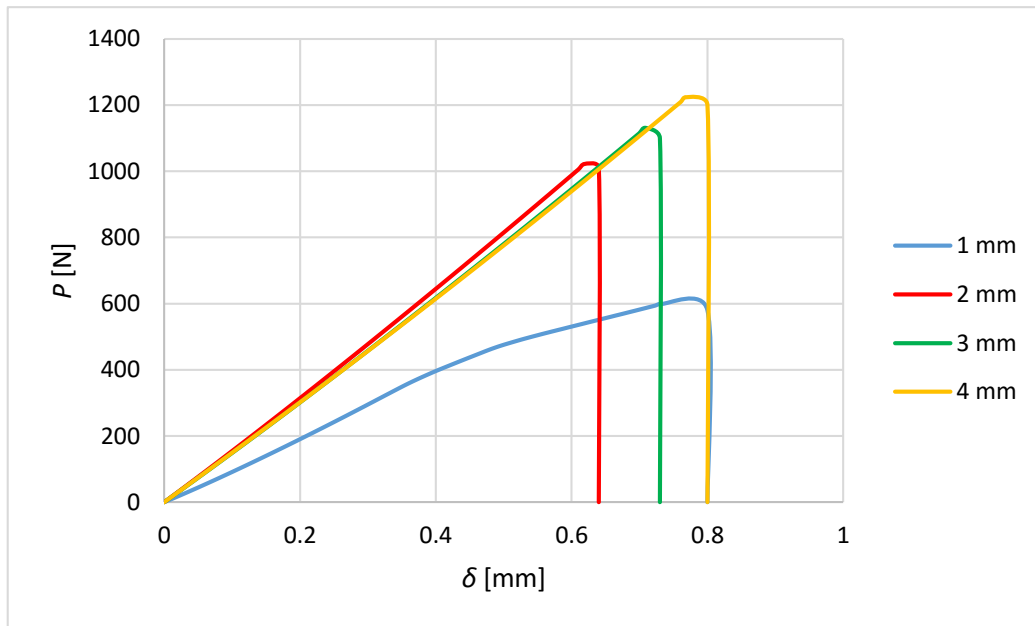


Figura 100 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o SikaForce® 7752 função de  $t_{p2}$  (critério MAXE).

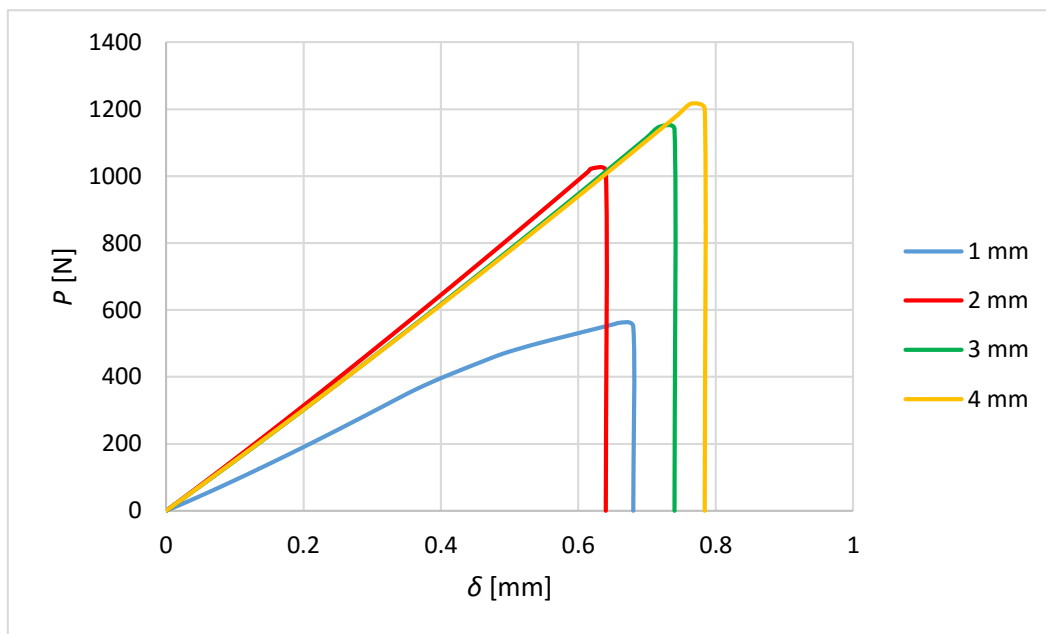


Figura 101 - Curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para juntas ligadas com o SikaForce® 7752 função de  $t_{p2}$  (critério MAXPE).

A Figura 102 mostra a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respectivas previsões numéricas dos diferentes critérios de dano do MEFX, em função de  $t_{p2}$ , para as juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138.

