



# Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural reforçado com microfibras de cortiça

MIGUEL ÂNGELO PINHEIRO FIGUEIRAS

novembro de 2020

# CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM ADESIVO ESTRUTURAL REFORÇADO COM PARTÍCULAS DE CORTIÇA EXPANDIDA

Miguel Ângelo Pinheiro Figueiras

1141107

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# **CARACTERIZAÇÃO DAS PROPRIEDADES MECÂNICAS DE UM ADESIVO ESTRUTURAL REFORÇADO COM PARTÍCULAS DE CORTIÇA EXPANDIDA**

Miguel Ângelo Pinheiro Figueiras

1141107

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

**2020**

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica





# JÚRI

## **Presidente**

Doutor Rui Filipe Neves Araújo Rego

Professor Adjunto, ISEP

## **Orientador**

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

## **Coorientador**

Mestre Paulo Jorge Roque de Oliveira Nóvoa

Professor Assistente Convidado, ISEP

## **Arguente**

Doutora Ana Sofia Oliveira Queirós Ferreira Barbosa

Investigadora, INEGI



## AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador professor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela disponibilidade, preocupação e apoio contínuo que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho. Sem a sua ajuda não seria possível a conclusão do mesmo.

Gostaria de agradecer aos meus pais pelo apoio oferecido durante este tempo que culmina com a entrega deste trabalho. À minha namorada, companheira e amiga Soraia pelo apoio, paciência e capacidade de gerir e ajudar em todas as situações.

Agradeço também ao Eng. José Andrade da empresa Amorim Isolamentos S.A., pela oferta do granulado fino e cortiça expandida.

Finalmente ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pela oportunidade concedida para a elaboração deste trabalho.



## PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas, Lei coesiva, Modelo de Danos Coesivo, Método de Elementos Finitos, Parâmetros coesivos, Double-Cantilever Beam, End-Notched Flexure.

## RESUMO

As ligações adesivas têm sido bastante desenvolvidas ao longo dos anos, e representam uma técnica de ligação dominante na indústria aeronáutica e automóvel, onde visam substituir os métodos tradicionais. Devido à crescente utilização das juntas adesivas, torna-se necessária a existência de modelos de previsão de resistência que sejam fiáveis e robustos. O Método de Elementos Finitos (MEF) tem ajudado ao desenvolvimento desta técnica de ligação. Uma abordagem recente consiste no uso de modelos de dano coesivo (MDC), que permitem simular o comportamento à fratura das juntas de forma bastante fiável. Esta técnica requer a definição das leis coesivas em tração e corte. Existem diversas formas de leis coesivas possíveis de aplicar em simulações por MDC, em função do comportamento expectável dos materiais que estão a ser simulados. Um método comum para melhorar as limitações dos adesivos é o reforço de juntas com partículas para melhoria das propriedades, sendo um dos reforços mais utilizados a cortiça. As partículas de cortiça podem criar obstáculos à propagação das fissuras, aumentando assim a tenacidade do adesivo. Este facto ocorre porque a cortiça apresenta uma combinação notável de propriedades.

Neste trabalho, estudou-se numericamente o efeito da adição de partículas de cortiça na tenacidade à tração e ao corte de um adesivo estrutural, consistindo na análise dos resultados da força máxima ( $P_{\text{máx}}$ ), deslocamento de força máxima ( $\delta P_{\text{máx}}$ ) e o deslocamento máximo ( $\delta_{\text{máx}}$ ). Utilizou-se o MEF em conjunto com os MDC para modelar o comportamento do adesivo modificado. Consideram-se concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1% de peso, à tração e ao corte. Foram realizados ensaios *Double-Cantilever Beam* para caracterização à tração e ensaios *End-Notched Flexure* para caracterização ao corte. De seguida, realizou-se um estudo da sensibilidade dos

parâmetros coesivos, que consiste na averiguação da influência de  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  no comportamento dos modelos numéricos dos ensaios DCB e ENF.

Com este trabalho foi possível compreender a influência da adição de 0%, 0,25%, 0,5% e 1% de cortiça no adesivo Araldite® AV138 para os ensaios DCB e ENF. As curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 com concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1% revelaram uma boa aproximação aos resultados experimentais. Os resultados obtidos com o modelo de dano coesivo triangular apresentam uma rigidez inicial semelhante ao valor experimental e valores numéricos de  $P_{máx}$  bastante próximos do valor experimental. O comportamento das curvas  $P-\delta$  durante a fase de propagação justifica-se pelo facto de a propagação do dano em ensaios DCB ser governada por  $G_{Ic}$  e em ensaios ENF por  $G_{IIc}$ .

## KEYWORDS

Adhesive joints, Cohesive law, Cohesive Damage Model, Finite Element Method, Cohesive parameters, Double-Cantilever Beam, End-Notched Flexure.

## ABSTRACT

Adhesive joints have been highly developed over the years, and are currently a dominant joining technique in the aeronautical and automotive industry, where they aim to replace traditional methods. Due to the increasing use of adhesive joints, it is necessary to have strength prediction models that are reliable and robust. The Finite Element Method (FEM) has helped to develop this joining technique. A recent approach is the use of cohesive zone models (CZM), which allow to simulate the fracture behavior of the joints in a very reliable way. This technique requires the definition of cohesive laws in traction and shear. There are several forms of cohesive laws that can be applied in CZM simulations, depending on the expected behavior of the materials being simulated. A common method to improve the limitations of adhesives is the reinforcement of joints with particles to improve properties, in this case the reinforcement used is cork. Cork particles can create obstacles to the propagation of cracks, thus increasing the toughness of the adhesive. This is because cork has a remarkable combination of properties.

In this work, the effect of adding cork particles on tensile and shear strength of a structural adhesive was numerically studied, consisting of the analysis of the results of maximum load ( $P_{\max}$ ), maximum load displacement ( $\delta P_{\max}$ ) and maximum displacement ( $\delta_{\max}$ ). The FEM was used in conjunction with the CZM to model the behavior of the modified adhesive. Cork concentrations of 0%, 0,25%, 0,5% and 1% by weight are considered, in traction and shear. Double-Cantilever Beam tests were performed to characterize traction and End-Notched Flexure tests to characterize shear. Then, a study of the sensitivity of the cohesive parameters was carried out, which consists of verifying the influence of  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  and  $G_{IIc}$  on the behavior of the numerical models of the DCB and ENF tests.

---

With this work it was possible to understand the influence of the addition of 0%, 0,25%, 0,5% and 1%, of cork in the Araldite® AV138 adhesive for the DCB and ENF tests. The  $P-\delta$  curves obtained numerically for joints bonded with the Araldite® AV138 adhesive with cork concentrations of 0%, 0,25%, 0,5% and 1% showed a good approximation to the experimental results. The results obtained with the triangular cohesive damage model present an initial stiffness similar to the experimental value and numerical,  $P_{\max}$  values quite close to the experimental value. The behavior of  $P-\delta$  curves during the propagation phase is justified by the fact that the damage propagation in DCB tests is governed by  $G_{IC}$  and in ENF tests by  $G_{IIC}$ .

## LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

### Lista de Abreviaturas

2D	Duas Dimensões
4ENF	<i>Four-point End-Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Asymmetric Double-Cantilever Beam</i>
AECMA	<i>European Association of Aerospace Industries</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
ATDCB	<i>Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam</i>
BS	<i>British Standards</i>
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CCM	<i>Compact Mixed-Mode</i>
CFRP	<i>Carbon Fiber-Reinforced Polymer</i>
CLS	<i>Cracked Lap Shear</i>
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double-Cantilever Beam</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
EN	<i>European Normalization</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FRP	<i>Fibre reinforced plastic</i>

---

GF	<i>Glass Fiber</i>
GRP	<i>Glass Reinforced Plastic</i>
IFT	<i>Interlaminar Fracture Toughness</i>
ISO	<i>International Standard Organization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
MWNTs	<i>Multi-Walled Nanotubes</i>
NF	Norma Francesa
PP	<i>Polypropylene</i>
PTFE	Politetrafluoretileno
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
UV	Ultravioleta
ZPF	Zona de Processo de Fratura

---

## Símbolos Romanos

$2L$	Distância entre apoios
$a$	Comprimento de fenda
$a_0$	Comprimento de fenda inicial (pré-fenda)
$a_{eq}$	Comprimento de fenda equivalente
$B, b$	Largura do substrato
$c$	Fator comprimento ensaio MMB
$C$	Flexibilidade, Caminho em sentido anti-horário em torno da fenda
$C_0$	Flexibilidade inicial
$C_{0corr}$	Flexibilidade inicial corrigida
$E$	Módulo de Young
$E_f$	Módulo de flexão
$E_x$	Módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção $xx$
$E_y$	Módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção $yy$
$G$	Módulo de corte do adesivo, Taxa de libertação de energia da deformação
$G_c$	Taxa crítica de libertação de energia da deformação
$G_I$	Taxa de libertação de energia em modo I
$G_{Ic}$	Taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração
$G_{II}$	Taxa de libertação de energia em modo II
$G_{Ic}$	Taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte
$G_{xy}$	Módulo de corte transversal dos aderentes
$h, h_1, h_2$	Espessura do substrato

---

$J$	Taxa de energia libertada não linear
$K$	Tenacidade à fratura
$K$	Matriz que relaciona as tensões e deformação em tração e corte nos elementos coesivos
$K_c$	Tenacidade crítica à fratura
$L$	Distância entre apoios dividida por 2
$L/2$	Distância entre apoios dividida por 4
$L_0$	Comprimento de Sobreposição
$m$	Fator de geometria para provetes TDCB (declive)
$P$	Carga
$P_{máx}$	Carga máxima
$P_u$	Carga aplicada por unidade de largura dos substratos
$T$	Carga máxima de início da propagação da fenda majorada em 150%
$T$	Vetor de tração
$t_a, t_A$	Espessura do adesivo
$t_m^0$	Resistência coesiva em modo misto
$t_n$	Tensão coesiva à tração
$t_n^0$	Resistência coesiva à tração
$t_s$	Tensão coesiva ao corte
$t_s^0$	Resistência coesiva ao corte $t_s^0$
$U$	Densidade de energia de deformação do material
$u$	Campo de deformação

---

## Lista de Símbolos

---

$\gamma_{\text{máx}}$	Deformação máxima de corte
$\delta_s^0$	Deslocamento coesivo da carga máxima ao corte
$\delta_s^f$	Deslocamento de rotura ao corte
$\delta_n^0$	Deslocamento coesivo da carga máxima à tração
$\delta$	Deslocamento
$\Delta$	Fator de correção de $\sigma_0$
$\Delta_l$	Fator de correção do comprimento de fenda
$\delta_n$	Deslocamento coesivo de tração
$\delta_s$	Deslocamento coesivo de corte
$\varepsilon$	Deformação
$\varepsilon_n$	Deformação em tração
$\varepsilon_s$	Deformação em corte
$\nu$	Coefficiente de Poisson
$\sigma_y$	Coefficiente de Poisson
$\tau_{\text{max}}$	Tensão de rotura de corte

---



## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 - Exemplos de utilização de adesivos no sector automóvel [7].	13
Figura 2 - Exemplos de utilização de adesivos no sector automóvel [7].	13
Figura 3 - Estrutura de fuselagem com nova tecnologia de junção de componentes por adesivos [8].	14
Figura 4 - Adesivos estruturais de película para aeronaves [9].	15
Figura 5 - Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de tração [1].	16
Figura 6 - Dimensões (em mm) a considerar para o ensaio em junta topo a topo cilíndrica [13].	17
Figura 7 - Provetes de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2 [12].	17
Figura 8 - Exemplo de curva tensão-deformação [12].	18
Figura 9 - Provede para ensaio de tração em junta topo a topo [12].	19
Figura 10 - Distribuição de tensão corte numa junta sob esforço de corte [1].	20
Figura 11 - Dimensões (em mm) de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 [3].	20
Figura 12 - Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta [15].	21
Figura 13 - Geometria do provede de junta de sobreposição simples utilizado na referência [16].	22
Figura 14 - Provete losipescu: maciço (a) e em junta (b).	22
Figura 15 - Ensaio losipescu e geometria do provede (dimensões em mm) [12, 14].	23
Figura 16 - Provede Arcan (dimensões em mm) [12].	24
Figura 17 - Provede com fixação NPL para ensaio Arcan (dimensões em mm) [12].	24
Figura 18 - Provete maciços em torção: (a) provede sólido e (b) provede tubular [14].	25
Figura 19 - Geometria e ensaio do provede <i>Napkin ring test</i> .	25
Figura 20 - Deslocamentos medidos na superfície dos cilindros [3].	26
Figura 21 - Geometria do provede TAST [12].	27
Figura 22 - Ensaio TAST [12].	28
Figura 23 - Modos de rotura em juntas adesivas [22].	29
Figura 24 - Representação esquemática de um ensaio DCB [24].	29
Figura 25 - Geometria do provede DCB [27].	30
Figura 26 - Provede de ensaio TDCB [12].	31

---

Figura 27 - Representação esquemática dos ensaios ENF, ELS e 4ENF. ....	32
Figura 28 – Geometria do provete ENF [27]. ....	33
Figura 29 - Esquema do ensaio 4 ENF [12] .....	33
Figura 30 - Esquema de ensaio ELS [12]. ....	34
Figura 31 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura nula: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) [2]. ....	37
Figura 32 – Modelo coesivo triangular [55, 56]. ....	38
Figura 33 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [65]. ....	41
Figura 34 – Adesivo com talco [74] .....	42
Figura 35 - Partículas de cortiça a) sem tratamento de superfície b) com tratamento de superfície [78].	43
Figura 36 - Curva de tensão-deformação compressiva típica para cortiça [80, 84]. ....	43
Figura 37 – Imagens de (a) fibras de vidro desenroladas; (b) fibra de vidro tecida [94] .....	45
Figura 38 – Adesivo com pós de borracha [103] .....	46
Figura 39 - Junta adesiva reforçada com fibras metálicas [110]. ....	47
Figura 40 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ da liga de alumínio AW 6082-T651 [69] .....	54
Figura 41 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [126] .....	55
Figura 42 - Adesivo Araldite® AV138 .....	56
Figura 43 - Análise macroscópica da cortiça [79] .....	58
Figura 44 - Processo de aglomeração no autoclave [131] .....	60
Figura 45 - Referências normativas referentes ao aglomerado de cortiça expandida [130]. ....	61
Figura 46 - Provetes de alumínio .....	63
Figura 47 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S .....	64
Figura 48 – Granalhagem dos substratos .....	64
Figura 49 - Localização dos calços calibrados .....	64
Figura 50 - Montagem do conjunto de calços .....	65
Figura 51 - Fixação dos substratos .....	65
Figura 52 - Método de remoção do excesso de adesivo dos provetes .....	66
Figura 53 - Representação esquemática dos provetes DCB [24]. ....	66
Figura 54 - Representação esquemática dos provetes ENF [22] .....	67

---

Figura 55 - Máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 e computador com <i>software</i> TRAPEZIUM X .....	68
Figura 56 - <i>Setup</i> do ensaio DCB.....	68
Figura 57 - <i>Setup</i> DCB com a máquina fotográfica Canon.....	69
Figura 58 - Posicionamento do provete ENF na máquina de ensaio .....	69
Figura 59 –Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e com 0%, 0.25%, 0.5% e 1% de cortiça.....	71
Figura 60 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0% de concentração de cortiça.....	71
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,25% de concentração de cortiça.....	72
Figura 62 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,5% de concentração de cortiça.....	72
Figura 63 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 1% de concentração de cortiça.....	73
Figura 64 - Método de obtenção da correção do comprimento de fenda $\Delta$ [23] .....	74
Figura 65 - Representação esquemática da ZPF e do conceito de fenda equivalente [24].....	75
Figura 66 - Curvas-R do provete $P_{CO\_3}$ através dos métodos CBBM, CCM e CBT .....	76
Figura 67 - Curvas-R do provete $P_{CO25\_3}$ através dos métodos CBBM, CCM e CBT .....	77
Figura 68 - Curvas-R do provete $P_{CO5\_1}$ através dos métodos CBBM, CCM e CBT .....	77
Figura 69 - Curvas-R do provete $P_{C1\_3}$ através dos métodos CBBM, CCM e CBT .....	78
Figura 70 - Tendência de $G_{Ic}$ do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos .....	82
Figura 71 - Curvas $P-\delta$ obtidas pelo ensaio ENF .....	83
Figura 72 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0% de concentração de cortiça.....	83
Figura 73 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,25% de concentração de cortiça.....	84
Figura 74 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,5% de concentração de cortiça.....	84
Figura 75 - Curvas $P-\delta$ registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 1% de concentração de cortiça.....	85
Figura 76 - Curvas-R do provete ENF $CO\_3$ com o adesivo Araldite® AV138 e 0% de cortiça .....	87

Figura 77 - Curvas-R do provete ENF C025_3 com o adesivo Araldite® AV138 e 0,25% de cortiça .....	87
Figura 78 - Curvas-R do provete ENF C05_3 com o adesivo Araldite® AV138 e 0,5% de cortiça .....	88
Figura 79 - Curvas-R do provete ENF C1_1 com o adesivo Araldite® AV138 e 1% de cortiça .....	88
Figura 80 - Tendência de $G_{IIc}$ do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos .....	91
Figura 81 - Malha do provete DCB .....	93
Figura 82 - Refinamento da malha do provete DCB na extremidade da pré-fenda .....	93
Figura 83 - Malha do provete ENF .....	94
Figura 84 - Refinamento da malha ENF .....	94
Figura 85 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e um dos cilindros de suporte. ....	94
Figura 86 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e o cilindro de solicitação. ....	95
Figura 87 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos .....	95
Figura 88 - MDC triangular implementado no software ABAQUS® [50] .....	96
Figura 89 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça .....	98
Figura 90 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça .....	99
Figura 91 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça .....	99
Figura 92 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 1% de cortiça .....	100
Figura 93 - Curvas $\delta P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça .....	101
Figura 94 - Curvas $\delta P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça .....	101
Figura 95 - Curvas $\delta P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça .....	102
Figura 96 - Curvas $\delta P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 1% de cortiça .....	102
Figura 97 - Curvas $\delta_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça .....	103
Figura 98 - Curvas $\delta_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça .....	103
Figura 99 - Curvas $\delta_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça .....	104
Figura 100 - Curvas $\delta_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 1% de cortiça .....	104
Figura 101 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça .....	105
Figura 102 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça .....	106
Figura 103 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça .....	106
Figura 104 - Curvas $P_{m\acute{a}x}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça .....	107

Figura 105 - Curvas $\delta P_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça. ....	107
Figura 106 - Curvas $\delta P_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça. ....	108
Figura 107 - Curvas $\delta P_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça. ....	108
Figura 108 - Curvas $\delta P_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça. ....	109
Figura 109 - Curvas $\delta_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça. ....	110
Figura 110 - Curvas $\delta_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça. ....	110
Figura 111 - Curvas $\delta_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça. ....	111
Figura 112 - Curvas $\delta_{\text{máx}}$ com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça. ....	111
Figura 113 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça .....	113
Figura 114 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça .....	114
Figura 115 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça .....	116
Figura 116 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 1% de cortiça .....	117
Figura 117 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça. ....	119
Figura 118 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça. ....	120
Figura 119 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça. ....	121
Figura 120 - Curvas $P-\delta$ de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça. ....	123
Figura 121 - Influência de $E$ nas curvas $P-\delta$ de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138 .....	125
Figura 122 - Influência de $t_n^0$ nas curvas $P-\delta$ de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138 .....	125
Figura 123 - Influência de $G_{IC}$ nas curvas $P-\delta$ de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138.....	126
Figura 124 - Influência de $G$ nas curvas $P-\delta$ de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138 .....	127
Figura 125 - Influência de $t_s^0$ nas curvas $P-\delta$ de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138 .....	128
Figura 126 - Influência de $G_{IIC}$ nas curvas $P-\delta$ de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138.....	128



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Principais vantagens de ligações adesivas .....	11
Tabela 2 - Principais limitações de ligações adesivas .....	12
Tabela 3 - Casos de estudo de adesivos com cortiça.....	48
Tabela 4 - Casos de estudo de adesivos com fibras .....	49
Tabela 5 - Casos de estudo de adesivos com nanotubos .....	50
Tabela 6 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [124] .....	53
Tabela 7 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [124] .....	54
Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [126, 127] .....	56
Tabela 9 - Dimensões teóricas dos provetes DCB em mm .....	67
Tabela 10 - Dimensões teóricas dos provetes ENF em mm .....	67
Tabela 11 - Valores de $G_{IC}$ com concentração de 0% de cortiça.....	79
Tabela 12 - Valores de $G_{IC}$ com concentração de 0,25% de cortiça.....	80
Tabela 13 - Valores de $G_{IC}$ com concentração de 0,5% de cortiça.....	80
Tabela 14 - Valores de $G_{IC}$ com concentração de 1% de cortiça.....	81
Tabela 15 - Valores de $G_{IIC}$ com concentração de 0% de cortiça .....	89
Tabela 16 - Valores de $G_{IIC}$ com concentração de 0,25% de cortiça .....	90
Tabela 17 - Valores de $G_{IIC}$ com concentração de 0,5% de cortiça .....	90
Tabela 18 - Valores de $G_{IIC}$ com concentração de 1% de cortiça .....	91
Tabela 19 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 0% cortiça ...	113
Tabela 20 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 0,25% cortiça .....	115
Tabela 21 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 0,5% cortiça	116
Tabela 22 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 1% cortiça ...	118
Tabela 23 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 0% cortiça ....	119
Tabela 24 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 0,25% cortiça .....	121
Tabela 25 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 0,5% cortiça .	122

---

Tabela 26 - Erros de $P_{máx}$ , $\delta P_{máx}$ e $\delta_{máx}$ do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 1% cortiça ....	123
Tabela 27 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $E$ , $t_n^0$ e $G_{Ic}$ do adesivo Araldite® AV138.....	124
Tabela 28 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $G$ , $t_s$ e $G_{IIc}$ do adesivo Araldite® AV138.....	126

# ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO .....	3
1.1	Contextualização .....	3
1.2	Objetivos .....	4
1.3	Organização da dissertação .....	4
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	9
2.1	Ligações adesivas .....	9
2.1.1	Caraterização das ligações adesivas .....	9
2.1.2	Aplicações das juntas adesivas .....	12
2.2	Determinação das propriedades de adesivos .....	15
2.2.1	Propriedades mecânicas à tração.....	16
2.2.1.1	Métodos de ensaio .....	17
2.2.2	Propriedades mecânicas ao corte .....	19
2.2.2.1	Métodos de Ensaio .....	20
2.2.3	Propriedades de fratura à tração .....	28
2.2.3.1	Modo I.....	29
2.2.4	Propriedades de fratura ao corte .....	31
2.2.4.1	Modo II.....	32
2.3	Previsão de resistência de juntas adesivas .....	34
2.3.1	Mecânica dos meios contínuos .....	35
2.3.2	Mecânica da fratura .....	35
2.3.3	Modelos de dano coesivo.....	36
2.3.3.1	Tipos de Leis Coesivas .....	37
2.3.3.2	Determinação dos parâmetros coesivos.....	38
2.3.4	Método de Elementos Finitos eXtendido .....	39

---

2.4	Modificação de adesivos .....	41
2.4.1	Aditivação por partículas.....	41
2.4.1.1	Partículas minerais.....	41
2.4.1.2	Partículas orgânicas .....	42
2.4.2	Inclusão de microfibras .....	44
2.4.3	Outros aditivos .....	46
2.4.4	Casos de estudo.....	47
2.4.4.1	Cortiça .....	47
2.4.4.2	Fibras.....	48
2.4.4.3	Nanotubos de carbono com paredes múltiplas (MWCNTs) .....	49
3	DESENVOLVIMENTO .....	53
3.1	Trabalho experimental.....	53
3.1.1	Materiais .....	53
3.1.1.1	Substratos .....	53
3.1.1.2	Adesivo .....	54
3.1.1.3	Cortiça.....	57
3.1.1.3.1	Aglomerado de cortiça expandida .....	58
3.1.1.3.2	Exemplos de aplicações .....	62
3.1.2	Fabrico dos provetes DCB e ENF .....	62
3.1.2.1	Preparação dos substratos .....	62
3.1.2.2	Ensaio dos provetes DCB e ENF .....	66
3.1.3	Resultados obtidos .....	70
3.1.3.1	Ensaio DCB.....	70
3.1.3.1.1	Curvas $P-\delta$ .....	70
3.1.3.1.2	Determinação de $G_{ic}$ .....	73
3.1.3.1.3	Resultados obtidos.....	76
3.1.3.1.4	Análise de resultados .....	78
3.1.3.2	Ensaio ENF.....	82
3.1.3.2.1	Curvas $P-\delta$ .....	82

---

---

3.1.3.2.2	Determinação de $G_{IIC}$ .....	85
3.1.3.2.3	Resultados obtidos.....	86
3.1.3.2.4	Análise de resultados.....	88
3.2	Trabalho numérico.....	92
3.2.1	Condições numéricas.....	92
3.2.2	Modelo de dano coesivo triangular.....	96
3.2.3	Estudo do tamanho de malha.....	97
3.2.3.1	Ensaio DCB.....	98
3.2.3.1.1	Resultados para $P_{máx}$ .....	98
3.2.3.1.2	Resultados para $\delta P_{máx}$ .....	100
3.2.3.1.3	Resultados para $\delta_{máx}$ .....	103
3.2.3.2	Ensaio ENF.....	105
3.2.3.2.1	Resultados de $P_{máx}$ .....	105
3.2.3.2.2	Resultados para $\delta P_{máx}$ .....	107
3.2.3.2.3	Resultados para $\delta_{máx}$ .....	109
3.2.4	Validação das leis coesivas obtidas.....	112
3.2.4.1	Ensaio DCB.....	112
3.2.4.2	Ensaio ENF.....	118
3.2.5	Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas.....	124
3.2.5.1	Ensaio DCB.....	124
3.2.5.2	Ensaio ENF.....	126
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	131
5	REFERÊNCIAS.....	137



# INTRODUÇÃO

- 1.1 Contextualização
- 1.2 Objetivos
- 1.3 Organização da dissertação



# 1 INTRODUÇÃO

## 1.1 Contextualização

As juntas adesivas podem ser utilizadas como alternativa às comuns ligações mecânicas. Devido a diversas vantagens, o uso de ligações adesivas aumentou significativamente nos últimos anos e é atualmente uma técnica de ligação bastante utilizada na indústria aeronáutica e automóvel. Essas vantagens traduzem-se na possibilidade de união de materiais diferentes, maior leveza, menores custos ligados ao fabrico e ainda prevenção da corrosão galvânica que sucede nas ligações entre dois materiais metálicos diferentes. Torna-se importante por isso estudar a configuração das juntas de modo a conceber a melhor alternativa para se obter maior resistência e duração das estruturas ligadas com adesivos para um futuro próximo. As juntas adesivas são uma das técnicas usadas para juntar materiais. Existem algumas soluções disponíveis para melhorar a tenacidade de adesivos, como a inclusão de partículas (inorgânicas ou orgânicas). Com isto, têm sido criadas combinações de adesivos com partículas, desde polímeros, cerâmicos e metais.

Ao longo dos anos, vários modelos de previsão de dano foram melhorados através do Método de Elementos Finitos (MEF), o que tem ajudado ao desenvolvimento desta técnica de ligação. Os modelos de dano coesivo (MDC), em conjunto com o MEF, são uma ferramenta viável para a previsão de resistência de juntas adesivas. Os MDC combinam critérios da resistência dos materiais para a iniciação do dano e conceitos da mecânica da fratura para a propagação da fenda, originando uma poupança de recursos e de tempo na análise da resistência de estruturas com juntas adesivas e na seleção do adesivo mais adequado para cada aplicação. Os MDC consistem em estabelecer leis coesivas que introduzem artificialmente zonas de propagação de dano na estrutura para avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. Os parâmetros coesivos influenciam de forma significativa os resultados das simulações, nomeadamente a tenacidade à tração ( $G_{Ic}$ ) e a resistência à tração ( $t_n^0$ ) para a lei coesiva à tração, e a tenacidade ao corte ( $G_{IIc}$ ) e a resistência coesiva ao corte ( $t_s^0$ ) para a lei coesiva ao corte.

Neste contexto, independentemente da técnica de previsão, é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas e de fratura dos materiais, que devem ser determinadas por ensaios normalizados de elevada fiabilidade. Um método comum para melhorar as limitações dos adesivos é o reforço de juntas com partículas para

melhoria das propriedades, sendo neste caso o reforço utilizado a cortiça. As partículas de cortiça podem criar obstáculos à propagação das fissuras, aumentando assim a tenacidade do adesivo. Este facto ocorre porque a cortiça apresenta uma combinação notável de propriedades.

## 1.2 Objetivos

Neste trabalho têm-se o objetivo de estudar numericamente o efeito da adição de partículas de cortiça expandida num adesivo estrutural, usando as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) de ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) para caracterização à tração e de ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) para caracterização ao corte.

Numa primeira fase do trabalho, o estudo é realizado por um adesivo frágil com a aditivação de partículas de cortiça e é validada a adequabilidade do modelo de dano coesivo triangular para a reprodução das leis coesivas experimentalmente obtidas por ensaios DCB (tração) e ENF (corte). Esta validação é levada a cabo numericamente recorrendo ao *software* Abaqus®, em que se utiliza um MDC triangular. Numa segunda fase, é feito o estudo da malha para ambos os ensaios, onde se verifica a influência dos parâmetros  $P_{máx}$ ,  $\delta P_{máx}$  e  $\delta_{máx}$  no tamanho da malha. A lei coesiva utilizada neste trabalho numérico é a lei triangular. A validação da lei coesiva triangular para a modelação da camada de um adesivo em tração e corte consistirá na comparação das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais. Por fim, é feito um estudo da influência dos parâmetros coesivos ( $G_{Ic}$ ,  $t_n^0$ ,  $G_{IIc}$  e  $t_s^0$ ) do tipo de leis coesivas na previsão do comportamento das juntas DCB e ENF, para uma melhor compreensão do efeito destes parâmetros nas curvas  $P-\delta$ .

## 1.3 Organização da dissertação

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1 - é feita a contextualização do trabalho realizado, descritos os objetivos do trabalho e apresentada a organização do relatório.

Capítulo 2 - é feita uma revisão bibliográfica sobre o tema em questão, onde se pretende abordar as ligações adesivas, tal como caracterizar as propriedades dos adesivos, os ensaios que caracterizam à fratura e os métodos para determinação do  $G_{Ic}$  pelo ensaio DCB e do  $G_{IIc}$  pelo ensaio ENF. Por fim, aborda-se o tema da aditivação de partículas em adesivos, sendo a cortiça a partícula adicionada, no entanto, é apresentado outros tipos de aditivos.

Capítulo 3 - é apresentado todo o procedimento experimental que envolve a caracterização da geometria dos ensaios DCB e ENF, dos materiais utilizados e do fabrico dos provetes. São descritos os ensaios realizados, determinado o valor de  $G_{Ic}$  e

$G_{IIc}$  com o adesivo testado e feita a análise e comparação dos resultados obtidos. É apresentada a modelação dos ensaios no *software* ABAQUS®, obedecendo às condições da análise numérica, com o objetivo de determinação da lei coesiva associada a cada ensaio realizado. É efetuado um estudo do tamanho da malha que consiste na análise dos resultados de  $P_{máx}$ ,  $\delta P_{máx}$  e  $\delta_{máx}$  para 4 provetes do ensaio DCB e 4 provetes do ensaio ENF para as concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. De seguida, foram validadas as leis coesivas obtidas em tração e corte através da comparação das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais. Por último, é efetuada uma análise de sensibilidade aos parâmetros constituintes da lei coesiva.

Capítulo 4 - são apresentadas as conclusões deste trabalho e propostas de trabalhos futuros.



# REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

- 2.1 Ligações adesivas
- 2.2 Determinação das propriedades de adesivos
- 2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas
- 2.4 Modificação de adesivos



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Ligações adesivas

A necessidade da ligação entre materiais tem sido bastante desenvolvida ao longo do tempo, existindo atualmente várias formas de unir materiais, materiais cujos componentes são da mesma natureza ou materiais diferentes. Ao longo dos anos têm-se vindo a verificar um aumento progressivo na utilização de ligações adesivas. A ligação adesiva, também designada por junta adesiva ou mesmo junta colada, permite a união de dois elementos estruturais. Os elementos estruturais da junta, que são ligados entre si pelo adesivo, são designados por substratos ou aderentes. O adesivo é, por si só, um material capaz de fomentar a adesão entre substratos de um mesmo material ou materiais diferentes, através de forças de adesão e coesão interna, sem alterar a sua estrutura. Após a colagem, estes passam a designar-se aderentes. Inicialmente, os primeiros adesivos eram muito frágeis. No entanto com a evolução da tecnologia, e em particular a tecnologia dos adesivos, têm surgido adesivos com características superiores no que concerne à resistência e propriedades de adesão, o que lhes tem permitido alcançar um espaço no mercado, substituindo as ligações mais convencionais. As ligações adesivas estão condicionadas por diversas variáveis como a preparação das superfícies, ou condições ambientais de temperatura e humidade relativa, entre outras. Com alterações químicas a combinação de adesivos tornou-se em bases poliméricas, traduzindo assim em melhores características de tenacidade, do mesmo modo que permitiu obter excelentes resultados na combinação de madeiras e metais [1]. O sucesso da tecnologia dos adesivos e da adesão tem sido possível devido a um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento tecnológico em diferentes áreas do conhecimento, tais como a química orgânica e físico-química de macromoléculas, físico-química de superfícies, mecânica da fratura e resistência dos materiais, além de outras [2].

#### 2.1.1 Caracterização das ligações adesivas

As ligações adesivas estão mais presentes nas mais variadas indústrias, e possuem ainda uma grande margem de progressão na sua utilização, em função das suas vantagens competitivas. Estas ligações são capazes de suportar esforços equivalentes aos das ligações mecânicas, efetuando a transmissão eficiente da carga entre os componentes ligados e mantendo a sua integridade estrutural durante o seu tempo de vida sob as condições a que estão sujeitas [3, 4].

A versatilidade das ligações adesivas faz com que sejam usadas em substituição das ligações convencionais, visto o seu vasto campo de aplicação. Estas são muitas vezes procuradas para satisfazer necessidades de amortecimento de vibrações e absorção de choques, sendo que um dos requisitos mais importantes das juntas adesivas é que estas continuem a suportar cargas estáticas e dinâmicas, em condições de serviço, durante o seu ciclo de vida.

O uso de adesivos em ligações estruturais continua a ser um tema de investigação [3]. As ligações adesivas apresentam uma distribuição de tensões mais uniforme ao longo da área colada, quando comparadas com os sistemas de fixação mecânica convencionais (parafusos, rebites, entre outros), que apresentam picos de tensão junto à zona de furação. De seguida serão apresentadas algumas características das juntas adesivas [1]:

- ✓ Tipo de ligações - Ligações usualmente permanentes;
- ✓ Distribuição de tensões - Distribuição de tensões uniforme ao longo da largura da junta;
- ✓ União da junta - Quase invisível, sem contornos do início da ligação;
- ✓ Junção de materiais - Ideal para união de diferentes materiais;
- ✓ Resistência a temperaturas - Fraca resistência a elevadas temperaturas;
- ✓ Resistência mecânica - Excelentes propriedades de fadiga; O isolamento elétrico reduz a corrosão;
- ✓ Preparação da junta - Necessária uma limpeza cuidada;
- ✓ Tempo de produção - Minutos a horas, dependendo do tipo de junta;
- ✓ Avaliação da qualidade - Métodos de avaliação limitados.

A coesão, resistência interna do adesivo quando este é sujeito a esforços, também deve ser levada em consideração, pois quanto mais fortes forem as forças intermoleculares do adesivo, maior será a sua coesão e resistência.

A preparação das superfícies é um dos aspetos que mais influencia a adesão entre o adesivo e os substratos, pelo que se deve efetuar uma rigorosa seleção do adesivo e dos aderentes, de acordo com as suas propriedades. Podem ser usadas várias técnicas com o intuito de melhorar a adesão, como a utilização de tratamentos superficiais, por exemplo a anodização do alumínio [5].

De seguida, apresenta-se a Tabela 1 onde estão representadas as principais vantagens das ligações adesivas.

Tabela 1 - Principais vantagens de ligações adesivas

<b>Principais vantagens de ligações adesivas comparativamente a ligações mecânicas (da Silva et al. [3])</b>	Diminuição das concentrações de tensões;
	Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
	Aumento da rigidez das estruturas;
	As ligações adesivas permitem também reduzir o número de componentes (parafusos, rebites, grampos, entre outros);
	A montagem com adesivos é mais resistente à fadiga, motivada pela ausência do efeito de concentração de tensões devido a não existência de furos na ligação;
	Excelente relação resistência - peso;
	Custo reduzido devido a processos de fabrico mais baratos;
	Aerodinâmica otimizada;
	Melhor aparência visual;
	Excelentes propriedades elétricas e térmicas;
	Permite a ligação de vários tipos de materiais;
	Resistência à corrosão no caso de juntas de substratos incompatíveis.

Para além das vantagens (Tabela 1) existem também limitações associadas a utilização de juntas adesivas, e na Tabela 2 referem-se às principais limitações de ligações adesivas.

Tabela 2 - Principais limitações de ligações adesivas

<b>Principais limitações da junta adesiva (da Silva et al. [3]):</b>	Necessidade de projetar ligações que eliminem as forças de arrancamento e clivagem;
	Necessidade de usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição o mais uniforme possível de tensões;
	Os ciclos de cura de alguns adesivos são relativamente longos e podem requerer a aplicação de pressão e de altas temperaturas. Isto pode constituir uma limitação ao tamanho da peça, caso exija o recurso a um forno ou autoclave;
	Necessidade de evitar as tensões localizadas e garantir que o adesivo trabalhe essencialmente ao corte;
	Necessidade de uma cuidada preparação superficial, por vezes complexa, morosa e dispendiosa através de, por exemplo, abrasão mecânica, ataques químicos, desengorduramento, entre outros processos, para garantir uma boa adesão e durabilidade da ligação;
	Difícil controlo de qualidade e segurança;
	Não existe um critério de dimensionamento universal que defina o projeto para qualquer estrutura;
	A durabilidade das juntas adesivas é influenciada pela degradação e limitação da resistência dos adesivos, quando expostos a condições extremas de calor, humidade, radiação UV, água, entre outros.

### 2.1.2 Aplicações das juntas adesivas

As juntas adesivas têm vindo a sofrer um elevado desenvolvimento devido à sua utilização em diversas indústrias. As vantagens relativamente ao seu peso, capacidade de ligar materiais dispares e corrosão levam a que as várias indústrias invistam nesta tecnologia. As mais variadas indústrias têm recorrido a este método, e de seguida irão ser dados exemplos de indústrias que já utilizam o adesivo diariamente e nas mais diversas formas. A utilização de adesivos para aplicações automóveis é muito vasta,

indo da utilização de algo tão pequeno como um sensor até partes de grande dimensão como o chassis do veículo. Com a aplicação de juntas adesivas, a indústria automóvel pretende aumentar a eficiência dos transportes, reduzir consumos, peso e emissões, e conseguir melhorias a nível de segurança. Muitos veículos de alta performance são produzidos com materiais leves para conseguirem um peso mínimo do veículo. Estes materiais compósitos (GRP) não permitem a soldadura e a utilização de elementos de fixação mecânicos, o que adiciona mais peso ao veículo, bem como um maior risco de vibração. Os adesivos estruturais são os preferidos entre os profissionais da indústria automóvel, uma vez que permitem a fácil união de diferentes tipos de material (como compósitos onde a soldadura não seria possível). Uma vantagem adicional é a adição da borracha em adesivos estruturais, de forma a promover a absorção da vibração e as forças de impacto. Atualmente há uma utilização extensa de adesivos para aplicações na indústria automóvel tais como junta pronta, colagem estrutural do eixo de transmissão e chassis, vedantes do radiadores e colagem de filtros. Os sistemas eletrónicos também exigem a utilização de diversos adesivos no enchimento e isolamento elétrico, sensores, relés, comutadores, motores elétricos, entre outras aplicações. A companhia *Permabond Engineering Adhesives Ltd* [6] é um dos exemplos de marcas que fornece adesivos para a indústria automóvel mundial, tendo muitos produtos especificados pelos principais fabricantes de automóveis e fornecedores Tier 1, que procuram produtos de ponta de alta qualidade a preços muito competitivos.



Figura 1 - Exemplos de utilização de adesivos no sector automóvel [7].



Figura 2 - Exemplos de utilização de adesivos no sector automóvel [7].

Os motores elétricos encontram-se por toda a parte, desde a sua escova de dentes elétrica ao ajuste elétrico do espelho retrovisor do seu carro. Na verdade, mais de 2 bilhões de motores são produzidos por ano apenas para a indústria automóvel. Os adesivos são intrínsecos à estrutura de motores elétricos, pois são a forma mais eficaz de garantir a correta aplicação dos íman, eixos e rotores no seu conjunto, sem a necessidade de fixações mecânicas, que por sua vez aumentaram o tamanho do motor, o seu peso e o seu ruído. Os adesivos para a colagem de ímanes foram desenvolvidos para terem bom desempenho em materiais como aço, ferrite, neodímio

e outros materiais magnéticos. As principais características incluem a capacidade de suportar elevadas temperaturas, as velocidades de cura rápida para linhas de produção e excelente resistência ao impacto.

A indústria naval viu chegar a utilização das ligações adesivas primeiramente para uso militar. Este tipo de ligações fornecia características importantes para combater contra o meio marítimo altamente corrosivo. Nesta indústria, a aplicação de juntas adesivas vai desde elementos estruturais, como o casco e convés até ao elemento mais insignificante. Com isto, poderemos concluir o porquê de se utilizar as juntas adesivas na indústria naval, pois verificamos que as juntas permitem obter boa resistência à humidade, temperatura e boa durabilidade. As aplicações nesta indústria resultam, normalmente, em esforços de flexão, corte e torção [7].

Outra indústria que tem apostado em materiais alternativos aos convencionais é a indústria aeronáutica, onde mais de 50% da estrutura das aeronaves é constituída por *Carbon Fiber-Reinforced Polymer* (CFRP), em detrimento de materiais como alumínio. Com a utilização deste material as próprias ligações sofreram alterações, sendo utilizadas as juntas adesivas até na estrutura das aeronaves (Figura 3). Algumas das características que levaram à sua utilização são o seu reduzido peso, boa resistência à fadiga, amortecimento de vibração sónica e por facilmente se conseguir obter superfícies aerodinâmicas [8].

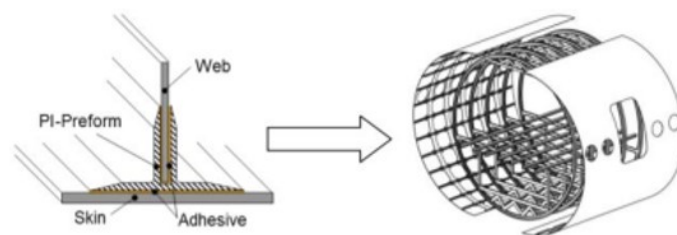


Figura 3 - Estrutura de fuselagem com nova tecnologia de junção de componentes por adesivos [8].

Já o sector aeroespacial tem apostado em produtos inovadores, como películas adesivas sensíveis à pressão, adesivos líquidos à base de solvente e à base de água e malhas adesivas, que estão definidas nas práticas de montagem de aeronaves modernas. Os adesivos que garantam fortes ligações entre os subcomponentes compostos, com excelente resistência química e desempenho mecânico extraordinário, preservando a integridade estrutural dos componentes críticos da aeronave. Um dos exemplos da sua utilização é na colagem composta aeroespacial, utilizando adesivos estruturais compostos de película (Figura 4). A sua utilização permite que os engenheiros criem estruturas de aeronaves fortes e eficientes. Ao não precisar de fixadores, estes oferecem uma espessura aderente menor, o que permite

tirar o máximo proveito das propriedades de rigidez dos compostos e fornece uma separação de materiais diferentes [9].



Figura 4 - Adesivos estruturais de película para aeronaves [9].

## 2.2 Determinação das propriedades de adesivos

Desde que os adesivos começaram a ser utilizados como forma de juntar materiais, houve a necessidade de quantificar (ou pelo menos qualificar) a sua adequabilidade na indústria. A vida útil de um adesivo é determinada pela previsão do tempo e resistência que o mesmo apresenta na junta após determinadas tensões. Para determinar essas tensões é crucial saber as propriedades mecânicas e de fratura do adesivo. No caso da resistência estática, para além da necessidade da informação do módulo de elasticidade longitudinal e do coeficiente de *Poisson*, são necessárias as curvas de tensão-deformação em tração e corte, face ao comportamento acentuadamente não-linear dos adesivos. A resistência à fratura também é revelante para a determinação da resistência das juntas. Existe uma grande variedade de ensaios para caracterizar os adesivos, como por exemplo os descritos no trabalho de Adams et al. [10] e que são alvos de normas: *American Society for Testing and Materials (ASTM)*, *British Standards (BS)*, *International Organization for Standardization (ISO)*, e Norma Europeia (EN), que definem os procedimentos de ensaio, técnicas de preparação de amostras, tratamento das superfícies, ciclos de cura, entre outros. Face às dificuldades em medir certas propriedades do adesivo a partir dos ensaios de juntas, recorre-se também a provetes maciços e aos ensaios normalizados para materiais poliméricos. A caracterização dos adesivos a partir do ensaio de juntas apresenta várias dificuldades, resultantes da pequena espessura da camada adesiva e de componentes de tensão indesejadas, como por exemplo tensões de arrancamento em juntas de sobreposição simples. Os tipos de esforços a que as juntas adesivas podem estar submetidas são [3, 11]:

- ✓ Tração;
- ✓ Compressão;
- ✓ Corte;

- ✓ Clivagem (*cleavage*);
- ✓ Arrancamento (*peel*).