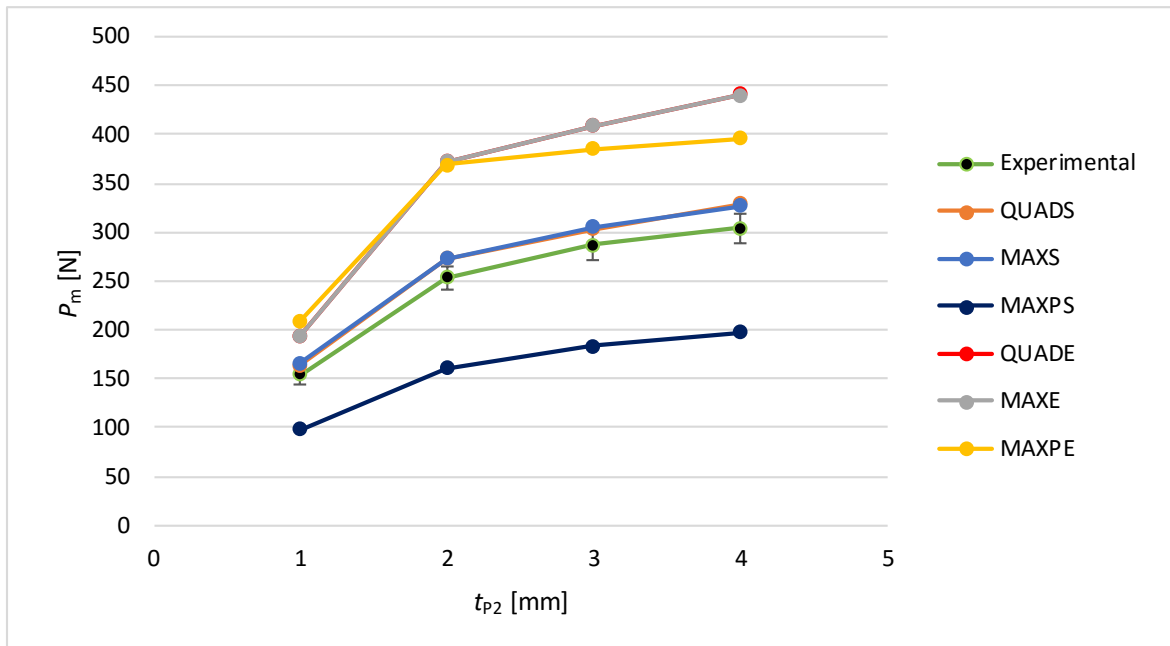


Figura 102 - Valores de  $P_m$  experimentais e respectivas previsões numéricas para juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$ .

Os valores de  $P_m$  dos critérios QUADS e MAXS são os mais aproximados aos valores obtidos experimentalmente e são ligeiramente superiores ao limite máximo do intervalo dos valores experimentais. Tendo como base os valores obtidos experimentalmente, para o critério QUADS e para os quatro valores de  $t_{p2}$  (1, 2, 3 e 4 mm), a variação percentual foi de 6,9%, 7,7%, 5,4% e 8,2%, respetivamente. Na aplicação do critério MAXS, foram registados valores de variação percentual de 7,5%, 7,8%, 6,4% e 7,2% para  $t_{p2}=1, 2, 3$  e 4 mm, respetivamente. A variação entre os critérios MAXS e QUADS é tão reduzida que a curva relativa ao critério MAXS sobrepõe-se à curva relativa ao QUADS, como se pode observar na Figura 102. O outro critério baseado nas tensões, MAXPS, demonstrou ser um critério bastante desajustado, com uma variação percentual máxima de -59,9%. Os critérios baseados na deformação, QUADE, MAXE e MAXPE, sobrestimaram os valores de  $P_m$ . Os valores de variação percentual máxima foram 46,8%, 46,8% e 45,3% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

A Figura 103 mostra a comparação entre os valores de  $P_m$  obtidos experimentalmente e as respetivas previsões numéricas dos diferentes critérios de dano do MEFX, em função de  $t_{p2}$ , para as juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752.

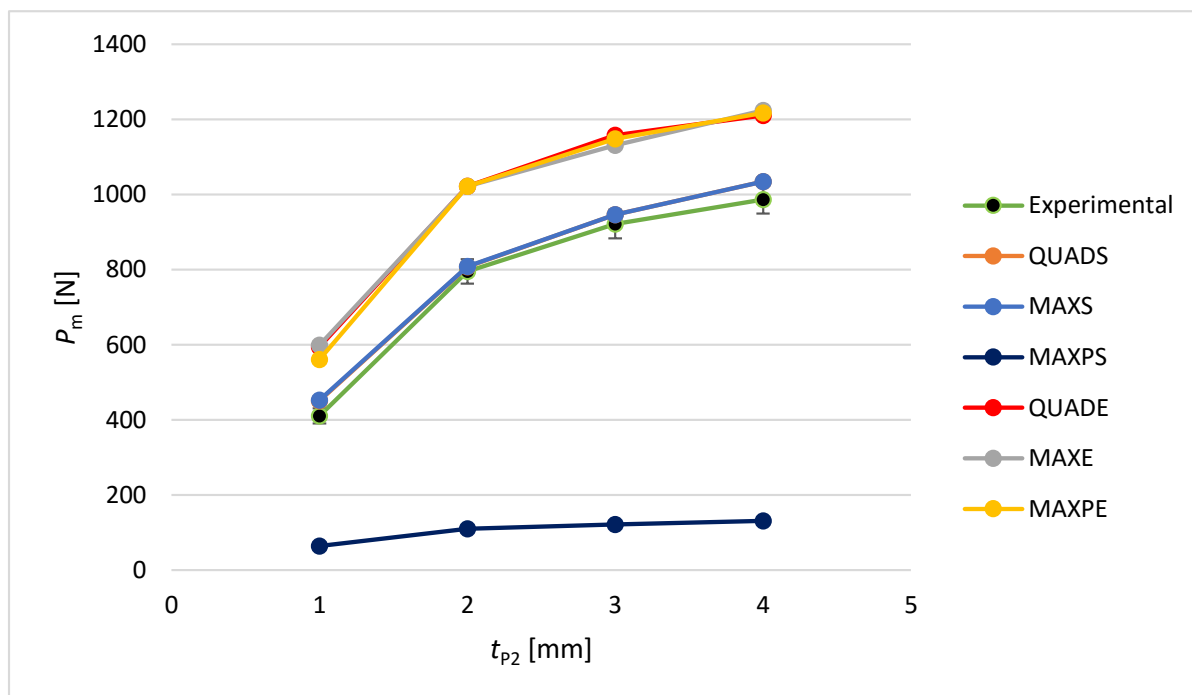


Figura 103 - Valores de  $P_m$  experimentais e respectivas previsões numéricas para juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 função de  $t_{p2}$ .

As previsões numéricas obtidas nas juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 apresentam um comportamento semelhante às previsões obtidas nas juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, embora com maiores valores de  $P_m$ , o que comprova que o SikaForce® 7752 proporciona juntas adesivas mais resistentes. Tal como acontece no caso das juntas ligadas com Araldite® AV138, os critérios de dano mais precisos foram o QUADS e MAXS e, neste caso, os valores numéricos estão dentro do intervalo dos valores experimentais. No caso do critério QUADS, a variação percentual foi de 9,7%, 1,6%, 2,7% e 4,8% para os valores de  $t_{p2}$  compreendidos entre 1 e 4 mm, respetivamente. Para o critério MAXS, a variação percentual foi de 10,1%, 1,6%, 2,7% e 4,8% para  $t_{p2}=1, 2, 3$  e 4 mm, respetivamente. Como se pode verificar, os valores de variação percentual entre os critérios QUADS e MAXS são bastante aproximados, o que resulta na sobreposição das curvas que se observa na Figura 103. O critério mais desajustado continua a ser o MAXPS, apresentando uma variação percentual máxima de -86,8%. A previsão segundo os três critérios de dano baseados nas deformações (QUADE, MAXE e MAXPE) apresentou valores relativamente aproximados entre eles, como se observar na Figura 103 pela sobreposição das curvas respetivas, mas bastante por excesso relativamente aos valores de  $P_m$  experimentais. Tendo como base os resultados experimentais, registou-se uma variação percentual máxima de 44,6%, 45,9 e 36,6% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respetivamente.

### 3.2.4.2 Estudo do efeito da lei de propagação

Para analisar a previsão de resistência utilizando a lei de propagação exponencial foi necessário alterar alguns parâmetros nos modelos do ABAQUS®. O amaciamento, designado por *softening*, na Figura 104 foi alterado de *Linear* (lei de propagação triangular) para *Exponential*. Também se pode observar na figura que o parâmetro *Power* difere. Na lei de propagação triangular é utilizado  $Power=1$  enquanto, aplicando a lei de propagação exponencial, o parâmetro *Power* assume os valores 0,5, 1 ou 2 de forma a testar diferentes critérios. A Figura 104 compara os parâmetros que diferem no estudo do efeito da lei de propagação.

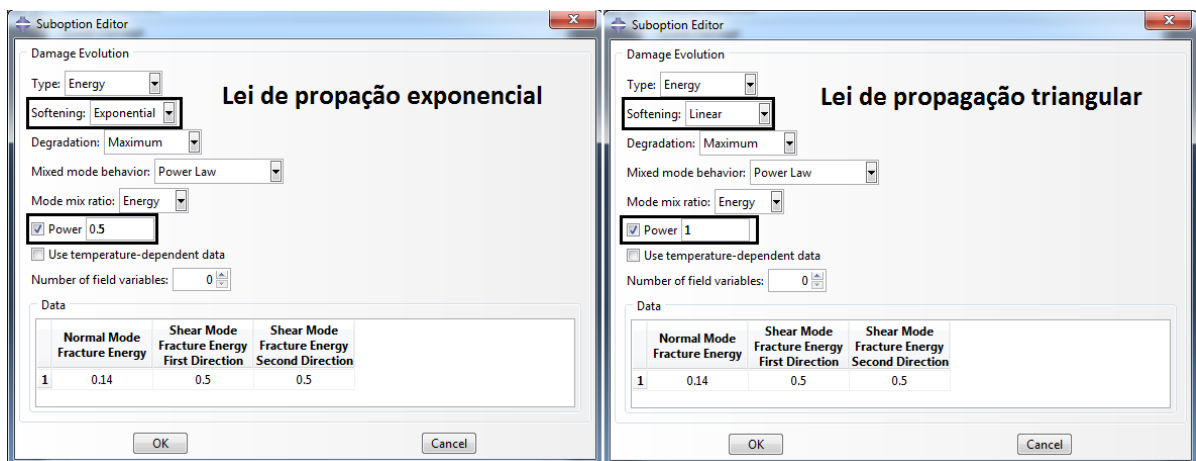


Figura 104 - Comparação dos parâmetros entre a lei triangular e exponencial.

A Figura 105 e a Figura 106 apresentam a comparação entre os valores de  $P_m$  utilizando a lei triangular, com os obtidos utilizando a lei de propagação exponencial, para juntas ligadas com os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, respectivamente. Os valores de  $P_m$  utilizados para representar a lei de propagação triangular são os valores obtidos com o critério QUADS, uma vez que este critério mostrou ser o mais preciso. Para validação dos resultados, estes valores são também comparados com os valores experimentais.