### 2.2.1 Propriedades mecânicas à tração

Os esforços de tração ocorrem pela aplicação de forças perpendiculares ao plano da colagem, fazendo com que os aderentes se afastem, e resultam em tensões teoricamente uniformemente distribuídas por toda a superfície. Na prática a espessura de adesivo é difícil de controlar, pelo que as forças raramente são rigorosamente axiais. Assim, desenvolvem-se regiões de maior concentração de tensões relativamente ao interior do adesivo. Normalmente os adesivos apresentam uma baixa resistência quando solicitados à tração (Figura 5).

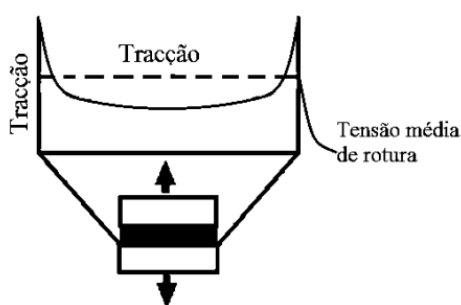


Figura 5 - Distribuição de tensão axial numa junta sob esforço de tração [1].

Existem várias formas de determinar as propriedades de um adesivo à tração, sendo que há duas categorias principais: ensaios que utilizam provetes de adesivo maciço (*bulk*) e ensaios de junta adesiva. Tem sido debatido qual destes ensaios é o mais apropriado para determinar as propriedades mecânicas de um adesivo, existindo quem defenda que as propriedades obtidas pelos ensaios de provetes maciços não consigam ser as mesmas que as obtidas através de uma junta, pois os processos de cura destes podem não ser idênticos. Os ensaios em provetes *bulk* e as juntas topo a topo são os mais utilizados para determinação das propriedades à tração [12]. Os ensaios realizados por juntas topo a topo são mais próximos da realidade. Ao contrário dos ensaios *bulk*, este ensaio utiliza substratos de secção circular (Figura 6) em aço ligados por uma camada de adesivo. Através destes ensaios são obtidos os dados relativos ao módulo de elasticidade, módulo de rigidez e coeficiente de *Poisson*. As tensões são calculadas dividindo a força aplicada pela área colada. Como entraves tem-se a dificuldade de obtenção de propriedades mecânicas em tração, devido a questões relacionadas com a precisão do fabrico dos provetes e alinhamento destes durante o ensaio. De facto, os desalinhamentos, mesmo que pequenos, vão conduzir à existência de esforços espúrios de flexão, reduzindo assim as propriedades de resistência da junta colada. A distribuição de tensões em juntas topo a topo não é uniforme. Tal resulta do efeito de *Poisson*, pela compressão provocada na camada de

adesivo pelos substratos quando existe uma diferença sensível de rigidez entre eles [3].

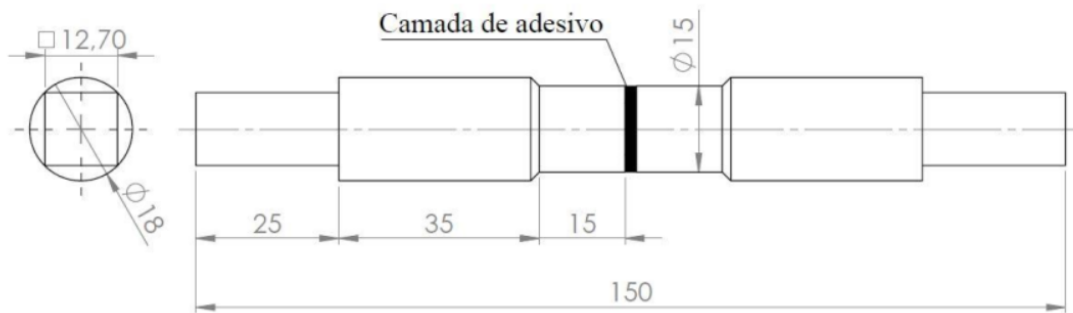


Figura 6 - Dimensões (em mm) a considerar para o ensaio em junta topo a topo cilíndrica [13].

### 2.2.1.1 Métodos de ensaio

O ensaio de tração é um ensaio fácil e de rápida execução, que apresenta inúmeras propriedades e resultados que se podem retirar, sendo o tipo de ensaio que apresenta maior bibliografia e estudos dentro da área. De seguida, são apresentados os vários ensaios à tração.

#### Tração em provetes de adesivo maciço (*bulk*)

É um dos ensaios mais utilizados para determinar as propriedades à tração, sendo comparável aos ensaios usados em materiais plásticos. As propriedades determinadas são intrínsecas ao próprio material, obtendo uma tensão uniforme e uniaxial, sem que haja influência dos aderentes [12].

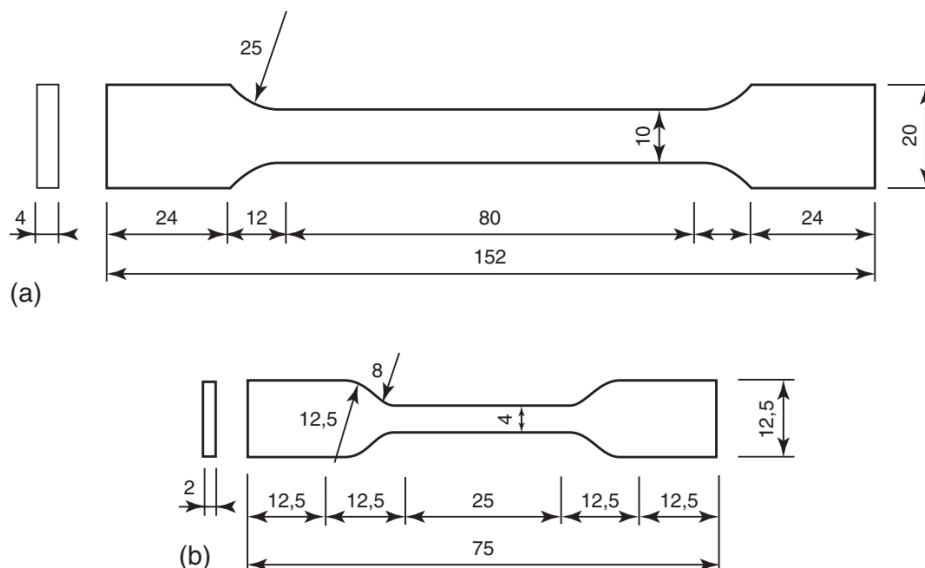


Figura 7 - Provetes de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2 [12]

Existem diversas normas para fabricação de provetes *bulk*, sendo uma das mais utilizadas a norma EN ISO 527-2 (Figura 7), que prevê dois tipos de provetes (longo ou reduzido) em que a escolha é determinada pela rigidez do adesivo. Estes provetes são conhecidos por "osso de cão", devido à sua geometria. No ensaio dos provetes da Figura 7, a sua fixação é feita por pinças convencionais. No caso dos adesivos mais rígidos, as deformações são menores, pelo que, o provete que melhor se adapta é o de maiores dimensões. Neste ensaio são feitas as medições de carga e deslocamento, o que permite obter a curva tensão-deformação (Figura 8), obtendo-se através desta o módulo de Young ( $E$ ), resistência à tração e tensão de cedência [12].

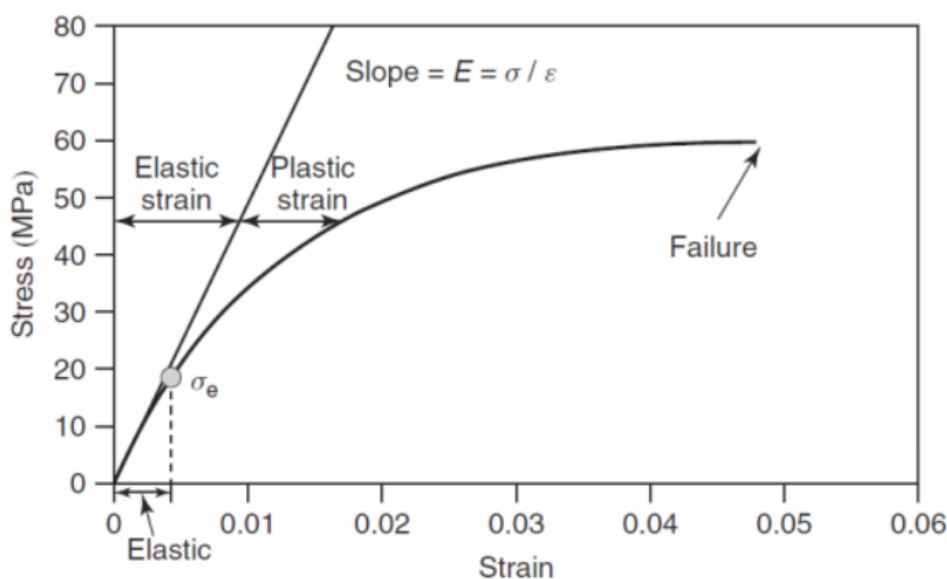


Figura 8 - Exemplo de curva tensão-deformação [12].

### Tração em juntas topo a topo

Este tipo de ensaio segue a norma ASTM D 897 e é usado para determinar as propriedades à tração dos adesivos. Existem três requisitos obrigatórios para se conseguirem bons resultados [12]:

- ✓ A camada de adesivo não pode conter bolhas de ar;
- ✓ A carga precisa ser aplicada axi simetricamente e perpendicularmente à linha de ligação;
- ✓ Deve ser evitada a rotura na linha de adesão secundária (em provetes que a apresentem).

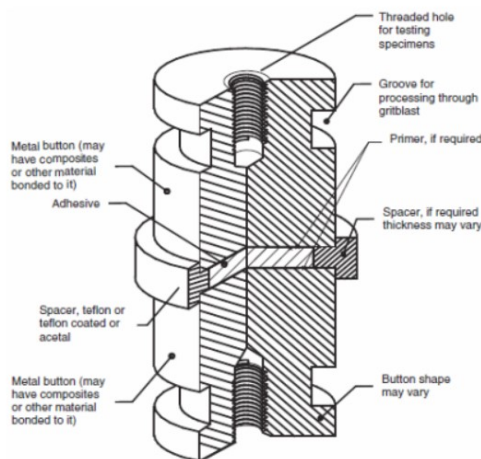


Figura 9 - Provete para ensaio de tração em junta topo a topo [12]

O ensaio é realizado com dois aderentes circulares em aço e ligados entre si pelo adesivo (Figura 9), permitindo assim obter informação referente de  $E$  e ao coeficiente de Poisson ( $\nu$ ) [3]. As tensões são calculadas dividindo a força aplicada pela área colada. Alguns autores demonstraram que a distribuição de tensões não é uniforme, o que resulta do efeito de Poisson, da constricção provocada na camada de adesivo pelos substratos quando existe uma diferença sensível de rigidez entre eles, ou ainda por desalinhamento [3]. Os pequenos desalinhamentos influenciam nas propriedades de resistência.

### 2.2.2 Propriedades mecânicas ao corte

Os esforços de corte são aqueles que provocam o escorregamento entre os dois substratos, que ocorre pela aplicação de forças paralelas ao plano de colagem. Observam-se picos de tensões de corte originadas numa junta sujeita a esforços de corte nos dois extremos do adesivo. Deste modo, a parte central do adesivo está sujeita a tensões quase nulas e, quanto maior forem os seus valores de pico, menor será a resistência do adesivo (Figura 10).

Este comportamento deve-se ao efeito da deformação diferencial ao longo do comprimento de sobreposição ( $L_0$ ), de modo que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente, desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta à sobreposição [3].

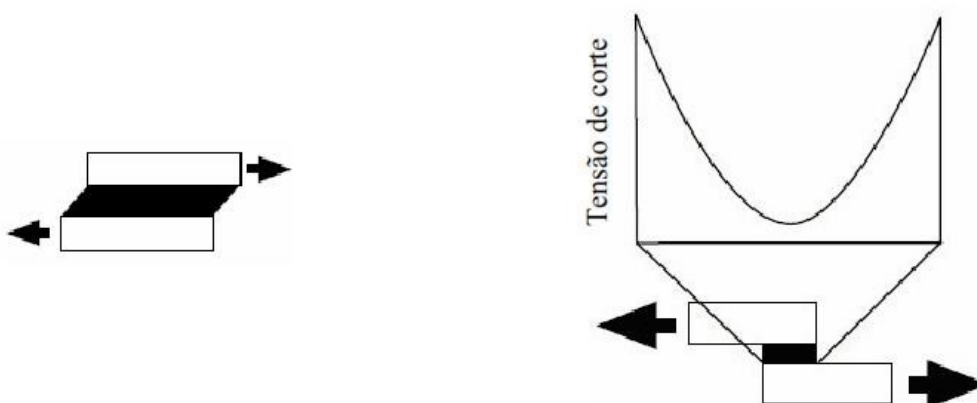


Figura 10 - Distribuição de tensão de corte numa junta sob esforço de corte [1]

### 2.2.2.1 Métodos de Ensaio

No ensaio ao corte há vários métodos que se pode realizar, posto isto, apresentam-se o ensaio junta de sobreposição simples, *V-Notched Beam Shear Method*, ensaio de borboleta, junta topo a topo em torção e *Thick Adherend Shear Test*.

#### Junta de sobreposição simples (JSS)

O teste das juntas de sobreposição simples (JSS) é um dos métodos mais comuns porque é um método simples, de baixo custo, as juntas são de fácil fabrico e pode ser realizado em máquinas universais de ensaios mecânicos. Este ensaio é regulamentado pelas normas ASTM D1002, ISO 4587 ou outras equivalentes. Neste ensaio os substratos estão sujeitos a uma sollicitação de tração, enquanto a camada de adesivo está sujeita a esforços de corte. No entanto, as juntas podem ser realizadas individualmente num molde, reduzindo os defeitos introduzidos pelo corte [14]. A junta também vai estar sob sollicitação de esforços de arrancamento, resultado do desalinhamento as forças de tração. De modo a diminuir o aparecimento de esforços de arrancamento e regular a espessura colocam-se calços nos locais de amarração (Figura 11).

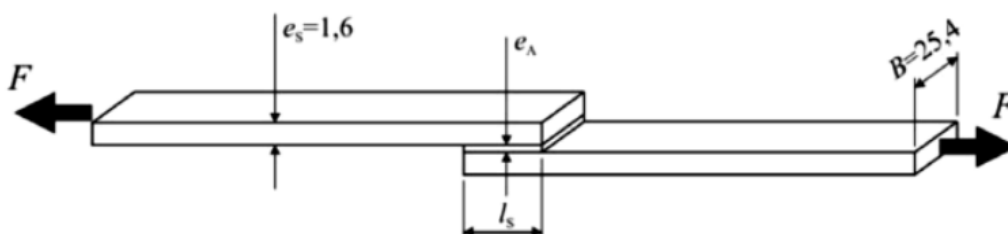


Figura 11 - Dimensões (em mm) de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 [3]

A norma ASTM D1002 refere a geometria dos provetes a preparar como ilustrado na Figura 11. A tensão média de corte ( $\tau$ ) é determinada pela seguinte fórmula:

$$\tau = \frac{P}{l \times b} \quad (1)$$

em que  $\tau$  [MPa] representa a tensão de corte,  $P$  [N] a força ou carga aplicada,  $b$  [mm] a largura da junta e  $l$  [mm] o comprimento de sobreposição [14].

Como se pode verificar na Figura 12, a JSS está sujeita a um estado de tensão complexo devido ao desalinhamento da carga, o que origina um momento fletor e induz outros esforços, os quais podem originar a deformação dos substratos, e não apenas o de corte; como se pretende .

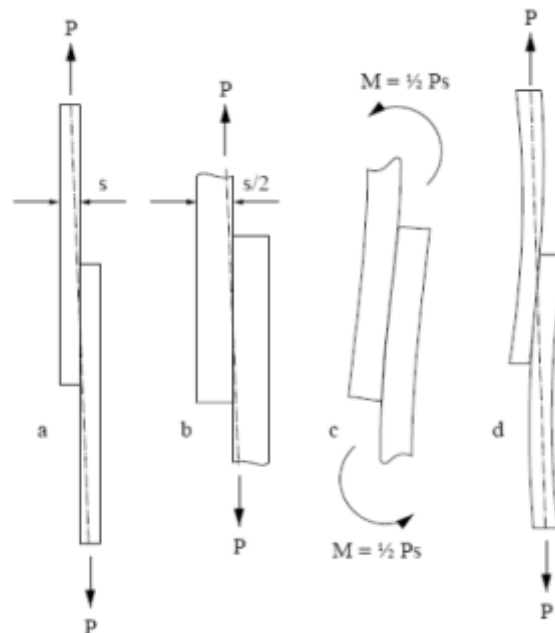


Figura 12 - Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta [15]

No entanto, existem diversas formas de atenuar o efeito da deformação da junta, sem que para isso seja necessário projetar um diferente tipo de ligação. Um dos métodos habitualmente utilizado é a junta de sobreposição dupla, que adiciona um novo substrato. Kim et al. [16] propuseram um trabalho de comparação experimental, em termos de modo de rotura e resistência de provetes ligados por sobreposição simples solicitados à tração, e uma das soluções utilizadas para contornar os efeitos de flexão foi a utilização de calços de alinhamento com espessura igual à de cada um dos substratos (Figura 13). Desta forma, a carga axial aplicada fica alinhada, sendo

teoricamente permitido alinhar o provete na máquina de ensaio, pois, também a espessura do adesivo e do substrato têm influência no mesmo. Quando estas espessuras aumentam, o momento fletor conseqüentemente aumenta e, por sua vez, a resistência da junta diminui. Em alguns casos, o aumento da espessura dos aderentes pode ser benéfico, tornando os substratos mais resistentes e menos suscetíveis à deformação plástica [17].

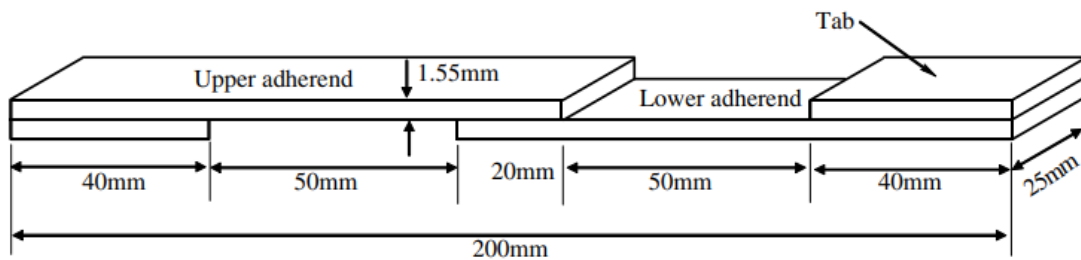


Figura 13 - Geometria do provete de junta de sobreposição simples utilizado na referência [16]

### Iosipescu ou *V-Notched Beam Shear Method*

De seguida é apresentado o ensaio Iosipescu ou *V-notched beam test* (adotado pela norma ASTM D5379); o que foi inicialmente indicado para testes de metais e juntas soldadas em condições de carregamento de corte puro. Este método também pode ser aplicado em adesivos no estado maciço (Figura 14-a) ou em juntas (Figura 14-b).

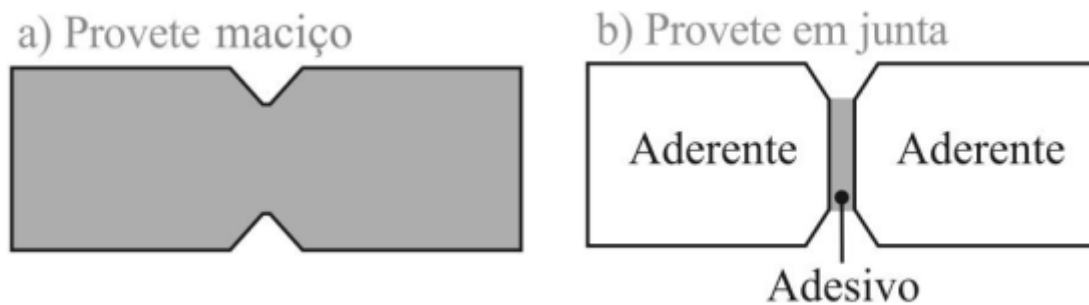


Figura 14 - Provetes Iosipescu: maciço (a) e em junta (b)

Ambos os métodos são similares pois mantêm-se dois entalhes simétricos no centro do provete. A secção central do provete está sujeita a um esforço de corte, uma vez que os momentos fletores provenientes dos dois lados se anulam [3]. Nesta zona devem ser colados extensómetros a  $45^\circ$  e a  $(-45^\circ)$  com o eixo do provete de forma a medir as respetivas deformações [3]. O provete é carregado em quatro pontos diferentes, como demonstrado na Figura 15.

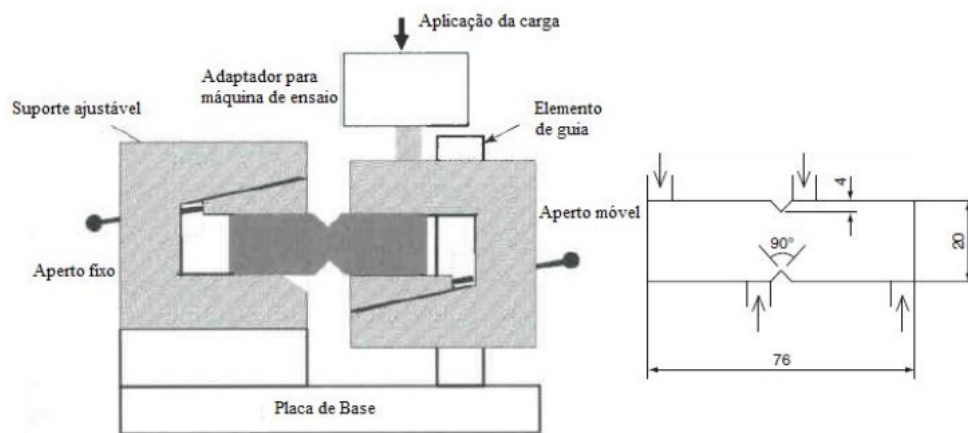


Figura 15 - Ensaio Iosipescu e geometria do provete (dimensões em mm) [12, 14]

Este ensaio oferece vantagens, com a utilização de provetes de fácil execução e possibilidade de obtenção do módulo de corte e da resistência ao corte. Sendo  $t$  a espessura do provete e  $h$  a distância entre extremidades dos dois entalhes,  $\tau$  é dado por [3]:

$$\tau = \frac{P}{t \times h} \quad (2)$$

e o módulo de corte,  $G$ , por:

$$G = \frac{P}{t_p h (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})}, \quad (3)$$

em que  $t_p$  [mm] representa a espessura do provete e  $h$  [mm] a distância entre extremidades dos dois entalhes. As deformações  $\varepsilon$  são determinadas com recurso a extensômetros colados na secção central do provete, a  $45^\circ$  e a  $-45^\circ$  com o eixo do mesmo [3, 14].

### Ensaio de borboleta ou *Notched plate shear method* (Arcan)

O ensaio *Notched plate shear method* (ou Arcan) é usado para obtenção de propriedades de corte em provetes de adesivo em bruto. Estes ensaios são também denominados de borboleta devido à sua forma semelhante a uma borboleta (Figura 16) [12]. Em relação ao ensaio Iosipescu, o ensaio Arcan possui melhores características pois apresenta bom desempenho em todos os tipos de adesivos, incluindo os mais dúcteis [11]. Este tipo de ensaio é utilizado para plásticos, compósitos e adesivos para obtenção das suas propriedades, e pode ser utilizado com espessuras menores, o que aproxima a caracterização do comportamento mecânico às condições mais utilizadas em juntas, em que o adesivo apresenta uma espessura muito

fina. O provete possui dois entalhes simétricos a  $90^\circ$  e um raio de concordância de 1,5 mm, minimizando assim a concentração de tensões [3].

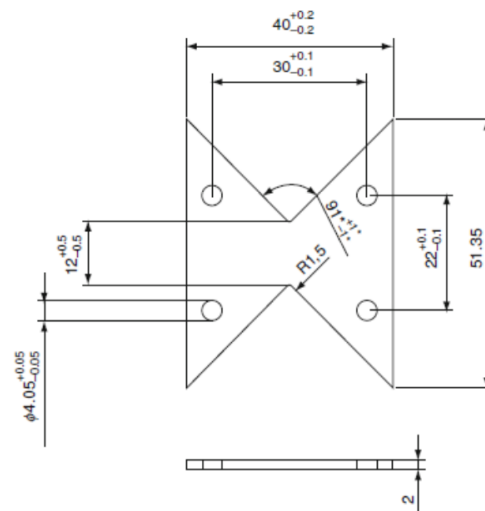


Figura 16 - Provete Arcan (dimensões em mm) [12]

O deslocamento da zona de deformação de corte uniforme entre os dois entalhes, pode ser medido com extensômetros montados sobre o provete, orientados a  $45^\circ$  e ( $-45^\circ$ ) com o eixo. Neste último caso, o grande impasse sustenta-se com a amplitude das deformações a medir, que muitas vezes se situam à volta de apenas 1% [3, 14]. Existem vários dispositivos para a montagem dos provetes, sendo um deles a fixação tipo *National Physical Laboratory* (NPL) [18], ilustrada na Figura 17, que requer a existência de dois furos em cada metade do provete. O cálculo de  $G$  e de  $\tau$  é realizado com expressões idênticas às equações (2) e (3).

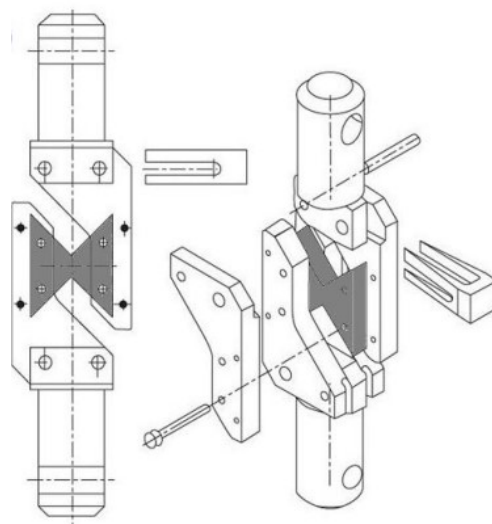


Figura 17 - Provete com fixação NPL para ensaio Arcan (dimensões em mm) [12]

### Torção em provetes maciços

A torção em provetes maciços é testada com provetes sólidos ou tubulares para que desta forma se consigam retirar as propriedades de corte nestes tipos de ensaios (Figura 18). A forma redonda é obtida recorrendo à maquinagem dos provetes, o que significa que não é viável para adesivos muito flexíveis. Como é necessária a fixação dos provetes, são utilizadas extremidades com fixação nas garras da máquina de ensaio e para transmissão de binário [14].

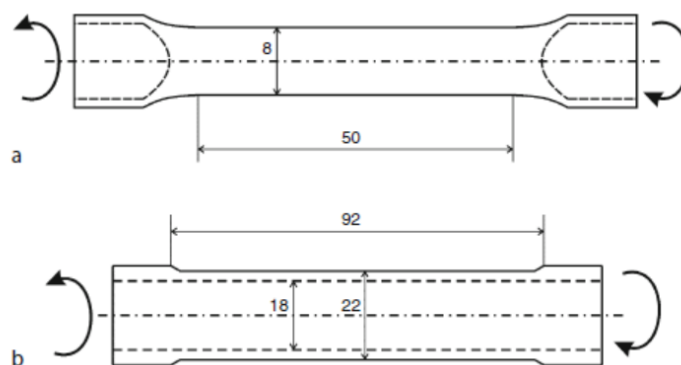


Figura 18 - Provetes maciços em torção: (a) provete sólido e (b) provete tubular [14]

Desta forma, a região redonda é livre de concentrações de tensões e, portanto, podem ser medidas com este ensaio as propriedades do adesivo.

### Junta topo a topo em torção ou *Napkin-ring test*

O ensaio *Napkin ring test* (Figura 19) é realizado em juntas topo a topo entre dois cilindros de paredes muito finas onde são aplicados momentos torsores de valor igual [3], mas sentido oposto, sendo que é no raio exterior do cilindro que vai ocorrer a maior deformação do adesivo [12].

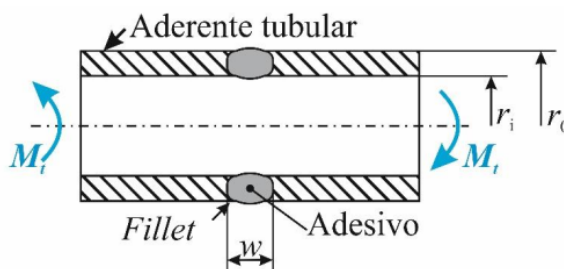


Figura 19 - Geometria e ensaio do provete *Napkin ring test*

Este ensaio é usado quando as deformações são baixas. Para que se obtenha um estado de tensão de corte puro é necessário que os dois cilindros estejam perfeitamente alinhados. A maior dificuldade nos ensaios de adesivos de baixa espessura é a medição dos pequenos deslocamentos que terá de ser efetuada com

elevada precisão [12]. Também a sua complexidade de fabrico de provetes e o seu elevado custo, é outro dos motivos de se utilizarem outros métodos para determinação de propriedades mecânicas ao corte [3, 14]. Considerando  $M_t$  o momento torsor aplicado no provete,  $r_i$  e  $r_o$  os raios interior e exterior dos substratos e  $w$  a espessura da camada adesiva,  $\tau$  a uma dada distância  $r$  do eixo em que é aplicado  $M_t$  é calculada pela seguinte equação [3]:

$$\tau = \frac{2M_t \times r}{\pi \times (r_o^4 - r_i^4)} \quad (4)$$

e o módulo de corte  $G$ :

$$G = \frac{2t}{\pi \times (r_o^4 - r_i^4)} \times \left( \frac{M_t}{\phi} \right), \quad (5)$$

em que  $\phi$  representa o ângulo de rotação medido. Em alternativa,  $G$  é dado por:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (6)$$

em que  $\gamma$  é calculado pela razão:

$$\gamma = \frac{v_m - v_t}{w}, \quad (7)$$

em que  $v_m$  é o deslocamento total medido no provete (igual ao deslocamento no adesivo,  $v_a$ , acrescido do deslocamento nos aderentes,  $v_t$ , como ilustra a Figura 20).

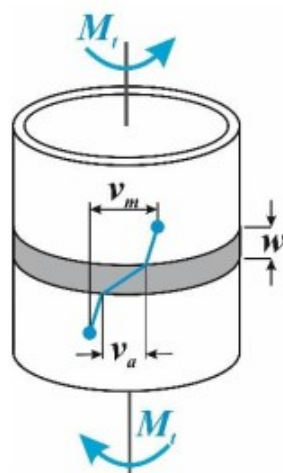


Figura 20 - Deslocamentos medidos na superfície dos cilindros [3]

### **Thick Adherend Shear Test (TAST)**

Das metodologias de ensaio para obtenção de propriedades de corte, o ensaio TAST é dos mais populares, uma vez que tanto os dispositivos de ensaio como a realização dos provetes é relativamente fácil. Este ensaio é exclusivamente realizado em junta, sendo as dimensões indicadas na Figura 12.

O método TAST pode ser usado para determinar:

- ✓ A tensão de corte do adesivo até a rotura ( $\tau_{\max}$ );
- ✓ O módulo de corte do adesivo ( $G$ );
- ✓ Outras propriedades podem ser obtidas a partir da curva de tensão vs. deformação, tal como o módulo secante e a deformação máxima de corte ( $\gamma_{\max}$ );
- ✓ Os efeitos de diversas condições nas propriedades de corte, como por exemplo temperatura, meio ambiente, velocidade de ensaio, entre outros.

O ensaio TAST é um procedimento normalizado pelas normas ISO 11003-2 e ASTM D3983. A geometria característica do provete é o que pode observar na Figura 21, com espessura elevada dos substratos e  $L_0$  reduzido. Esta configuração de junta elimina quase por completo o arrancamento nas extremidades da junta e garante tensões de corte praticamente uniformes ao longo da ligação, o que permite a caracterização do adesivo em corte puro [12].

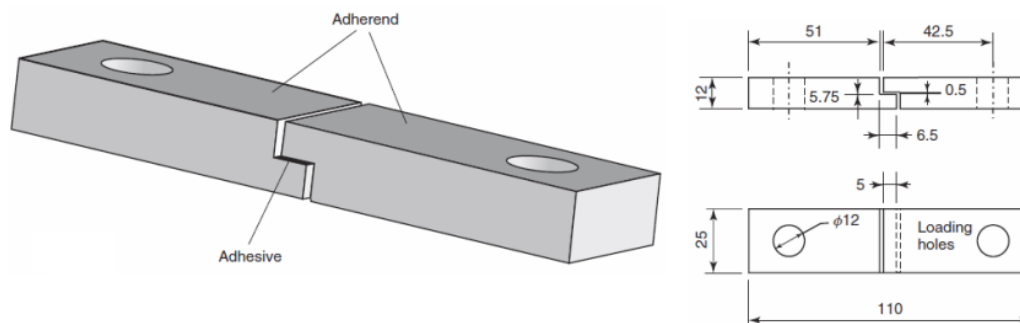


Figura 21 - Geometria do provete TAST [12]

O ensaio consiste em tracionar o provete através dos furos de carregamento até à rotura. A junta adesiva é submetida a um esforço de corte devido à geometria dos aderentes. Torna-se em um processo simples e económico, na execução e aquisição de dados. É um ensaio indicado para diferentes condições ambientais, apesar da difícil análise de tensões. O ensaio é realizado com o auxílio de uma máquina de tração (Figura 22) e são utilizados extensómetros para medir as deformações.

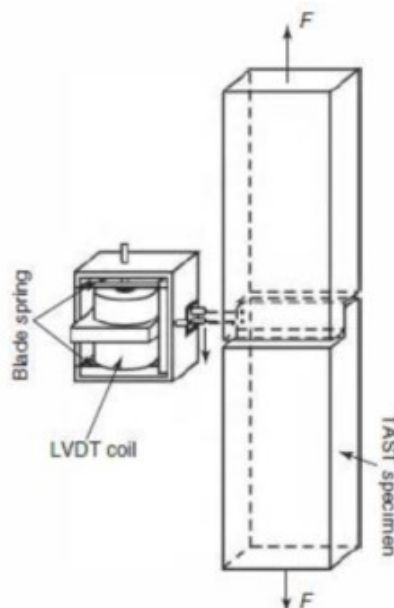


Figura 22 - Ensaio TAST [12]

### 2.2.3 Propriedades de fratura à tração

A tenacidade à fratura à tração fratura é o mais comum devido à sua simplicidade. Este ensaio está atualmente normalizado para a medição de  $G_{Ic}$  em juntas adesivas (ASTM D3433-99). Este ensaio corresponde ao movimento de abertura de fenda na direção perpendicular ao seu plano, por efeito de tração nessa direção. Este é o modo mais crítico no que se refere à propagação da fenda pelo facto de as tensões serem concentradas em porções menores do adesivo e por a junta ter menor resistência ao arrancamento do que ao corte.

Entre os principais impulsionadores da mecânica da fratura estão Inglis [19] e Griffith [20]. Estes investigadores desenvolveram a mecânica da fratura linear elástica onde a tenacidade à fratura é dada pelo fator de intensidade de tensão ( $K$ ), ou pela taxa de libertação de energia da deformação ( $G$ ). Estes conceitos só são válidos para um grupo de materiais onde a propagação da fenda se encontra na região elástica, e podem ser usados para caracterizar a fratura frágil. Contudo, a grande maioria dos materiais encontra-se no domínio da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, porque apresentam uma alta ductilidade. Nestas circunstâncias, pode ser utilizado o integral- $J$  para caracterizar a tenacidade à fratura [21]. Sob carregamentos monotónicos, as fendas propagam-se quando  $K$  ou  $G$  atingem os valores críticos, conhecidos por tenacidade crítica à fratura ( $K_c$ ) e taxa de crítica de libertação de energia de deformação ( $G_c$ ). A tenacidade é medida em ensaios normalizados que se encontram divididos em 3 modos elementares (Figura 23):

- Modo I;

- Modo II;
- Modo III.

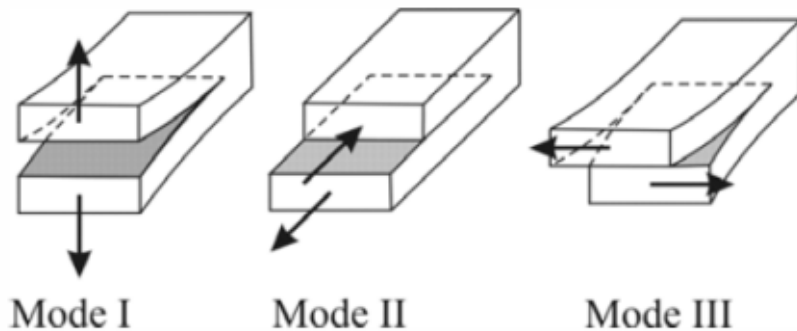


Figura 23 - Modos de rotura em juntas adesivas [22]

O modo I representa o modo de tração (abertura), enquanto os modos II e III são os modos de corte. Em muitos casos, mais propriamente em estruturas, a carga aplicada cria uma combinação de modos no crescimento da fenda, o que implica a utilização de critérios de modo misto para simular a propagação do dano [22, 23].

#### 2.2.3.1 Modo I

No modo I, o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) é o mais utilizado devido à sua simplicidade. Este ensaio é universalmente aceite para caracterizar a fratura em diversos materiais como compósitos, madeiras e adesivos. Na Figura 24 está representado de forma esquemática o ensaio DCB.

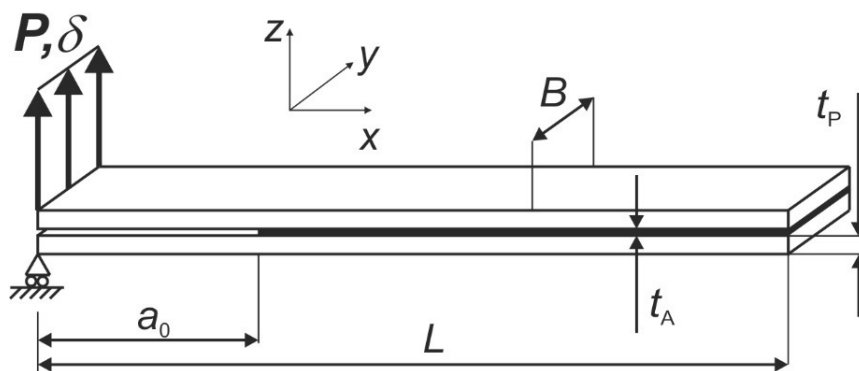


Figura 24 - Representação esquemática de um ensaio DCB [24].

Os provetes DCB são constituídos por dois substratos com comprimento igual ( $L$ ), espessura constante ( $h$ ) e largura ( $B$ ) também iguais. O adesivo encontra-se entre os substratos e possui uma espessura ( $t_A$ ) constante em todo o processo, sendo considerado o comprimento de fenda inicial  $a_0$  desde a zona onde é aplicada a sollicitação até à extremidade da pré-fenda presente no adesivo [12].

O ensaio consiste em solicitar os braços do provete em abertura a uma velocidade constante. Durante o ensaio é registada a carga ( $P$ ) e o deslocamento ( $\delta$ ). O comprimento de fenda é obtido através de análise de fotos/imagens obtidas durante o ensaio e com intervalos de tempo pré-estabelecidos [12].

No decorrer da fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo. Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de  $G_{Ic}$ . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, torna-se difícil a medição do comprimento de fenda durante o ensaio. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [25]. A norma referente ao ensaio DCB é a norma ASTM D3433-99 [26], onde está enunciado o método para execução de ensaio.

Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato ( $h$ ), de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, pela equação (8). Nesta equação,  $T$  corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva,  $a$  é o comprimento da fenda,  $B$  é a largura do substrato e  $\sigma_y$  corresponde à tensão de cedência do material do substrato.

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (8)$$

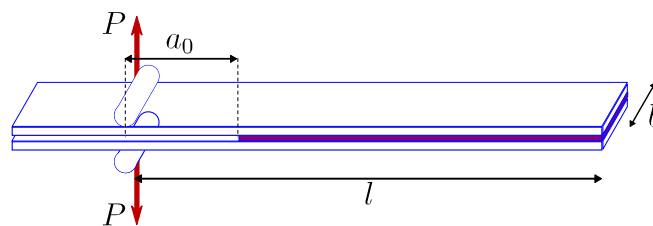


Figura 25 – Geometria do provete DCB [27].

Idêntico ao ensaio utilizado para caracterização da fratura à tração é o ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) (Figura 26) para a determinação de  $G_{Ic}$ , que apresenta como vantagem, em relação ao ensaio anterior, o facto de não ser necessária a medição de  $a$  para o método de tratamento de dados convencional. Este é um aspeto considerável, pois estes valores estão sempre sujeitos a erros de leitura com alguma influência no resultado final, sendo normalmente obtidos através de registos fotográficos da face lateral do provete [24, 28]. A norma ASTM D3433 recomenda que os substratos possuam 241,3 mm de comprimento e largura de 25,4 mm. A altura do provete é a necessária para que a taxa de variação da flexibilidade,  $C$ , com o comprimento de fenda ( $dC/da$ ) seja constante ao longo da propagação da fenda. A altura do substrato,  $h$ , varia de acordo com a seguinte equação:

$$m = \frac{1}{h} + \frac{3a^2}{h^3} \quad (9)$$

em que  $m$  é o declive,  $a$  corresponde ao comprimento de fenda e  $h$  corresponde à altura do substrato [12].

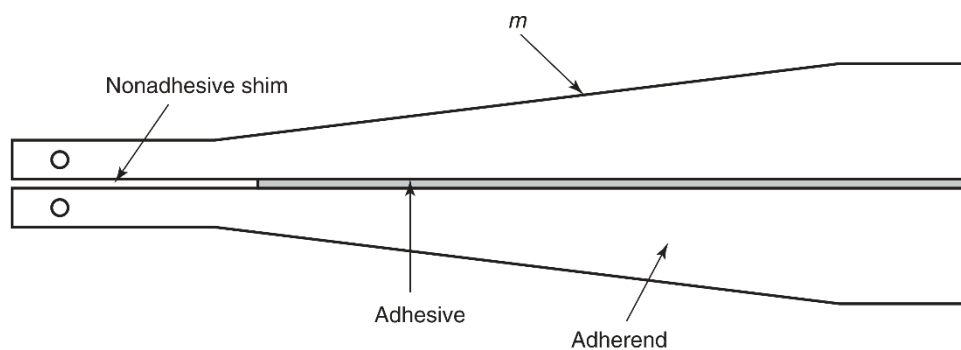


Figura 26 - Provete de ensaio TDCB [12]

#### 2.2.4 Propriedades de fratura ao corte

Permanece de momento uma única norma e de origem japonesa (JIS-K-7086-1993) para a caracterização à fratura em modo II de juntas coladas, mas maior parte dos artigos publicados sobre o tema baseia-se em ensaios geralmente utilizados para a caracterização da fratura interlaminar de modo II em materiais compósitos. Sendo que os ensaios *End-Notched Flexure* (ENF), *End-Loaded split* (ELS) e *4-Point End-Notched Flexure* (4ENF) são os ensaios que mais se destacam (Figura 27). O ensaio ELS apresenta algumas dificuldades na correta obtenção de  $G_{IIc}$  relacionadas com a existência de grandes deslocamentos e alguma sensibilidade às condições de aperto [24]. O ensaio 4ENF requer um dispositivo de ensaio mais sofisticado e apresenta alguns problemas relacionados com a influência do atrito na região da pré-fenda [29]. O ensaio ENF é o mais utilizado para a caracterização de materiais à fratura em modo II, sobretudo devido à sua simplicidade.

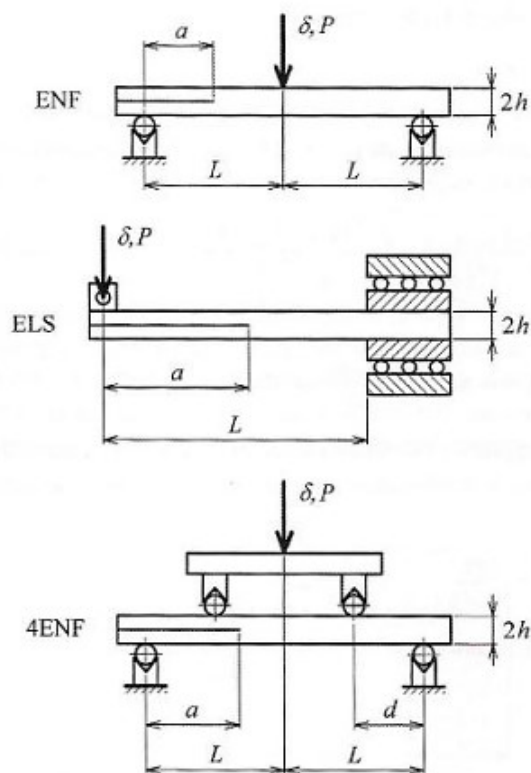


Figura 27 - Representação esquemática dos ensaios ENF, ELS e 4ENF.

Estes ensaios, geralmente utilizados para a caracterização da fratura interlaminar em materiais compósitos, servem de base à maioria dos artigos publicados sobre a fratura das juntas adesivas [12]. O ensaio ENF é o mais utilizado para a caracterização de materiais à fratura, sobretudo devido à sua simplicidade.

#### 2.2.4.1 Modo II

O ensaio ENF descreve-se como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meio vão, com um comprimento de pré-fenda inicial ( $a_0$ ) definido, onde a meio é aplicada uma carga  $P$  (Figura 28). A solicitação aplicada origina a propagação da fenda sem haver a separação dos aderentes. Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que  $a_0$  seja pelo menos igual a 70% de  $L$  (meio-vão) [30]. Como os métodos utilizados para determinação dos parâmetros coesivos tipicamente requerem a medição de  $a$  durante a propagação, podem-se observar dificuldades na estimativa de  $G_{Ic}$  por esta medição [31].

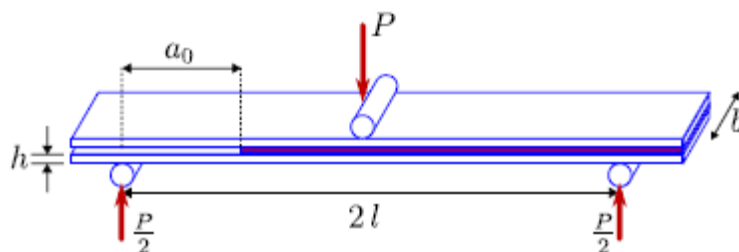


Figura 28 – Geometria do provete ENF [27].