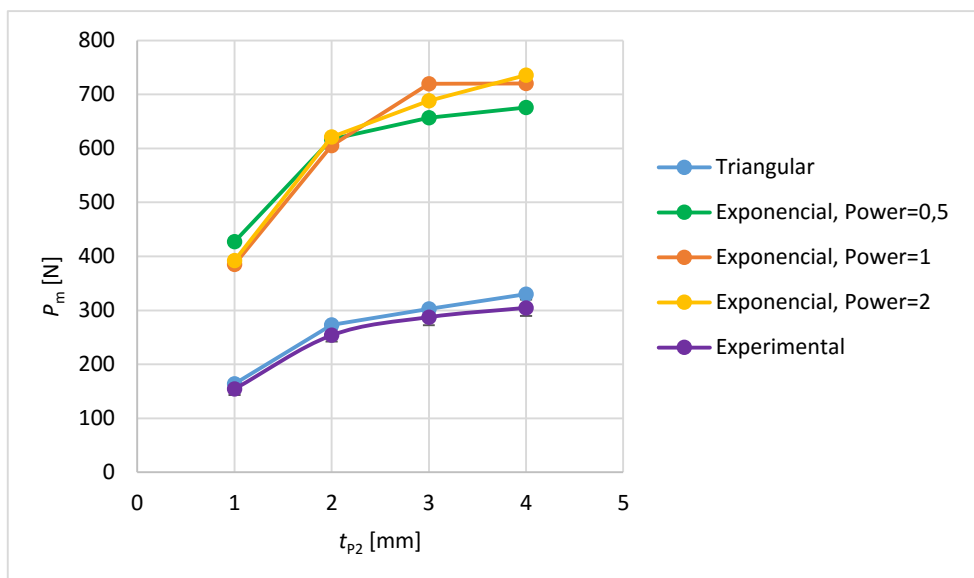


Figura 105 - Valores de  $P_m$  experimentais e previsões numéricas das leis triangular e exponencial para as juntas com o adesivo Araldite® AV138 função de  $t_{p2}$ .

No caso das juntas ligadas com Araldite® AV138, verifica-se que a lei de propagação exponencial sobrestima de forma acentuada os valores de  $P_m$ , para os três valores de  $P_m$ , para os três valores de  $P_m$  (Figura 105). Foi registada uma variação percentual máxima de 160,9%, 137,6% e 139,4% para  $Power=0,5$ ,  $Power=1$  e  $Power=2$ , respetivamente.

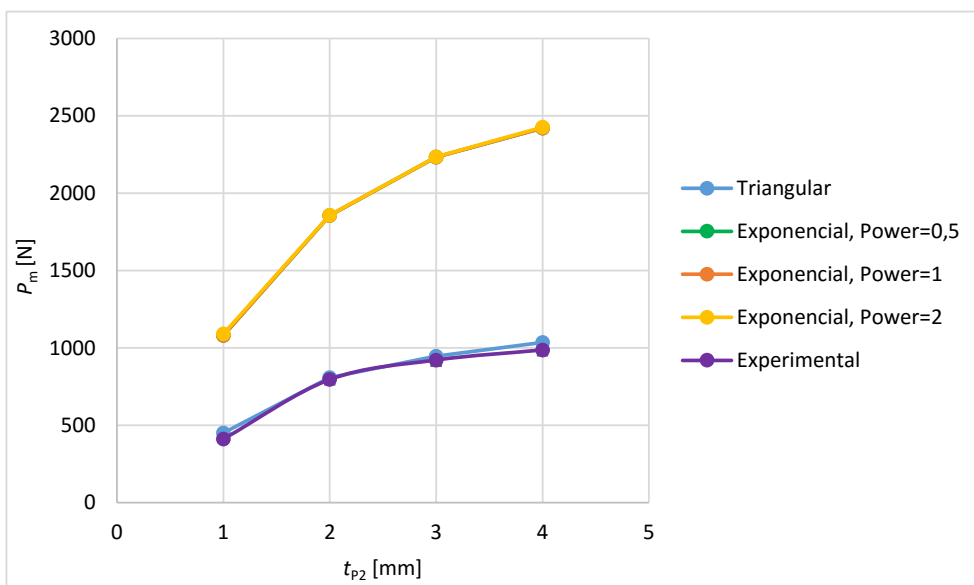


Figura 106 - Valores de  $P_m$  experimentais e previsões numéricas das leis triangular e exponencial para as juntas com o adesivo SikaForce® 7752 função de  $t_{p2}$ .

Tal como acontece com as juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, a previsão numérica utilizando a lei de propagação exponencial sobrestima os valores de  $P_m$  nas juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752 (Figura 106). Ao contrário do que se

verifica nas juntas com Araldite® AV138, as curvas  $P_m-t_{p2}$  são bastante aproximadas quando se varia o valor do parâmetro  $Power$ , o que se justifica pela ductilidade do adesivo, já que nestas condições a zona de dano estende-se por um comprimento maior na camada de adesivo. Foi registada uma variação percentual máxima de 139,5%, 139,5% e 141,9% para  $Power=0,5$ ,  $Power=1$  e  $Power=2$ , respetivamente.

### 3.2.4.3 Comparação dos resultados obtidos com modelos de dano coesivo

De forma a avaliar a capacidade e a precisão do MEFX em prever a resistência de juntas adesivas em L, os resultados obtidos numericamente utilizando o MEFX foram comparados com os resultados numéricos utilizando o MDC obtidos num trabalho anterior [3]. A Figura 107 e a Figura 108 apresentam a comparação 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 coladas com os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, respetivamente.