É relevante mencionar que a fenda está localizada no eixo neutro do provete (meio da espessura), pelo que a sua propagação é controlada pelas tensões de corte, traduzindo assim um efeito de modo II puro.

Outro ensaio muito idêntico ao anterior é o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF), que se diferencia pelo número de ponto de carregamento (Figura 29). Os dois cilindros de carregamento permitem que a placa gire livremente, o que resulta na aplicação de uma carga idêntica em ambos os cilindros de carregamento. A propagação da fenda é estável, no entanto este ensaio está associado a atrito considerável na região da pré-fenda [12].

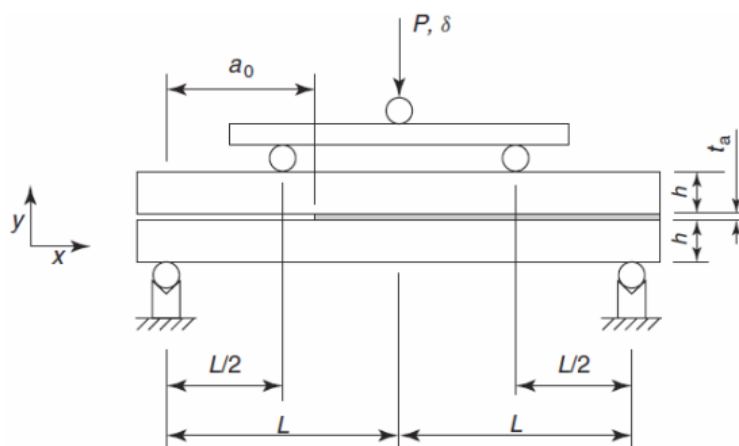


Figura 29 - Esquema do ensaio 4 ENF [12]

Por fim, o ensaio *End-Loaded Split* (ELS) caracteriza o comportamento à fratura de juntas adesivas quando estas se encontram sob uma carga de modo II. Este ensaio apresenta algumas dificuldades na obtenção de  $G_{IIC}$  relacionadas com a existência de grandes deslocamentos e é muito sensível às condições de aperto [12, 32]. Tem a particularidade de a extremidade oposta ao carregamento ser encastrada, como se pode ver na Figura 30.

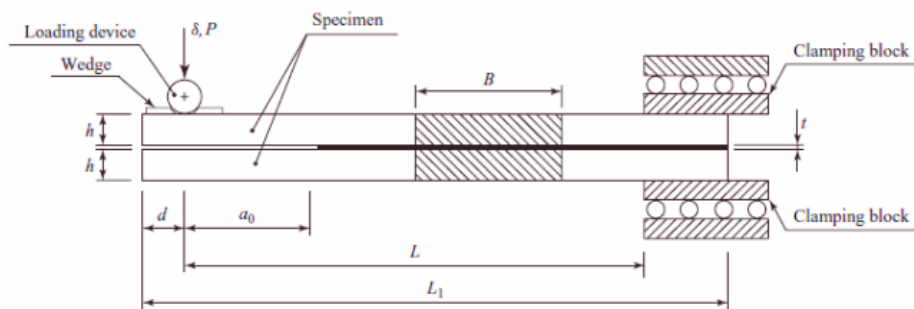


Figura 30 - Esquema de ensaio ELS [12].

### 2.3 Previsão de resistência de juntas adesivas

O modelo das juntas adesivas sobredimensionadas que resultavam em estruturas mais dispendiosas e mais pesadas, estava relacionado com a falta de modelos de materiais precisos e de critérios de rotura adequados. Esta área do conhecimento sofreu um significativo processo evolutivo, nomeadamente metodologias de previsão fiáveis que permitem aumentar a eficiência. Existem duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas: as análises de forma fechada - métodos analíticos - e os métodos numéricos.

Primeiramente, o modelo analítico de Volkersen [33], desenvolvido na década dos anos 30, partiu do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo apenas ocorre em corte. O conceito analítico torna-se mais complexo na eventualidade do adesivo se deformar plasticamente, da utilização de substratos de compósito ou de materiais diferentes. O MEF [34] é atualmente a técnica mais utilizada para a análise de juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams [35], que introduziram fatores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. No início da aplicação do MEF, recorria-se então à mecânica dos meios contínuos para a previsão da resistência das juntas adesivas, que requer a distribuição de tensões e um critério de rotura apropriado. É possível também combinar o MEF com técnicas da mecânica de fratura para a previsão da resistência, quer pelo fator de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Todavia, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à necessidade de voltar a criar a malha na eventualidade da propagação da fenda, originando uma repercussão ao nível do esforço computacional [36]. A modelação numérica sofreu enormes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. A modelação de dano por MDC inclui a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é possível prever dano com a mecânica de fratura, mediante a utilização de elementos coesivos para promover a

propagação de fendas. Outra técnica para modelar o crescimento de fendas com tensão, é o método de Elementos Finitos eXtendido (MEFX), mais utilizada nos dias de hoje, em que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento descontínuo.

### 2.3.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é uma técnica que utiliza modelos analíticos ou numéricos como o MEF para obtenção dos valores máximos de deformação, tensão ou energia de deformação. A sua intuição é realizada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. Desta forma, são comparados os valores obtidos pelos modelos com os valores admissíveis dos materiais, permitindo assim estimar a resistência das ligações adesivas. Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen [33], que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. [10] usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspeto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de particularidade das tensões nas extremidades da malha. Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante espontâneos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios [37]. Todavia, estes podem ser bastante complexos sem que as suas previsões sejam realistas. Estes fundamentos não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams [35], em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

### 2.3.2 Mecânica da fratura

Para a mecânica dos meios contínuos a estrutura e o seu material são contínuos, o que não enquadra no caso de existirem defeitos no material, ou então materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fratura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) provocados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a  $180^\circ$ . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados.

Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. É possível, através da mecânica da fratura avaliar se estes defeitos são suscetíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, se mantêm com dimensões inferiores às críticas, embora se possam propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fratura pela propagação de fendas pode ser iniciada por diferentes fatores, como a aplicação de cargas lentas, fadiga, impacto, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes da ação de outros. Foi graças ao estudo de Griffith [20] que existem os princípios básicos da mecânica da fratura, através do estudo de fraturas em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fratura ocorre a partir do mais crítico. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável antes da rotura final [38]. Como a teoria da mecânica da fratura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de *Hutchinson-Rice-Rosengreen* (HRR) por Hutchinson [39] e por Rice [40] para modelar roturas dúcteis.

Grande parte dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, modo I ( $G_I$ ) ou modo II ( $G_{II}$ ) e o respetivo valor crítico ou resistência à fratura,  $G_c$  [41], em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fratura de juntas adesivas pode ocorrer em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tração e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fratura. O conceito de envelope da fratura fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tração e corte quando as duas estão presentes na sollicitação.

### 2.3.3 Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo (MDC) surgiram com os estudos de Barenblatt [42] e Dugdale [43], que descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, originando métodos mais completos para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos MDC pode ser feita em elementos de mola ou em elementos coesivos [44].

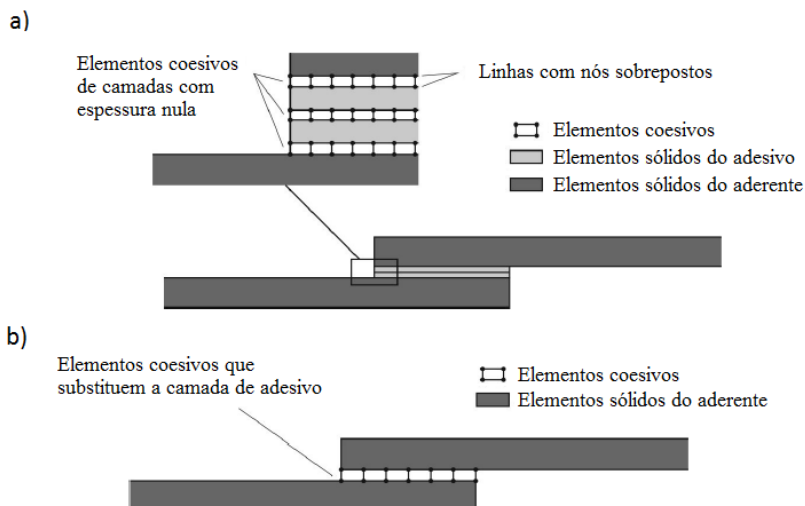


Figura 31 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura nula: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) [2].

Os MDC têm como princípio fundamental, a introduzir nos modelos de zonas de propagação de dano em estruturas, e conseqüente avaliado o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. Para este efeito, são estabelecidas leis coesivas (tração-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 31), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local [45], ou ser aplicados diretamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua [46].

Os MDC, desvalorizam os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, e originam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, através das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são utilizados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa. Assim torna-se possível simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tração-separação são normalmente construídas por relações lineares em que cada uma das etapas de carregamento, é definida de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais [47]. Este modelo está implementado em softwares, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D, apresenta uma componente adicional de corte [48].

### 2.3.3.1 Tipos de Leis Coesivas

Existem vários MDC estudados, o modelo linear parabólico [49], triangular [50], exponencial [51], polinomial [52] e trapezoidal [46], entre outros. De acordo com o

comportamento do material ou a interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [53].

O modelo mais usado, devido à sua simplicidade, reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais [54], é o modelo Triangular. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 32).

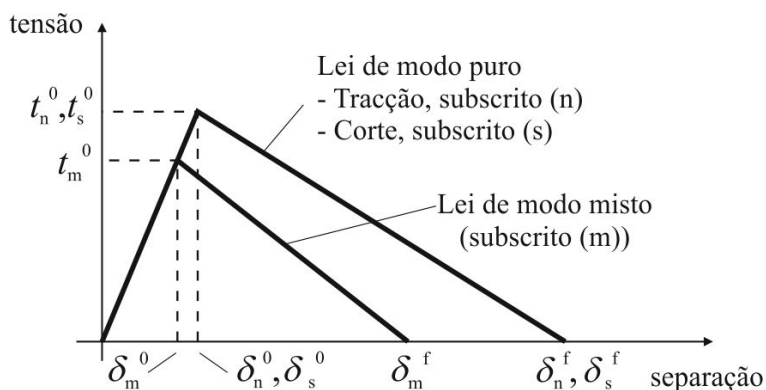


Figura 32 – Modelo coesivo triangular [55, 56]

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [57].

A lei coesiva trapezoidal, lei também bastante utilizada simula o comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I [24] e modo II [25].

### 2.3.3.2 Determinação dos parâmetros coesivos

O comportamento de juntas adesivas pode ser reproduzido de forma precisa através das análises por MDC. Contudo, os parâmetros coesivos devem ser calibrados com ensaios experimentais e respetivamente validados, de forma a simular com maior precisão a rotura da ligação [58]. Têm sido publicados vários trabalhos sobre a definição dos parâmetros coesivos ( $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ ). Contudo, segundo Jung Lee et al. [59], alguns parâmetros como  $t_n^0$  e  $t_s^0$  ainda não se encontram devidamente padronizados. Tem surgido algumas técnicas de análise de dados, como por exemplo o método de definição individual de parâmetros, o método direto e o método inverso, que apresentam diferentes graus de complexidade e de precisão. O esquema de definição individual dos parâmetros consiste na definição isolada dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. Contudo este método é particularmente crítico devidos aos desvios entre os parâmetros do adesivo em material maciço e em

camada adesiva [60]. Este problema surge causado pelo efeito de restrição às deformações de uma camada fina de adesivos entre dois aderentes, e também devido ao modo misto de propagação de fendas em ligações adesivas. De facto, as fendas em materiais maciços tendem a crescer de forma perpendicular à direção de tensão principal máxima [61]. Em ligações adesivas finas, como o adesivo é tipicamente mais fraco e flexível do que os aderentes, as fendas são obrigadas a propagar do sentido longitudinal da ligação. O método inverso consiste no procedimento iterativo de ajuste entre as previsões numéricas e os dados experimentais, considerando por exemplo a curva  $P-\delta$ , o que permite a estimativa de leis coesivas simplificadas para as condições específicas em que se está a executar o ajuste de parâmetros. Nos métodos de definição dos parâmetros e inverso é selecionada uma forma parametrizada da lei coesiva (por exemplo, bilinear ou trilinear) para obter o MDC, com base no comportamento do material a ser simulado [62]. Por outro lado, o método direto define a forma exata as leis coesivas, na medida que este método calcula os MDC da ligação adesiva a partir da informação fornecida pelos ensaios de caracterização à fratura [60], pela diferenciação das curvas  $G_I-\delta_n$  ou  $G_{II}-\delta_s$  (em que  $\delta_n$  é deslocamento em tração e  $\delta_s$  é deslocamento em corte). No entanto, no que respeita aos parâmetros dos MDC,  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  são normalmente os principais parâmetros a determinar, em função do papel preponderante que desempenham nos resultados globais. Para avaliação de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ , os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são geralmente mais simples de aplicar, embora só possam ser utilizados em adesivos que não apresentem uma ductilidade muito acentuada. De facto, a MFLE não é viável em adesivos com grande ductilidade e, nestas condições, o integral- $J$  surge como alternativa para definição de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$ .

Independentemente da técnica utilizada para avaliação dos parâmetros coesivos, os ensaios tipicamente usados para a determinação de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$  são o ensaio DCB (tração) e ENF (corte). O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar  $G_{Ic}$  pois apresenta uma geometria simples e de fácil fabrico dos provetes. Existem vários métodos para obter  $G_{Ic}$ , como métodos baseados na teoria de vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento equivalente ou integral- $J$  [63]. Rice [40] tornou possível obter uma expressão para o valor de  $G_{Ic}$  em provetes DCB através do método de integral- $J$ , que também permite obter a relação entre as tensões transmitidas e os deslocamentos na extremidade da fenda, ou seja, a lei coesiva [64]. O ensaio DCB é constituído por dois substratos colados entre si com uma camada fina de adesivo.

#### 2.3.4 Método de Elementos Finitos eXtendido

O MEFX é uma evolução recente do MEF, que permite a análise e modelação do crescimento do dano para previsão da fratura em estruturas, baseado na resistência dos materiais para a iniciação do dano e em deformações para a avaliação da rotura, em vez dos valores de  $t_n^0/t_s^0$  ou  $\delta_n^0/\delta_s^0$  (deslocamentos de tração e corte

correspondentes a  $P_{máx}$ , respetivamente) utilizados no MDC, pela mesma ordem. No MEFX, comparativamente com os MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, o que constitui uma vantagem significativa. Assim, a fenda passa a poder propagar livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda [65]. Belytschko e Black [66], no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos perto extremidade da fenda, para permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda [67]. Devido ao crescimento da fenda, a extremidade desta muda a sua posição e orientação continuamente, dependendo das condições de carga e da geometria da estrutura, e em simultâneo são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera inicialmente um comportamento linear elástico dos materiais, que é representado por uma matriz constitutiva elástica que relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a rotura são simulados pelo MEFX por critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fraturados. Os critérios de iniciação de dano podem depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas, enquanto as leis tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fratura podem ser lineares ou exponenciais [68].

Campilho et al. [69] utilizaram o MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil, onde se comparam resultados pelo MEFX com os MDC (Figura 33). Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

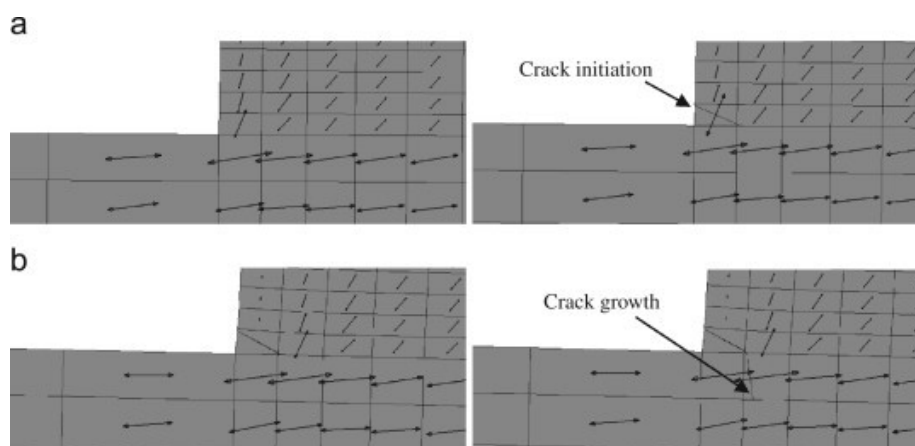


Figura 33 - Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) [65].

## 2.4 Modificação de adesivos

### 2.4.1 Aditivação por partículas

Um método comum para melhorar as limitações dos adesivos é adicionar aditivos à junta adesiva, o que resulta num material compósito. Um material compósito é uma combinação de dois ou mais materiais que possuem melhores propriedades do que os seus componentes individuais. A fase de reforço é uma fibra ou uma partícula que aprimora as propriedades mecânicas, elétricas e térmicas da junta adesiva. Os reforços estão cada vez mais fortes e mais rígidos que a junta adesiva [70], e de acordo com as suas dimensões, podem ser divididos em três categorias:

- a) Reforços à escala nanométrica;
- b) Reforços de microescala;
- c) Reforços à escala macro.

#### 2.4.1.1 Partículas minerais

No ramo automóvel, o desenvolvimento de um novo veículo deve equilibrar uma série de requisitos, melhorar o desempenho em termos de segurança e conforto, reduzir custos e tempos de ciclo de fabricação preservando o meio ambiente. Neste contexto, fabricantes e fornecedores automóveis estão cada vez mais interessados em materiais anteriormente utilizados para aplicações aeroespaciais como magnésio, alumínio e, principalmente, compósitos de matriz orgânica. A utilização de partículas minerais em adesivos aprimora as propriedades mecânicas. No entanto, uma desvantagem em usar partículas sólidas sem juntas adesivas é o aumento significativo na viscosidade dos adesivos, o que impede a formação de uma boa junta adesiva. Os adesivos estruturais atuais podem ser usados para unir uma variedade de materiais semelhantes e

diferentes, geralmente com preparação de superfície mínima e às vezes até mesmo sem desgorduramento. Este tipo de desempenho é obtido pelo uso de polímeros estruturais que, como consequência, levam a complexas microestruturas de materiais compósitos multifásicos.

A adição de partículas minerais a um adesivo pode modificar a viscosidade, opacidade e peso do adesivo, mas também acelerar o processo de junta adesiva. Outras funções específicas que podem ser alcançadas, é por exemplo, a natureza oleofílica do talco (Figura 34), que muitas vezes é visto apenas como um enchimento de redução de custos, tornando-o popular para minimizar a operação de desgorduramento de superfícies metálicas [71]. Também hidrofóbico, o talco pode adicionar resistência química e resistência à água ao adesivo [72]. No entanto, o uso de partículas minerais também afetará o comportamento mecânico do adesivo [73], que é de grande importância para aplicações estruturais. Juntamente com o desenvolvimento de materiais avançados, há uma necessidade de obter conhecimento sobre os vários efeitos das partículas minerais e de propor modelos de materiais apropriados para descrever o seu comportamento.

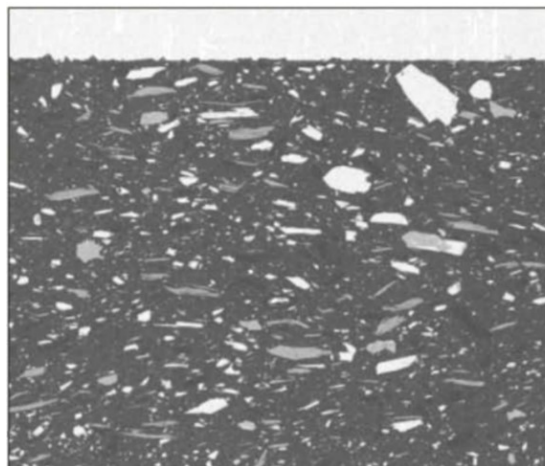


Figura 34 – Adesivo com talco [74]

#### 2.4.1.2 Partículas orgânicas

No caso das partículas orgânicas, inclui-se a cortiça como reforço de microescala. A cortiça provém do sobreiro em locais específicos dos países do Mediterrâneo Ocidental (Portugal, Espanha, sul da França, parte da Itália e norte da África). A cortiça é um material biológico com estrutura alveolar semelhante a um favo de mel com células prismáticas (Figura 35). As células da parede de cortiça são formadas por cinco camadas, incluindo celulose, lignina, suberina, taninos e ceras. As células da primavera são maiores e suas paredes são mais finas de que as do outono [75]. A cortiça é muito leve, muito versátil, elástica, inócua, não afetada pela atividade microbiana, flexível, consideravelmente impermeável a líquidos e gases e também é um bom isolante

elétrico, térmico, acústico e de vibração [76, 77]. Devido às propriedades únicas da cortiça, esta tem vastas aplicações, como nas indústrias aeronáutica e automóvel, e também pode ser usada como reforço para melhorar a tenacidade à fratura de resinas frágeis [77].

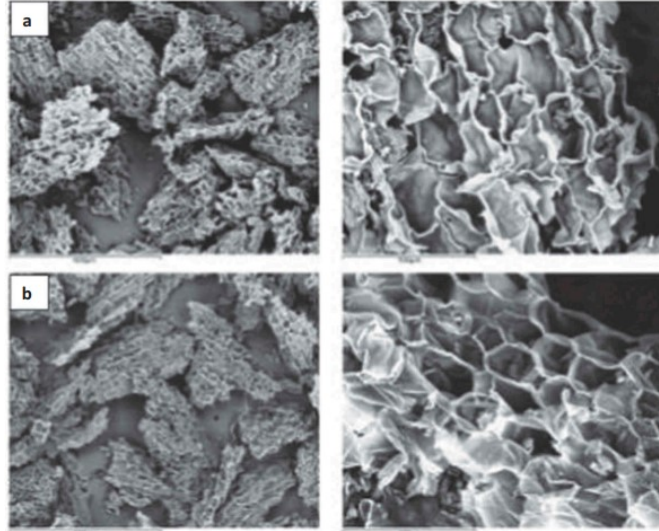


Figura 35 - Partículas de cortiça a) sem tratamento de superfície b) com tratamento de superfície [78].

A cortiça apresenta propriedades mecânicas bastante particulares. A curva de compressão (tensão-deformação) exibe três regiões, relacionadas aos três mecanismos responsáveis pelas propriedades dos materiais celulares flexíveis [79-81]. Como se pode observar na Figura 36, a primeira região apresenta até 7% de deformação, o que corresponde à flexão elástica das paredes celulares; a segunda é um nível quase horizontal, que se estende a cerca de 70% de deformação, causado pela compressão progressiva das paredes celulares; por fim, o esmagamento das paredes celulares e o colapso completo das células fazem com que o nível de tensão aumente abruptamente [80, 82, 83].

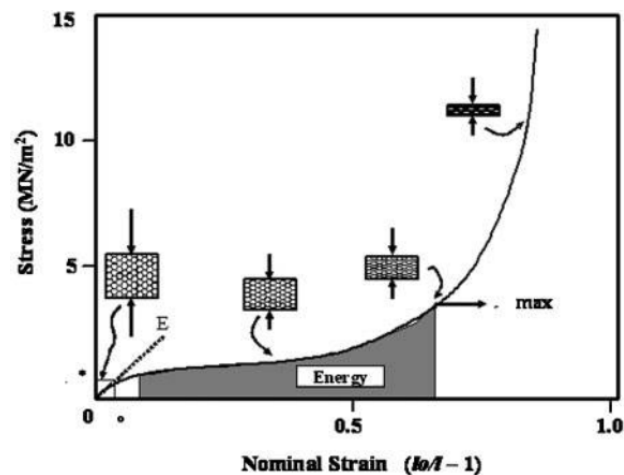


Figura 36 - Curva de tensão-deformação compressiva típica para cortiça [80, 84].

Acredita-se que os materiais à base de cortiça, produtos resistentes, contribuam para a diminuição da quantidade de dióxido de carbono na atmosfera, uma vez que são considerados "neutros em carbono" [85]. Quando usadas como reforço em adesivos, as partículas de cortiça podem criar obstáculos à propagação das fissuras, aumentando assim a tenacidade do adesivo. Este facto ocorre porque a cortiça apresenta uma combinação notável de propriedades. A microestrutura dos adesivos epóxicos é muito útil para aplicações em engenharia de estruturas, pois apresenta alto módulo de elasticidade e resistência, baixa fluência e boa resistência térmica [88, 89]. No entanto, as estruturas desses polímeros também causam fragilidade, com baixa resistência ao início de fendas e à sua propagação [90]. A tenacidade pode ser definida como a resistência do material à fratura sob tensão, ou seja, a capacidade de um material de absorver energia e se deformar plasticamente sem ocorrer fratura. A tenacidade é um dos principais aspetos que regem a resistência dos materiais, pelo que se torna importante ter total conhecimento desta propriedade para desenvolver um adesivo reforçado.

#### 2.4.2 Inclusão de microfibras

As fibras de vidro são usadas de duas formas relevantes, incluindo fibras descontínuas e fibras contínuas [91]. Os enroladores de precisão de alta velocidade (*draw rolls*) produzem filamentos contínuos. Dependendo da velocidade dos rolos de desenho, o diâmetro pode variar de 10 a 40  $\mu\text{m}$ . Diferentemente das fibras de carbono, as fibras de vidro são isotrópicas, pelo que as suas propriedades não mudam com a direção da carga aplicada. As fibras de vidro têm:

- ✓ Densidade relativamente baixa;
- ✓ Baixo custo;
- ✓ Alta resistência;
- ✓ Alto impacto;
- ✓ Baixa condutividade térmica;
- ✓ Grande flexibilidade.

Além disso, as fibras são bons isolantes elétricos, mesmo em baixas espessuras [92-95]. Devido às suas propriedades exclusivas, são usadas como reforços em adesivos e têm amplas aplicações em diversos setores, como aeroespacial, defesa, automóvel e o setor naval. As fibras de vidro são um dos reforços poliméricos mais amplamente utilizados, com quase 90% de todas as fibras reforçadas com plástico (FRPs) feitas de fibras de vidro. Das quais, a forma mais antiga e a mais popular é o vidro de grau elétrico (*E glass*). Outros tipos de fibras de vidro (Figura 37) incluem *A Glass* ou vidro alcalino, *C glass* ou vidro resistente a produtos químicos e *R glass* ou *S glass* de alta resistência. Em circunstâncias de laboratório, as fibras de vidro podem resistir a tensões de tração de cerca de 7000  $\text{N}/\text{mm}^2$ , enquanto as fibras de vidro comerciais atingem 2800 a 4800  $\text{N}/\text{mm}^2$  [96].

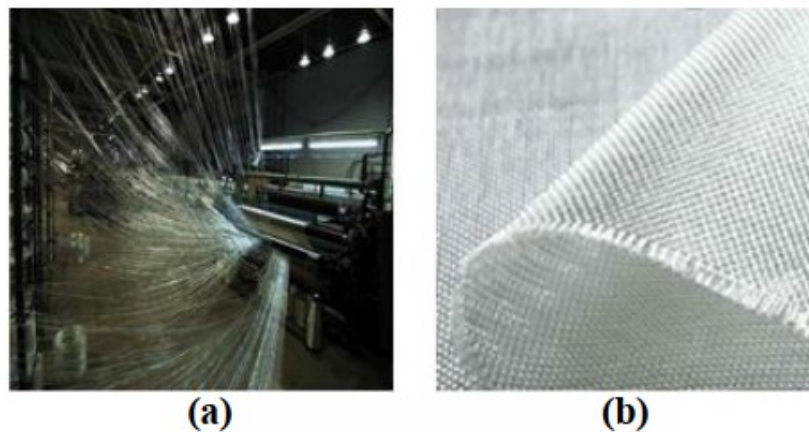


Figura 37 – Imagens de (a) fibras de vidro desenroladas; (b) fibra de vidro tecida [94]

Outras fibras conhecidas são as fibras de carbono que são formadas por regiões grafíticas e não cristalinas e cujo diâmetro pode variar de 5 a 10  $\mu\text{m}$ .

As fibras de carbono apresentam excelentes propriedades mecânicas, como também:

- Termicamente e eletricamente;
- Alta rigidez;
- Alta resistência à tração;
- Baixo peso;
- Alta resistência química;
- Tolerância à temperatura;
- Baixa expansão térmica.

Além disso, sua resistência à tração não é afetada pela humidade e alta temperatura. As fibras são muito populares e úteis em várias indústrias, incluindo aeroespacial, engenharia civil e militar. No entanto, entre todas as fibras de reforço, as fibras de carbono oferecem o preço mais alto [94, 97, 98].

Uma das abordagens mais interessantes é o uso de aditivos. Para uma maior resistência e absorção de energia, as fibras podem ser obtidas adicionando uma segunda fase na forma de partículas ou fibras ao adesivo, enquanto as propriedades físicas e químicas de nenhuma delas mudam [99, 100]. Nas últimas décadas, muitas pesquisas foram realizadas sobre a adição de fibras sintéticas ou naturais aos adesivos. Uma das aplicações das fibras de carbono, é a aplicação de polímeros reciclados reforçados com fibra de carbono como reforço para espumas epóxicas. Os *Carbon Fiber-Reinforced Polymer* (CFRP) têm sido cada vez mais utilizados em aplicações aeroespaciais e automóveis por causa de suas propriedades mecânicas específicas superiores em comparação com suas contrapartes metálicas. Estima-se que a procura global por fibra de carbono alcance 140.000 t em 2020 [101]. Uma das aplicações mais representativas do CFRP tem lugar nas aeronaves Boeing 787 e Airbus A350, onde o CFRP contribui com até 50% em peso [102].

### 2.4.3 Outros aditivos

Como outros aditivos, apresentam-se os pós de borracha (Figura 38) com tamanho micro, são tipicamente feitos de materiais elastoméricos vulcanizados. Esses materiais elastoméricos são produzidos principalmente a partir de pneus usados. No entanto, outras borrachas industriais, como borracha butílica, natural e nitrílica, também podem ser úteis para funcionarem como aditivos. O tamanho das partículas de borracha depende do processo de fabricação e varia tipicamente entre 10 e 180  $\mu\text{m}$ . Esses reforços elastoméricos são amplamente utilizados em várias aplicações, especialmente em adesivos frágeis. A inclusão de partículas de borracha em adesivos frágeis, como adesivos epóxis, pode aumentar significativamente a sua tenacidade.

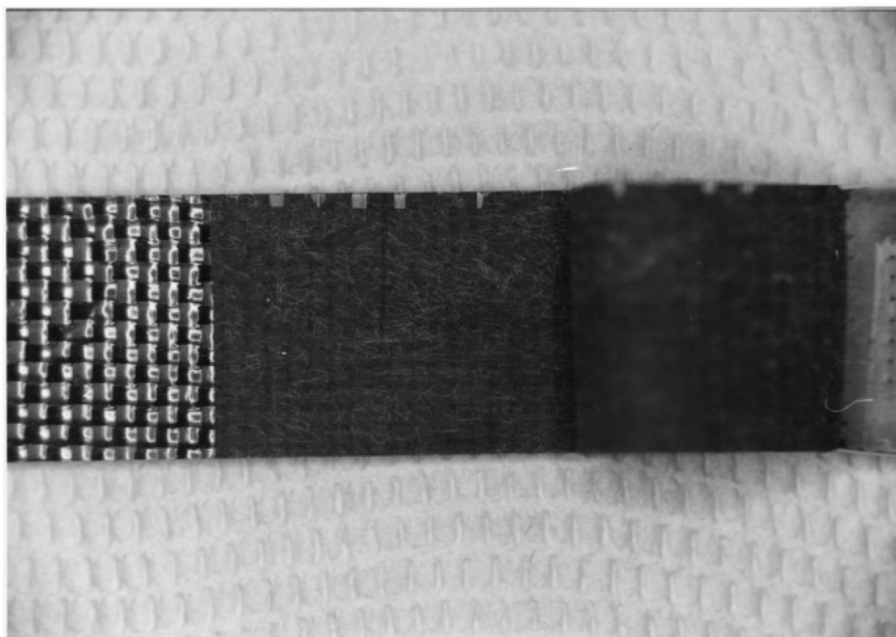


Figura 38 – Adesivo com pós de borracha [103]

Em particular, o campo de sistemas adesivos de *Fibre reinforced plastic* (FRP) estão-se a expandir rapidamente porque a alta relação rigidez/peso do FRP e a boa capacidade de isolamento da borracha podem ser combinadas especialmente em aplicações aeroespaciais e de foguetes [100]. Por exemplo, o uso de um sistema adesivo de FRP/borracha para a carcaça do motor de foguete aumentou significativamente a resistência, de modo que as carcaças mais recentes do motor de foguete são feitas de FRP/borracha em vez de metal. Kunz-Douglass et al. [104] descobriram que a tenacidade de adesivo epóxico aumenta aumentando a fração volumétrica das partículas de borracha no adesivo.

Uma das partículas mais utilizadas é o alumínio, que constitui um reforço à escala macro. No campo de adesivos e juntas adesivas, as macro fibras são geralmente metálicas, como aço, alumínio, entre outros. O diâmetro varia de 0,2 a 1,2 mm [105-

109]. A incorporação de macro fibras metálicas é uma maneira eficiente de melhorar o comportamento mecânico de juntas adesivas [105-107, 109].

As macro fibras metálicas têm algumas vantagens em relação a outros reforços:

- a) Melhor desempenho no processo de cura adesiva;
- b) Condutividade elétrica melhorada da camada adesiva;
- c) Espessura adesiva uniforme.

Este tipo de reforço de macro fibras metálicas pode melhorar as propriedades mecânicas das juntas adesivas [105]. Os efeitos do espaçamento das fibras de alumínio nas juntas adesivas, não apenas causam um aumento na força, como também causam um aumento no deslocamento para ocorrência da falha. Diminuindo o espaçamento das fibras, uma junta adesiva pode sofrer um aumento na resistência ao corte de até 133,9% em comparação com uma junta adesiva não reforçada [106]. Foi relatado que a incorporação de fibras metálicas (Figura 39) melhora a distribuição de tensões na camada adesiva, além do fato de que a condutividade térmica é relativamente maior nas fibras de reforço em comparação com o adesivo, podendo resultar numa melhor transferência de calor durante a cura, e em menores tensões residuais na camada adesiva.

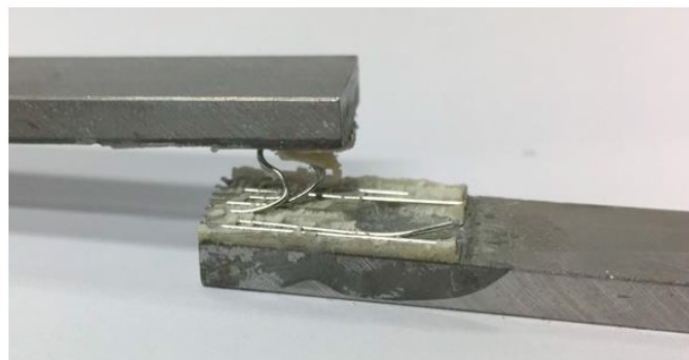


Figura 39 - Junta adesiva reforçada com fibras metálicas [110].

#### 2.4.4 Casos de estudo

##### 2.4.4.1 Cortiça

Retirada a cada 9 - 12 anos [111] a cortiça é usada numa infinidade de produtos, desde os tradicionais aos mais inovadores e inesperados. O principal é a rolha, mas assim que é retirada da base da árvore resulta em matéria prima para isolamento, pavimento e produtos para áreas tão diversas com a construção, a moda, o design, a saúde, a produção de energia ou a indústria aeroespacial. Rolhas e pisos de cortiça são os dois produtos mais representativos da indústria. Portanto, a possibilidade de combinar a cortiça com adesivos torna-a numa opção diferenciadora e contribui para que assuma

uma importância crescente. Na Tabela 3 são apresentados, de forma sucinta, vários trabalhos em que usam adesivos com a introdução de cortiça.

Tabela 3 - Casos de estudo de adesivos com cortiça

dos Santos et al.  
[112]

Neste trabalho, apresenta-se um novo adesivo ecológico sustentável que se baseia na extração aquosa de cortiça, resultante da liquefação catalisada por álcool poli-hídrico de pó ou grânulos de cortiça. Os resultados revelaram que as formulações com o extrato aquoso da cortiça liquefeita podem ser utilizadas para unir duas superfícies lignocelulósicas. O extrato aquoso da liquefação da cortiça pode ser encarado como uma fonte química valiosa adicional para o desenvolvimento de outros produtos.

Barbosa et al. [78]

No presente estudo são utilizadas micropartículas naturais de cortiça com o objetivo de aumentar a tenacidade de um adesivo epóxico frágil. A tenacidade do adesivo foi avaliada através de testes de fratura. Foi utilizado o método de desenho de Taguchi para entender a influência de cada parâmetro em estudo e a interação entre eles. Com esta pesquisa, foi possível concluir que a cortiça pode melhorar a tenacidade do adesivo. A quantidade de cortiça, o tamanho e o uso do tratamento de superfície plasmática influenciam as propriedades mecânicas.

Barbosa et al.  
[113]

No presente estudo foram usadas micropartículas naturais de cortiça para aumentar a tenacidade de um adesivo epóxico frágil. O principal objetivo desta pesquisa foi investigar o efeito da quantidade de partículas de cortiça na reação de cura de um adesivo epóxico frágil, sabendo que a quantidade presente influencia as propriedades mecânicas. Concluiu-se que as propriedades mecânicas apresentadas pela resina composta/cortiça não se devem a mecanismos inerentes ao processo de cura.

#### 2.4.4.2 Fibras

Como se tem vindo a verificar, a utilização de fibras atualmente é cada vez mais procurada. As suas propriedades mecânicas superam as propriedades de ligas metálicas. São, portanto, apresentados na Tabela 4 casos de estudo de adesivos reforçados com fibras.

Tabela 4 - Casos de estudo de adesivos com fibras

Khoramishad et al.  
[105]

Neste artigo, os parâmetros geométricos e materiais de fibras metálicas empregadas para reforço de junta de sobreposição adesiva simples (SLJ) foram estudados por meio de investigações experimentais e modelos de elementos finitos. Os resultados deste estudo mostraram que, reduzir a distância entre as fibras, aumentar o diâmetro da fibra e escolher um material mais rígido para as fibras, melhora a distribuição de tensões e reduz os valores de tensão máxima e média na junta adesiva.

Razavi et al. [110]

O objetivo deste artigo é avaliar o comportamento à fadiga de adesivos reforçados com fibras metálicas. A distância entre as fibras de reforço foi considerada o principal parâmetro para os testes de fadiga. Os resultados mostraram que, diminuindo a distância entre as fibras, pode-se obter uma melhoria significativa para a resistência à fadiga de juntas adesivas reforçadas com fibras metálicas.

Delzendehrooy et al. [114]

Neste artigo, são consideradas fibras e partículas naturais fornecidas de diferentes partes das palmeiras para melhorar a resistência estática das juntas adesivas. Os resultados mostram que as fibras de palmeira melhoraram significativamente a resistência das juntas adesivas e mostram que as fibras de palmeira podem melhorar a resistência das juntas adesivas, diminuindo a propagação de fendas, absorvendo energia.

#### 2.4.4.3 Nanotubos de carbono com paredes múltiplas (MWCNTs)

Os nanotubos de carbono (NTCs) são considerados um dos materiais de reforço mais promissores para a próxima geração de compósitos estruturais e compósitos multifuncionais [115]. Estes tubos em escala molecular de carbono grafítico têm excelentes propriedades mecânicas, térmicas e elétricas. De facto, alguns CNTs são mais fortes que o aço, mais leves que o alumínio e mais condutores que o cobre [116]. Os CNTs têm alta taxa de proporção e propriedades físicas e químicas excepcionalmente superiores a outros materiais, e podem melhorar as propriedades do polímero em baixa concentração [117-119]. Na Tabela 5 apresentam-se alguns casos de estudo de adesivos reforçados com nanotubos.

Tabela 5 - Casos de estudo de adesivos com nanotubos

Khoramishad  
e  
Khakzad [120]

e

Neste trabalho, foi investigada a energia de fratura de um adesivo epóxico reforçado com *Multi-Walled Nanotubes* (MWCNTs) com diâmetro externo inferior a 8 nm sobre carregamento no Modo I. Os valores de energia de fratura dos adesivos reforçados e não reforçados foram obtidos a partir de testes experimentais. Os resultados experimentais mostraram que incorporar maior quantidade de MWCNTs impôs um efeito menos positivo na energia de fratura do adesivo, sendo que os mecanismos de fratura que aumentaram a energia de fratura foram o arrancamento e descolamento dos nanotubos.

Wernik et al. [121]

Neste trabalho, as investigações têm como objetivo caracterizar as propriedades físicas e mecânicas de adesivos epóxidos estruturais reforçados com nano-reforço. Descreve-se a metodologia usada para dispersar os nanotubos de carbono no adesivo e apresentam-se detalhes referentes à preparação da superfície aderente, controlo da espessura da linha de adesão e condições de cura do adesivo. O estudo conclui que, com a dispersão dos nanotubos os resultados dos testes indicam uma melhoria aproximada de 25% na resistência à tração e rigidez dos adesivos estruturais nano-reforçados.

Yu et al. [122]

Neste trabalho são utilizados nanotubos de carbono de paredes múltiplas, sendo utilizados como reforço para o desenvolvimento de adesivos epóxidos. São estudadas as propriedades térmicas, elétricas e mecânicas do adesivo e suas juntas. Verificou-se que a estabilidade térmica e a condutividade elétrica aumentaram com a adição de CNTs. A junta com 1% em peso de CNT, em particular, apresentou a maior tenacidade à fratura entre todas as juntas testadas.

# DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

3.2 Trabalho numérico



## 3 DESENVOLVIMENTO

### 3.1 Trabalho experimental

Neste capítulo é feita a análise dos dados relativos aos ensaios DCB e ENF para o adesivo Araldite® AV138 com introdução de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. Apresenta-se a descrição dos materiais utilizados, o procedimento experimental utilizado no fabrico dos provetes DCB e ENF e os ensaios destes mesmos provetes, com o objetivo de obter os valores experimentais de  $G_{Ic}$  nos provetes DCB e  $G_{IIc}$  para os provetes ENF. De referir que os ensaios foram realizados no âmbito de um trabalho elaborado anteriormente [123]. No final, é feita uma discussão detalhada dos resultados obtidos. Todos os trabalhos práticos foram desenvolvidos no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

#### 3.1.1 Materiais

Em ambos os ensaios realizados (DCB e ENF), os provetes foram preparados com substratos de alumínio AW 6082-T651 e o adesivo (Araldite® AV138) com introdução de cortiça.

##### 3.1.1.1 Substratos

Os provetes utilizados na realização dos provetes DCB e ENF consistem na liga de alumínio 6082 T651, que é uma liga da série 6000, com 82% de alumínio; e magnésio e silício como principais elementos de liga. Esta liga apresenta excelente resistência à corrosão e boa soldabilidade. A liga 6082 é conhecida como uma liga estrutural que sofreu tratamento térmico, foi solubilizada e envelhecida artificialmente.

A Tabela 6 apresenta a composição química da liga AW 6082-T651.

Tabela 6 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [124]

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

Na Tabela 7 apresentam-se as propriedades mecânicas da liga de alumínio, conforme especificado na ficha técnica do fabricante.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [124]

Espessura [mm]	Tensão de rotura mínima [MPa]	Tensão de cedência 0,2% mínima [MPa]	Alongamento mínimo [%]	Dureza Brinell	Modulo de Young [GPa]
6,00-12,50	300	255	9	91	70

A liga de alumínio 6082 é a liga mais amplamente utilizada para maquinagem e são normalmente usada nas indústrias aeronáutica e automóvel [1], tendo as mais diversas aplicações estruturais. A liga 6082 apresenta alta resistência, podendo ser comercializada sob a forma de barras, tubos e perfis.

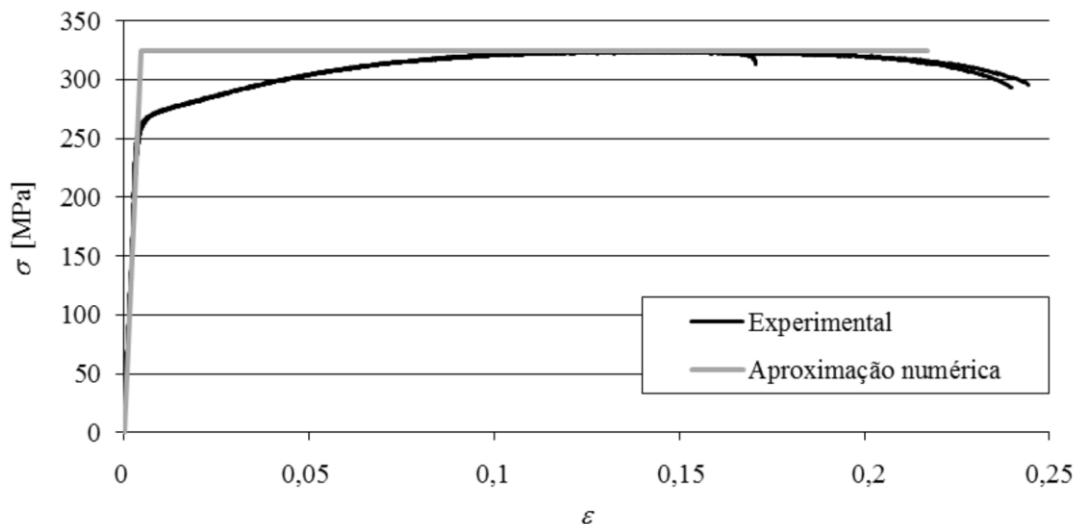


Figura 40 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW 6082-T651 [69]

A Figura 40 mostra as curvas tensão-deformação ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) desta liga de alumínio à tração, obtidas no trabalho de Campilho et al. [69], de acordo com a norma ASTM-E8M-04.

### 3.1.1.2 Adesivo

O adesivo utilizado foi o Araldite® AV138 (Figura 42), fabricado pela empresa suíça Huntsman Advanced Materials. Este adesivo caracteriza-se pelo seu comportamento frágil mas de elevada resistência (Figura 41), sendo adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [125]. É adequado a

aplicações industriais que requerem resistência a ambientes agressivos e quentes. Pode também ser utilizado em produtos eletrônicos e em estruturas aeroespaciais.

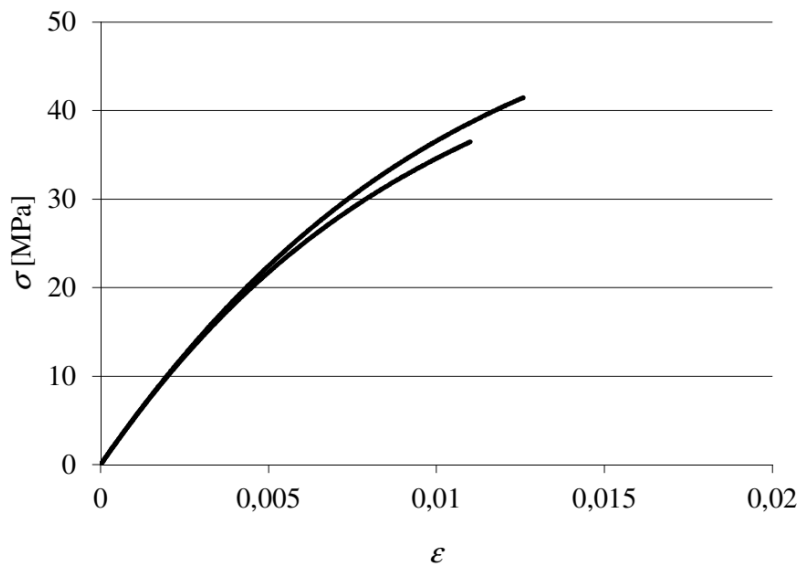


Figura 41 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [126]

Verdadeiramente, os adesivos frágeis são bastante sensíveis à clivagem e ao arrancamento, sendo a rotura das respetivas juntas iniciada nas extremidades da ligação adesiva. O Araldite® AV138 é um adesivo epóxico frágil, muito sensível a qualquer tipo de defeitos que o adesivo possua [126, 127]. Composto por dois componentes, resina AV138 e endurecedor HV998, este adesivo apresenta excelente resistência à tração e ao corte. Este adesivo é fornecido em duas embalagens e, como tal, é necessário proceder à pesagem dos dois componentes, utilizando uma balança digital. A relação de mistura utilizada neste adesivo é de 100 g de resina para 40 g de endurecedor, com uma precisão de  $\pm 5\%$ . Portanto, na preparação do Araldite® AV138, juntou-se a resina com o endurecedor num recipiente, mexendo durante 3 minutos até que a mistura se torne homogênea. Com os substratos pré-preparados, este adesivo foi aplicado manualmente com uma espátula, pela zona de colagem do substrato.

As principais vantagens do Araldite® AV138 são as seguintes [128]:

- Baixa emissão de gases e perda de voláteis;
- Excelente resistência química;
- Resistente a temperaturas de até 120°C;
- Cura a temperaturas acima de 5°C;
- Ótimo preenchimento e baixo escorrimento.



Figura 42 - Adesivo Araldite® AV138

A Tabela 8 indica as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes do adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [126, 127].

Tabela 8 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® AV138 [126, 127]

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

(a) valores estimados na referência [127] (b) valor do fabricante

### 3.1.1.3 Cortiça

A cortiça é originada do sobreiro e é um material cujas aplicações são conhecidas desde há muito tempo. Macroscopicamente, é um material leve, elástico e praticamente impermeável a líquidos e gases. Microscopicamente, a cortiça é constituída por camadas de células de aspeto alveolar, cujas membranas celulares possuem um certo grau de impermeabilização e estão cheias de um gás, usualmente considerado semelhante ao ar, que ocupa cerca de 90% do volume [79]. Possui uma massa volúmica média de cerca de 200 kg/m<sup>3</sup>, e uma baixa condutividade térmica. Na aglomeração da cortiça usam-se fundamentalmente resinas sintéticas de poliuretano, fenólicas (fenol-formaldeído) e melamínicas, e por vezes são também utilizadas resinas de origem vegetal [129]. O material de cortiça que se está a estudar trata-se de cortiça expandida, utilizada essencialmente no fabrico de aglomerados designados como aglomerados negros de cortiça.

A constituição química da cortiça engloba vários tipos de compostos, que tradicionalmente são divididos em cinco grupos [79].

- a) Suberina (45% - responsável pela sua compressibilidade e elasticidade);
- b) Lenhina (27% - estrutura das paredes celulares);
- c) Polissacáridos (12% - também ligados à estrutura da cortiça);
- d) Ceróides (6% - repelem a água e contribuem para a impermeabilidade);
- e) Taninos (6% - cor e proteção/conservação do material);
- f) Cinzas (4%).

A cortiça apresenta uma densidade muito baixa, o que se deve a uma estrutura alveolar com paredes muito finas. Esta estrutura confere-lhe características únicas que a diferenciam enquanto matéria-prima tais como:

- ✓ A leveza e a fluabilidade (contém 90% de ar encerrado em células impermeáveis);
- ✓ A elasticidade, compressibilidade e impermeabilidade (que se deve à presença de suberina e à grande flexibilidade das suas membranas celulares);
- ✓ A eficiência isoladora acústica, térmica e vibrática (que se deve ao facto de o ar se encontrar encerrado em minúsculos compartimentos estanques, isolados por um material de baixa densidade).

É um produto natural, ecológico e inodoro que conserva a sua eficiência indefinidamente, e constitui um retardador da combustão. A cortiça é compacta e resistente e pode considerar-se imputrescível e inalterável, características que a tornam num material com um vasto potencial de aplicações. A primeira extração de cortiça ocorre quando a árvore atinge 25 a 30 anos. A primeira cortiça retirada recebe o nome de virgem, a segunda de secundeira e as extrações subsequentes o nome de amadia. Numa análise macroscópica à cortiça aquando da extração das árvores

observa-se a parte exposta, o “entrecasco”, que vai sendo desligado pelas sucessivas camadas de novas células que se vão formando no interior, as quais formam a “raspa”, que é o principal constituinte da “costa” da cortiça (parte externa), que seca, contrai e endurece, fendilhando devido ao crescimento. Analogamente, a parte interna do tecido sub eroso, que corresponde à última camada de crescimento anual, é designada por “barriga” ou “ventre” (Figura 43). Esta camada tem menor elasticidade do que as outras camadas e apresenta orifícios dos canais lenticulares (poros). A porosidade está estreitamente ligada à qualidade da cortiça. A cortiça virgem não apresenta raspa.

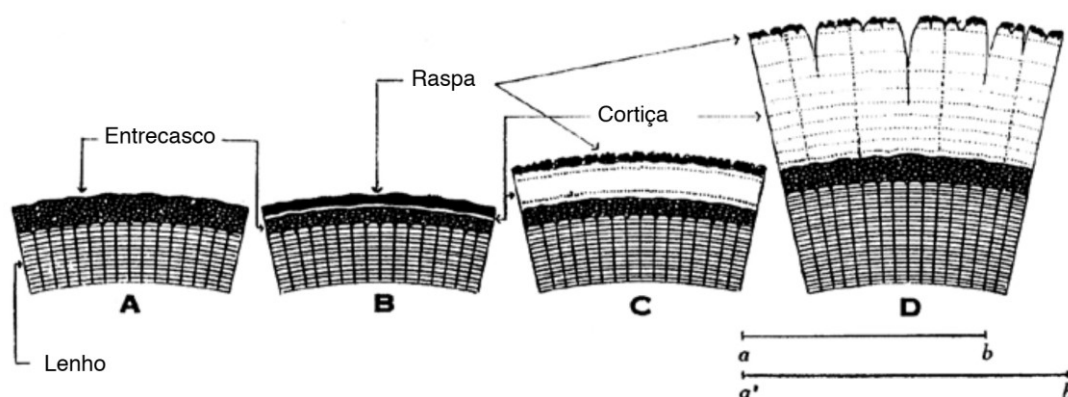


Figura 43 - Análise macroscópica da cortiça [79]

Ao longo da espessura da cortiça são observáveis os anéis de crescimento, distinguíveis por serem constituídos por células formadas com diferentes dimensões e com diferentes espessuras das suas paredes celulares, conforme sejam formadas na primavera/verão ou no outono/inverno. As partes da cortiça que não são utilizadas no fabrico de rolhas e de outros produtos naturais (decorativos, blocos, discos, lâminas), bem como os desperdícios daí resultantes, são transformadas em grânulos, base de um atual grande sector da indústria corticeira, o dos aglomerados. A cortiça transformada, sob a forma de aglomerado, mantém todas as suas propriedades anteriormente descritas. O fato de ser um produto 100 % natural e ecológico confere-lhe uma posição de clara vantagem face aos padrões ecológicos aos quais hoje se aspira [79].

#### 3.1.1.3.1 Aglomerado de cortiça expandida

O material de cortiça utilizado no adesivo Araldite® AV138 (Figura 42) trata-se de cortiça expandida utilizada essencialmente no fabrico de aglomerados designados como aglomerados negros de cortiça. O aglomerado de cortiça expandida é um produto constituído essencialmente por falca (70 a 80%), tecido misto de cortiça, entrecasco e lenho, proveniente dos ramos e obtido por extração manual ou mecânica dos despojos das podas dos sobreiros. O aglomerado pode também conter refugos,

cortiça de árvores queimadas ou mortas, aparas de costa e restos de cortiça com defeitos graves, o que piora a qualidade do aglomerado. O aglomerado de cortiça expandida, também denominado por aglomerado puro, recebe esta designação porque se fabrica de forma distinta dos outros aglomerados. A substância de ligação num aglomerado puro é resultante da degradação térmica da própria cortiça a altas temperaturas. Também pode ocorrer a designação de aglomerado negro, devido à coloração do produto final. Após o descortiçamento ocorre o processo de secagem. Na secagem o material é empilhado e por vezes remexido, para que a sua secagem possa ser homogénea. O aglomerado estando seco é armazenado durante vários meses, normalmente em área coberta. De seguida efetua-se o loteamento ou mistura dos vários tipos de cortiça de diferentes proveniências [130]. Após as misturas, coloca-se a matéria-prima nos moinhos de trituração. Esta operação serve para obter grânulos com determinada dimensão em função do tipo de aglomerado a fabricar, possuindo um rendimento de 60%. Esta operação também tem função de limpeza. A granulometria final normalmente é de 3 a 10 mm para o aglomerado acústico e de 5 a 22 mm para o aglomerado térmico. No fabrico dos aglomerados acústicos é normalmente usada cortiça de melhor qualidade [79]. A fase seguinte serve para eliminar impurezas, pó e grânulos de densidade superior como, por exemplo, pedaços de lenho, entrecasco e terras. Esta operação é efetuada com o auxílio de separadores densimétricos vibratórios ou mantas vibratórias. As impurezas retidas são na ordem dos 30 a 35%. O granulado obtido é seguidamente ensilado e seco por insuflação de ar quente a cerca de 110°C ou então é previamente seco e depois ensilado. A intenção desta ensilagem é a de reduzir e controlar o teor de humidade até 6 a 8%. A temperatura de secagem não pode ser muito elevada de modo a não libertar as resinas naturais da cortiça. Este processo é bastante relevante porque poderá por em causa todo o processo de cozimento [79]. O cozimento é um processo que pode ser realizado por via seca ou húmida. Nos processos de via seca a matéria é sujeita a um tratamento térmico num forno. O processo de via húmida, também designado por autoclave ou *steambacket*, é o mais usual nos dias de hoje. Neste caso, o cozimento é feito com o vazamento de vapor de água, normalmente a 340°C, e a densidade final depende do grau de compactação empregue. O aglomerado produzido em autoclaves é mais homogéneo e mais económico do que o produzido em fornos, exigindo menor tempo de fabrico. O vapor de água, além de provocar o cozimento, também retira algum material exsudado, diminuindo a massa volúmica e melhorando as características de isolamento. Como desvantagem apresenta-se o facto de não ser possível fabricar elevadas massas volúmicas pois, à medida que se comprime o granulado, mais difícil se torna este ser atravessado pelo vapor injetado, com um limite de compactação na ordem dos 300 kg.m<sup>-3</sup>. No processo da autoclavagem, o molde é o próprio autoclave. O granulado seco é introduzido até uma determinada altura, dependendo da compressão ou massa volúmica requerida. Efetua-se um aperto antes da cozedura e depois realiza-se o processo com a insuflação de vapor de água

entre os 300 e 370°C e com uma pressão de cerca de 30 a 60 kPa (Figura 44). No final da passagem do vapor pode realizar-se uma nova compressão, podendo o volume final passar a ser metade do inicial, no caso de blocos mais densos. Com a introdução do vapor, e vazando a massa de grânulos, será produzida a exsudação das resinas para a superfície dos grânulos e o seu aumento de volume poderá ser até 1,8 vezes, determinando a sua aglutinação. O tempo de cozimento, sendo de 17 a 30 minutos nos casos mais comuns, depende do teor de humidade do granulado, da temperatura do vapor e do volume/massa do granulado. A segunda compactação, atrás referida, dará origem ao esmagamento dos canais de escoamento, ao estabelecimento de novas superfícies de contacto e ao esmagamento celular nas zonas de contacto. Durante o processo de cozimento, o aglomerado de cortiça expandida perde holocelulose (9%) e extratáveis (10%), ganhando no teor de suberina (44%), lenhina (34%) e cinza (6%) [130].



Figura 44 - Processo de aglomeração no autoclave [131]

Assim são obtidos os blocos de cortiça expandida que, depois de estabilizados, são retificados e cortados em placas de diferentes espessuras, normalmente com serras de fita, a que se segue o acerto de dimensões e esquadria, com uma serra de disco. Os blocos são embalados e armazenados. Os aglomerados produzidos podem ser de três tipos – térmicos, acústicos ou vibráticos - a diferença baseia-se nas granulometrias e compressões usadas que conduzem a diferentes densidades finais. Os aglomerados acústicos têm uma massa volúmica de 90 kg/m<sup>3</sup>, os térmicos de 120 kg/m<sup>3</sup> e os vibráticos devem ter uma massa volúmica superior a 180 kg/m<sup>3</sup>. Um aglomerado de cortiça expandida com menor densidade tem uma maior capacidade para absorver água, ou seja, uma maior higroscopicidade, uma pior aglutinação dos grânulos e maior capacidade de desintegração e afetação das propriedades mecânicas intrínsecas. Com uma menor densidade existe uma diminuição do seu coeficiente de condutibilidade térmica, coeficiente este que aumenta com a humidade do material e a temperatura do ambiente onde está inserido.

Tendo este trabalho como foco principal o aglomerado de cortiça expandida, são apresentadas as exigências e referências normativas para este produto (Figura 45).

CARACTERÍSTICA	EXIGÊNCIA	MÉTODO DE ENSAIO	
Conductividade térmica	$\leq 0,060 \text{ W/m.K}$	ISO 8302	
Resistência térmica	$\geq 0,025 \text{ m}^2.\text{K/W}$	ISO 8301	
Comprimento	Classe L1: valor nominal $\pm 3 \text{ mm}$ Classe L2: valor nominal $\pm 5 \text{ mm}$	NP EN 822	
Largura	Classe W1: valor nominal $\pm 2 \text{ mm}$ Classe W2: valor nominal $\pm 3 \text{ mm}$	NP EN 822	
Espessura	tolerâncias: Classe T1: $\pm 1 \text{ mm}$ Classe T2: $\pm 2\% \text{ c/ máximo } 2 \text{ mm}$	NP EN 823	
Esquadria	Comp. e larg. Espessura	$\leq 4 \text{ mm/m}$ $\leq 2 \text{ mm/m}$	NP EN 824
Planeza	$\leq 2 \text{ mm}$	NP EN 825	
Estabilidade dimensional a $(23\pm 2)^\circ\text{C}$ e $(50\pm 5)\% \text{ hr}$	comprimento e largura planeza	$\leq 0,5\%$ $\leq 1 \text{ mm/m}$	NP EN 1603
Estabilidade dimens. sob acção temp <sup>a</sup> e humidade	comprimento e largura planeza	$\leq 0,5\%$ $\leq 1\%$	NP EN 1604
Deformação em condições específicas de compressão e temperatura	$\geq \text{DLT}$	NP EN 1605	
Manuseamento	$\geq 130 \text{ kPa}$	EN 12089 mét <sup>o</sup> B	
Teor em água	$\leq 8\% \text{ (m/m)}$	NP EN 12105	
Resistência ao fogo	Classificação	NP EN 13501-1	
Massa volúmica aparente	$\leq 130 \text{ kg/m}^3$	NP EN 1602	
Comportamento à compressão (10% deformação)	Nível CS (10)90 $\geq 90 \text{ kPa}$ Nível CS (10)100 $\geq 100 \text{ kPa}$ Nível CS (10)110 $\geq 110 \text{ kPa}$	NP EN 826	
Carga pontual	$\geq$ nível declarado	NP EN 12430	
Compressibilidade	Espessura Compressibilidade Red. Esp. Longo termo	$\leq$ valor declarado $\leq$ valor declarado Ver abaixo	NP EN 12431
Fluência sob compressão	Ver abaixo	EN 1606	
Tensão de tracção perpendicular às faces	Nível TR 40 $\geq 40 \text{ kPa}$ Nível TR 50 $\geq 50 \text{ kPa}$ Nível TR 60 $\geq 60 \text{ kPa}$	NP EN 1607	
Comportamento à flexão	$\geq 130 \text{ kPa}$	EN 12089 mét <sup>o</sup> B	
Resistência ao corte	$\geq 50 \text{ kPa}$	NP EN 12090	
Absorção de água (curta duração)	$\leq 0,5 \text{ kg/m}^2$	NP EN 1609 mét <sup>o</sup> A	
Transmissão ao vapor de água	$\geq$ valor declarado	NP EN 12086	
Massa volúmica aparente	$\geq$ valor declarado	EN 1602	
Resistência ao escoamento de ar	$\geq$ nível declarado	EN 29053	
Propriedades acústicas	$\geq$ valor declarado	EN ISO 354:1993/A1 EN ISO 11654	

Fonte - documento de especificação: NP EN 13170: 2001

Figura 45 - Referências normativas referentes ao aglomerado de cortiça expandida [130].

### 3.1.1.3.2 Exemplos de aplicações

O uso da cortiça na decoração tem aumentado de popularidade, quer para aplicadores profissionais, quer no domínio do *do-it-your-self*. Nomeadamente neste último caso, os modernos sistemas de aplicação (colagens, rolos, encaixes entre outros,) aumentam a sua facilidade e rapidez de instalação [79], usando-se nas seguintes aplicações.

- ✓ Isolamento de coberturas inclinadas;
- ✓ Isolamento de coberturas planas e metálicas;
- ✓ Isolamento de fachadas;
- ✓ Isolamento de paredes internas;
- ✓ Pavimentos.

Mais especificamente, tem-se o isolamento térmico de edifícios, reduzindo perdas de energia, protegendo as lajes e para além disso, impedindo ou reduzindo a condensação superficial da humidade nas paredes e tetos. Uma das principais aplicações do aglomerado expandido é no isolamento térmico de coberturas, onde este material desempenha as funções de isolante e de suporte do sistema de impermeabilização, a resistência a temperaturas elevadas e características de resistência mecânica têm vantagens. No campo da acústica, tem-se a chamada correção acústica por absorção acústica e diminuição do tempo de reverberação (diminuição do eco) em determinados ambientes. No campo anti-vibrático em que se utilizam os aglomerados mais densos, estes aplicam-se como amortecedores das vibrações nos suportes das máquinas, de modo a reduzir a transmissão das vibrações de funcionamento às estruturas em que assentam.

Existem ainda algumas aplicações específicas de granulados e regranulados de cortiça, podendo definir-se algumas funções específicas na construção civil:

- ✓ Enchimento leve na melhoria de situações de isolamentos;
- ✓ Inerte no fabrico de betões para redução de peso de painéis de betão;
- ✓ Termo-isolante em betão e betonilhas;
- ✓ Anti-condensação em paredes ou coberturas;
- ✓ Fono-isolante em pavimentos flutuantes;
- ✓ Enchimentos de parede dupla.

### 3.1.2 Fabrico dos provetes DCB e ENF

Nesta secção estão indicadas as várias etapas necessárias para o fabrico dos provetes DCB e ENF com diferentes concentrações de partículas de cortiça expandida.

#### 3.1.2.1 Preparação dos substratos

Para uma correta preparação da superfície dos substratos é necessário executar essa operação com bastante cuidado e rigor para que os resultados obtidos sejam

satisfatórios. Tem-se como objetivo garantir que a adesão seja tal que o ponto mais fraco da junta seja o adesivo ou o substrato, reduzindo a hipótese de rotura na interface. A fabricação dos provetes envolveu várias etapas até estes ficarem prontos para ensaio. A liga de alumínio foi fornecida em placa de grandes dimensões com 3 mm de espessura. Os provetes foram obtidos por um processo de corte automático através de um disco de corte, o que permitiu obter provetes com 140 mm de comprimento por 25 mm de largura, como se pode verificar na Figura 46.

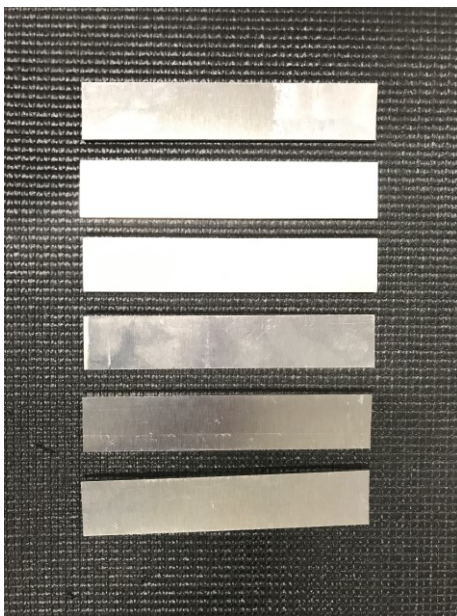


Figura 46 - Provetes de alumínio

A seleção dos métodos para preparação da superfície recaiu sobre processos passivos mecânicos e químicos. Os processos passivos envolveram a abrasão mecânica e a granalhagem, enquanto o processo químico consistiu em limpar as superfícies com acetona. Em suma, todos os substratos foram granalhados a seco com jato de areia ( $\text{SiO}_2$ ) na granalhadora existente no Laboratório do ISEP – CIDBLAST RT6S (Figura 47). O processo de granalhagem consiste na projeção das partículas de areia sobre as superfícies dos substratos (Figura 48) em que será feita posteriormente a colagem. De seguida o provete é limpo com o auxílio de um jato de ar comprimido e com acetona. Após a granalhagem as superfícies apresentam uma rugosidade uniforme, o que permite uma boa molhagem e resulta numa junta mais resistente.



Figura 47 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S

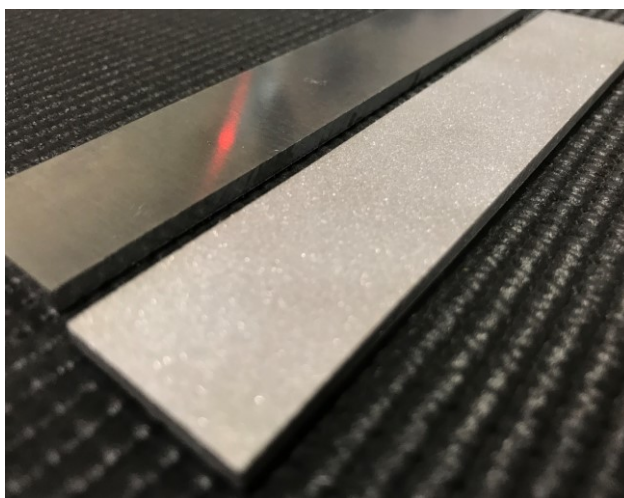


Figura 48 – Granalhagem dos substratos

Chegando ao fim do processo de limpeza das superfícies procedeu-se à colagem dos substratos. A mistura do adesivo foi realizada usada a razão mássica proposta pelo fabricante. No caso do adesivo aditivado, foi inicialmente feita a mistura das partículas de cortiça expandida com o endurecedor, e só depois misturada a resina para produzir a pasta a ser aplicada nas juntas. Na colagem das juntas, foram inseridos entre os substratos, nas bordas da sobreposição, calços calibrados com um diâmetro de 0,2 mm para garantir o valor correto de  $t_a$ . Para este efeito, foram produzidos calços com fita calibrada com os respetivos valores de  $t_a$ . A estes calços (Figura 49) foi aplicado desmoldante de forma a poderem ser retirados dos provetes sem resistência.



Figura 49 - Localização dos calços calibrados

A produção do calço frontal é distinta da do calço traseiro. De facto, enquanto o calço traseiro só garante  $t_a$ , o calço frontal vai possuir uma lâmina com espessura de 0,1 mm, que é colocada com o objetivo de criar a pré-fenda no adesivo e garantir  $t_a$ . Este método foi inicialmente proposto por Lee et al. [132].



Figura 50 - Montagem do conjunto de calços

Durante este processo garantiu-se que extremidade da lâmina fica exposta e em contacto com a camada de adesivo, de modo a garantir a pré-fenda inicial. Para concluir a preparação dos calços (Figura 50) é aplicado desmoldante nos calços realizados, para facilitar a sua remoção após cura do adesivo. De seguida, foi realizada a colagem dos substratos com alinhamento em barras de apoio, fixados nestas através de grampos. O posicionamento correto dos substratos para obter os diferentes valores de  $L$  foi realizado manualmente com recurso a um paquímetro digital. Este  $L$  corresponde ao comprimento do adesivo admitindo que não existem filetes nas extremidades. A cura do adesivo aplicado no provete foi levada a cabo de acordo com as especificações do fabricante para a cura completa, isto é, durante pelo menos 48 horas à temperatura ambiente. Na Figura 51 visualiza-se o processo de fixação dos substratos à barra de apoio.



Figura 51 - Fixação dos substratos

Após cura, e com o auxílio de um alicate, foram removidos os calços dos provetes e o excesso de adesivo nos bordos dos provetes. Na remoção dos calços deve-se ter atenção para não danificar a junta, pois alguns calços oferecem alguma resistência à separação. O excesso de adesivo foi retirado com o auxílio de uma mó de pedra aplicada numa máquina de furar vertical, representado na Figura 52.



Figura 52 - Método de remoção do excesso de adesivo dos provetes

### 3.1.2.2 Ensaio dos provetes DCB e ENF

Para os ensaios DCB foram produzidos 12 provetes, onde foram produzidos 3 provetes para cada concentração mássica de cortiça (0%, 0,25%, 0,5% e 1%). As dimensões teóricas para preparação dos provetes são as apresentadas na Figura 53 e Tabela 9.

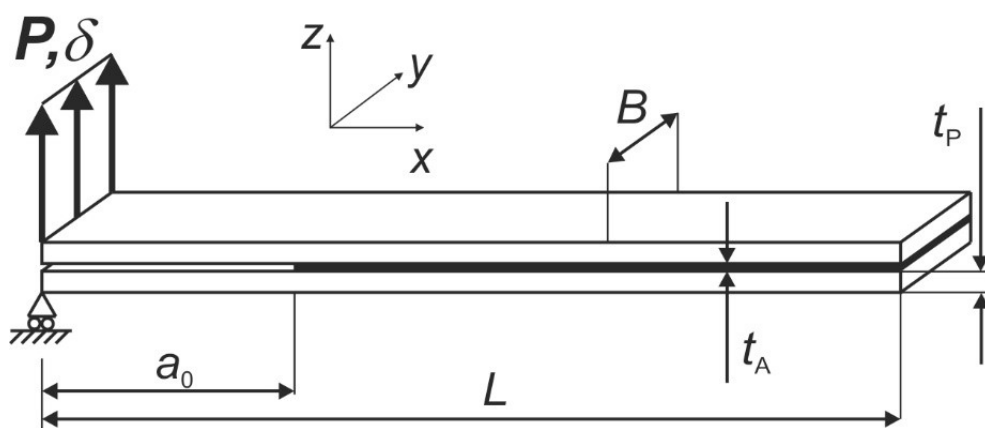


Figura 53 - Representação esquemática dos provetes DCB [24]

Tabela 9 - Dimensões teóricas dos provetes DCB em mm

Comprimento do provete, $L$	140
Espessura do substrato, $T_P$	3
Espessura do adesivo, $T_A$	0,2
Comprimento da pré-fenda, $A_0$	50
Largura do provete, $B$	25

Para os ensaios ENF foram também produzidos 12 provetes, onde foram produzidos 3 provetes para cada concentração de cortiça, 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. As dimensões teóricas para preparação dos provetes são as apresentadas na Figura 54 e Tabela 10.

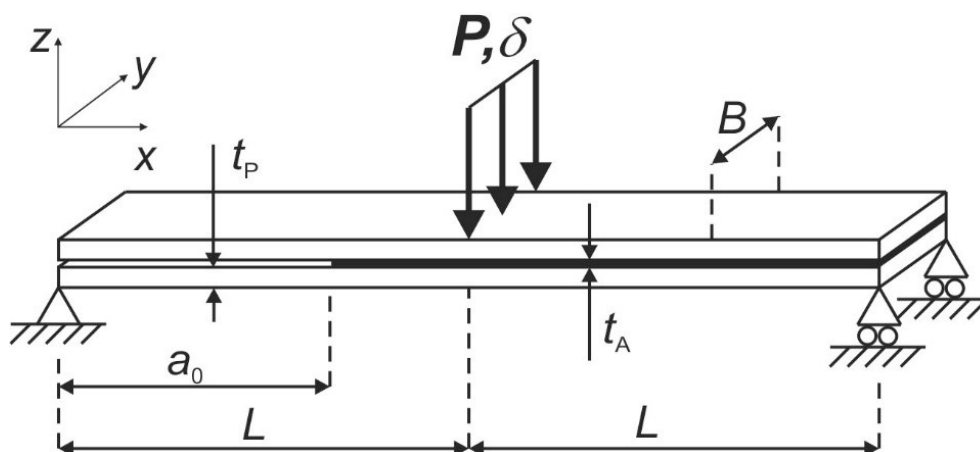


Figura 54 - Representação esquemática dos provetes ENF [22]

Tabela 10 - Dimensões teóricas dos provetes ENF em mm

Comprimento do provete, $L$	230
Espessura do substrato, $T_P$	3
Espessura do adesivo, $T_A$	0,2
Comprimento da pré-fenda, $A_0$	85
Largura do provete, $B$	25

Os ensaios dos provetes foram realizados em condições ambientes de temperatura e humidade na máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph de carregamento contínuo AG-X 100 (Figura 55), existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP,

sendo esta auxiliada pelo *software* TRAPEZIUM X instalado num computador para controlo dos ensaios e registo de dados. Esta máquina está equipada com uma célula de carga de 100 kN, utilizada para a medição da força aplicada. A mesma máquina universal de ensaios foi utilizada para a realização dos restantes ensaios efetuados neste trabalho.



Figura 55 - Máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 e computador com *software* TRAPEZIUM X

Para a fixação dos provetes DCB na máquina de ensaios, primeiramente fixou-se o provete pela dobradiça inferior por intermédio da amarra da máquina de ensaios (Figura 56), e de seguida, promoveu-se o movimento da amarra basculante com baixa velocidade para posterior fixação da dobradiça superior.



Figura 56 - Setup do ensaio DCB

Depois de o provete se encontrar devidamente colocado nas amarras, coloca-se a máquina fotográfica para registos de imagens durante o ensaio DCB (Figura 57). Utilizou-se uma máquina fotográfica digital Canon® devidamente posicionada para que a objetiva da câmara capturasse todo o provete.



Figura 57 - Setup DCB com a máquina fotográfica Canon

Por fim, no ensaio ENF utilizou-se novamente a máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph (Figura 55), que foi configurada de forma a realizar ensaios de flexão em 3 pontos, usando velocidade de solitação constante. Neste ensaio obteve-se o registo de  $P$  e  $\delta$ , em condições de temperatura ambiente. Na Figura 58 visualiza-se o posicionamento do provete ENF na máquina de ensaio.



Figura 58 - Posicionamento do provete ENF na máquina de ensaio

Para o ensaio ENF, o provete é colocado em rolos de suporte, designados de rolagamentos, que rodam sem atrito em torno de um veio fixo, para que o provete possa deformar livremente durante a aplicação da carga. Os rolos de suporte são distanciados de  $2L$  (Figura 58). Também devem ser garantidos o alinhamento e posição centrada dos provetes com o cilindro de aplicação da carga. Para auxílio nesta tarefa foi efetuada uma marcação na face lateral dos provetes, identificando a localização dos pontos de apoio, e no ponto de aplicação da carga. Depois de o provete se encontrar devidamente colocado nos cilindros, posiciona-se a máquina fotográfica Canon como no ensaio DCB para registos de imagens durante o ensaio ENF para documentar a propagação de fenda na região de medição de  $G_{Ic}$ .

### 3.1.3 Resultados obtidos

#### 3.1.3.1 Ensaio DCB

Neste capítulo são apresentados os resultados de  $G_{Ic}$  obtidos pelo ensaio DCB, referentes ao adesivo estrutural mencionado anteriormente (Araldite® AV138). Os dados dos ensaios foram analisados por diferentes métodos de obtenção de  $G_{Ic}$ , nomeadamente *Compliance Calibration Method* (CCM), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) No final são comparados os resultados de  $G_{Ic}$  obtidos entre os vários métodos.

##### 3.1.3.1.1 Curvas $P-\delta$

A Figura 59 apresenta as curvas  $P-\delta$  obtidas através dos ensaios realizados utilizando o adesivo Araldite® AV138, para cada um dos valores de percentagem de cortiça definidos, nomeadamente, 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. Como se verifica na Figura 59 todas as curvas  $P-\delta$  apresentam o mesmo comportamento, à exceção de P\_C1\_2. Durante a propagação da fenda alguns provetes apresentam quebras abruptas de  $P$ , o que representa uma propagação instável da fenda. Por outro lado, como estes provetes apresentam zonas de propagação estáveis e boa repetibilidade no que diz respeito ao comportamento geral e valores de  $G_{Ic}$  obtidos, estes provetes são incluídos na análise de  $G_{Ic}$  que se segue.

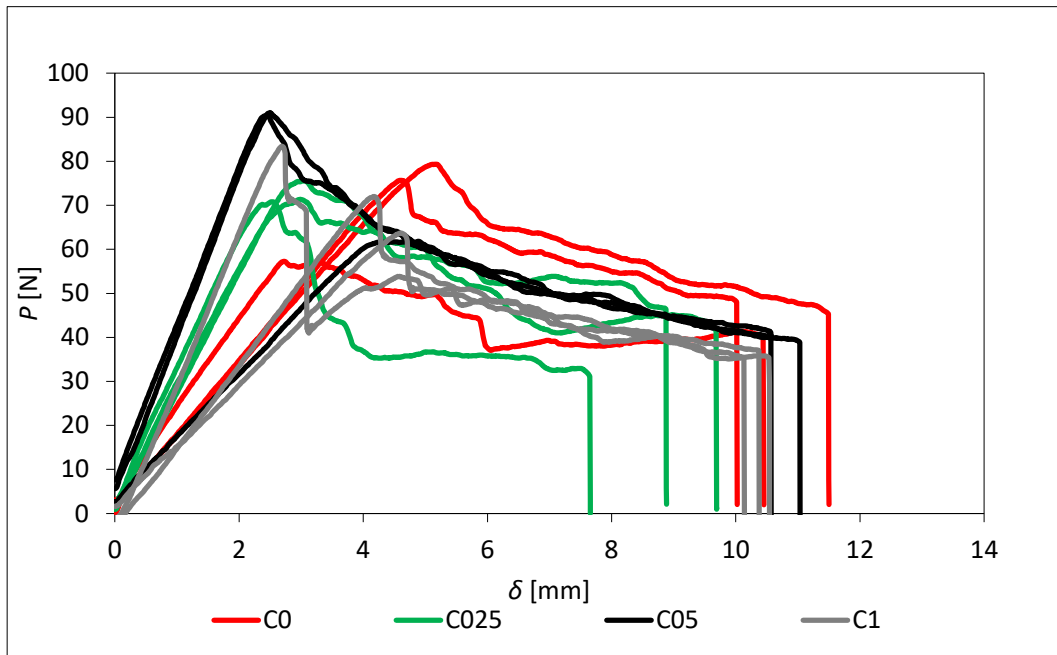


Figura 59 –Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e com 0%, 0.25%, 0.5% e 1% de cortiça

Em termos de rigidez, na Figura 59 pode-se observar que os provetes apresentam para cada concentração de cortiça, diferentes valores de rigidez. Pode-se observar que os provetes com 0,5% de cortiça (Figura 62) atingiram durante o ensaio uma carga máxima superior a 90 N. Enquanto que da Figura 60 à Figura 63 verifica-se o comportamento dos 12 provetes para cada concentração de cortiça:

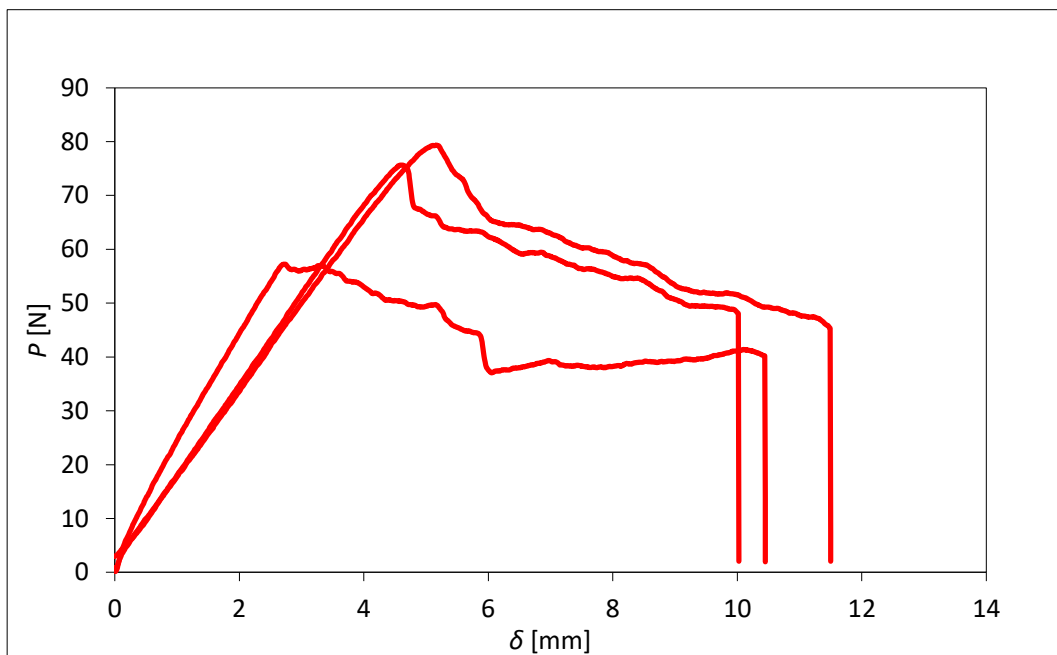


Figura 60 - Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0% de concentração de cortiça

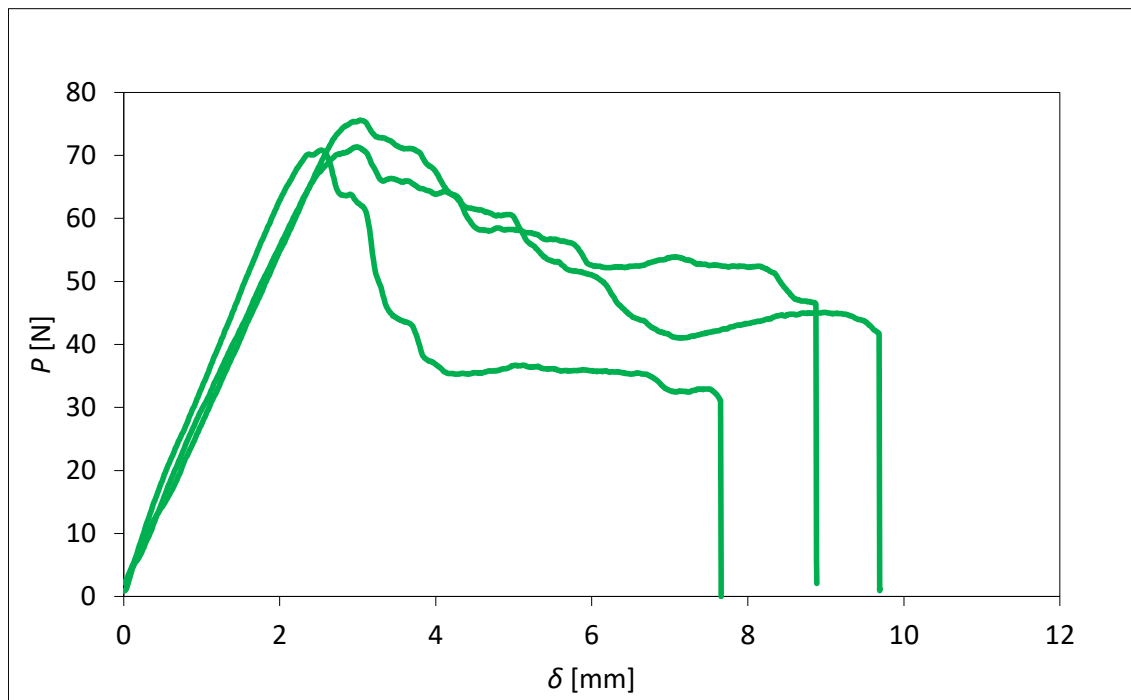


Figura 61 - Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,25% de concentração de cortiça

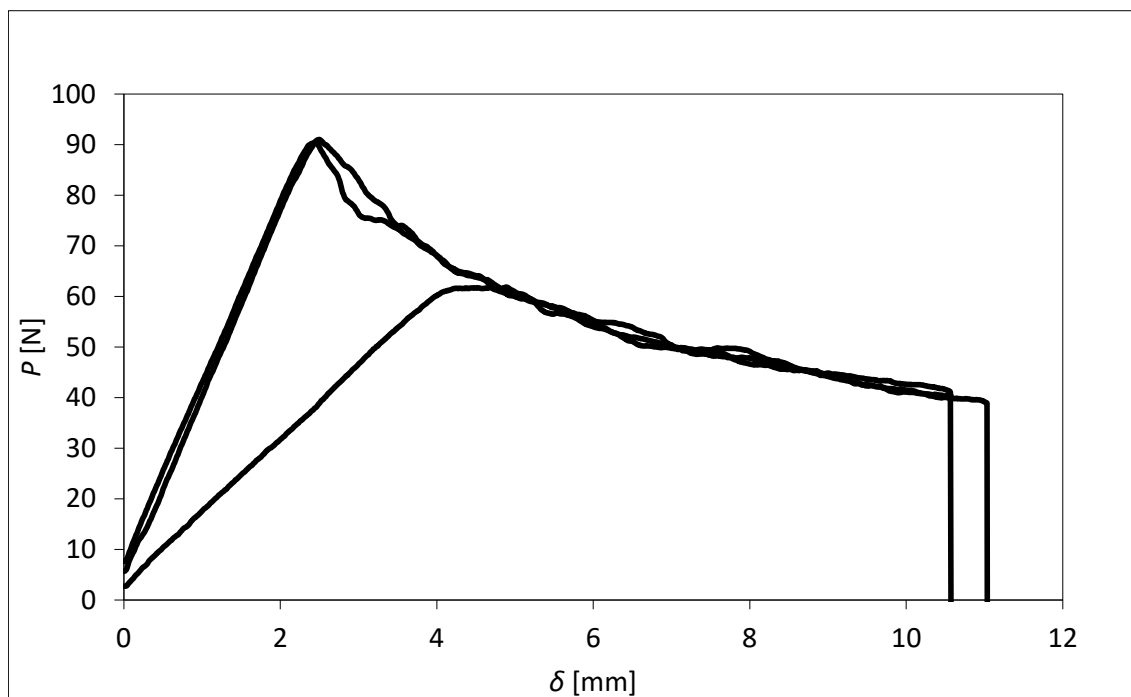


Figura 62 - Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,5% de concentração de cortiça

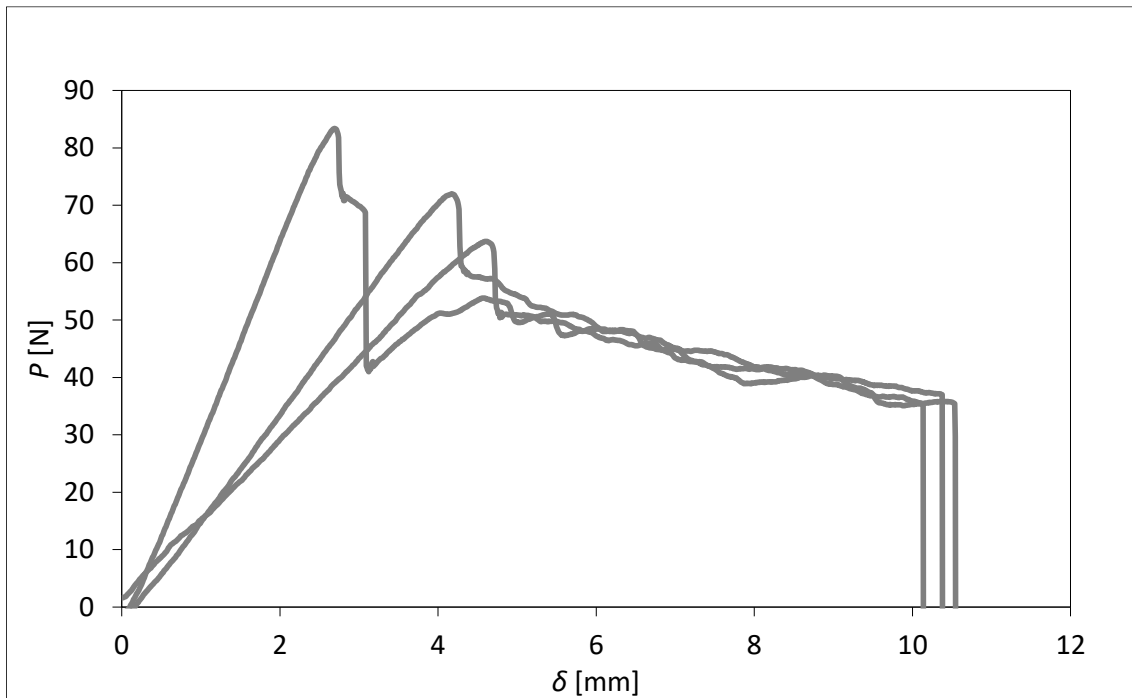


Figura 63 - Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 1% de concentração de cortiça

### 3.1.3.1.2 Determinação de $G_{IC}$

Na determinação de  $G_{IC}$  foi usado o método CCM, que é baseado na equação de Irwin-Kies. [24]

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}, \quad (10)$$

onde  $P$  [N] representa a carga aplicada,  $b$  [mm] a largura da amostra e  $C$  [mm/N] =  $\delta/P$  a flexibilidade. Se forem utilizados polinómios cúbicos ( $C = C_3a^3 + C_2a^2 + C_1a + C_0$ ), muito comuns em trabalhos realizados para ajustar as curvas da flexibilidade  $C = f(a)$ , leva a que [24]:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2b} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1) \quad (11)$$

Usando o método CBT, o  $G_{IC}$  é obtido através de [24]:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2b(a + |\Delta|)} \quad (12)$$

Contabiliza-se a rotação dos aderentes na extremidade na fenda, sendo  $\Delta$  um fator de correção do comprimento de fenda que se determina a partir da regressão linear de

$C^{1/3} = f(a)$ . A regressão linear pode ser obtida através de ensaios experimentais de três provetes (Figura 47), com diferentes comprimentos iniciais de fendas [23].