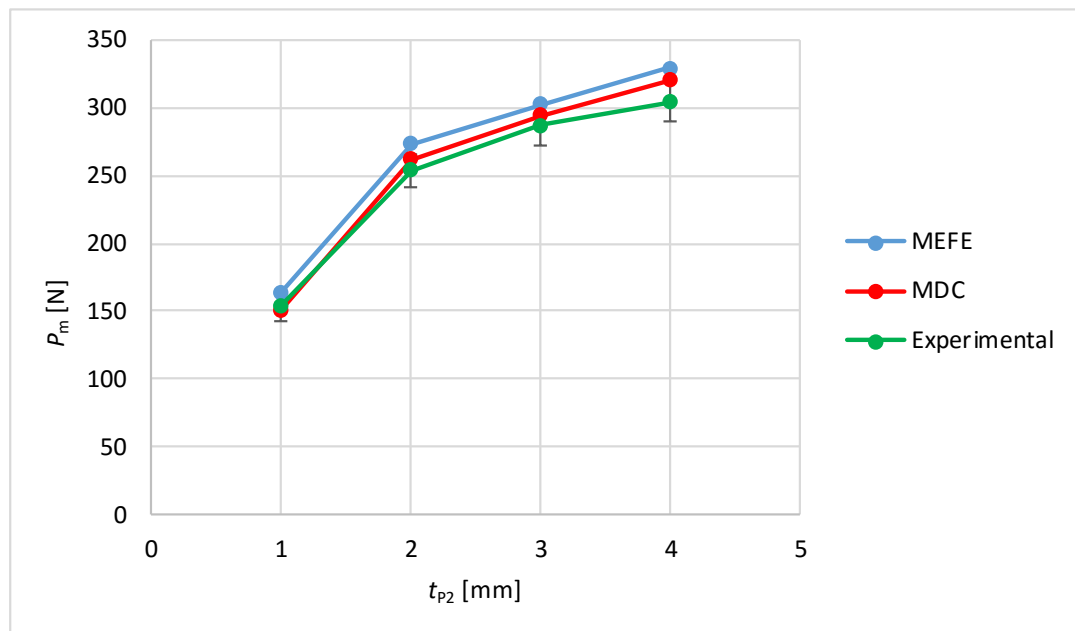


Figura 107 - Valores de  $P_m$  experimentais e respetivas previsões numéricas segundo o MEFX e MDC para juntas ligadas com Araldite® AV138.

Conforme se pode observar na Figura 107, para juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, o MEFX sobrestima ligeiramente o valor de  $P_m$  em comparação com o MDC. Em termos de variação percentual, para os valores de  $t_{p2}$  compreendidos entre 1 e 4 mm, os valores de  $P_m$  obtidos pelo MEFX são superiores aos do MDC em 8,1%, 4,3%, 2,7% e 2,8%, respetivamente. Tendo em conta estes resultados, verifica-se que o MEFX é capaz de prever a resistência de forma bastante aproximada relativamente ao MDC.

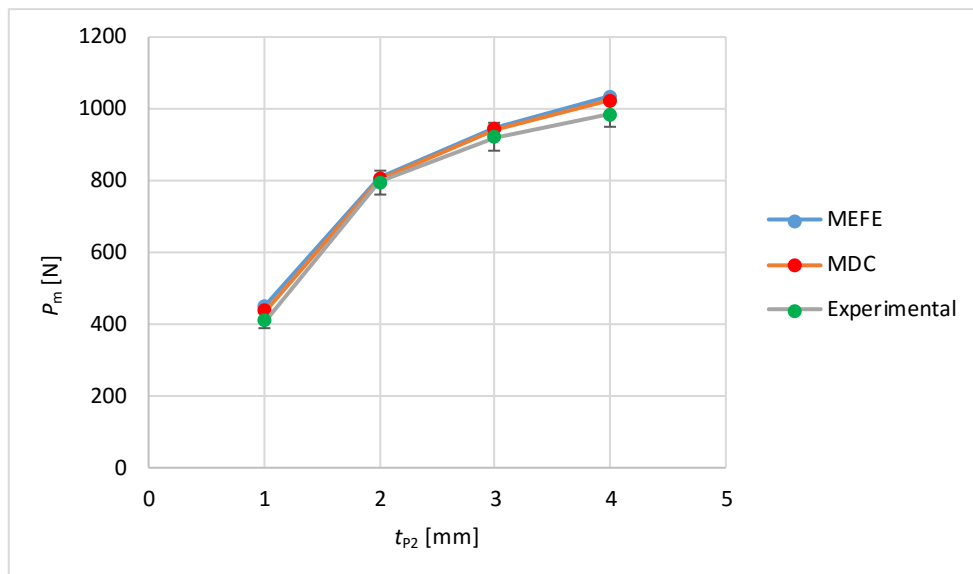


Figura 108 - Valores de  $P_m$  experimentais e respectivas previsões numéricas segundo o MEFX e MDC para juntas coladas com SikaForce® 7752.

No caso das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752 (Figura 108), verifica-se que o MEFX é capaz de prever a resistência com muita precisão quando comparado com o MDC. A variação percentual para os valores de  $t_{p2}$  compreendidos entre 1 e 4 mm, é 3,3%, 0,3%, 0,4% e 1,0%, respetivamente. Pela análise dos resultados obtidos, conclui-se que a previsão pelo MEFX é mais precisa, quando comparada com o MDC, para adesivos dúcteis (SikaForce® 7752) do que para adesivos frágeis (Araldite® AV138).

### 3.2.5 Análise dos resultados obtidos

Pelos resultados obtidos nos estudos realizados nesta dissertação, nomeadamente a análise de tensões, curvas  $P-\delta$  e previsão de resistência, é possível concluir que os dois adesivos em estudo apresentam um comportamento muito distinto. Isto deve-se à natureza dos dois adesivos, já que o Araldite® AV138 é um adesivo frágil enquanto o SikaForce® 7752 é um adesivo altamente dúctil.