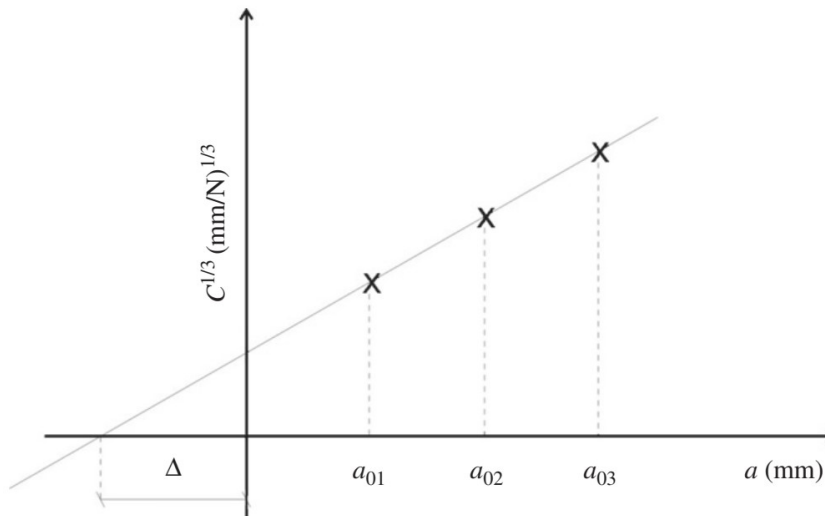


Figura 64 - Método de obtenção da correção do comprimento de fenda  $\Delta$  [23]

Uma outra forma de contabilizar os efeitos de rotação dos aderentes na extremidade da fenda é pela utilização do parâmetro  $\Delta_I$ , e que é dado por [23]:

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E}{11G} \left[ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (13)$$

sendo

$$\Gamma = 1,18 \frac{E}{G}. \quad (14)$$

Este parâmetro  $\Delta_I$  pode ser usado na Equação (14) em substituto do parâmetro  $\Delta$ .

Por fim, considera-se o método *Compliance-Based Beam Method* (CBBM), onde se deve considerar um comprimento equivalente de fenda  $a_e$ , durante a propagação da fenda, para se obter  $G_{Ic}$ . Para adesivos com alguma ductilidade, é necessário considerar o efeito da Zona de Processo da Fratura (ZPF) ou *Fracture Process Zone* (FPZ). A ZPF corresponde a uma região de material danificado por processo sinelásticos (microfissuração, microdeformação plástica, entre outros), localizada na extremidade da fenda (Figura 65).

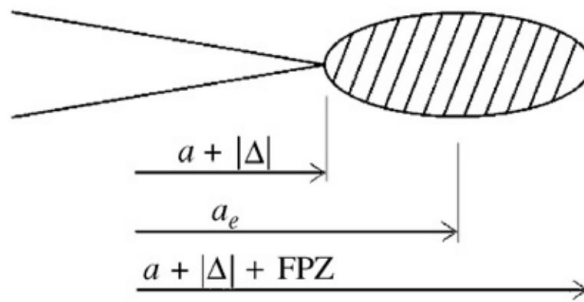


Figura 65 - Representação esquemática da ZPF e do conceito de fenda equivalente [24]

A ZPF torna-se maior quando se está na presença de adesivos dúcteis. O comprimento equivalente de fenda pode ser calculado utilizando  $a_e = a + |\Delta| + \Delta_{aFPZ}$  como função da seguinte equação (*Teorema de Castigliano*), substituindo  $a$  por  $a_e$ . [24]

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{Eb^3} + \frac{12Pa}{5bhG}, \quad (15)$$

tendo em conta que

$$U = 2 \left[ \int_0^a \frac{M_f^2}{2EI} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G} b dz dx \right] \quad (16)$$

e

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{bh} \left( 1 - \frac{\gamma^2}{c^2} \right), \quad (17)$$

em que  $U$  [J] representa a energia de deformação devida à flexão e ao corte dos dois braços do provete,  $M_f$  [N.mm] representa o momento fletor e  $I = bh^3/12$  [mm<sup>4</sup>] o momento estático de segunda ordem da viga. Os parâmetros  $c$  e  $V$  são, respetivamente, metade da espessura e a carga transversal em cada braço.

É considerado neste método um módulo de flexão equivalente  $E_f$ , que pode ser obtido através da Equação (15), usando uma flexibilidade inicial  $C_0$  [24]:

$$E_f = \left( C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5bhG} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)}{bh^3}. \quad (18)$$

$G_{ic}$  pode então ser obtido pela seguinte equação, tomando por base a Equação (10) [24]:

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{b^2h} \left( \frac{2a_e^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G} \right). \quad (19)$$

### 3.1.3.1.3 Resultados obtidos

Da Figura 66 à Figura 69 estão representadas as curvas-R de provetes selecionados com o adesivo Araldite® AV138 e as respectivas concentrações de cortiça pelos métodos já referidos anteriormente.

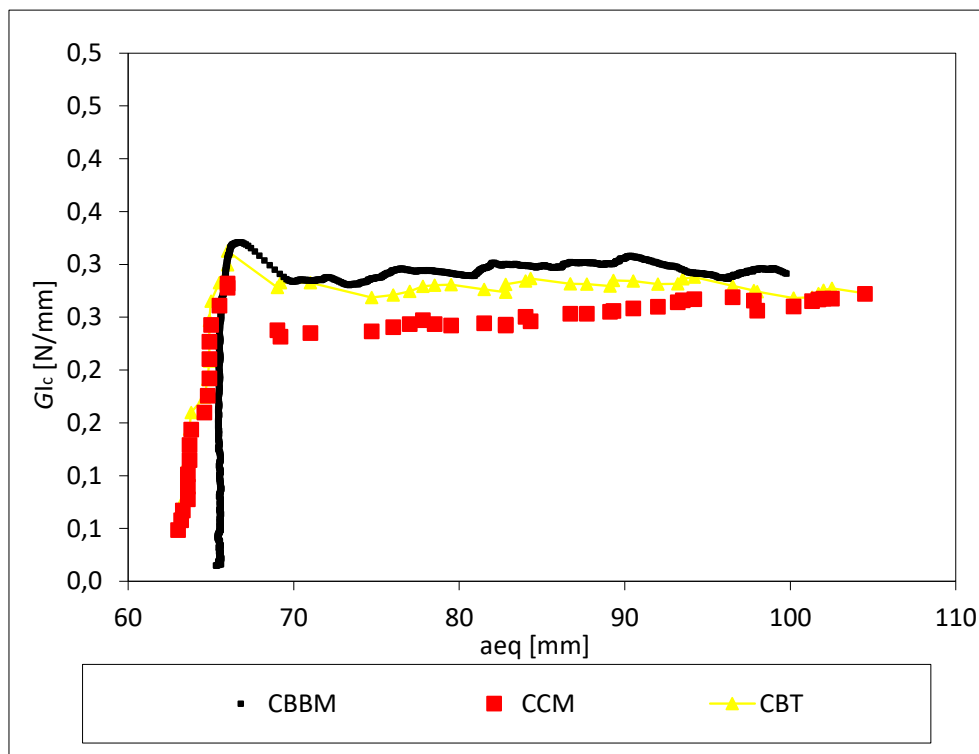


Figura 66 - Curvas-R do provete  $P_{CO_3}$  através dos métodos CBBM, CCM e CBT

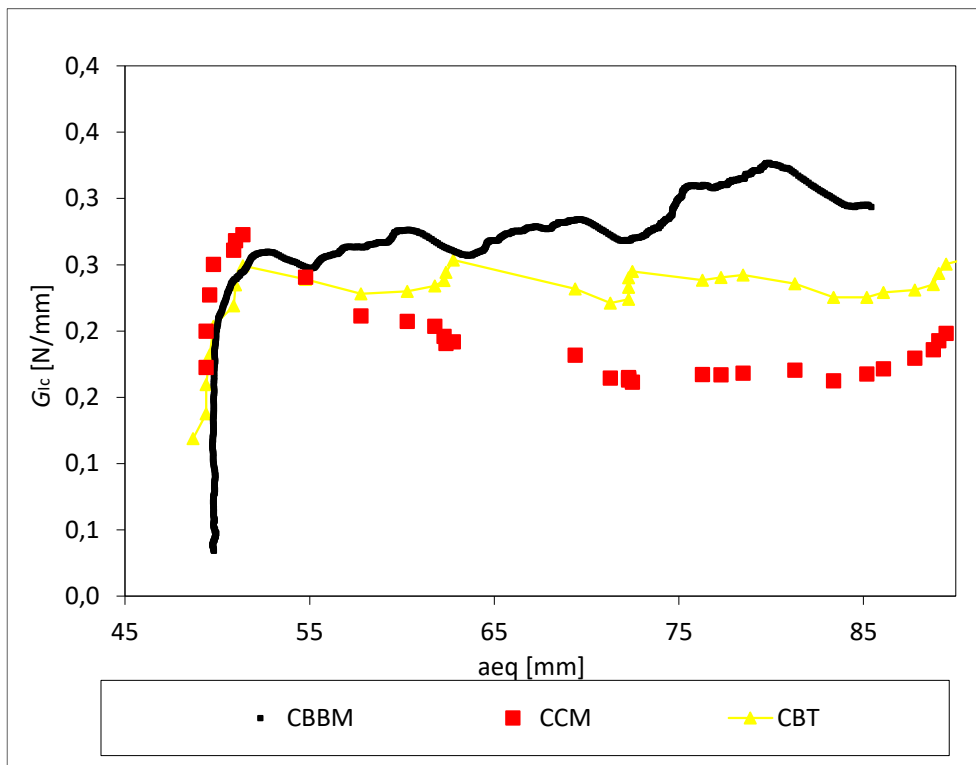


Figura 67 - Curvas-R do provete *P\_C025\_3* através dos métodos CBBM, CCM e CBT

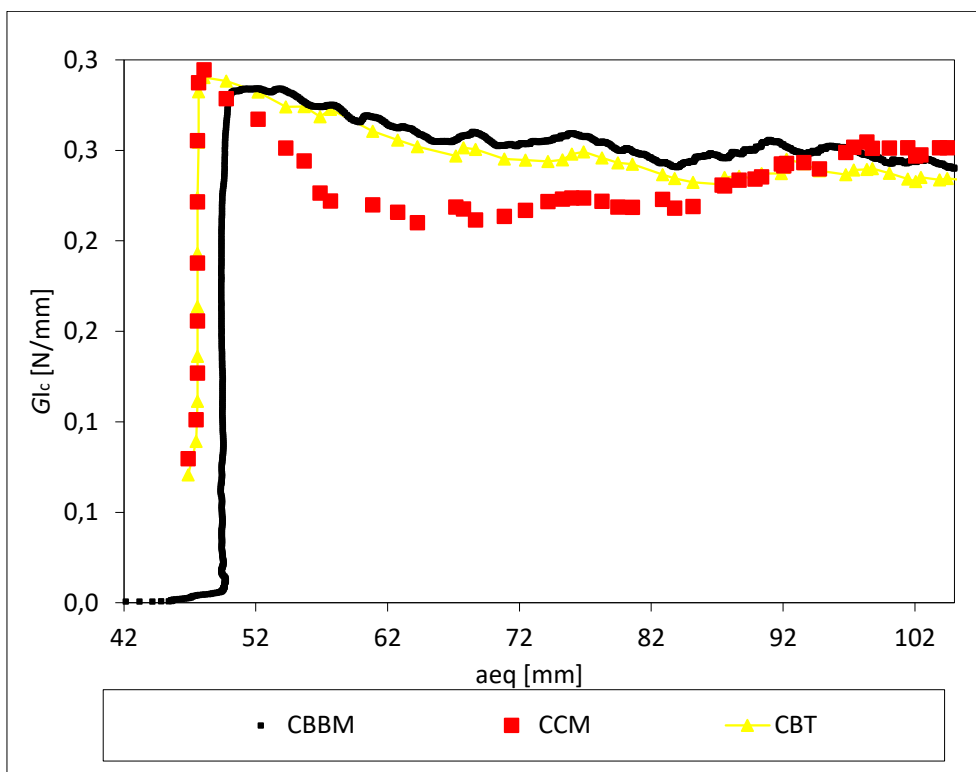


Figura 68 - Curvas-R do provete *P\_C05\_1* através dos métodos CBBM, CCM e CBT

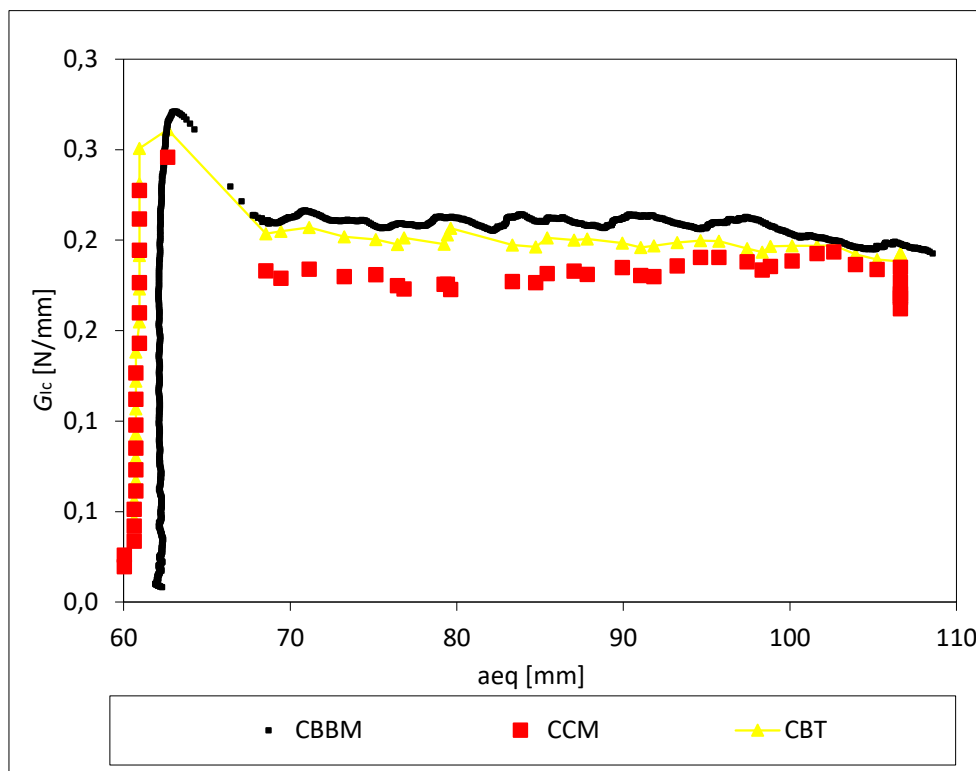


Figura 69 - Curvas-R do provete  $P_{C1_3}$  através dos métodos CBBM, CCM e CBT

#### 3.1.3.1.4 Análise de resultados

De uma forma geral, constata-se que todas as curvas  $P-\delta$  (Figura 59) apresentam o mesmo comportamento, confirmando a elevada repetibilidade dos ensaios DCB. Apenas os provetes  $P_{C0_1}$  e  $P_{05_2}$  não atingiram o mesmo patamar de rigidez inicial, tendo obtido o valor de força máxima mais distante dos restantes provetes. No entanto a propagação da fenda teve um comportamento idêntico aos restantes, embora num patamar  $P-\delta$  diferente aos verificados para os restantes provetes, pela razão referida anteriormente. As curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® AV138 apresentam três etapas distintas. Na primeira etapa, têm um comportamento considerado reversível, pois apresentam um regime elástico onde a evolução da curva  $P-\delta$  é linear. A segunda etapa já se limita a um processo irreversível no adesivo (formação da ZPF), onde se verifica uma perda de linearidade perto de chegar a  $P_{máx}$ . A  $P_{máx}$  corresponde um deslocamento da carga máxima ( $\delta P_{máx}$ ). A energia armazenada no provete obtém o seu valor crítico,  $G_{ic}$ , na contiguidade de  $P_{máx}$ , o que corresponde ao início de propagação da pré-fenda. A terceira etapa ocorre após ser alcançado  $P_{máx}$ , e diz respeito à fase de propagação estável da fenda em que a força aplicada diminui progressivamente. No final há uma quebra abrupta, devido à rotura total do provete.

Nas curvas R representativas do adesivo Araldite® AV138 existe um valor inicial de  $a_{eq}$  diferente entre os métodos utilizados, uma vez que o método CBBM inclui o efeito da

FPZ, enquanto nos restantes métodos apenas se trata do comprimento real da fenda,  $a$ . Contudo, era esperado uma subida abrupta inicial de  $G_{Ic}$  pela análise dos métodos CCM e CBT, tal como verificado pela curva CBBM (Figura 66 à Figura 69). Tanto o método CCM como o CBT necessitam da medição do comprimento de fenda, o que torna a análise do processo menos expedita. Essa análise pode induzir ainda mais erros pelo método CCM, visto serem utilizados polinómios cúbicos, já referidos no capítulo 3.1.3.1.2. Através dos métodos utilizados para retirar as curvas R, foi possível verificar que no caso do adesivo sem cortiça (Figura 66) para os restantes gráficos (Figura 67 à Figura 69) o valor de  $a$  ou  $a_{eq}$  diminui com a presença de cortiça. Apenas o provete com 1% de cortiça (Figura 69) é que tomou valores próximos ao provete sem cortiça. Pode-se concluir que com a introdução de cortiça no provete poderá aumentar a resistência a rutura.

Na Tabela 11 à Tabela 14 é apresentado valores para cada método, bem como a média e desvio padrão associada a cada método.

Tabela 11 - Valores de  $G_{Ic}$  com concentração de 0% de cortiça

<b>CO</b>		<b><math>G_{Ic}</math> [N/mm]</b>	
<b>Proвете</b>	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>
CO_1	0,1901	0,1786	0,1745
CO_2	0,2819	0,2947	0,3122
CO_3	0,2533	0,2786	0,2953
<b>Média</b>	0,2418	0,2506	0,2607
<b>Desvio Padrão</b>	0,04700	0,06291	0,07508

Tabela 12 - Valores de  $G_{Ic}$  com concentração de 0,25% de cortiça

<b>C025</b>		<b><math>G_{Ic}</math> [N/mm]</b>	
<b>Provete</b>	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>
CO25_1	0,1275	0,1329	0,1441
CO25_2	0,1924	0,2134	0,2335
CO25_3	0,1870	0,2407	0,2835
<b>Média</b>	0,1690	0,1957	0,2204
<b>Desvio Padrão</b>	0,03599	0,05603	0,07064

Tabela 13 - Valores de  $G_{Ic}$  com concentração de 0,5% de cortiça

<b>C05</b>		<b><math>G_{Ic}</math> [N/mm]</b>	
<b>Provete</b>	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>
CO5_1	0,2346	0,2458	0,2490
CO5_2	0,2288	0,2403	0,2465
CO5_3	0,2270	0,2440	0,2497
<b>Média</b>	0,2301	0,2434	0,2484
<b>Desvio Padrão</b>	0,00395	0,00280	0,00173

Tabela 14 - Valores de  $G_{IC}$  com concentração de 1% de cortiça

<b>C1</b>	<b><math>G_{IC}</math> [N/mm]</b>		
	<b>Provete</b>	<b>CCM</b>	<b>CBT</b>
C1_1	0,2076	0,1858	0,2041
C1_2	0,1614	0,1672	0,2087
C1_3	0,1659	0,1807	0,2082
<b>Média</b>	0,1783	0,1779	0,2070
<b>Desvio Padrão</b>	0,02548	0,00962	0,00250

Analisando as tabelas verifica-se uma tendência constante entre os valores obtidos pelos diferentes métodos, sendo o provete *CO\_2* aquele que regista uma maior concordância de  $G_{IC}$ . Em termos de discrepâncias, o provete *CO25\_1* foi aquele que registou um menor valor de tenacidade à fratura em modo I, sendo este o resultado mais distante da média dos provetes. Pelo método CBBM, é possível ver nas tabelas um aumento do valor de  $G_{IC}$  relativamente aos restantes métodos pois, como já foi referido anteriormente, este método inclui o efeito da ZPF. Considera-se o CBBM como valor de referência, devido ao facto de ser um método robusto e que traduz com precisão o valor de  $G_{IC}$ .

A partir da informação das tabelas para o adesivo AV138, apresenta-se o gráfico seguinte (Figura 70), que representa a tendência de valores de  $G_{IC}$  obtida pelos vários métodos.

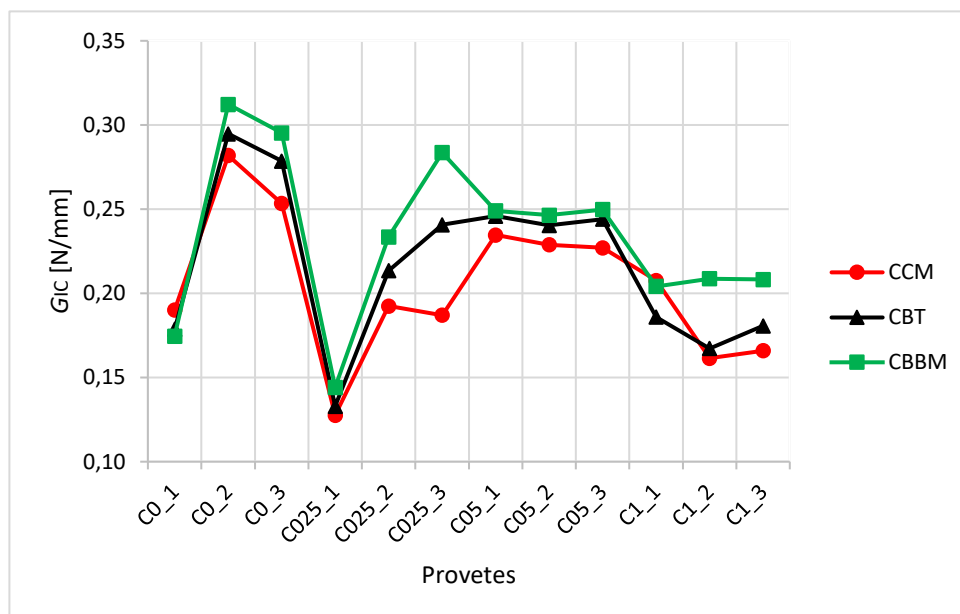


Figura 70 - Tendência de  $G_{IC}$  do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos

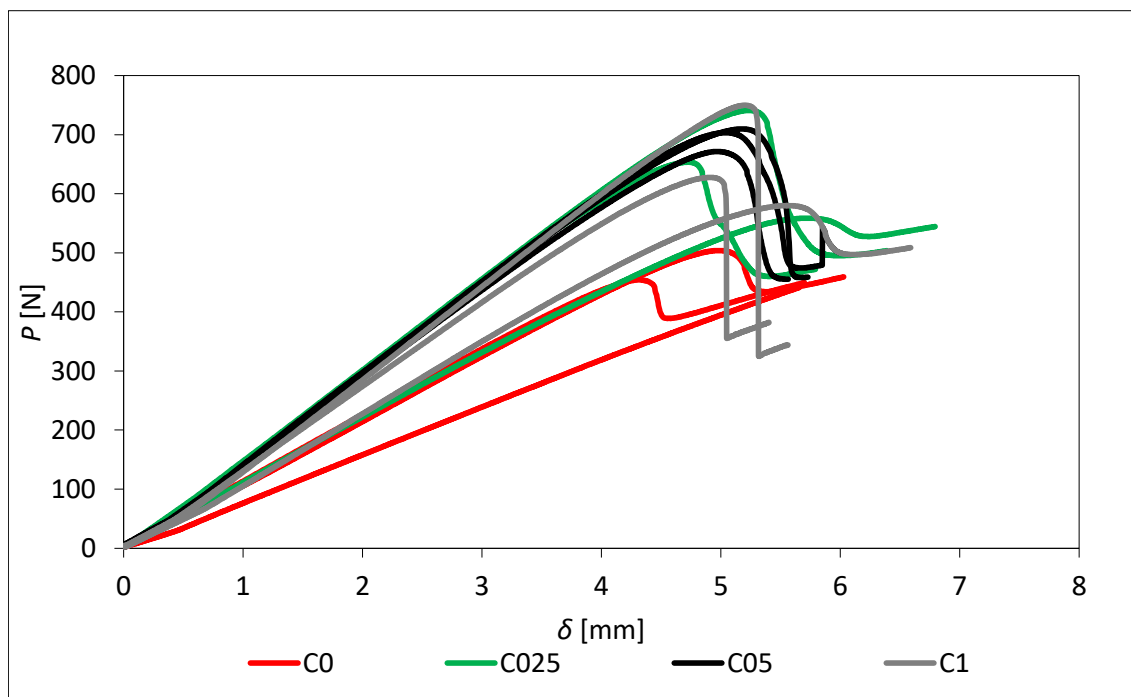
Na Figura 70, nos provetes sem cortiça verifica-se através do método CBBM que os valores de  $G_{IC}$ , são superiores aos valores dos provetes com cortiça. O mesmo acontece com o método CBT e o método CCM. De seguida, o primeiro ensaio com 0,25% de cortiça resultou numa queda abrupta do valor de  $G_{IC}$ , mas de seguida aumentou nos dois seguintes ensaios. Aumentou-se a concentração de cortiça para 0,5%, tendo resultado numa estabilização dos valores nos 3 ensaios. Por fim, verificou-se uma diminuição de  $G_{IC}$  com a duplicação da concentração de cortiça. Tendo-se verificado, que a tendência dos valores médios de  $G_{IC}$  tendem para valores de 0,20 N/mm.

### 3.1.3.2 Ensaio ENF

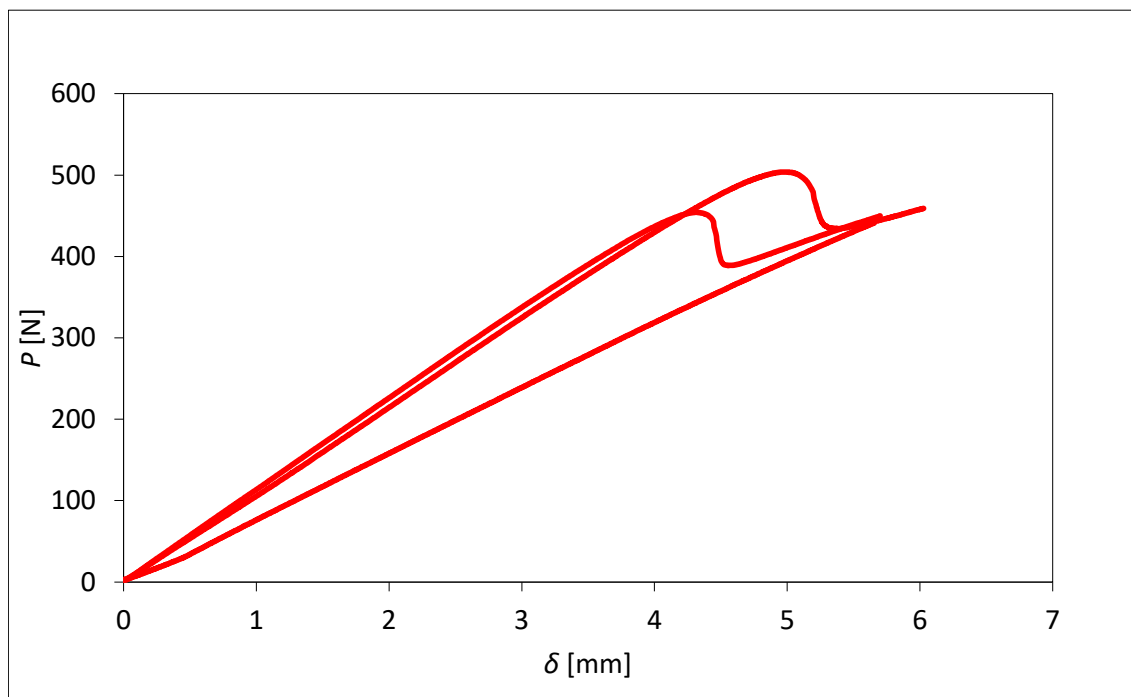
Neste capítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios ENF, nomeadamente as curvas  $P-\delta$ , o tratamento para obtenção de  $G_{IIC}$  para o adesivo Araldite® AV138 com percentagem de cortiça, e é também feita uma análise dos resultados obtidos.

#### 3.1.3.2.1 Curvas $P-\delta$

Com a realização dos ensaios ENF, através do software da máquina de ensaios foram registados os valores de  $P$  e  $\delta$ . Deste modo obtêm-se as curvas  $P-\delta$  para os testes considerados válidos. Na Figura 71 observam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas para os doze provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. As curvas são indicativas de um adesivo com um comportamento frágil, onde se verifica uma rotura abrupta. Assim, o valor de  $P$  decresce bruscamente, originando uma propagação mais rápida da fenda.

Figura 71 - Curvas P- $\delta$  obtidas pelo ensaio ENF

Na Figura 72 à Figura 75 verifica-se o comportamento dos 3 provetes para cada concentração de cortiça.

Figura 72 - Curvas P- $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0% de concentração de cortiça

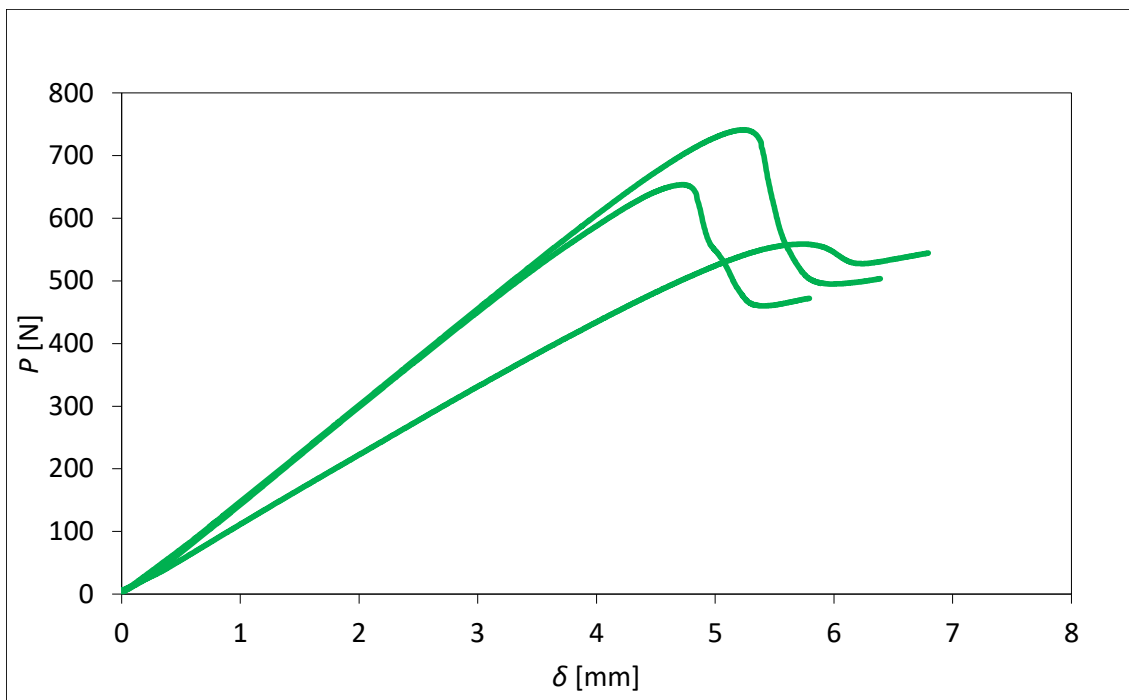


Figura 73 - Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,25% de concentração de cortiça

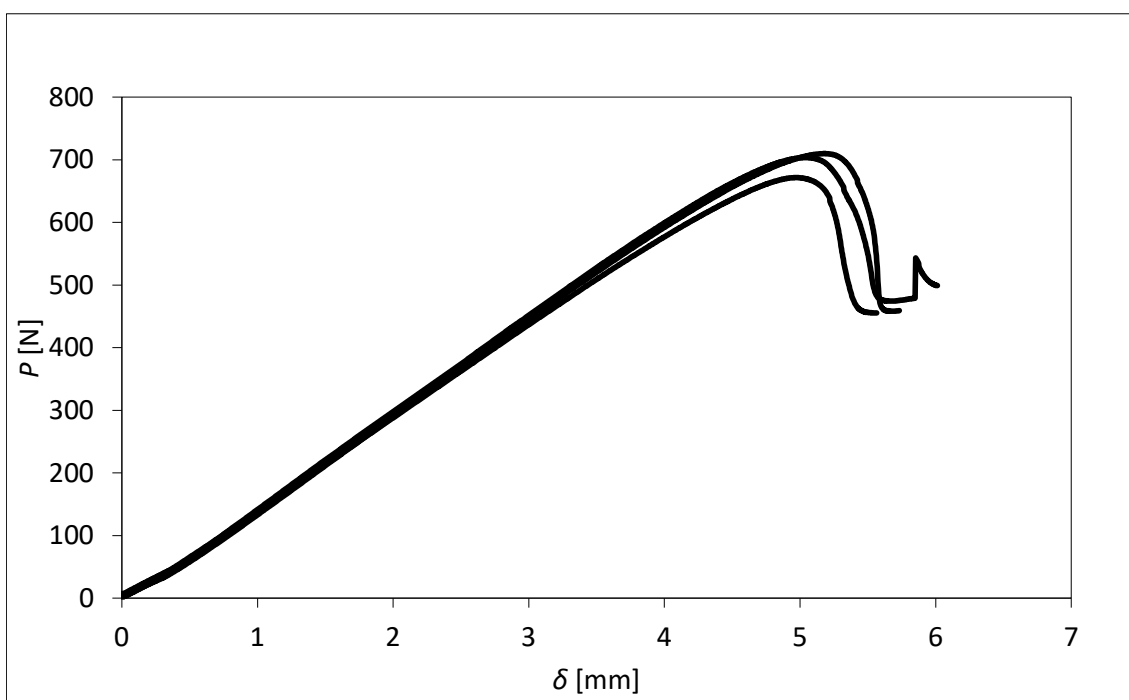


Figura 74 - Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 0,5% de concentração de cortiça

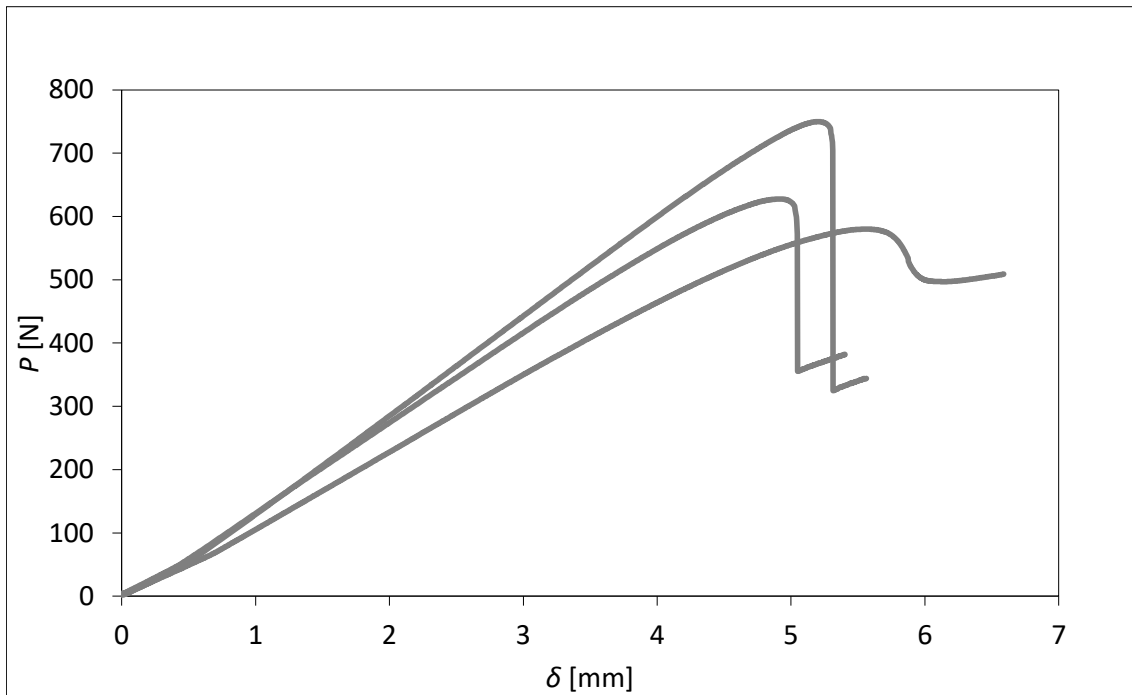


Figura 75 - Curvas  $P$ - $\delta$  registadas através dos ensaios de provetes de juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 e 1% de concentração de cortiça

### 3.1.3.2.2 Determinação de $G_{IIC}$

Para os ensaios de determinação do  $G_{IIC}$  utilizam-se métodos semelhantes aos que foram usados para determinar  $G_{IC}$ , embora com os ajustes necessários à modificação do carregamento e condições de apoio começando pelo CCM,  $G_{IIC}$  pode ser obtido por [25]:

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}. \quad (20)$$

Na generalidade dos trabalhos publicados usam-se polinómios cúbicos ( $C = C_1 a^2 + C_0$ ) para ajustar as curvas da flexibilidade  $C = f(a)$ , o que leva a [25]:

$$G_{IIC} = \frac{3P^2 C_1 a^2}{2b}. \quad (21)$$

No caso do ensaio ENF, o método CBT refere que [25]:

$$G_{IIC} = \frac{9(a + 0,42\Delta_f)^2 P^2}{16b^2 h^3 E}. \quad (22)$$

De seguida, procedendo ao cálculo do  $G_{IIC}$  pelo método CBBM para o ensaio ENF utilizou-se a teoria das vigas, podendo descrever-se como [25]:

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8Eb h^3} + \frac{3L}{10Gb h}. \quad (23)$$

O módulo de flexão considerado neste método pode ser calculado a partir da Equação (23), usando a flexibilidade inicial ( $C_0$ ), e a fenda inicial  $a_0$ :

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8bh^3 C_{0corr}} \quad (24)$$

onde  $C_{0corr}$  é dado por

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10Gb h}. \quad (25)$$

Combinando a Equação (23) com a Equação (24), e colocando  $a_e$  no lugar de  $a$  origina

$$a_e = a + \Delta_{aFPZ} = \left[ \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3}, \quad (26)$$

onde  $C_{corr}$  é dado pela Equação (25), usando  $C$  no lugar de  $C_0$ .  $G_{IIc}$  pode então ser determinado usando a Equação (20), sendo dado por [25]:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_e^2}{16b^2 E_f h^3}. \quad (27)$$

### 3.1.3.2.3 Resultados obtidos

A determinação de  $G_{IIc}$  é baseada nas denominadas curvas de resistência, ou curvas- $R$ , que representam a evolução da taxa de libertação de energia de deformação ao corte em função de  $a$  durante o ensaio.

No ensaio ENF, entre o início da fenda e a posição correspondente ao ponto em que a propagação da fenda começa a ser afetada pelo cilindro de carregamento (que induz efeitos de compressão que dificultam a propagação da fenda), é expectável que este parâmetro seja constante. Este valor de patamar corresponde ao valor de  $G_{IIc}$  do respetivo adesivo. São apresentadas curvas de provetes representativos com percentagens de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1% referentes aos três métodos utilizados, o CCM, DBT e CBT, que requerem a medição de  $a$ , e o CBBM, baseado no comprimento de fenda equivalente.

Da Figura 76 à Figura 79 apresentam-se as curvas- $R$  de provetes escolhidos com diferentes concentrações de cortiça para a representação da junta colada com o adesivo Araldite® AV138, pelos métodos referidos anteriormente.

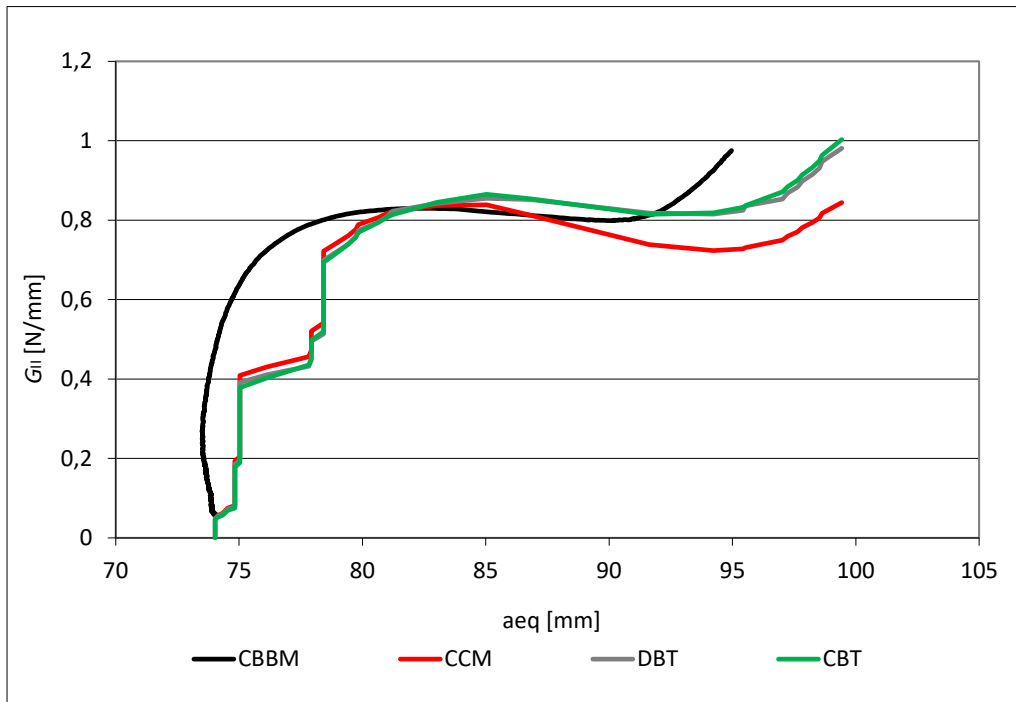


Figura 76 - Curvas-R do provete ENF C0\_3 com o adesivo Araldite® AV138 e 0% de cortiça

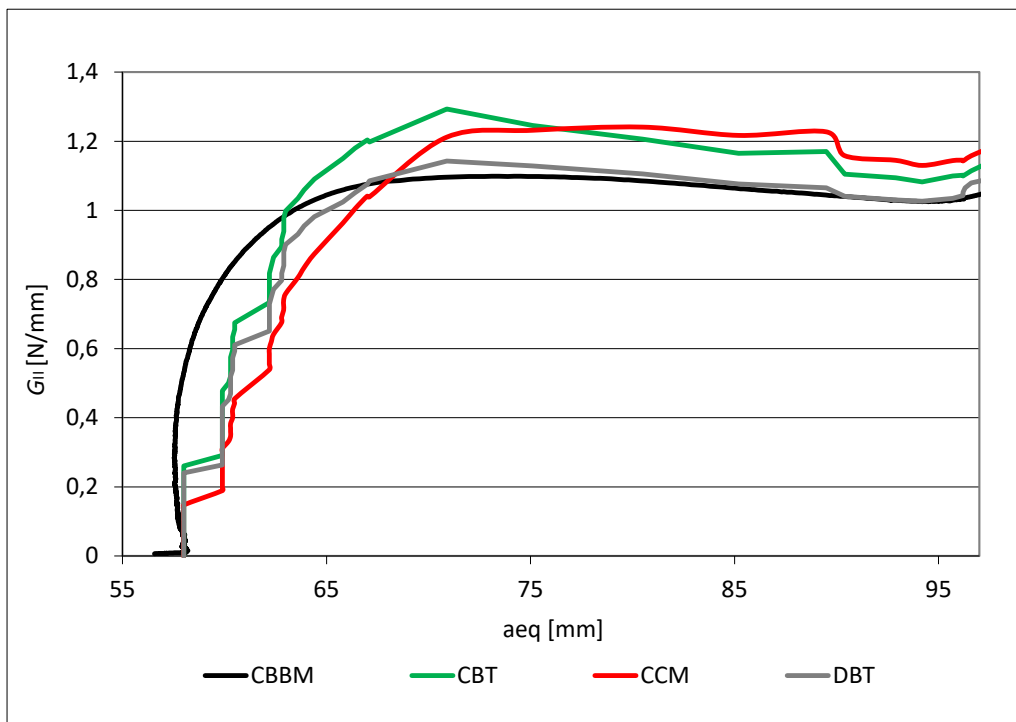


Figura 77 - Curvas-R do provete ENF C025\_3 com o adesivo Araldite® AV138 e 0,25% de cortiça

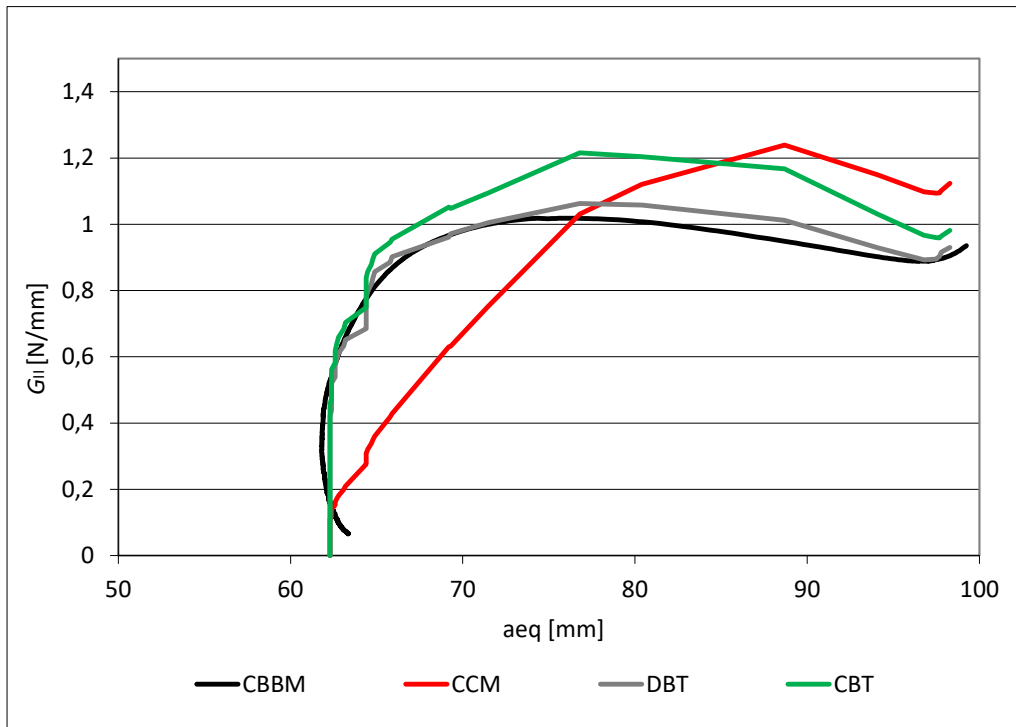


Figura 78 - Curvas-R do provete ENF C05\_3 com o adesivo Araldite® AV138 e 0,5% de cortiça

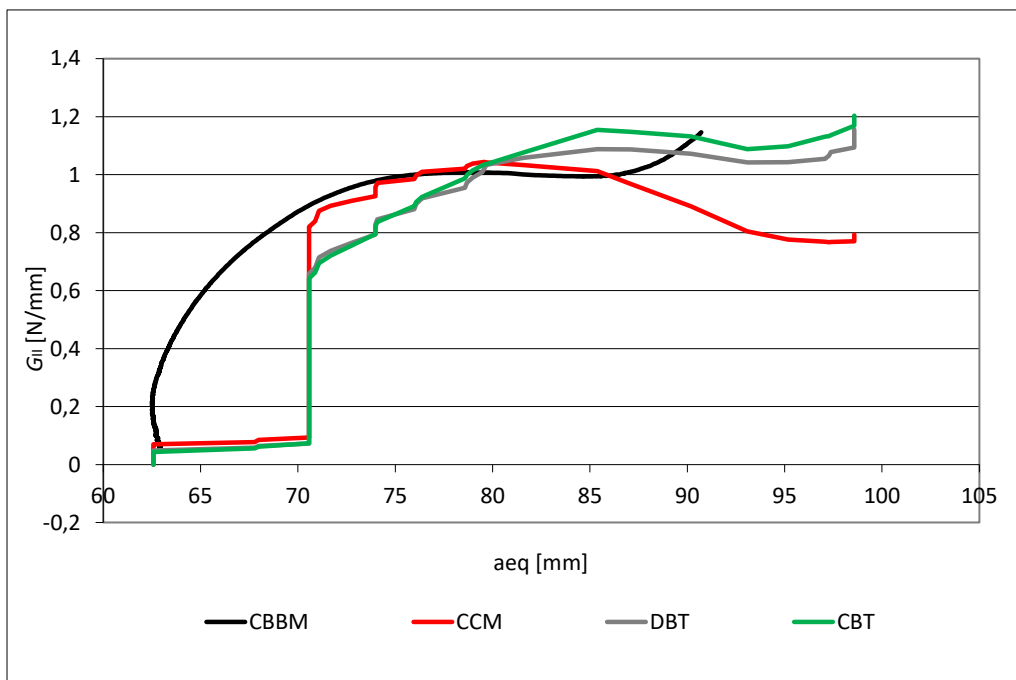


Figura 79 - Curvas-R do provete ENF C1\_1 com o adesivo Araldite® AV138 e 1% de cortiça

#### 3.1.3.2.4 Análise de resultados

Constatou-se que, devido à rigidez da máquina de ensaios, o comportamento das curvas  $P-\delta$  apresentou uma rigidez crescente na região inicial dos ensaios. Identifica-se

a presença de três fases nas curvas  $P-\delta$ , uma primeira fase onde se nota a evolução da curva  $P-\delta$  de forma linear, onde podemos ver o comportamento elástico reversível. Numa segunda fase surge um pouco antes do ponto de carga máxima ( $P_{\text{máx}}$ ), onde decorre uma perda da linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível do adesivo (formação da ZPF). Posto isto, a energia armazenada no provete chega a um valor crítico,  $G_{\text{IIC}}$ , iniciando-se assim a propagação da fenda. Por fim, após ser atingida  $P_{\text{máx}}$ , têm-se a última fase, em que a carga aplicada diminui progressivamente, correspondendo a uma propagação estável da fenda.

Nas curvas-R representativas do adesivo Araldite® AV138 com as respetivas concentrações de cortiça, observou-se o crescimento de fenda a  $G_{\text{IIC}}$  aproximadamente constante para todos os métodos. Comparando os valores durante a propagação pelos diferentes métodos, é de notar que a curva-R do CBBM está deslocada para a direita porque o comprimento de fenda utilizado na representação da curva-R é  $a_{\text{eq}}$  em vez de  $a$ , sendo  $a_{\text{eq}} = a + \Delta_{a\text{FPZ}}$  ( $\Delta_{a\text{FPZ}}$  corresponde à contribuição da ZPF para  $a_{\text{eq}}$ ), induzindo assim um valor bastante mais elevado de  $a_{\text{eq}}$ .

Da Tabela 15 à Tabela 18 são resumidos os valores de  $G_{\text{IIC}}$  (N/mm) dos doze ensaios válidos por todos os métodos, bem como a média e desvio padrão associada a cada método.

Tabela 15 - Valores de  $G_{\text{IIC}}$  com concentração de 0% de cortiça

C0		$G_{\text{IIC}}$ [N/mm]		
Provete	CCM	DBT	CBT	CBBM
C0_1	0,8291	0,6562	0,6562	0,7079
C0_2	Anulado			
C0_3	0,8251	0,8369	0,8369	0,8421
<b>Média</b>	0,8271	0,7466	0,7466	0,7750
<b>Desvio Padrão</b>	0,0028	0,1277	0,1277	0,0949

Tabela 16 - Valores de  $G_{IIC}$  com concentração de 0,25% de cortiça

<b>C025</b>		<b><math>G_{IIC}</math> [N/mm]</b>		
<b>Provete</b>	<b>CCM</b>	<b>DBT</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>
C025_1	1,0563	1,1671	1,1671	1,2236
C025_2	1,0851	0,9107	0,9107	1,0157
C025_3	1,2147	1,0921	1,0921	1,1984
<b>Média</b>	1,1187	1,0566	1,0566	1,1459
<b>Desvio Padrão</b>	0,0844	0,1318	0,1318	0,1135

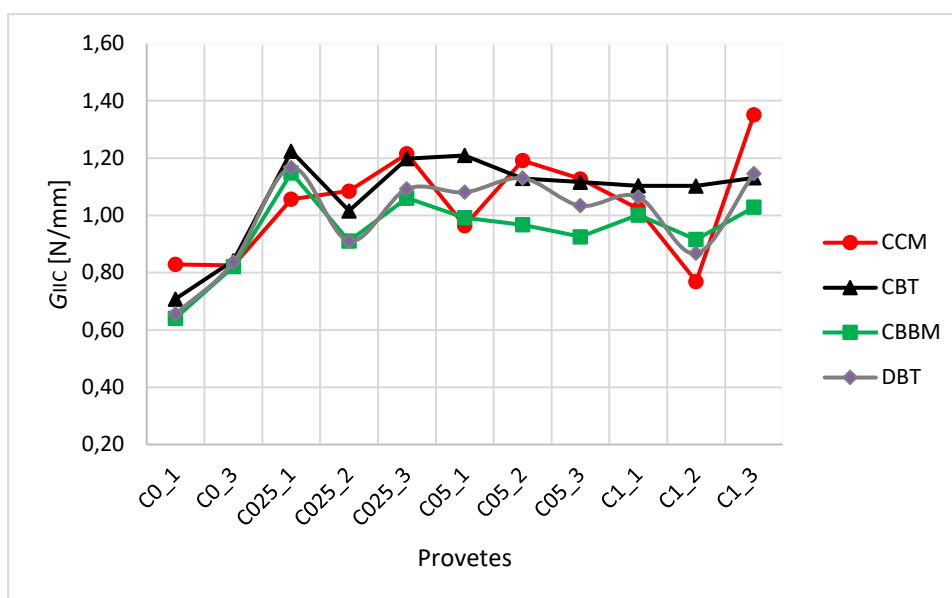
Tabela 17 - Valores de  $G_{IIC}$  com concentração de 0,5% de cortiça

<b>C05</b>		<b><math>G_{IIC}</math> [N/mm]</b>		
<b>Provete</b>	<b>CCM</b>	<b>DBT</b>	<b>CBT</b>	<b>CBBM</b>
C05_1	0,9637	1,0810	1,0810	1,2096
C05_2	1,1916	1,1299	1,1299	1,1293
C05_3	1,1275	1,0342	1,0342	1,1160
<b>Média</b>	1,0943	1,0817	1,0817	1,1516
<b>Desvio Padrão</b>	0,1175	0,0478	0,0478	0,0506

Tabela 18 - Valores de  $G_{IIC}$  com concentração de 1% de cortiça

C1	$G_{IIC}$ [N/mm]			
	CCM	DBT	CBT	CBBM
C1_1	1,0231	1,0650	1,0650	1,1035
C1_2	0,7692	0,8678	0,8678	1,1025
C1_3	1,3511	1,1460	1,1460	1,1310
<b>Média</b>	1,0478	1,0263	1,0263	1,1124
<b>Desvio Padrão</b>	0,2917	0,1431	0,1431	0,0162

Analisando as tabelas verifica-se que em todos os provetes existe uma concordância entre os valores obtidos, o que confirma a realização de provetes com condições idênticas e ajuda à veracidade dos resultados obtidos. Nos provetes de 0% de cortiça o segundo provete não foi contabilizado devido a valores com altas discrepâncias. Relativamente aos dados presentes nas tabelas, tem-se o menor valor de  $G_{IIC}$  nos provetes onde a concentração de cortiça é 0%. Pelos valores médios verificou-se que os provetes com 0,5% de cortiça apresentam maior  $G_{IIC}$ . A partir da informação das tabelas para o adesivo AV138, apresenta-se a Figura 80, que representa a tendência de valores de  $G_{IIC}$  obtida pelos vários métodos.

Figura 80 - Tendência de  $G_{IIC}$  do adesivo Araldite® AV138 pelos vários métodos

Os dois primeiros provetes são os provetes que apresentam 0% cortiça. Como se pode ver na Figura 80, são os valores mais baixos de  $G_{IIC}$ . Observou-se que, com os seguintes métodos, se verifica uma evolução de  $G_{IIC}$  com  $\alpha$  praticamente constante em provetes com a presença de cortiça nos ensaios ENF. Pelo método CBBM e pelo método CBT verifica-se uma estabilidade do valor de  $G_{IIC}$ , enquanto pelo método CCM ocorrem maiores variações. De referir que, avaliando pelas curvas, a concentração de 1% de cortiça será a melhor escolha. Nos provetes com cortiça, os valores médios de  $G_{IIC}$  tendem para valores superiores a 1 N/mm para todos os métodos. De referir que o método CBBM é o que apresenta o maior valor de  $G_{IIC}$  entre os métodos.

## 3.2 Trabalho numérico

A parte numérica deste trabalho tem como objetivo principal a reprodução dos resultados experimentais através da utilização de leis de dano coesivo que sejam representativas do comportamento do adesivo utilizado e que, como tal, possam ser aplicadas posteriormente para efeitos de previsão da resistência de juntas adesivas com o adesivo Araldite® AV138. As simulações foram feitas recorrendo ao MEF, utilizando o *software* de simulação Abaqus®. Será também realizada uma análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos, no sentido de averiguar o efeito da sua variação nas curvas  $P$ - $\delta$  respetivas, para o adesivo com as diferentes concentrações de cortiça.

### 3.2.1 Condições numéricas

O estudo pelo método de elementos finitos (MEF) dos ensaios DCB e ENF foi realizado com recurso ao *software* Abaqus®, que possui um módulo integrado de MDC para prever o comportamento das juntas adesivas. Estes modelos numéricos foram construídos individualmente para cada provete (12 para cada ensaio) em função das dimensões medidas na Tabela 9 e Tabela 10. Foi considerada uma modelação em 2D, e em estado plano de deformação, visto ser a condição mais adequada para a geometria em análise. Nas simulações de rotura por MDC foram consideradas malhas bastante refinadas, que permitem modelar com precisão suficiente o estado de tensão na região coesiva durante a propagação da fenda. No estudo numérico dos provetes ajustou-se propriedades dos materiais e das ligações de contacto de modo a garantir que os resultados obtidos, fossem resultados credíveis e onde fosse possível reduzir o tempo de obtenção de resultados, mas tentando manter a precisão dos resultados nas zonas mais propícias a grandes variações de tensões. Como se pode verificar na Figura 81, a malha dos provetes DCB apresenta maior refinamento na zona do adesivo e, nos aderentes, na proximidade da face interior, provocando uma variação da dimensão da malha e garantindo assim o maior refinamento nas zonas onde se esperam maiores gradientes de tensão [126].

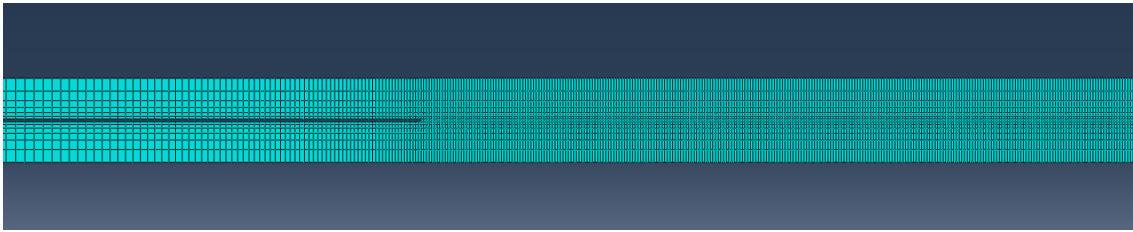


Figura 81 - Malha do provete DCB

Já na Figura 82, verifica-se a representação da malha de MEF na extremidade da pré-fenda, é evidente a variação do tamanho de elementos referida anteriormente. A camada de adesivo ilustrada a vermelho é constituída de elementos com dimensão de 0,2 mm por 0,2 mm, apresentando os elementos de alumínio adjacentes ao adesivo também o mesmo tamanho de elemento. Utilizou-se um efeito de gradação do tamanho da malha (efeito *bias*) na direção da espessura dos aderentes a partir da camada de adesivo até às superfícies superior e inferior, e horizontalmente nos aderentes desde a extremidade livre do provete até à zona da pré-fenda. A condição fronteira para os modelos DCB consistiram na fixação no plano de um nó do aderente inferior na extremidade esquerda do provete (na zona da pré-fenda) e na restrição horizontal e deslocamento vertical ascendente num nó da mesma extremidade do provete, mas no aderente superior.

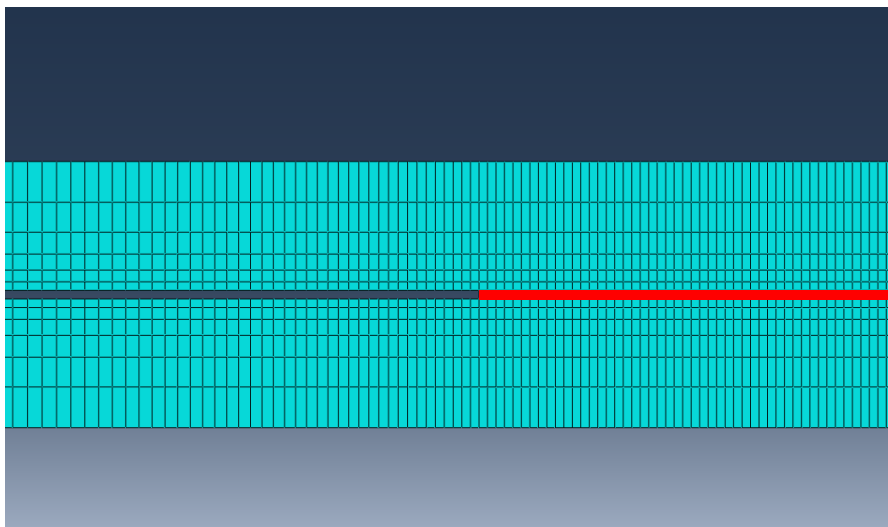


Figura 82 - Refinamento da malha do provete DCB na extremidade da pré-fenda

A Figura 83 mostra um exemplo de malha de provete ENF, onde é apresentada uma visão global da malha e as zonas mais refinadas, correspondendo estas aos pontos de apoios e carregamento pelos punções circulares, e também à zona útil de propagação da fenda (desde o início da camada de adesivo até ao punção intermédio de solicitação). Os elementos na camada de adesivo possuem dimensões de  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ , utilizando elementos quadrangulares com aresta de comprimento igual à espessura de

adesivo. Na zona do substrato em contacto com a camada de adesivo também se usaram elementos de dimensões idênticas.

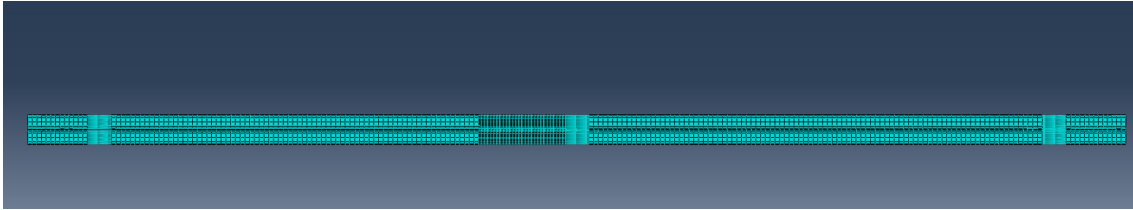


Figura 83 - Malha do provete ENF

Na zona da pré-fenda, a malha não é tão refinada no sentido do comprimento do provete, já que esta zona não está sujeita a grandes gradientes de tensões. Na direção da espessura, foi utilizada uma gradação do tamanho dos elementos (efeito *bias*), com maior refinamento no sentido da proximidade do adesivo, devido à necessidade de modelar com maior precisão a zona da ligação adesiva, e também nas faces horizontais exteriores dos aderentes, para maior precisão das condições de contato entre os cilindros de suporte e carregamento com os aderentes. Na Figura 84 são visíveis as zonas mais refinadas do contacto dos cilindros de suporte e carregamento com o provete.

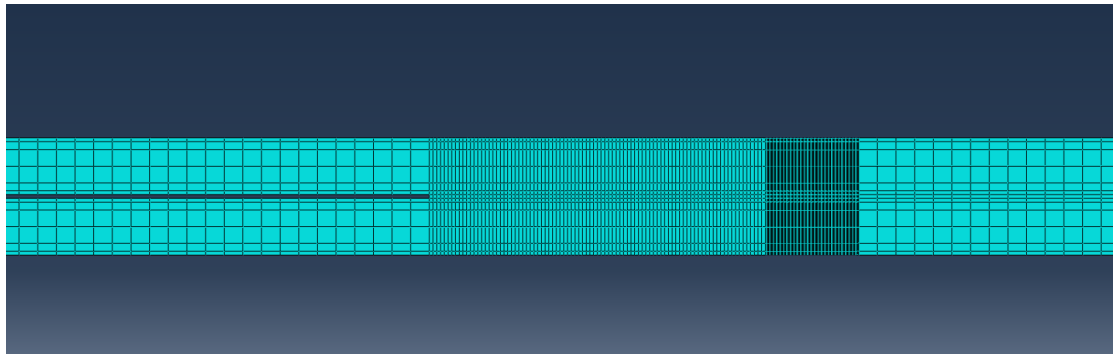


Figura 84 - Refinamento da malha ENF

Assim, foram utilizados elementos de malha com 0,05 mm (Figura 85) de lado na zona que durante análise faz o respetivo contacto com o cilindro.

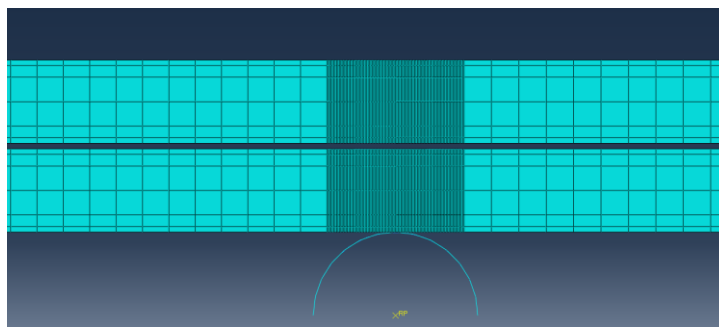


Figura 85 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e um dos cilindros de suporte.

Na Figura 86 observa-se que, no contato do provete com o cilindro de carregamento, a malha do provete representa um refinamento idêntico ao descrito anteriormente, com exceção de a malha ser mais grosseira na zona de propagação de dano à direita do cilindro de solicação, uma vez que esta região já excede os limites de análise do ensaio ENF.

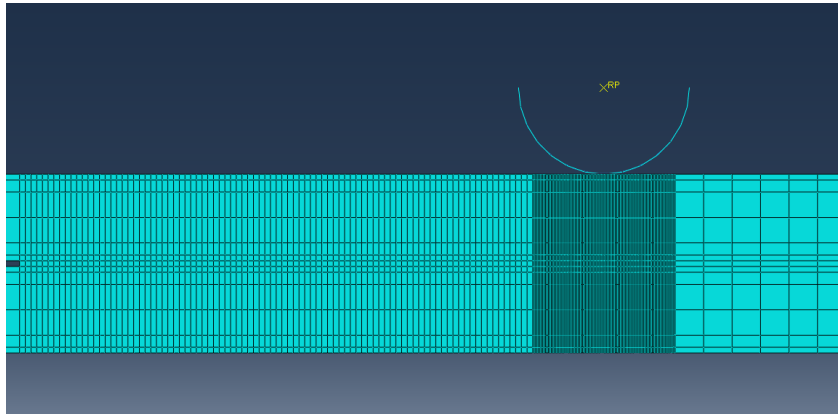


Figura 86 - Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e o cilindro de solicação.

Quanto às condições fronteira aplicados aos modelos ENF, a modelação foi preparada sempre com o intuito de aplicar as condições reais dos ensaios experimentais. Como se pode verificar na Figura 87, os cilindros de suporte foram restringidos nas duas direções do plano e na rotação, o cilindro de carregamento foi restringido na direção horizontal e aplicou-se um deslocamento vertical com sentido descendente, e restringiu-se também um nó a meio do comprimento do provete na direção horizontal para evitar o seu deslocamento horizontal. Foi também necessário introduzir condições de contato entre cada um dos três cilindros e o provete, e também entre os dois substratos na zona da pré-fenda, para assim garantir o deslizamento sem atrito. Foi utilizada uma formulação com pequeno deslizamento do tipo *surface to surface*. Considerou-se um comportamento tangencial sem fricção e um comportamento normal do tipo *hard contact*.

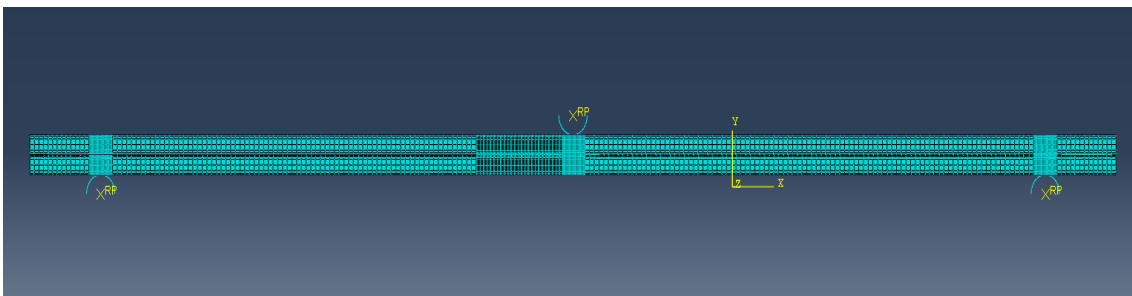


Figura 87 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos

### 3.2.2 Modelo de dano coesivo triangular

Os MDC consistem numa relação entre as tensões e deslocamentos relativos (tração ou corte) que ligam nós homólogos de elementos coesivos para assim simular o comportamento elástico até à resistência máxima e subsequentemente a degradação das propriedades dos materiais até à rotura. Podemos considerar diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [53]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [50], linear parabólico [49], exponencial [51], polinomial [52] e trapezoidal [46]. O modelo mais utilizado devido à sua simplicidade pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e pelos resultados exatos para a maioria das condições reais [54], é o modelo triangular. O modelo triangular 2D implementado no *software* ABAQUS® está representado na Figura 88, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

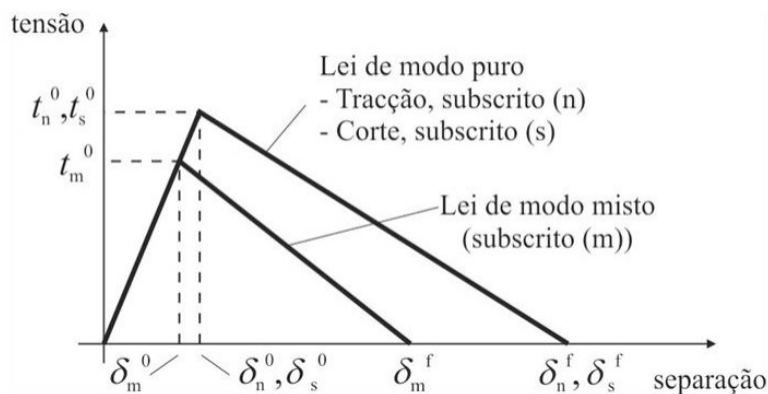


Figura 88 - MDC triangular implementado no software ABAQUS® [50]

O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo forem anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e corte [57]. Estes elementos coesivos estão sujeitos a componentes de deformação normal e de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz  $\mathbf{K}_{COH}$ , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (28)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja considerada uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [133]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que

$$K_{mm} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (29)$$

onde  $E$  corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e  $G$  ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [57]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, definido pela seguinte expressão

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (30)$$

$\langle \rangle$  são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [134]. Quando é atingido  $t_m^0$  (Figura 88) a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos ( $\delta_m^f$  na Figura 88) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de  $G_{Ic}$  e  $G_{IIc}$

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1. \quad (31)$$

### 3.2.3 Estudo do tamanho de malha

O estudo do tamanho da malha consiste na análise dos resultados de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  para 4 provetes do ensaio DCB e 4 provetes do ensaio ENF para as concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. Inicialmente, têm-se um tamanho de malha de 0,2 mm, sendo que, para uma análise da malha mais refinada e menos refinada utilizaram-se outros tamanhos de malha. Consideraram-se assim os valores de 0,05 mm e 0,1 mm para uma malha mais refinada, e 0,5 mm e 1 mm para uma malha menos refinada.

### 3.2.3.1 Ensaio DCB

Neste capítulo apresenta-se os gráficos referentes ao ensaio DCB com tamanho de malha entre 0,05 mm e 1 mm.

#### 3.2.3.1.1 Resultados para $P_{m\acute{a}x}$

Inicializou-se o estudo da malha apresentando-se os gráficos referentes ao  $P_{m\acute{a}x}$  (Figura 89 à Figura 92) em concordância do tamanho de malha entre 0,05 mm e 1 mm.

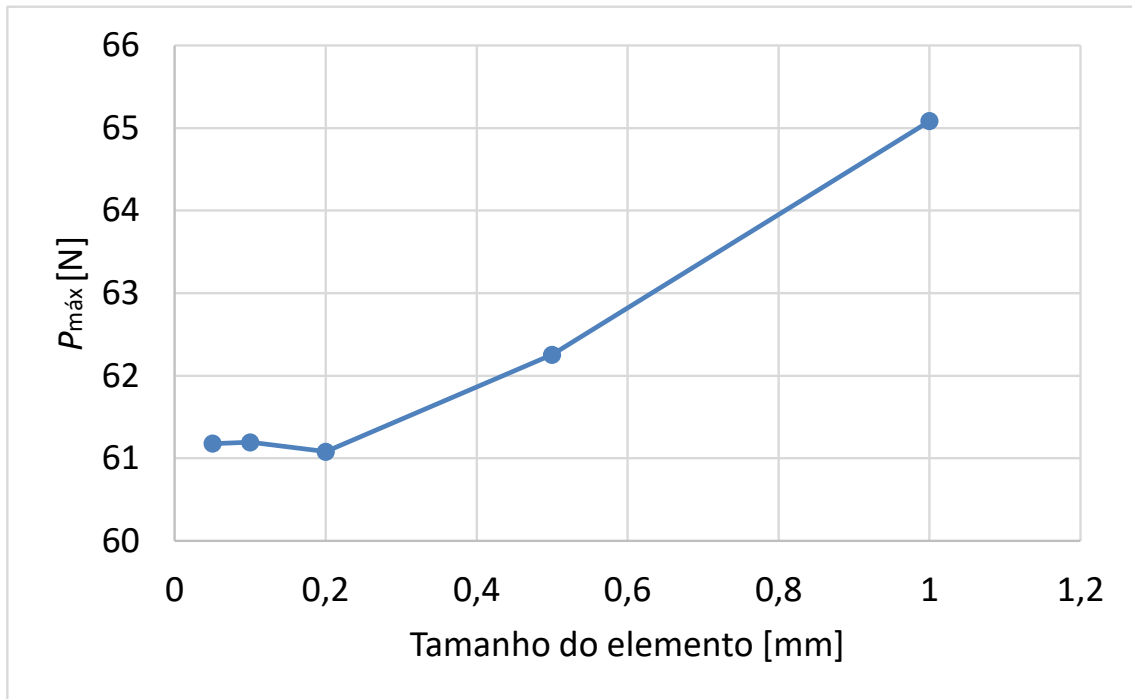


Figura 89 - Curvas  $P_{m\acute{a}x}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça

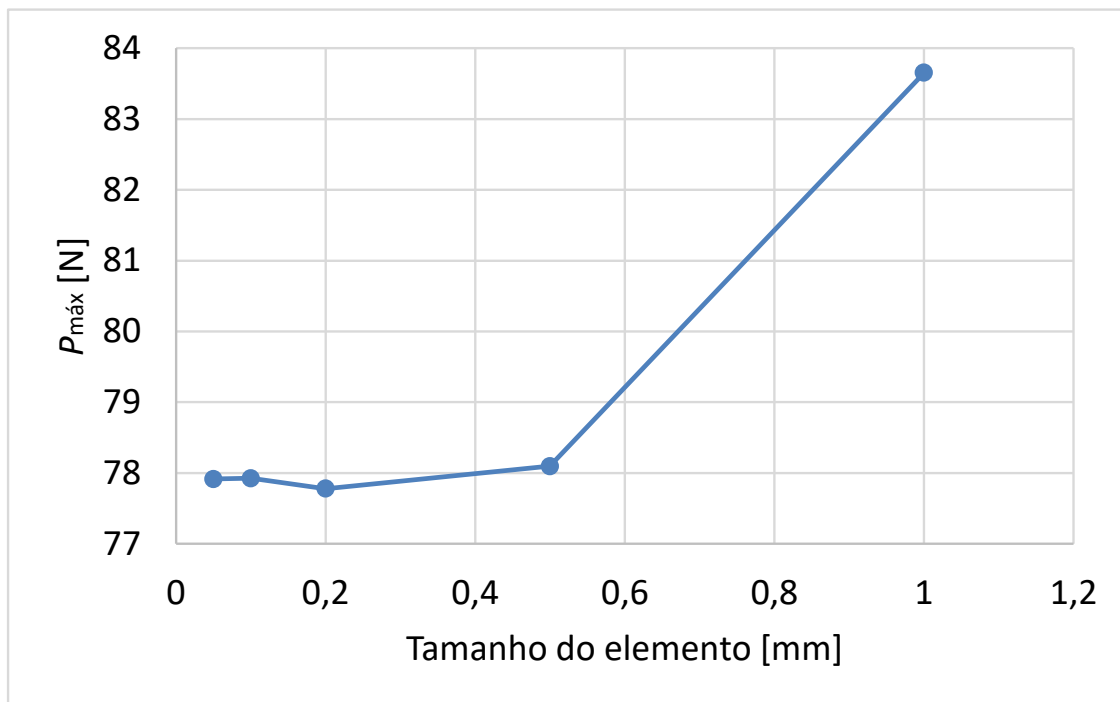


Figura 90 - Curvas  $P_{máx}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça

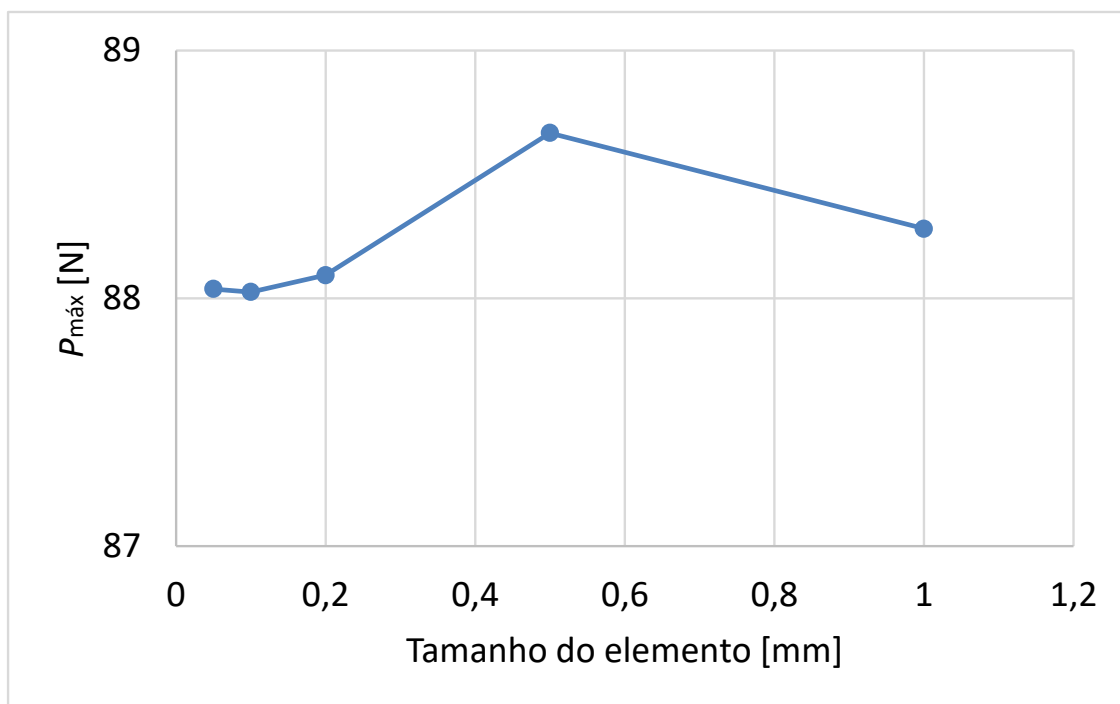


Figura 91 - Curvas  $P_{máx}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça

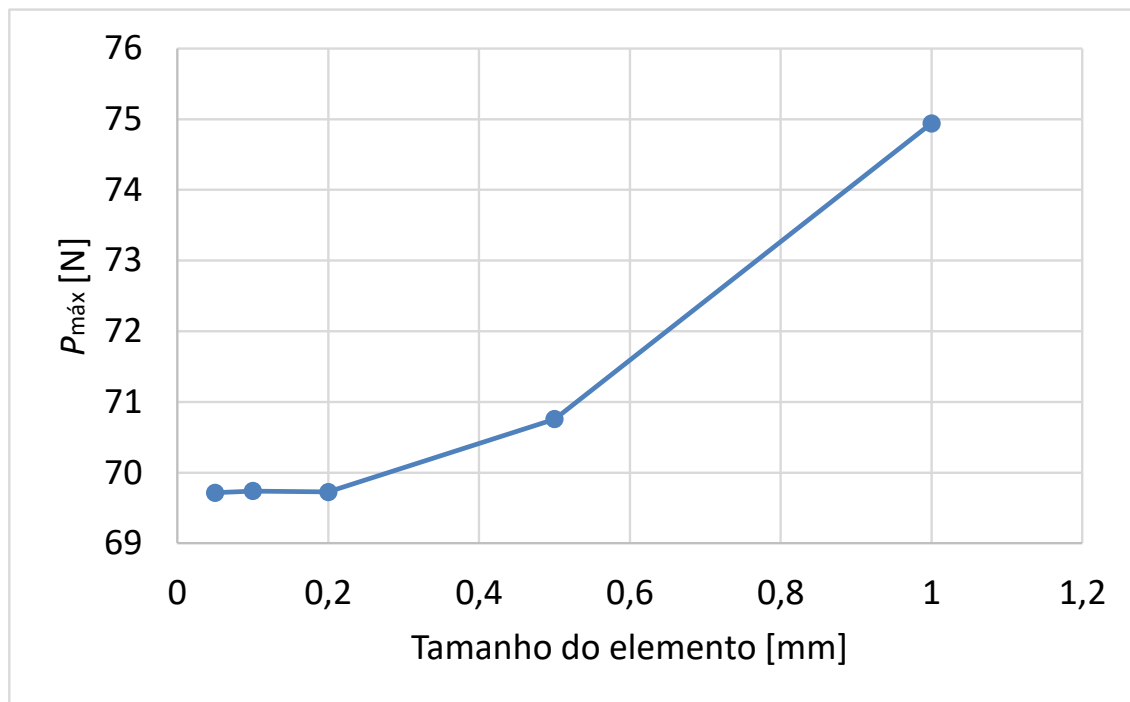


Figura 92 - Curvas  $P_{máx}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 1% de cortiça

A análise das curvas representadas na Figura 89 à Figura 92 mostra que, de um modo geral, estas apresentam o mesmo comportamento, isto é, quanto mais refinada a malha menor o  $P_{máx}$ . Apenas a Figura 91 apresenta um comportamento diferente, onde o tamanho da malha a 0,5 mm apresenta maior  $P_{máx}$ . A Figura 89 representa o caso com  $P_{máx}$  menor em relação aos outros gráficos. Com esta análise verificou-se que a presença de cortiça aumenta o  $P_{máx}$  e que abaixo de 0,2 mm o valor de  $P_{máx}$  começa a estabilizar, onde se prevê que o tamanho ideal da malha seja o maior valor até 0,2 mm.

#### 3.2.3.1.2 Resultados para $\delta P_{máx}$

De seguida, apresenta-se os gráficos das curvas  $\delta P_{máx}$  (Figura 93 à Figura 96) com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB.

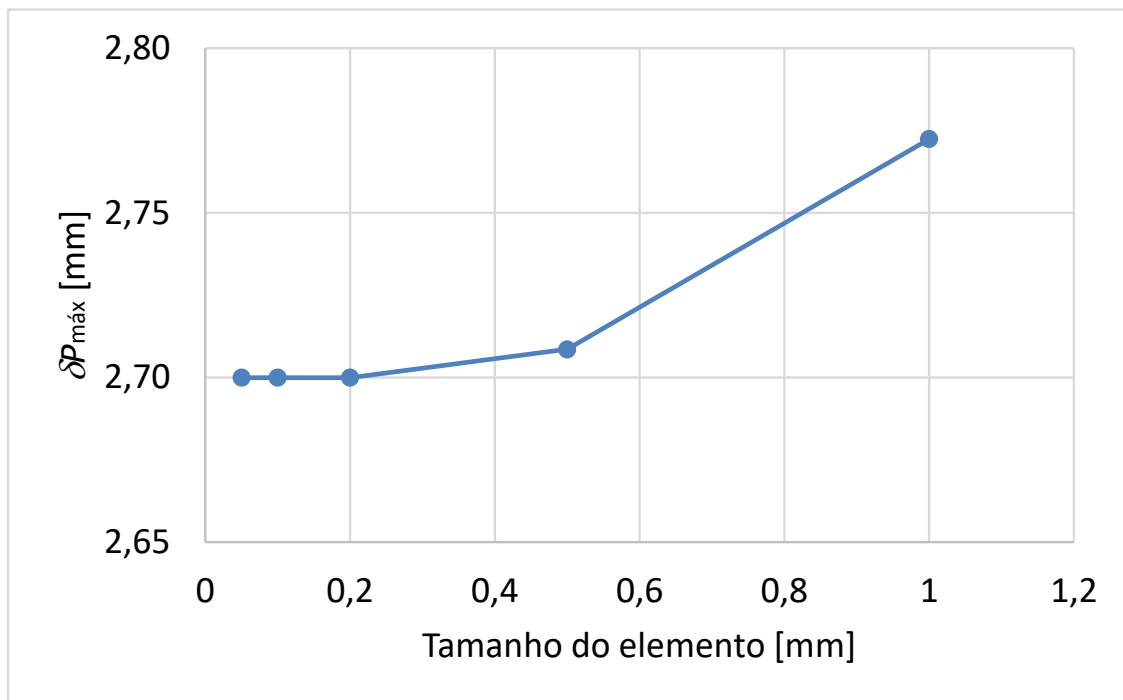


Figura 93 - Curvas  $\delta P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça.

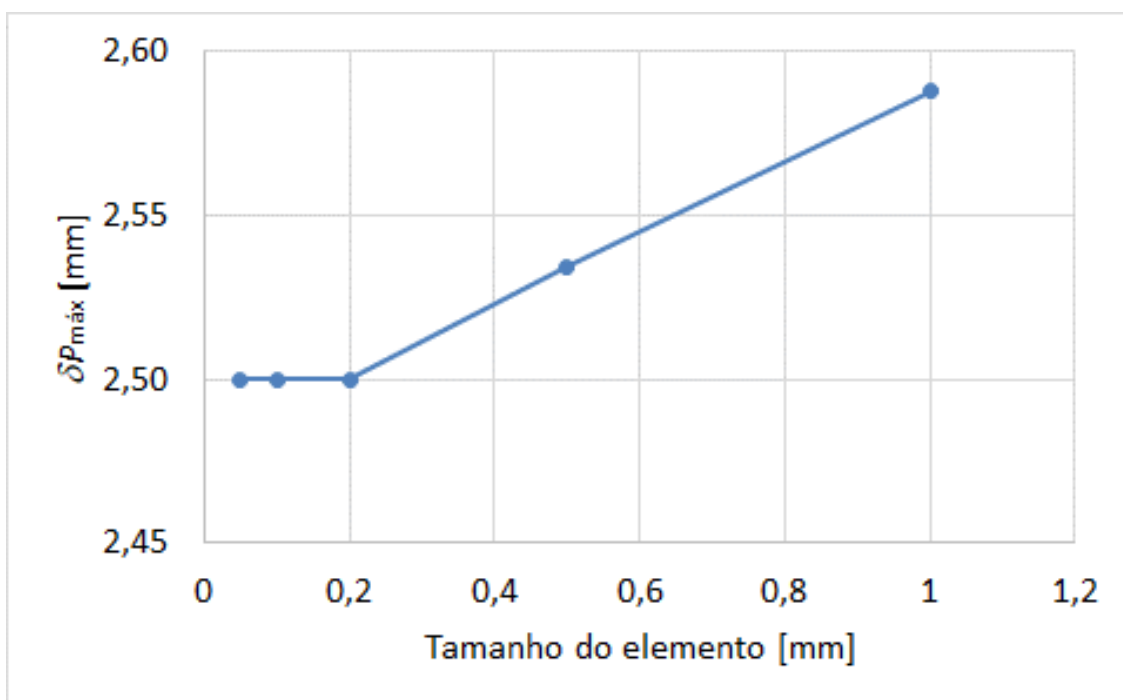


Figura 94 - Curvas  $\delta P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça.

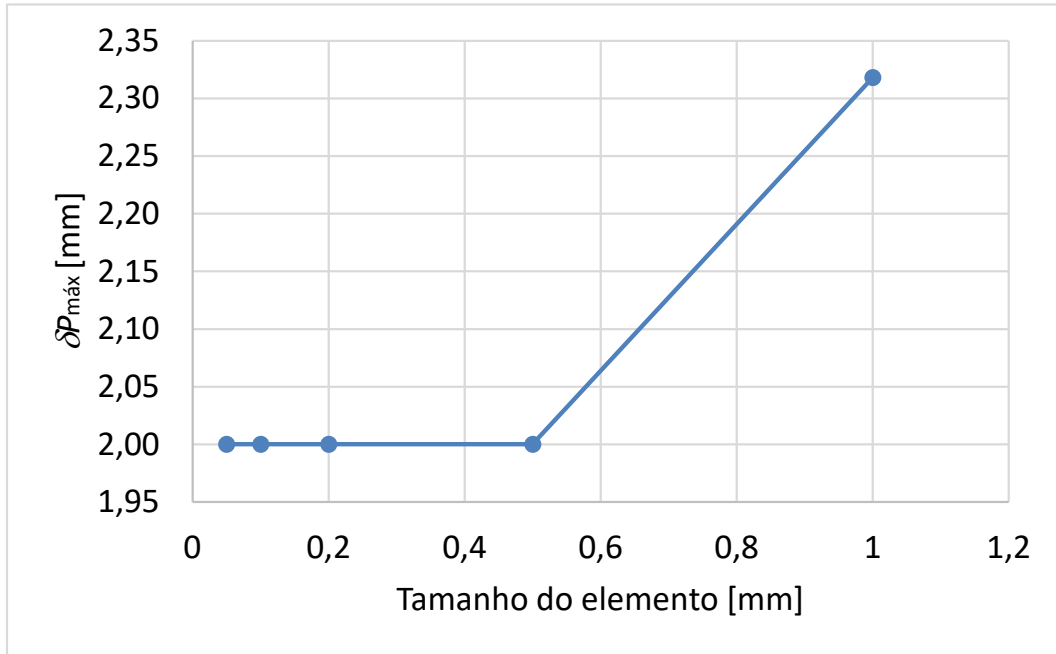


Figura 95 - Curvas  $\delta P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça.