Neste estudo foram registados valores reduzidos de resistência para juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, o que contraria de certa forma o que seria esperado, visto que este adesivo é teoricamente mais resistente. Foram obtidos valores reduzidos de resistência porque, no caso de juntas em L, o adesivo frágil (Araldite® AV138) atinge uma tensão elevada na extremidade solicitada da junta adesiva ( $x/L_0=0$ ), aplicando uma carga reduzida, e, por conseguinte, não permite uma distribuição do esforço para o interior da região de sobreposição. Geralmente, os adesivos altamente dúcteis e flexíveis apresentam uma resistência reduzida, mas no caso de juntas em L, este tipo de adesivos apresenta uma resistência superior a adesivos resistentes e frágeis. Tal acontece porque estes permitem uma distribuição de tensões mais uniforme, o que ocorre devido à deformação plástica.

Através da análise de tensões, observou-se que, com o aumento de  $t_{P2}$ , as juntas apresentam um comportamento que se aproxima de clivagem. Isto ocorre porque a distribuição de tensões apresenta uma extensão maior para o interior da junta. Desta forma, verifica-se que o aumento de  $t_{P2}$  é uma modificação favorável para a resistência de juntas coladas com os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, sendo ligeiramente melhor para o poliuretano.

Geralmente, as juntas coladas com adesivos dúcteis e flexíveis têm uma resistência à fadiga superior a junta coladas com adesivos rígidos e frágeis pois apresentam uma distribuição de tensões mais uniforme e, por isso, são capazes de suportar maiores esforços de arrancamento e clivagem. Por outro lado, os adesivos rígidos e frágeis são mais suscetíveis ao aparecimento de defeitos [65]. Em juntas sujeitas a esforços estáticos, os adesivos frágeis também são mais sensíveis à propagação de fendas até à rotura, enquanto os adesivos dúcteis, como o SikaForce® 7752, são mais resistentes à sua propagação, resultando numa maior resistência [66], que é o que se verifica na presente dissertação.



CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES

A presente dissertação teve como objetivo estudar o comportamento de juntas adesivas em L com aderentes de alumínio e de CFRP, considerando diferentes condições geométricas (valores de  $t_{p2}$ ) e adesivos de diferentes características de resistência e ductilidade. Os adesivos considerados são o Araldite® AV138, que é um adesivo com um comportamento rígido e frágil, e o SikaForce® 7752, que é um adesivo altamente dúctil e flexível. O estudo foi realizado através de uma análise numérica (MEFX) que foi posteriormente validada por resultados experimentais obtidos num trabalho anterior [3]. Esta análise consistiu numa análise de tensões e de resistência na camada adesiva, utilizando o *software* ABAQUS®, e tem como objetivo avaliar a influência de  $t_{p2}$  e verificar a adequação do MEFX como ferramenta de previsão de resistência de juntas em L.

A análise de tensões permitiu concluir diversos aspetos relacionados com o comportamento dos adesivos estudados. Desta análise, é possível concluir que os picos de tensões ocorrem na extremidade solicitada, ou seja, em  $x/L_0=0$ , para todas as configurações de junta e para ambos os adesivos. As juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 registaram valores de tensões superiores às juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752, devido ao facto do primeiro ser mais rígido. Este comportamento é típico dos adesivos frágeis. Por outro lado, o adesivo SikaForce® 7752 é capaz de distribuir as tensões por uma área maior na zona de sobreposição e de uma forma mais gradual. O facto deste adesivo apresentar uma elevada ductilidade originou juntas mais resistentes que as juntas coladas com o Araldite® AV 138. Esta análise permitiu também inferir que as tensões de corte obtidas são residuais já que a geometria da junta considerada é tipicamente de arrancamento. Nas tensões de arrancamento verificou-se que quanto maior for o valor de  $t_{p2}$ , menor são os picos de tensão. Com o aumento de  $t_{p2}$ , também se verificou que as distribuições de tensões tendem a ser mais graduais ao longo da camada de adesivo. Isto ocorre porque o tipo de solicitação tende a aproximar-se de clivagem. Este fenómeno é mais evidente quando se utilizam adesivos dúcteis.

Pela análise experimental de resistência, conclui-se que a junta mais resistente é aquela colada com o adesivo SikaForce® 7752, já que foram registados maiores valores de  $P_m$ . No caso das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138, à medida que se aumentou  $t_{p2}$ , o aumento percentual de  $t_{p2}=1$  mm para os restantes foi de 93,5% ( $t_{p2}=2$  mm), 124,3% ( $t_{p2}=3$  mm) e 140,1% ( $t_{p2}=4$  mm). Para juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752 o aumento percentual de  $t_{p2}=1$  mm para os restantes foi de 64,5% ( $t_{p2}=2$  mm), 86,6% ( $t_{p2}=3$  mm) e 97,5% ( $t_{p2}=4$  mm). Relativamente aos valores de  $P_m$ , o aumento percentual do adesivo SikaForce® 7752 quando comparado com o Araldite® AV138, foi de 266,3%, 313,4%, 320,7% e 323,9% para os valores de  $t_{p2}$  entre 1 e 4 mm, respetivamente.