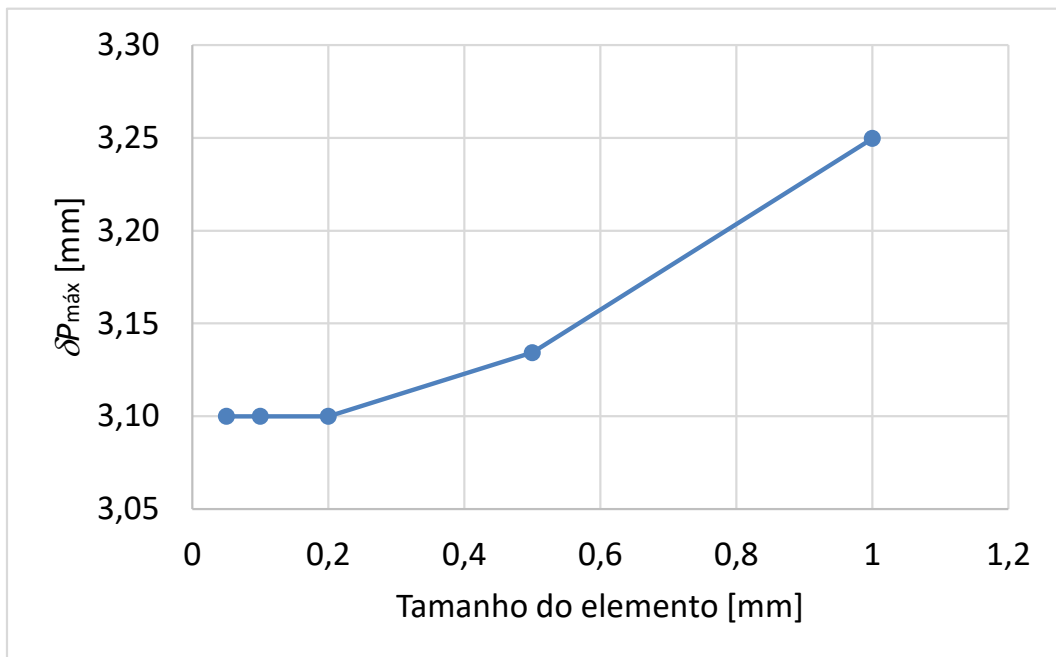


Figura 96 - Curvas  $\delta P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 1% de cortiça.

Nos resultados de  $\delta P_{\text{máx}}$ , as curvas (Figura 93 à Figura 96) apresentam o mesmo comportamento, na medida em que, quanto mais refinada a malha, menor é o valor de  $\delta P_{\text{máx}}$ . Com a presença de 0%, 0,25% e 0,5% de cortiça, respectivamente, o valor  $\delta P_{\text{máx}}$  diminui. Já com 1% de cortiça é onde se têm maior  $\delta P_{\text{máx}}$ . Por fim, conclui-se que  $\delta P_{\text{máx}}$  tende a estabilizar-se, entre 0 e 0,2 mm. Logo, consta-se que 0,2 mm será o melhor valor para o estudo da malha. Embora na Figura 95 comece a estabilizar em 0,5 mm.

### 3.2.3.1.3 Resultados para $\delta_{\text{máx}}$

Por fim, apresenta-se os gráficos das curvas  $\delta_{\text{máx}}$  (Figura 97 à Figura 100) com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB.

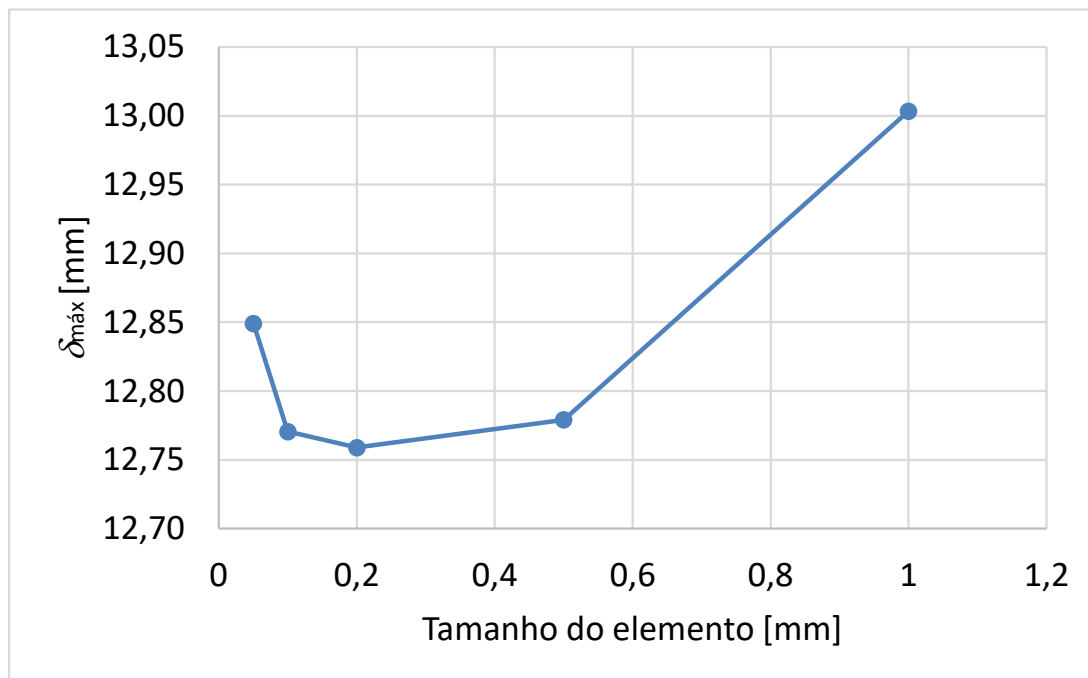


Figura 97 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça.

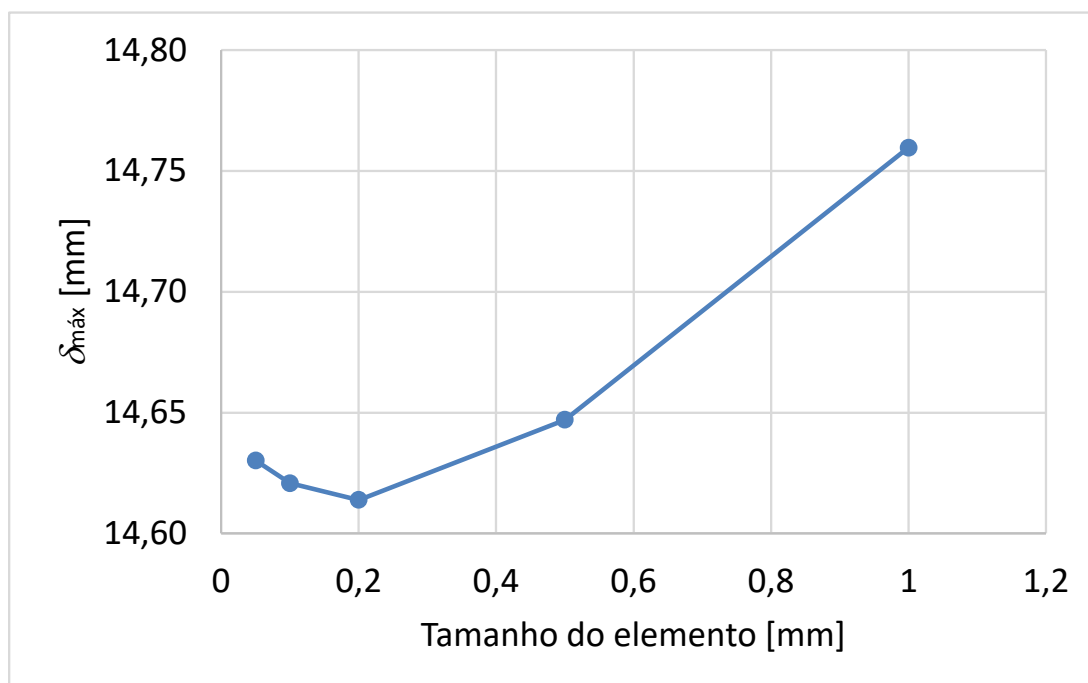


Figura 98 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça.

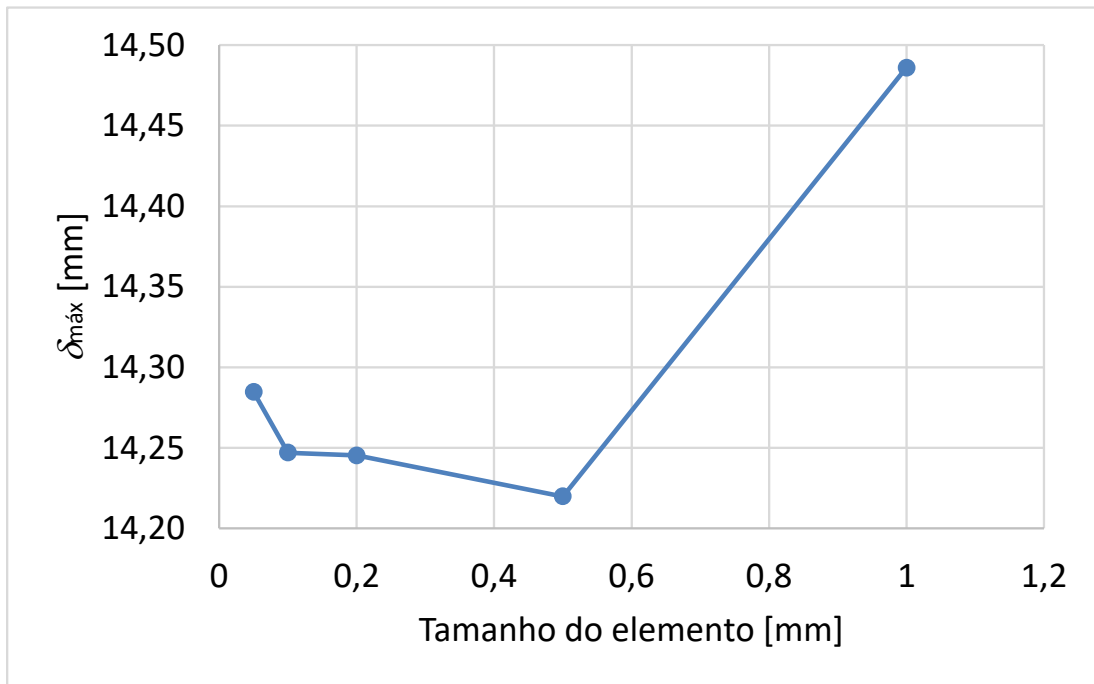


Figura 99 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça.

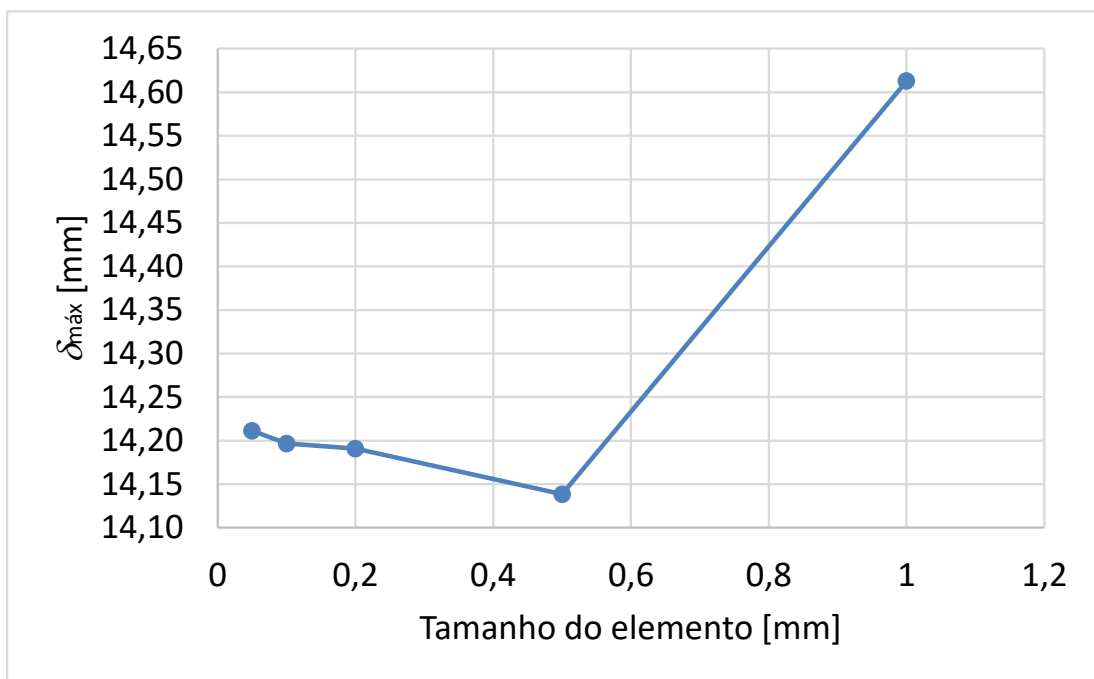


Figura 100 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete DCB com 1% de cortiça.

Nos resultados de  $\delta_{\text{máx}}$  verifica-se que o tamanho da malha entre 0,5 mm e 1 mm onde é menos refinada, em todas as concentrações de cortiça aumenta o valor de  $\delta_{\text{máx}}$ . No entanto, com o tamanho da malha entre 0,05 mm e 0,2 mm,  $\delta_{\text{máx}}$  diminui em todas as concentrações de cortiça com o adesivo. Apenas entre 0,2 mm e 0,5 mm nas concentrações de 0% e 0,25% de cortiça há um aumento de  $\delta_{\text{máx}}$ . Nas restantes

concentrações verifica-se o contrário. Como se pode ver, na Figura 97 onde o adesivo contém 0% de cortiça, é onde se têm menor  $\delta_{\text{máx}}$ . No tamanho de malha de 0,05 mm há um aumento de  $\delta_{\text{máx}}$  porque na parte final do provete verifica-se a presença de adesivo o que provoca maior demora na rutura total. No fim, tem-se a curva a estabilizar entre os intervalos de 0 a 0,2 mm.

### 3.2.3.2 Ensaio ENF

Neste capítulo apresenta-se os gráficos referentes ao ensaio ENF com tamanho de malha entre 0,05 mm e 1 mm.

#### 3.2.3.2.1 Resultados de $P_{\text{máx}}$

No ensaio ENF, como se pode verificar na Figura 101 à Figura 104 o  $P_{\text{máx}}$  aumenta consoante o tamanho da malha e com aumento da cortiça. Pode-se então concluir que, quanto maior percentagem de cortiça no adesivo, maior é o valor de  $P_{\text{máx}}$ . Por fim, verifica-se que entre 0 e 0,2 mm de tamanho de malha há uma tendência das curvas para estabilizar, o que leva à conclusão de que, o refinamento recomendado é entre o intervalo de 0,05 a 0,2 mm.

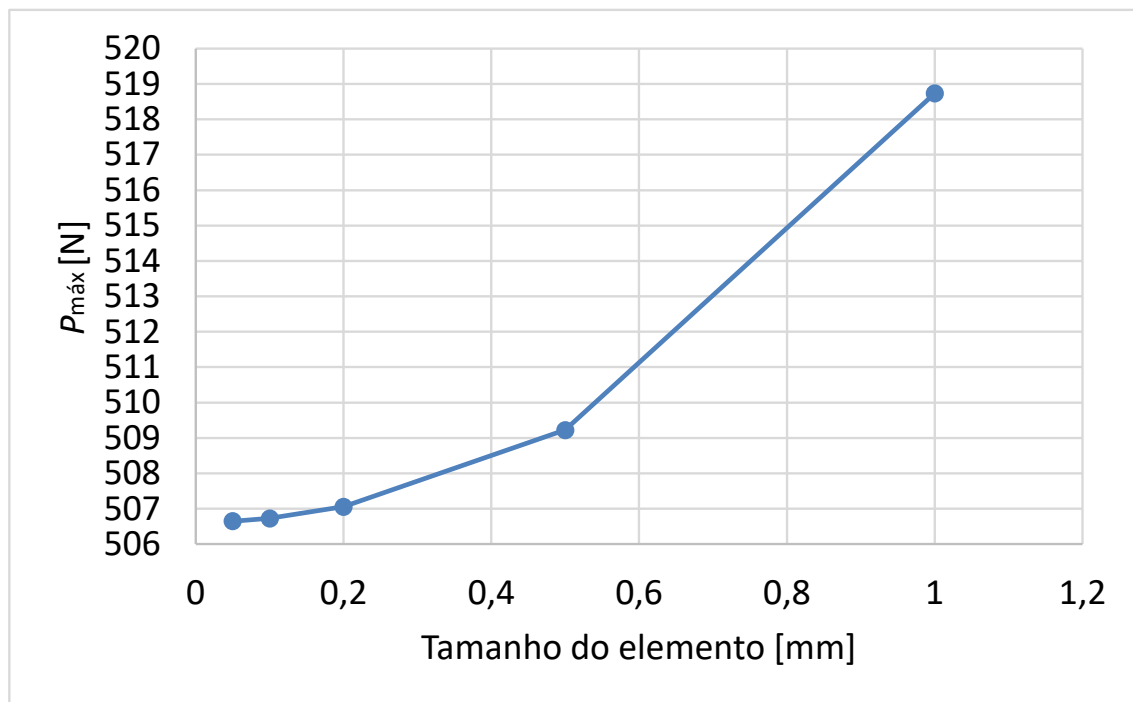


Figura 101 - Curvas  $P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça.

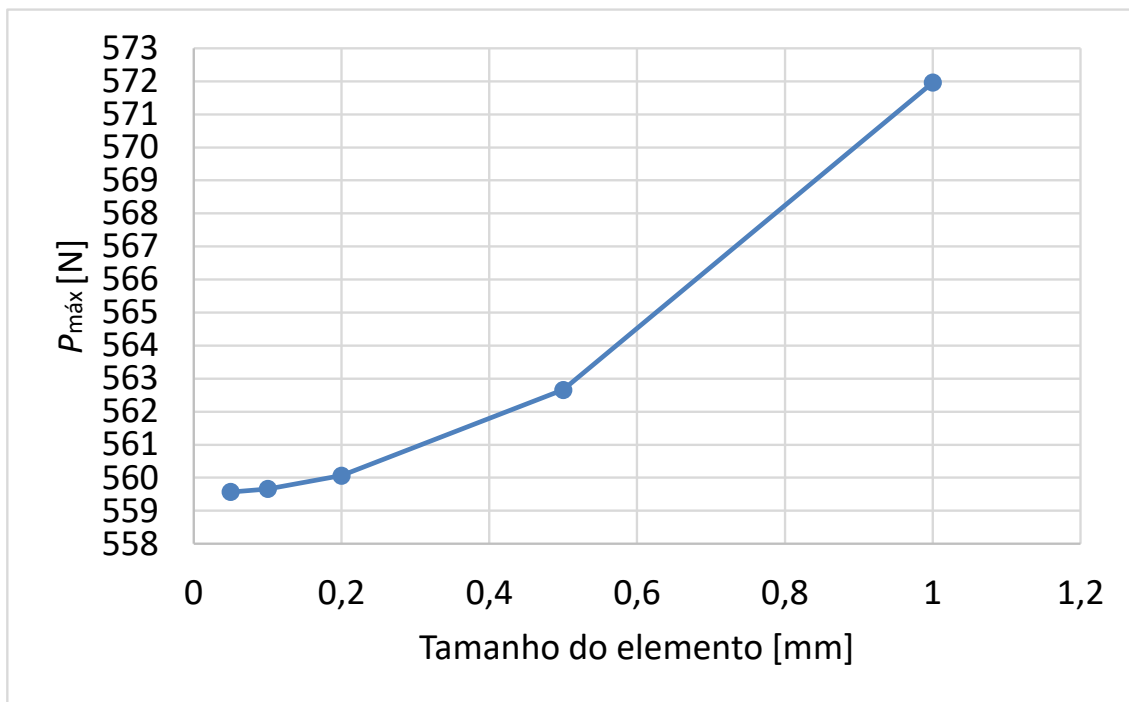


Figura 102 - Curvas  $P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça.

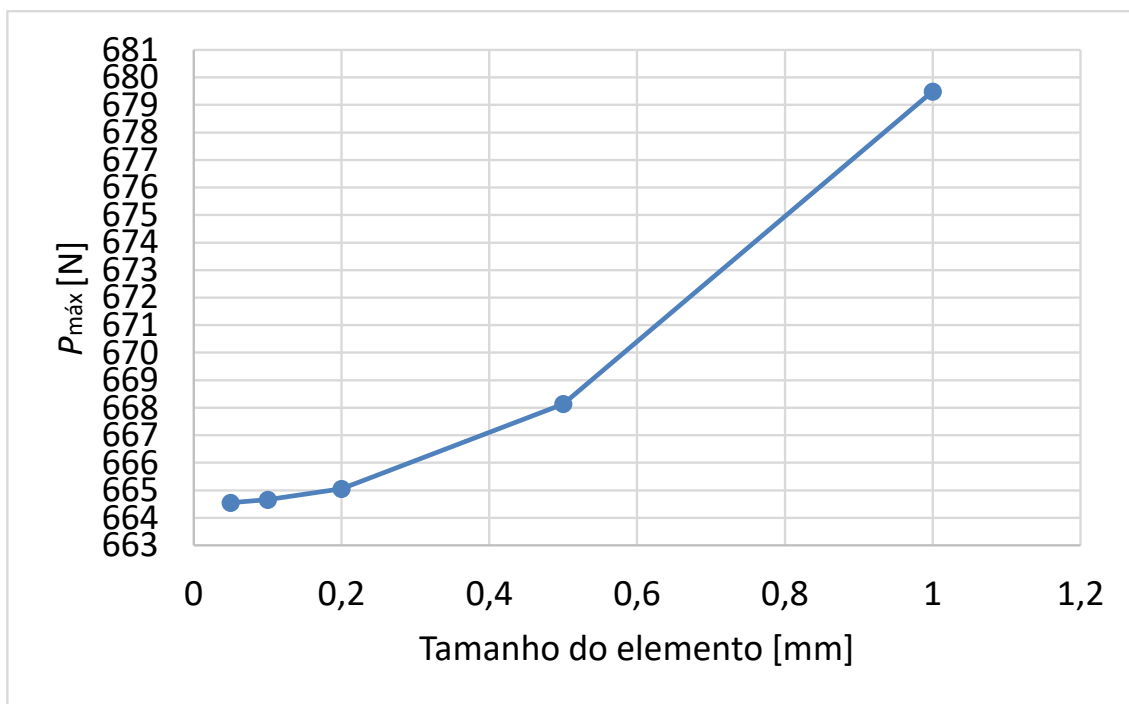


Figura 103 - Curvas  $P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça.

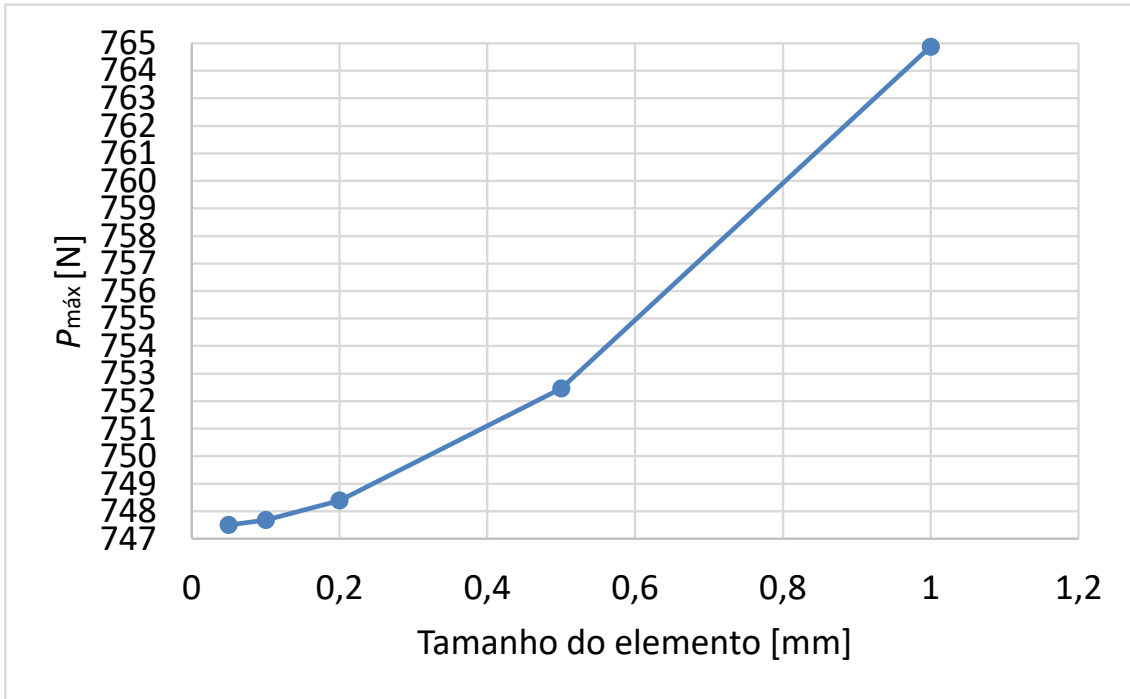


Figura 104 - Curvas  $P_{máx}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça.

### 3.2.3.2.2 Resultados para $\delta P_{máx}$

Também no ensaio ENF foi apresentado os resultados de  $\delta P_{máx}$  para o estudo da malha entre 0,05 mm a 0,2 mm. Seguem-se então os resultados obtidos.

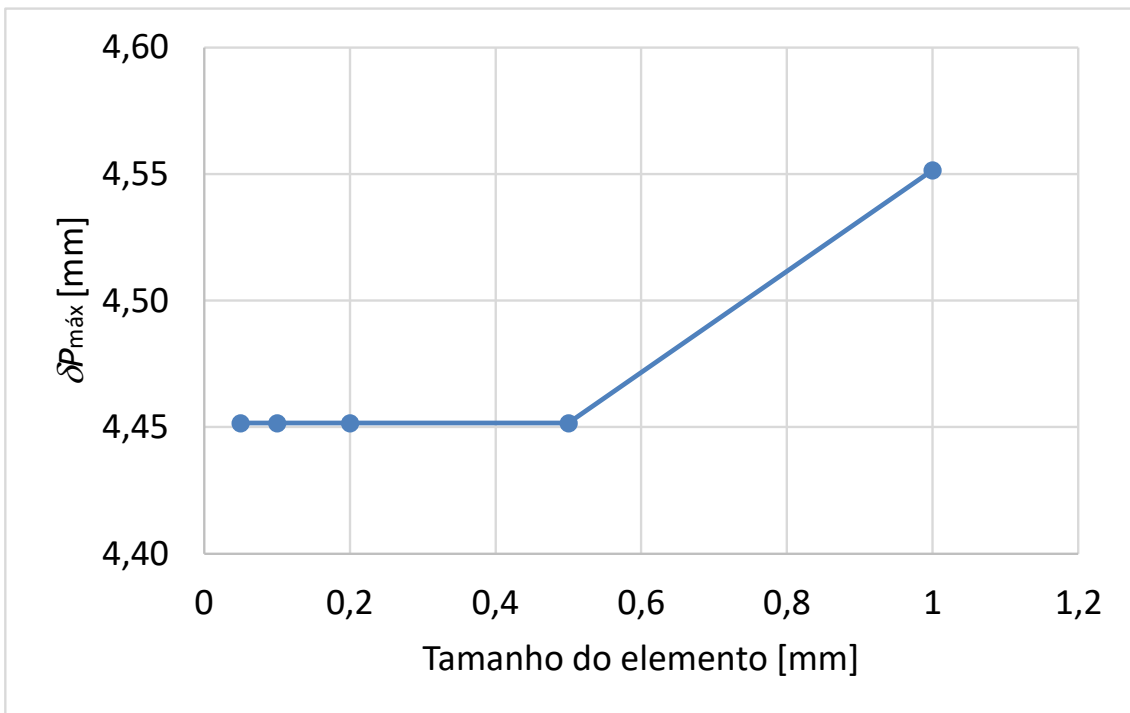


Figura 105 - Curvas  $\delta P_{máx}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça.

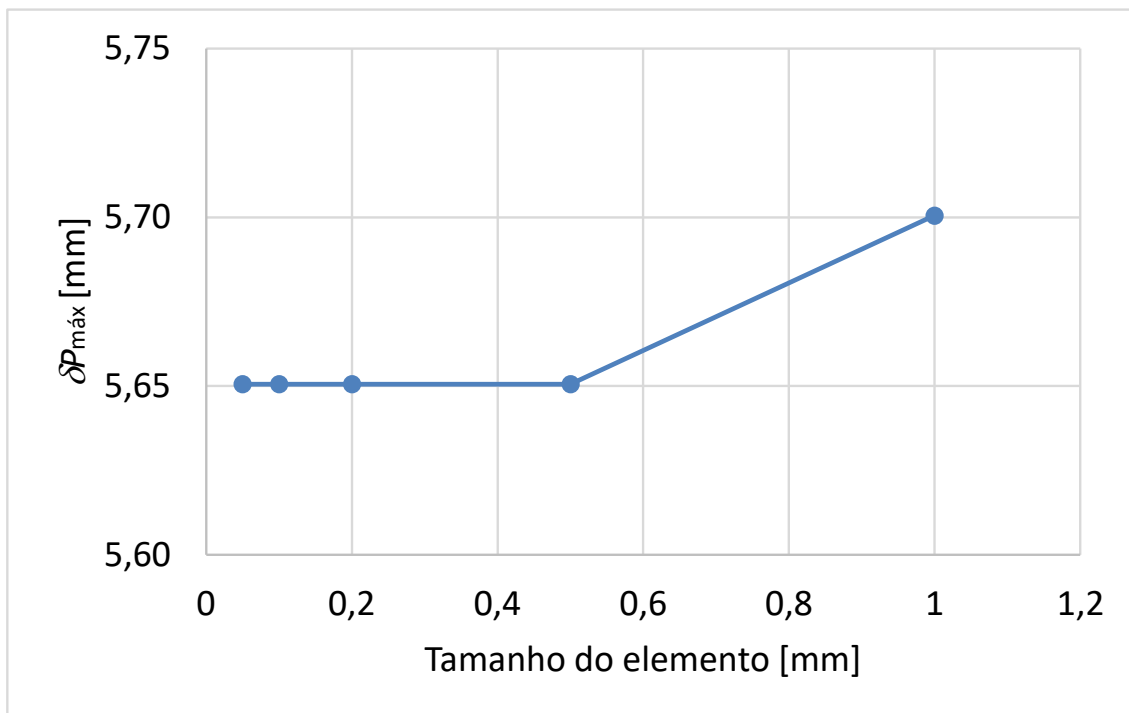


Figura 106 - Curvas  $\delta P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça.

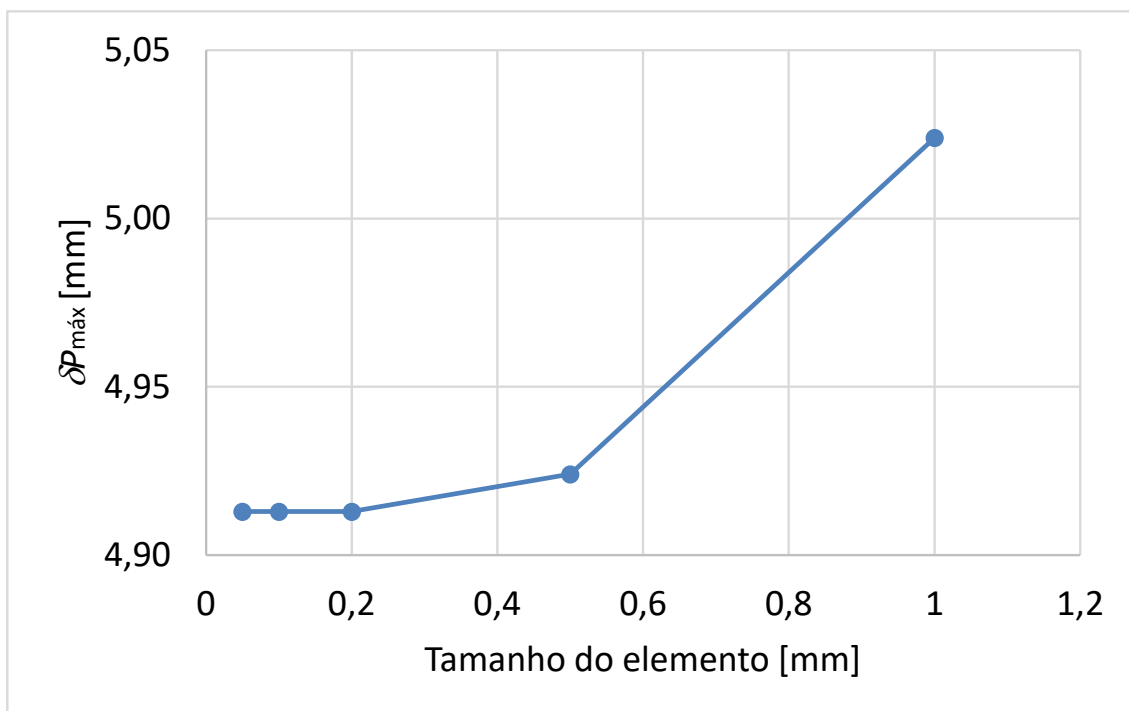


Figura 107 - Curvas  $\delta P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça.

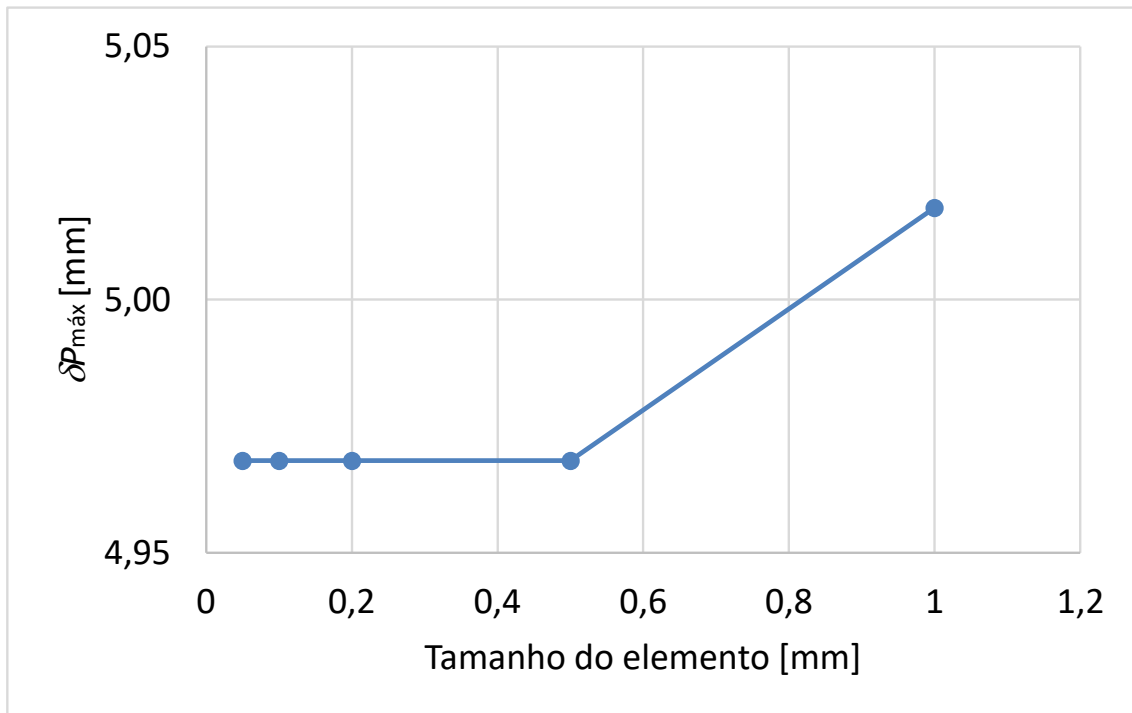


Figura 108 - Curvas  $\delta P_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça.

Neste caso,  $\delta P_{\text{máx}}$  aumenta para malhas menos refinadas. O adesivo com 0,25% de cortiça apresenta maior  $\delta P_{\text{máx}}$  que os restantes casos, sendo o provete com 0% de cortiça que apresenta menor valor de  $\delta P_{\text{máx}}$ . Pode-se concluir que a presença de cortiça no adesivo aumenta  $\delta P_{\text{máx}}$  e que entre 0,05 mm e 0,5 mm  $\delta P_{\text{máx}}$  começa a uniformizar. Portanto, quanto mais refinada for a malha melhor será o estudo do efeito de tamanho de malha em  $\delta P_{\text{máx}}$ . Ao contrário do ensaio DCB, o ensaio ENF em  $\delta P_{\text{máx}}$  começa a estabilizar a partir de 0,5 mm.

### 3.2.3.2.3 Resultados para $\delta_{\text{máx}}$

Por fim, apresenta-se os resultados de  $\delta_{\text{máx}}$  para o ensaio ENF com as concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1% (Figura 109 à Figura 112).

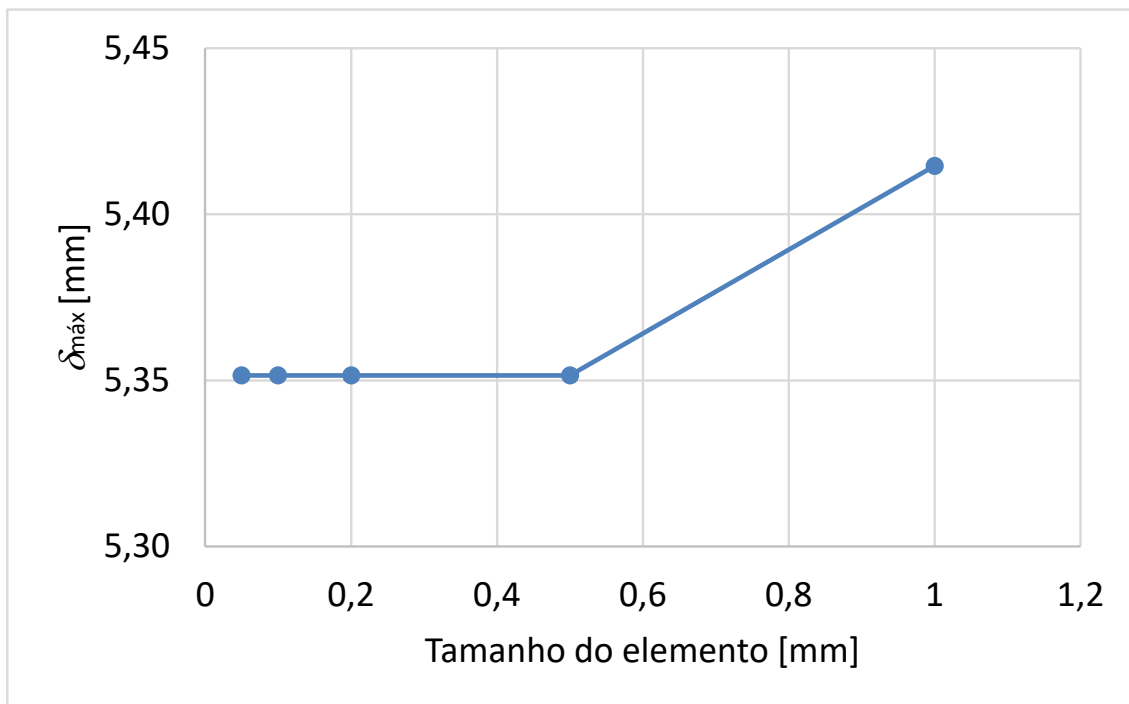


Figura 109 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça.

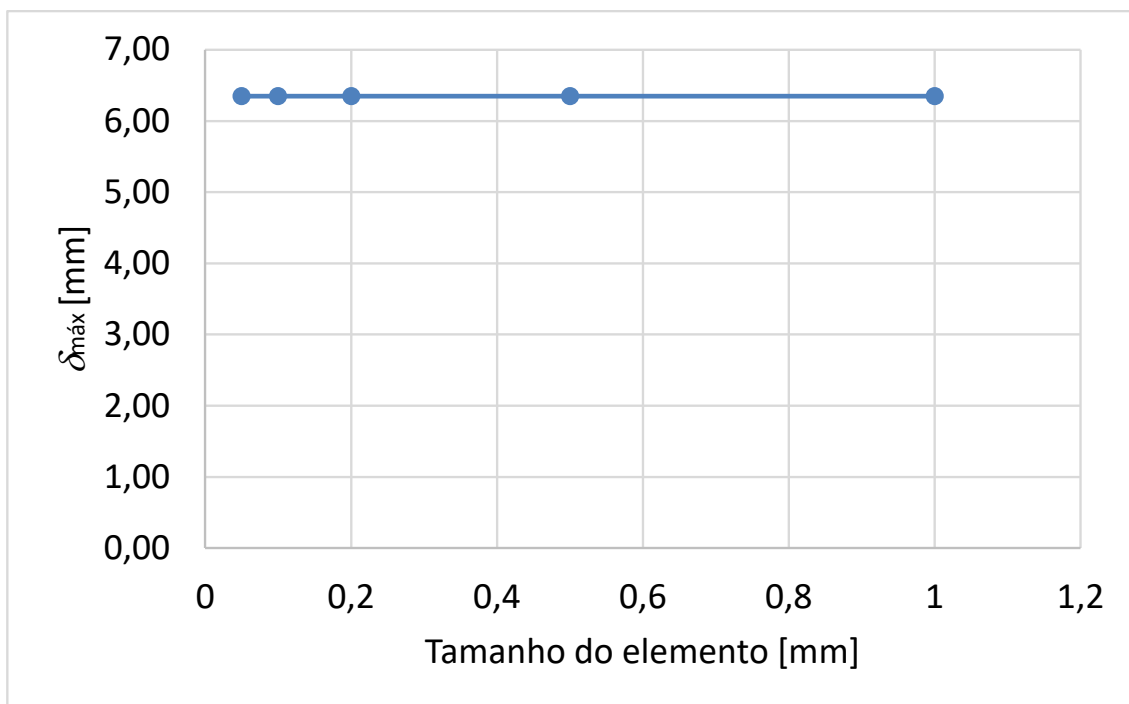


Figura 110 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça.

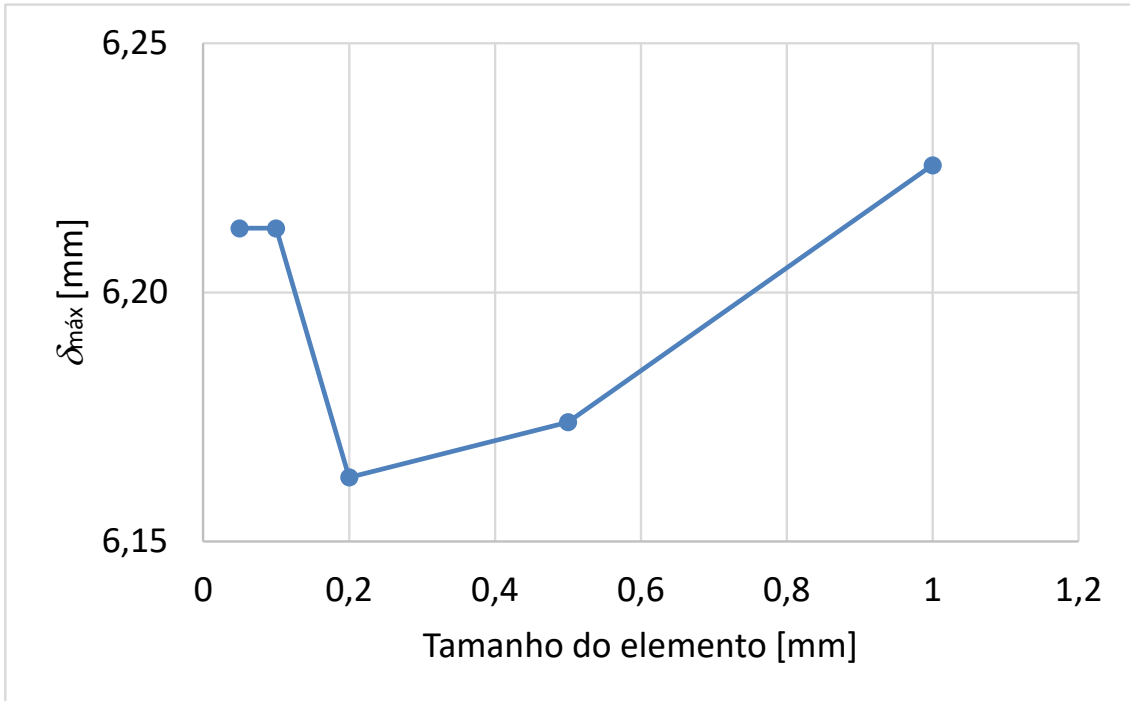


Figura 111 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça.