O estudo do efeito do critério de iniciação de dano permitiu concluir que os critérios QUADS e MAXS são os mais adequados já que obtiveram os resultados mais precisos, sendo o QUADS ligeiramente melhor. Para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e tendo como base os resultados experimentais obtidos anteriormente, para o critério QUADS e para os quatro valores de  $t_{p2}$  (1, 2, 3 e 4 mm), a variação percentual foi de 6,9%, 7,7%, 5,4% e 8,2%, respectivamente. Na aplicação do critério MAXS, foram registados valores de variação percentual de 7,5%, 7,8%, 6,4% e 7,2% para os valores de  $t_{p2}$  compreendidos entre 1 e 4 mm, respectivamente. No caso das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752, a variação percentual foi de 9,7%, 1,6%, 2,7% e 4,8% para os valores de  $t_{p2}$  compreendidos entre 1 e 4 mm, respectivamente, na utilização do critério QUADS. Para o critério MAXS, a variação percentual foi de 10,1%, 1,6%, 2,7% e 4,8% para  $t_{p2}=1, 2, 3$  e 4 mm, respectivamente. Os critérios QUADE, MAXE e MAXPE sobrestimaram os valores de  $P_m$  de uma forma acentuada, para ambos os adesivos. No caso do adesivo Araldite® AV138, a variação percentual máxima, tendo como base os resultados experimentais, foi de 46,8%, 46,8% e 45,3% para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respectivamente. No caso do SikaForce® 7752, para os critérios QUADE, MAXE e MAXPE, respectivamente, a variação percentual máxima foi de 44,6%, 45,9 e 36,6%. Para ambos os adesivos, o critério MAXPS revelou ser o critério mais desajustado. Este critério subestimou, no máximo, os valores de  $P_m$  em 59,9% e 86,8% para os adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, respectivamente.

O estudo da lei de propagação de dano mostrou que a lei triangular, utilizada no estudo do critério de iniciação de dano, é muito mais precisa do que a lei exponencial. Na lei exponencial foram testados três tipos de modelos nos quais se variava o parâmetro *Power* (0,5, 1 e 2). Quando comparados com os resultados experimentais, os valores de  $P_m$  da lei exponencial são superiores no máximo em 160,9% (*Power*=0,5), 137,6% (*Power*=1) e 139,4% (*Power*=2) para o adesivo Araldite® AV138 e 139,5% (*Power*=0,5), 139,5% (*Power*=1) e 141,9% (*Power*=2) para o SikaForce® 7752.

Para além da validação do MEFX pelos resultados experimentais, os resultados numéricos obtidos utilizando esta técnica também foram comparados com os resultados obtidos anteriormente [3] utilizando outro método numérico, neste caso o MDC. No caso do Araldite® AV138, os valores de  $P_m$  do MEFX são superiores aos do MDC em 8,1%, 4,3%, 2,7% e 2,8% para os valores de  $t_{p2}$  compreendidos entre 1 e 4 mm, respectivamente. Para o SikaForce® 7752, os valores obtidos são 3,3%, 0,3%, 0,4% e 1,0% para os valores de  $t_{p2}$  compreendidos entre 1 e 4 mm, respectivamente. Estes resultados obtidos na previsão de resistência permitem concluir que a técnica de MEFX, utilizando o critério QUADS e a lei triangular, é uma ferramenta bastante precisa para a previsão de resistência de juntas em L.

A realização desta dissertação permite concluir que o adesivo SikaForce® 7752 é o mais adequado para juntas adesivas em forma de L sujeitas a esforços de arrancamento, pois permite distribuir a carga sobre uma área mais extensa na camada de adesivo,

resultando numa maior resistência da junta. Os parâmetros que mais influenciam a resistência das juntas são o valor de  $t_{p2}$  e o tipo de adesivo utilizado.

Como sugestões de trabalhos futuros referem-se os seguintes:

- Utilização de adesivos com características diferentes;
- Utilização de substratos de materiais diferentes;
- Aumento dos valores de  $t_{p2}$ ;
- Aplicação da lei de propagação trapezoidal;
- Estudo do efeito da variação do raio de curvatura do aderente em L.



## BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO



## 5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Kaelble, D.H., *Theory and analysis of peel adhesion: mechanisms and mechanics*. Transactions of The Society of Rheology (1957-1977), 1959. **3**(1): p. 161-180.
2. Lin, Y.Y., C.Y. Hui, and Y.C. Wang, *Modeling the failure of an adhesive layer in a peel test*. Journal of Polymer Science Part B: Polymer Physics, 2002. **40**(19): p. 2277-2291.
3. Domingues, N.R.E., *Estudo da resistência de juntas adesivas em L entre alumínio e material compósito*. 2015, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto.
4. Pinto, A.M.G., *Ligação adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
5. Koller, J., U. Baumer, and D. Mania, *High-tech in the Middle Palaeolithic: Neandertal-manufactured pitch identified*. European Journal of Archaeology, 2001. **4**(3): p. 385-397.
6. Hartshorn, S.R., *Structural Adhesives - Chemistry and Technology*. 1986, New York: Plenum Publishing.
7. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, New York: McGraw Hill.
8. Fay, P.A., *History of adhesive bonding*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
9. da Silva, L.F.M., A.G. Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007: Publindústria
10. da Silva, L.F.M., D.A. Dillard, B. Blackman, and R.D. Adams, *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. 2012, Germany: Wiley-VCH.
11. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011, Springer.
12. Hart-Smith, L.J., *Aerospace*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
13. Dilger, K., *Automobiles*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
14. Hentinen, M., *Boats and marine*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
15. Martín-Martínez, J.M., *Shoe industry*, in *Adhesive bonding: Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2005, Woodhead Publishing Limited: Cambridge England.
16. Ebnesajjad, S., *Adhesive Technology Handbook*. 2008: William Andrew.
17. Shin, K.C. and J.J. Lee, *Bond parameters to improve tensile load bearing capacities of co-cured single and double lap joints with steel and carbon fiber-epoxy composite adherends*. Journal of composite materials, 2003. **37**(5): p. 401-420.

18. da Silva, L.F.M., R.D. Adams, and M. Gibbs, *Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2004. **24**(1): p. 69-83.
19. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
20. Campilho, R.D.S.G. and L.F.M. da Silva, *Advances in numerical modelling in adhesive joints*. 2012: Springer.
21. da Silva, L.F.M., P.J.C. das Neves, R.D. Adams, and J.K. Spelt, *Analytical models of adhesively bonded joints—Part I: Literature survey*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(3): p. 319-330.
22. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. Journal of Applied Mechanics, 1944. **66**: p. A17-A27.
23. Hart-Smith, L.J., *NASA Contract Report*. NASA CR-112236, 1973.
24. Hart-Smith, L.J., *NASA Contract Report*. NASA CR-112235, 1973.
25. Ikegami, K., T. Takeshita, K. Matsuo, and T. Sugibayashi, *Strength of adhesively bonded scarf joints between glass fibre-reinforced plastics and metal*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1990. **10**: p. 199-206.
26. Greenwood, L., *The strength of a lap joint*, in *Aspects of Adhesion* by D. Alner. 1969, University of London Press: London.
27. *Engineering Sciences Data Unit. Inelastic shear stresses and strains in adhesive bonding lap joints loaded in tension or shear (Computer Program)*. 1979, Engineering Sciences Data Item Number 79016.
28. John, S.J., A.J. Kinloch, and F.L. Matthews, *Measuring and predicting the durability of bonded carbon fibre/epoxy composite joints*. Composites, 1991. **22**(2): p. 121-127.
29. Lee, S.J. and D.G. Lee, *Development of a Failure Model for the Adhesively Bonded Tubular Single Lap Joint*. The Journal of Adhesion, 1992. **40**(1): p. 1-14.
30. da Silva, L.F.M., R.J.C. Carbas, G.W. Critchlow, M.A.V. Figueiredo, and K. Brown, *Effect of material, geometry, surface treatment and environment on the shear strength of single lap joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 621-632.
31. Harris, J.A. and R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
32. Williams, M.L., *The stresses around a fault or crack in dissimilar media*. Bulletin of the seismological society of America, 1959. **49**(2): p. 199-204.
33. *Abaqus Documentation*. 2013, Dassault Systèmes: Vélizy-Villacoublay.
34. Chen, Z., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *The use of the J-integral vector to analyse adhesive bonds with and without a crack*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(1): p. 48-55.
35. 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.
36. Barenblatt, G.I., *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. Advances in Applied Mechanics, 1962. **7**: p. 55-129.

37. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
38. Duan, K., X. Hu, and Y. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
39. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, and I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1): p. 147-161.
40. Khoramishad, H., A.D. Crocombe, K.B. Katnam, and I.A. Ashcroft, *Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model*. International Journal of Fatigue, 2010. **32**(7): p. 1146-1158.
41. Kattan, P.I. and G.Z. Voyiadjis, *Damage mechanics with finite elements: practical applications with computer tools*. 2012: Springer Science & Business Media.
42. Raghavan, P. and S. Ghosh, *A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding*. Mechanics of Materials, 2005. **37**(9): p. 955-979.
43. Wahab, M.M.A., I.A. Ashcroft, A.D. Crocombe, and S.J. Shaw, *Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(7): p. 763-781.
44. Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino, and M. Kimoto, *Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2003. **17**(7): p. 981-994.
45. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method for Fracture Analysis of Structures*. 2008, New Jersey: Blackwell Publishing.
46. 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.
47. 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.
48. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, and L.F.M. da Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
49. Premchand, V.P. and K.S. Sajikumar, *Fracture analysis in adhesive bonded joints with centre crack, in 10th National Conference on Technological Trends*. 2009.
50. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, F.J.P. Chaves, and L.F.M. da Silva. *Feasibility of the extended finite element method for the simulation of composite bonded joints*. in *Materials Science Forum*. 2013. Trans Tech Publ.
51. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, J.A.B.P. Neto, and L.F.M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.

52. Curiel Sosa, J.L. and N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
53. Airoidi, A., M. Vesco, S. Van Der Zwaag, A. Baldi, and G. Sala. *Damage in GLARE laminates under indentation loads: experimental and numerical results*. in *Proceedings of the 17th international conference on composite materials*. 2009.
54. Golewski, G.L., P. Golewski, and T. Sadowski, *Numerical modelling crack propagation under Mode II fracture in plain concretes containing siliceous fly-ash additive using XFEM method*. Computational Materials Science, 2012. **62**: p. 75-78.
55. Campilho, R.D.S.G., T.A.B. Fernandes, M.D. Banea, and L.F.M. da Silva, *Cohesive zone and extended finite element modelling for bonded joint strength prediction*. The Annals of " Dunarea de Jos" University of Galati. Fascicle XII: Welding Equipment and Technology, 2014. **25**: p. 5.
56. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, A.M.G. Pinto, L.F.M. da Silva, and A.M.P. de Jesus, *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
57. 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.
58. Lumley, R., *Fundamentals of aluminium metallurgy: production, processing and applications*. 2010: Elsevier.
59. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 2007: CRC press.
60. Campilho, R.D.S.G., A.M.G. Pinto, M.D. Banea, R.F. Silva, and L.F.M. da Silva, *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011. **25**(18): p. 2351-2368.
61. Faneco, T.M.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Tese de Mestrado.
62. Zhang, K., L. Li, Y. Duan, and Y. Li, *Experimental and theoretical stress analysis for an interface stress model of single-L adhesive joints between CFRP and aluminum components*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **50**: p. 37-44.
63. 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.
64. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
65. da Silva, L.F.M., T.N.S.S. Rodrigues, M.A.V. Figueiredo, M.F.S.F. de Moura, and J.A.G. Chousal, *Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength*. The Journal of Adhesion, 2006. **82**(11): p. 1091-1115.
66. Corporation, H., *Design Guide for Bonding Plastics*. Vol. 6. 2011: Henkel Corporation - Engineering Adhesives.