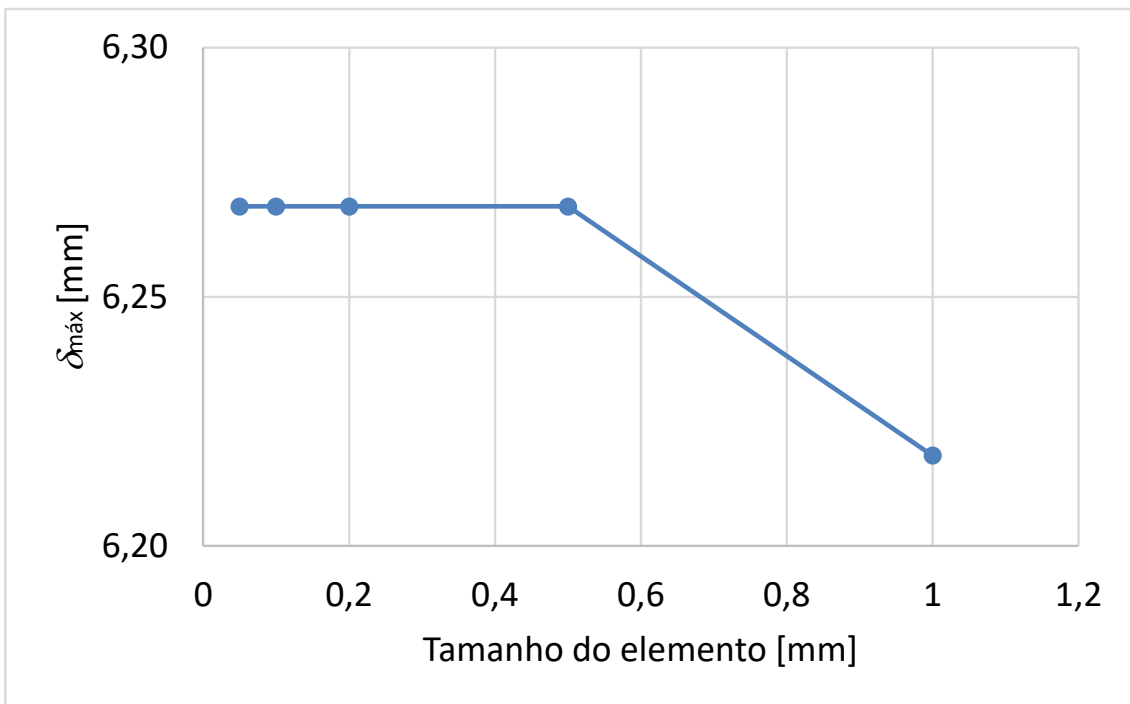


Figura 112 - Curvas  $\delta_{\text{máx}}$  com adesivo Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça.

Na Figura 109 tem-se a curva  $\delta_{\text{máx}}$  com o menor valor e onde não há presença de cortiça, logo verifica-se que com cortiça a curva  $\delta_{\text{máx}}$  aumenta. Os provetes ENF com adesivo e 0,25% de cortiça (Figura 110) apresentam-se ao longo dos diversos tamanhos de malha, entre 0,05 mm a 1 mm, um valor constante. Já a curva  $\delta_{\text{máx}}$  com

adesivo e 0,5% de cortiça (Figura 111) apresenta uma quebra no tamanho de malha em 0,2 mm, e de seguida aumenta o valor  $\delta_{m\acute{a}x}$ . Por fim, na Figura 112, onde o adesivo contém 1% de cortiça, verifica-se que quanto maior for o tamanho do elemento da malha, menor será o valor de  $\delta_{m\acute{a}x}$ . Por fim, a malha tende a estabilizar onde o refinamento será menor, que será em tamanhos de malha reduzidos, entre 0,05 mm e 0,2 mm.

### 3.2.4 Validação das leis coesivas obtidas

As leis coesivas utilizadas neste trabalho numérico estão definidas no capítulo 3.2.2. A validação da lei coesiva triangular para a modelação da camada de um adesivo em tração e corte consiste na comparação das curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais, nomeadamente no que concerne aos valores de  $P_{m\acute{a}x}$ , rigidez inicial e comportamento durante a propagação da fenda. Nos ensaios DCB e ENF foram analisados os valores de  $P-\delta$  com as respetivas dimensões de provete, e para cada concentração de cortiça: 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. Deste modo são expostos os resultados dos dois tipos de juntas estudadas, DCB e ENF, para o adesivo Araldite® AV138 com as respetivas concentrações de cortiça.

#### 3.2.4.1 Ensaios DCB

As curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente para as juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138 com concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%, respetivamente, são apresentadas, na Figura 113 à Figura 116. Observa-se uma boa aproximação aos resultados experimentais. De facto, os resultados obtidos com o modelo de dano coesivo triangular apresentam uma rigidez inicial semelhante ao valor experimental, ou seja, desde o início da aplicação da carga até ao início de propagação do dano. A lei triangular apresenta valores numéricos de  $P_{m\acute{a}x}$  bastante próximos do correspondente valor experimental. O comportamento das curvas  $P-\delta$  durante a fase de propagação justifica-se pelo facto de a propagação do dano em ensaios DCB ser governada por  $G_{Ic}$ . Na Tabela 19 à Tabela 22 são apresentados os resultados de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  para cada provete ensaiado experimentalmente com concentração de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%, respetivamente, e respetiva comparação com a simulação numérica com o modelo de dano coesivo triangular. Por fim, apresentou-se o erro médio para cada provete, sendo este calculado relativamente ao valor experimental.

Inicialmente apresenta-se as curvas  $P-\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça (Figura 113).

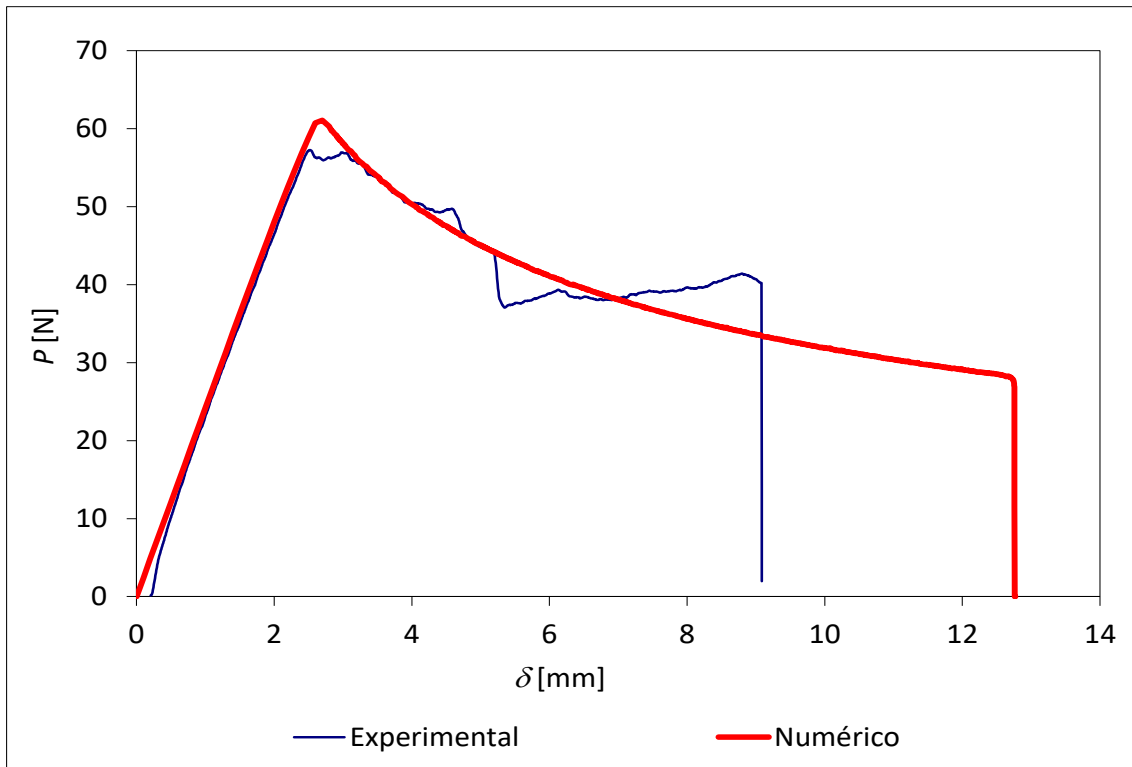


Figura 113 - Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 0% de cortiça

Tabela 19 - Erros de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 0% cortiça

### LEI TRIANGULAR

Provete	$P_{m\acute{a}x}$		Erro%	$\delta P_{m\acute{a}x}$		Erro%	$\delta_{m\acute{a}x}$		Erro%
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
P_CO_1	61,08	57,25	6,69	2,70	2,51	7,47	12,76	9,09	40,40
P_CO_2	76,04	79,35	-4,16	4,33	4,59	-5,69	15,96	10,10	57,95
P_CO_3	71,73	75,66	-5,19	3,72	3,96	-6,12	16,07	8,58	87,34
<b>Média</b>			5,35	<b>Média</b>		6,43	<b>Média</b>		61,90
<b>Desvio Padrão</b>			6,58	<b>Desvio Padrão</b>		7,73	<b>Desvio Padrão</b>		23,71

Na Tabela 19 são apresentados os resultados de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  para o provete DCB sem presença de cortiça. Na Figura 113, é possível visualizar as diferenças entre a curva experimental e numérica, onde se vão traduzir os valores experimentais de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  em relação aos valores numéricos apresentando um erro médio de 5,35% e 6,43%, respetivamente. Por outro lado,  $\delta_{\text{máx}}$  o erro médio é de 61,90%. Demonstrando que o numérico necessita de mais  $\delta_{\text{máx}}$  para ocorrer rutura total.

De seguida apresenta-se um ensaio representativo para provetes com 0,25% de cortiça (Figura 114).

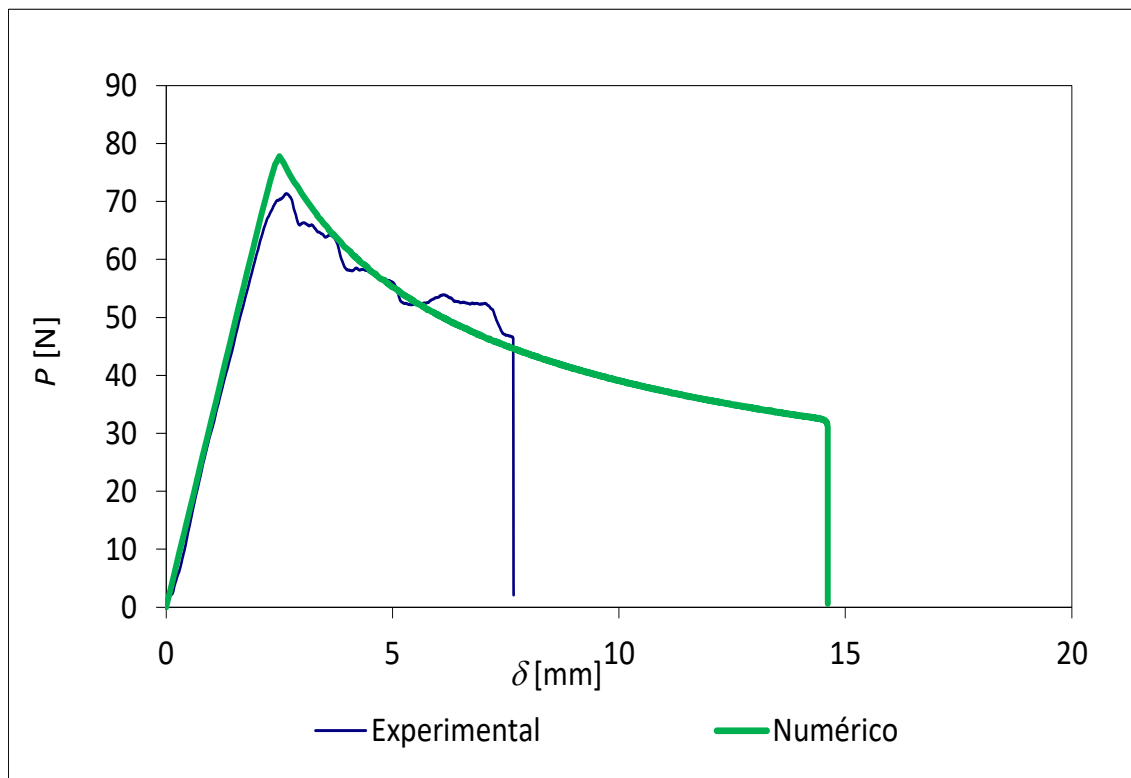


Figura 114 - Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 0,25% de cortiça

Na Figura 114 pode-se observar que as curvas numérica e experimental, em relação ao ensaio anterior, apresenta um valor de  $P_{\text{máx}}$  mais elevado, podendo concluir-se que, o facto de haver cortiça presente no adesivo aumente o valor de  $P$ , e consequentemente aumente  $P_{\text{máx}}$ .

Tabela 20 - Erros de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 0,25% cortiça

LEI TRIANGULAR									
Provete	$P_{\text{máx}}$			$\delta P_{\text{máx}}$			$\delta_{\text{máx}}$		
	Num	Exp	Erro%	Num	Exp	Erro%	Num	Exp	Erro%
P_C025_1	74,57	70,81	5,31	2,01	2,13	-5,61	13,19	6,24	111,51
P_C025_2	78,31	75,61	3,57	2,33	2,43	-4,41	14,28	7,76	84,08
P_C025_3	77,78	71,33	9,03	2,50	2,66	-5,89	14,61	7,67	90,46
<b>Média</b>			5,97	<b>Média</b>		5,30	<b>Média</b>		95,35
<b>Desvio Padrão</b>			2,79	<b>Desvio Padrão</b>		0,79	<b>Desvio Padrão</b>		14,35

Na Tabela 20 em consideração à condição do ensaio anterior onde a cortiça não estava presente, com a presença de cortiça e através da lei triangular, o erro médio do provete aumenta. Os valores de erro médio de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  são 5,97% e 5,30%, respetivamente. Por outro lado, o erro médio de  $\delta_{\text{máx}}$  é de 95,35%, o que corresponde a um aumento considerável relativamente ao provete sem cortiça. Verificou-se um aumento de  $P_{\text{máx}}$  na Figura 114 em relação ao provete de 0% de cortiça (Figura 113) e uma diminuição de  $\delta P_{\text{máx}}$  em relação ao provete com presença de cortiça.

Seguidamente, pelo ensaio DCB apresentam as curvas  $P$ - $\delta$  com 0,5% de cortiça (Figura 115).

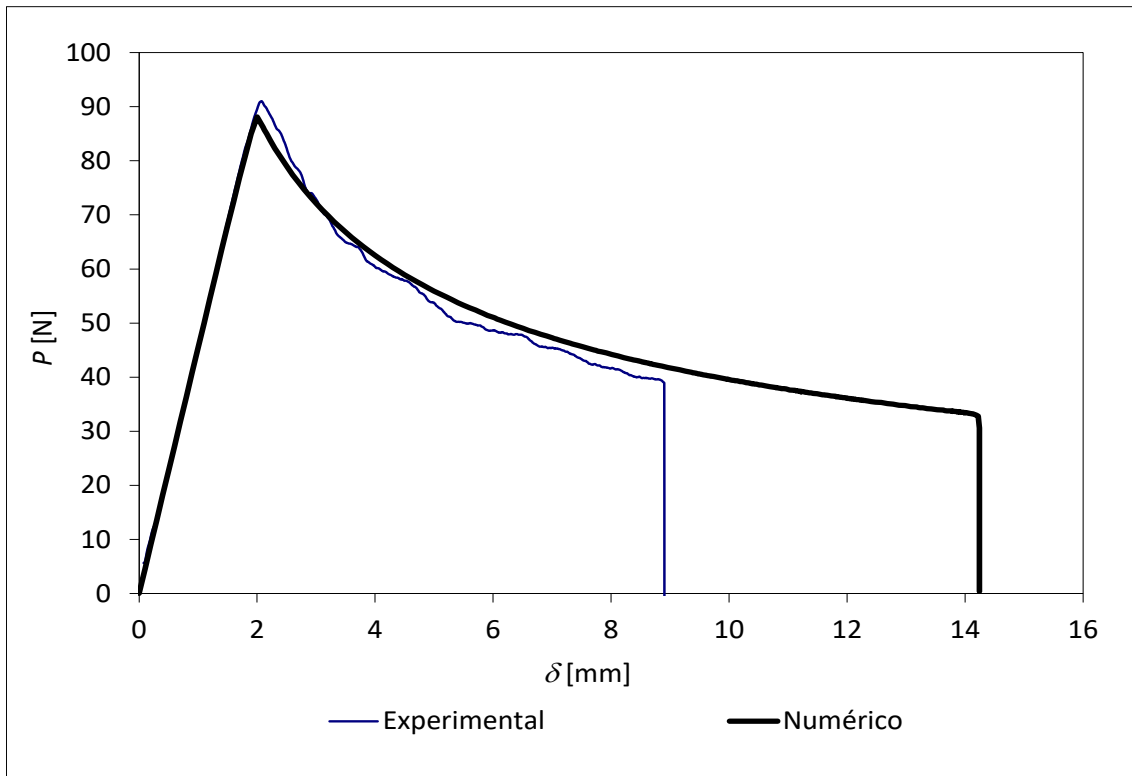


Figura 115 - Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete DCB com 0,5% de cortiça

Tabela 21 - Erros de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 0,5% cortiça

### LEI TRIANGULAR

Provete	$P_{m\acute{a}x}$		Erro%	$\delta P_{m\acute{a}x}$		Erro%	$\delta_{m\acute{a}x}$		Erro%
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
P_C05_1	88,09	91,04	-3,24	2,00	2,08	-3,62	14,25	8,90	59,98
P_C05_2	63,66	61,85	2,94	4,13	4,57	-9,71	14,60	9,69	50,69
P_C05_3	88,37	90,44	-2,29	2,15	2,21	-2,71	14,60	8,95	63,10
<b>Média</b>			2,82	<b>Média</b>		5,35	<b>Média</b>		57,92
<b>Desvio Padrão</b>			3,33	<b>Desvio Padrão</b>		3,81	<b>Desvio Padrão</b>		6,46

A Figura 115 apresenta-se como o ensaio com maior valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , como se pode verificar entre ensaios. Afirmando-se, que com a introdução de cortiça no adesivo aumenta a resist\encia. Na Tabela 21 pode-se observar que  $P_{m\acute{a}x}$  atinge valores superiores aos provetes com 0% e 0,25% de cortiça, e \u00e9 apresentado um erro m\u00e9dio de 2,82%, o que representa uma varia\u00e7\u00e3o muito reduzida. J\u00e1 os valores de  $\delta P_{m\acute{a}x}$  apresentam um erro m\u00e9dio id\u00eantico \u00e0s condi\u00e7\u00f5es de ensaio anteriores. Neste provete o erro m\u00e9dio de  $\delta_{m\acute{a}x}$  diminui em rela\u00e7\u00e3o aos ensaios anteriores, porque, como j\u00e1 foi mencionado, no estudo da malha o provete na parte final de rutura apresenta sempre uma quantidade de adesivo que aumenta  $\delta_{m\acute{a}x}$ . Portanto, em rela\u00e7\u00e3o a  $\delta_{m\acute{a}x}$  t\u00eam-se sempre valores de erro altos.

Finalizando o ensaio DCB, apresentam as curvas  $P$ - $\delta$  com 1% de cortiça (Figura 116) e os erros m\u00e9dios para o provete com 1% de cortiça (Tabela 22).

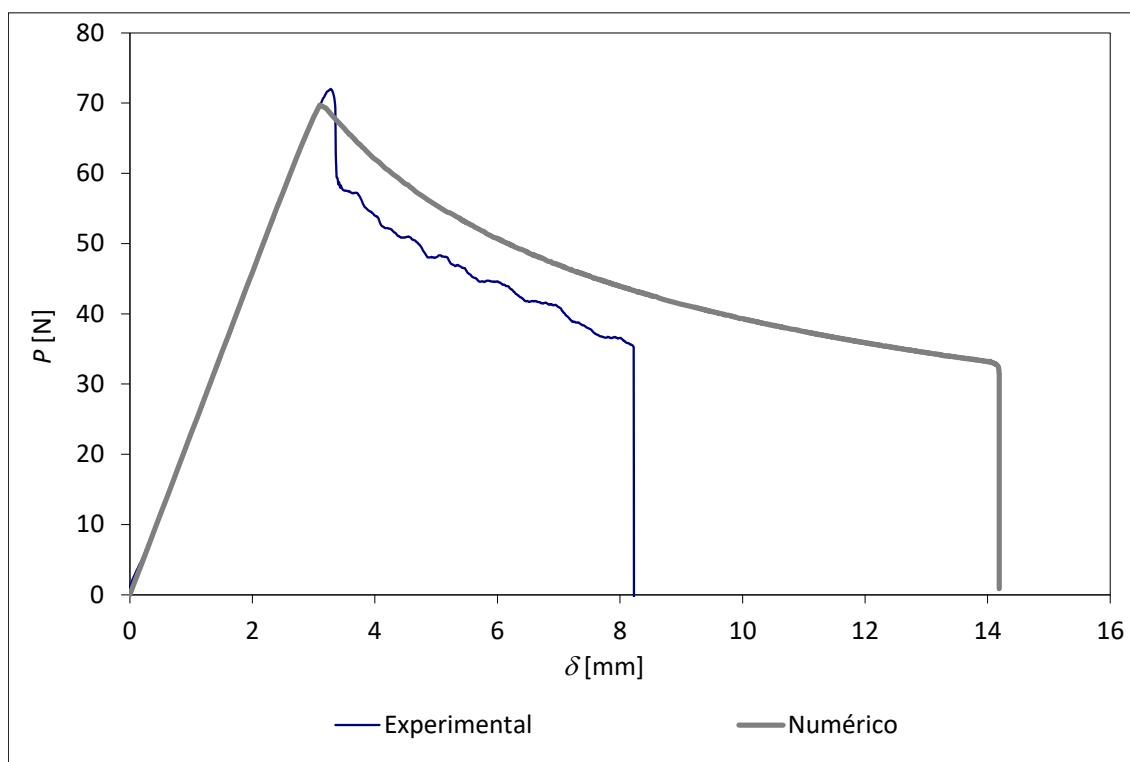


Figura 116 - Curvas  $P$ - $\delta$  de valida\u00e7\u00e3o das leis coesivas do Araldite\u2122 AV138 em provete DCB com 1% de cortiça

Finalizando a an\u00e1lise do ensaio DCB, o ensaio com 1% de cortiça sofreu uma diminui\u00e7\u00e3o no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , ao contr\u00e1rio dos ensaios anteriores. Posto isto, na Figura 116 pode-se observar que  $P_{m\acute{a}x}$  \u00e9 inferior ao ensaio anterior. Na Tabela 22, onde se retratam os valores representativos dos provetes com 1% de cortiça, os erros m\u00e9dios entre experimental e num\u00e9rico apresentam varia\u00e7\u00f5es id\u00eanticas aos ensaios anteriores. O erro m\u00e9dio de  $P_{m\acute{a}x}$  comparativamente aos ensaios com 0% e 0,25% de cortiça, \u00e9 inferior, tomando um valor de 4,50%. No entanto, em  $\delta P_{m\acute{a}x}$  apresenta-se com o maior valor de erro m\u00e9dio entre os ensaios DCB. Por fim, o valor de  $\delta_{m\acute{a}x}$  situa-se dentro do

erro médio entre ensaios, sendo o erro de 60,10%. Da análise feita às tabelas anteriores, conclui-se que os modelos numéricos através da lei triangular, consegue-se ter valores satisfatórios.

Tabela 22 - Erros de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete DCB para 1% cortiça

Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta_{\text{máx}}$		Erro%
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
P_C1_1	59,29	63,71	-6,94	3,50	3,86	-9,29	13,19	8,79	50,07
P_C1_2	80,58	83,40	-3,38	1,90	2,07	-8,07	13,20	8,37	57,75
P_C1_3	69,73	72,02	-3,18	3,10	3,28	-5,42	14,19	8,23	72,47
<b>Média</b>			4,50	<b>Média</b>		7,59	<b>Média</b>		60,10
<b>Desvio Padrão</b>			2,11	<b>Desvio Padrão</b>		1,98	<b>Desvio Padrão</b>		11,39

### 3.2.4.2 Ensaios ENF

Neste ponto, representam-se as curvas  $P-\delta$  obtidas numericamente para as juntas ENF, coladas com adesivo Araldite® AV138 e com as respectivas concentrações de cortiça, representadas na Figura 117 à Figura 120. A aproximação numérica com a lei triangular é a usada para caracterizar os resultados experimentais. Nas Tabela 23 à Tabela 26 são apresentados os resultados de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  para cada um dos 12 provetes ENF ensaiados experimentalmente com concentração de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%, respetivamente, e respetiva comparação com a simulação numérica em função do MDC triangular. Nestes ensaios foram excluídos os resultados experimentais do provete P\_CO\_2, devido à disparidade de resultados.

Começa-se por apresentar o ensaio ENF com 0% de cortiça na Figura 117.

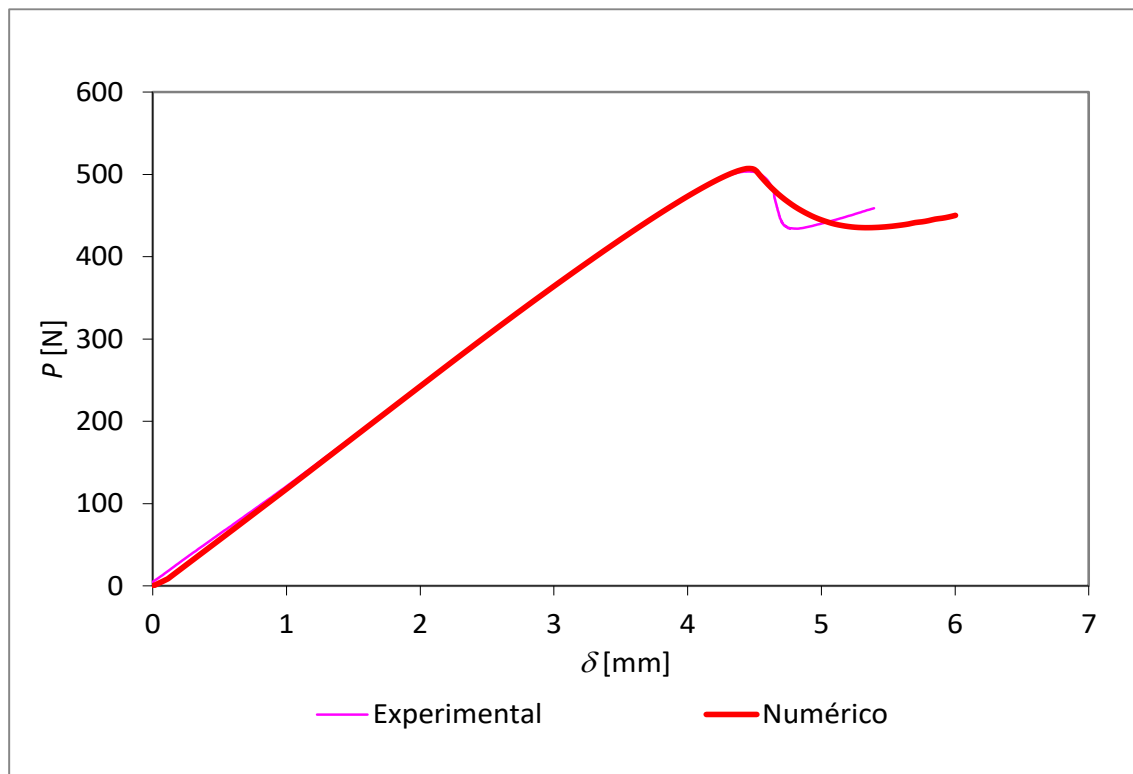


Figura 117 - Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 0% de cortiça.

Tabela 23 - Erros de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 0% cortiça

### LEI TRIANGULAR

Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta_{\text{máx}}$		Erro%
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
P_CO_1	452,45	454,19	-0,38	4,15	4,32	-3,85	5,55	4,56	21,65
P_CO_2	Anulado								
P_CO_3	507,05	503,76	0,65	4,45	4,46	-0,12	5,35	4,74	13,01
<b>Média</b>			0,52	<b>Média</b>		1,98	<b>Média</b>		17,33
<b>Desvio Padrão</b>			0,73	<b>Desvio Padrão</b>		2,64	<b>Desvio Padrão</b>		6,11

Na Tabela 23 são apresentados os resultados de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  para os provetes com 0% de cortiça. É possível verificar que pela lei triangular, os provetes de 0% de cortiça apresentam valores experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta P_{m\acute{a}x}$ , em relação aos valores numéricos um erro médio de 0,52% e 1,98%, respetivamente. O valor de  $\delta_{m\acute{a}x}$ , apresenta um erro médio de 17,33%. Neste ensaio pode-se observar que a curva experimental coincide com a numérica, traduzindo-se em erros médios relativamente baixos, de até 2%. Tirando o facto de que  $\delta_{m\acute{a}x}$  apresenta um erro médio superior.

Seguidamente, observam-se os resultados para o ensaio ENF com 0,25% de cortiça na Tabela 24.

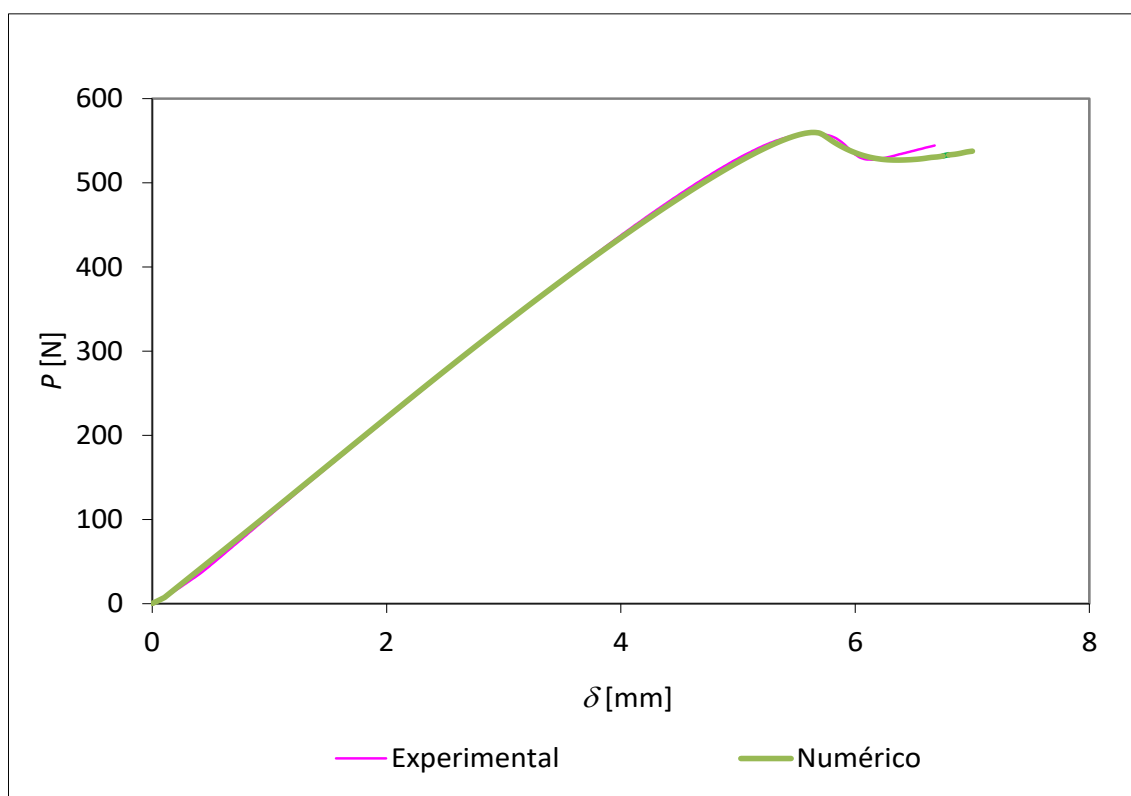


Figura 118 - Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 0,25% de cortiça.

Na Figura 118 pode-se observar que a curva experimental e a curva numérica são quase totalmente coincidentes, onde são refletidos na Tabela 24 os erros resultantes. Com a presença de 0,25% de cortiça e através da lei triangular, o erro médio em  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta minimamente em consideração ao ensaio anterior onde a cortiça se encontra ausente, mas o erro médio de  $\delta P_{m\acute{a}x}$  diminui. Os valores de erro médio de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta P_{m\acute{a}x}$  são 1,16% e 1,40%, respetivamente.  $\delta_{m\acute{a}x}$  apresenta um erro médio de 6,05%, diminuindo significativamente em comparação ao ensaio sem cortiça.

Tabela 24 - Erros de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 0,25% cortiça

LEI TRIANGULAR											
Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta_{\text{máx}}$		Erro%		
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp			
P_C025_1	560,06	558,77	0,23	5,65	5,64	0,24	6,35	6,10	4,09		
P_C025_2	636,18	653,60	-2,66	4,70	4,84	-2,70	5,75	5,94	-3,05		
P_C025_3	736,80	741,13	-0,59	5,12	5,19	-1,25	6,47	5,83	11,00		
<b>Média</b>		1,16		<b>Média</b>		1,40		<b>Média</b>		6,05	
<b>Desvio Padrão</b>		1,49		<b>Desvio Padrão</b>		1,47		<b>Desvio Padrão</b>		7,03	

Após os resultados do ensaio ENF com 0,25% de cortiça, é a vez de apresentar os resultados referentes ao ensaio com concentração de 0,5% de cortiça (Figura 119).

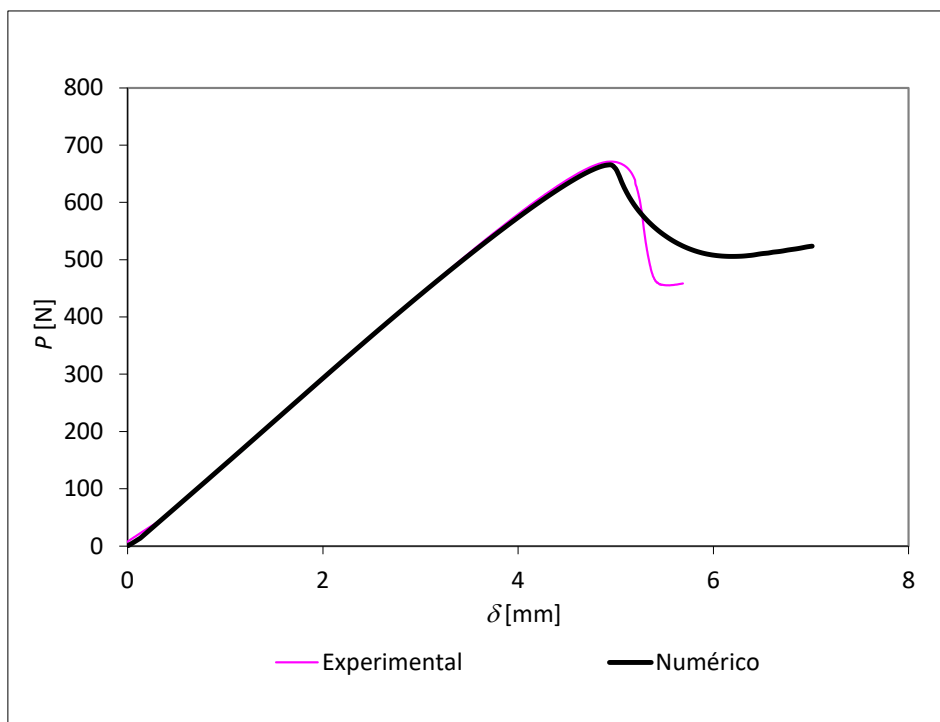
Figura 119 - Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 0,5% de cortiça.

Tabela 25 - Erros de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 0,5% cortiça

LEI TRIANGULAR									
Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta_{\text{máx}}$		Erro%
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
P_C05_1	698,47	703,33	-0,69	4,97	4,99	-0,41	6,32	5,63	12,28
P_C05_2	694,45	709,82	-2,17	5,02	5,10	-1,57	6,32	5,56	13,80
P_C05_3	665,06	671,47	-0,95	4,91	4,96	-0,97	6,21	5,55	11,91
Média			1,27	Média		0,98	Média		12,67
Desvio Padrão			0,79	Desvio Padrão		0,58	Desvio Padrão		1,00

Na Figura 119 observa-se uma curva onde  $\delta P_{\text{máx}}$  aumenta significativamente em relação aos ensaios anteriores pois, como se pode verificar na Tabela 25, o erro médio é o menor de todos os ensaios. O valor de  $P_{\text{máx}}$  atinge valores superiores aos ensaios com 0% e 0,25% de cortiça, e tem um erro médio de 1,27%. Em termos de  $\delta P_{\text{máx}}$  o ensaio com 0,5% de cortiça apresenta o melhor valor de erro médio, de 0,98%. Nestes provetes o erro médio de  $\delta_{\text{máx}}$  aumentou em relação ao ensaio anterior.

Finalizando, na Figura 120 apresentam-se as curvas para o provete ENF com 1% de cortiça.

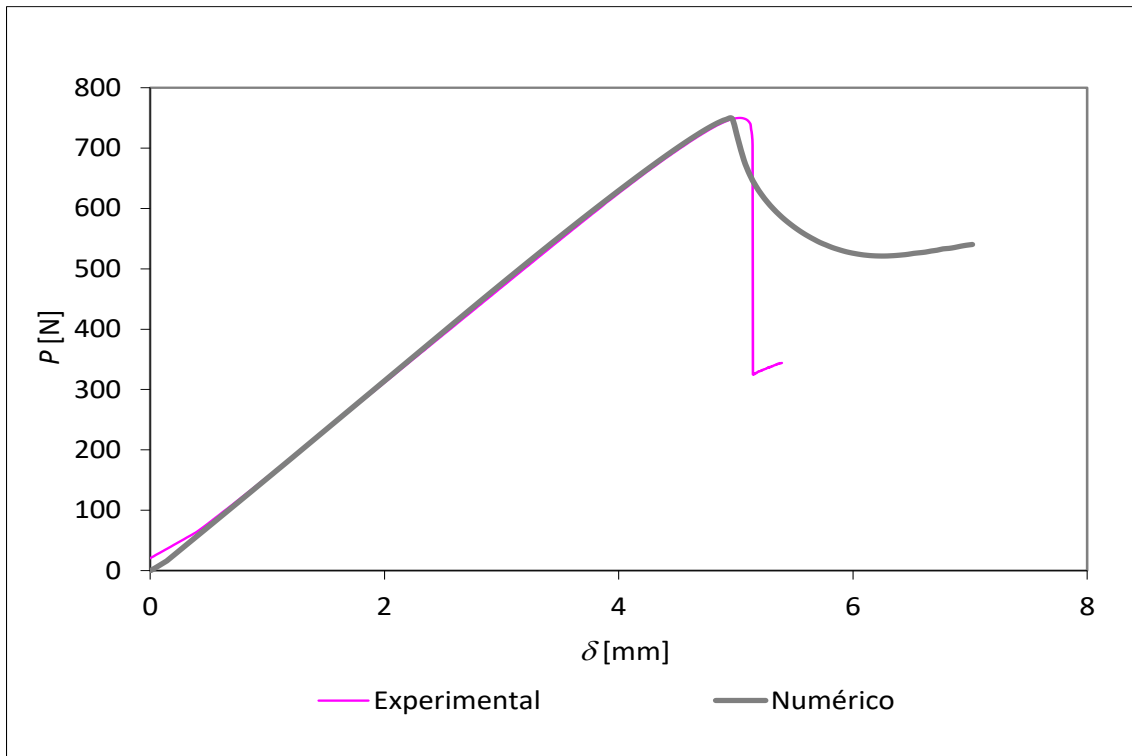


Figura 120 - Curvas  $P$ - $\delta$  de validação das leis coesivas do Araldite® AV138 em provete ENF com 1% de cortiça.

Tabela 26 - Erros de  $P_{\text{máx}}$ ,  $\delta P_{\text{máx}}$  e  $\delta_{\text{máx}}$  do adesivo Araldite® AV138 em provete ENF para 1% cortiça

### LEI TRIANGULAR

Provete	$P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta P_{\text{máx}}$		Erro%	$\delta_{\text{máx}}$		Erro%
	Num	Exp		Num	Exp		Num	Exp	
P_C1_1	579,08	579,99	-0,16	5,00	4,88	2,51	6,25	5,42	15,24
P_C1_2	618,32	627,53	-1,47	4,70	4,83	-2,68	4,97	5,03	-1,28
P_C1_3	748,39	749,78	-0,18	6,00	4,99	20,34	6,27	5,15	21,83
<b>Média</b>			0,60	<b>Média</b>		2,16	<b>Média</b>		19,14
<b>Desvio Padrão</b>			0,75	<b>Desvio Padrão</b>		2,69	<b>Desvio Padrão</b>		3,45

Na Figura 120, em relação ao ensaio anterior (Figura 119), apresenta maior  $P_{\text{máx}}$ , podendo-se concluir que neste caso  $P_{\text{máx}}$  é superior do que com 0,5% de cortiça. Por fim, na Tabela 26 observa-se os erros médios de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  nos provetes com 1% de cortiça, apresentando um erro médio de 0,60% e 2,16%, respetivamente. Seguidamente,  $\delta_{\text{máx}}$  apresenta um erro médio de 19,14%. Da análise feita às tabelas anteriores através da lei triangular, conseguiu-se ter valores satisfatórios.

### 3.2.5 Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas

O estudo da sensibilidade dos parâmetros coesivos apresentados neste capítulo consiste na averiguação da influência de  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{\text{Ic}}$  e  $G_{\text{IIc}}$  no comportamento dos modelos numéricos dos ensaios DCB e ENF. Os valores de  $G_{\text{Ic}}$  e  $G_{\text{IIc}}$  para os provetes do adesivo Araldite® AV138 com as respetivas concentrações de cortiça, foram obtidos experimentalmente a partir de ensaios DCB e ENF, respetivamente. Posteriormente, os valores de  $t_n^0$  e  $t_s^0$  foram obtidos por um método iterativo de ajuste. E assim sendo, é mais fácil para compreender com mais detalhe a influência da variação de  $G_{\text{Ic}}$  e  $G_{\text{IIc}}$  na curva  $P$ - $\delta$  dos ensaios obtidos numericamente. Nesta análise, foi realizado um estudo de sensibilidade destes quatro parâmetros no resultado da curva  $P$ - $\delta$  numérica. Consideraram-se variações de -75% a +75% do valor médio experimental. Esta análise foi realizada através do *software* Abaqus®, de onde foram retiradas as curvas  $P$ - $\delta$  que permitiram a análise do efeito da variação destes parâmetros.

#### 3.2.5.1 Ensaio DCB

Na Tabela 27 são apresentados os parâmetros numéricos de entrada para a análise de sensibilidade da curva  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® AV138, considerando a variação de  $E$ ,  $t_n^0$  e  $G_{\text{Ic}}$ . A variação dos valores cifra-se em -75% a 75% dos valores experimentais médios a partir dos ensaios DCB.

Tabela 27 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $E$ ,  $t_n^0$  e  $G_{\text{Ic}}$  do adesivo Araldite® AV138

	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%
$E$	1222,5	2445	3667,5	<b>4890</b>	6112,5	7335	8557,5
$t_n^0$	8,75	17,5	26,25	<b>35</b>	43,75	52,5	61,25
$G_{\text{Ic}}$	0,06	0,12	0,18	<b>0,24</b>	0,3	0,36	0,42

Na Figura 121 observa-se a influência de  $E$  no adesivo Araldite® AV138. A rigidez é idêntica entre a variação -25% a 75%, apenas se verifica um aumento de  $P$  em -50% e -75%, e seguidamente o valor de  $\delta$  aumenta.

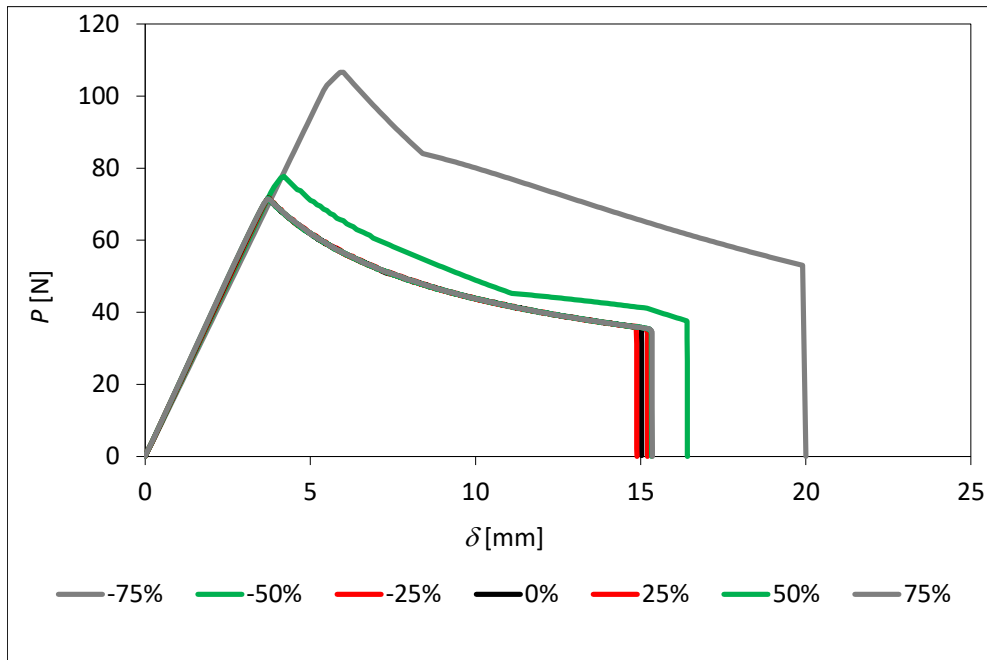


Figura 121 - Influência de  $E$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138

Na Figura 122 verificou-se que, na variação entre -75% a 25% do valor médio experimental exibem-se curvas idênticas, não se verificando alterações. Mas nas variações superiores a 50% do valor de  $t_n^0$  regista-se um aumento da rigidez. Por outro lado, com o aumento de  $t_n^0$  observa-se um aumento de  $P_{m\acute{a}x}$  associado ao aumento da rigidez elástica do provete.

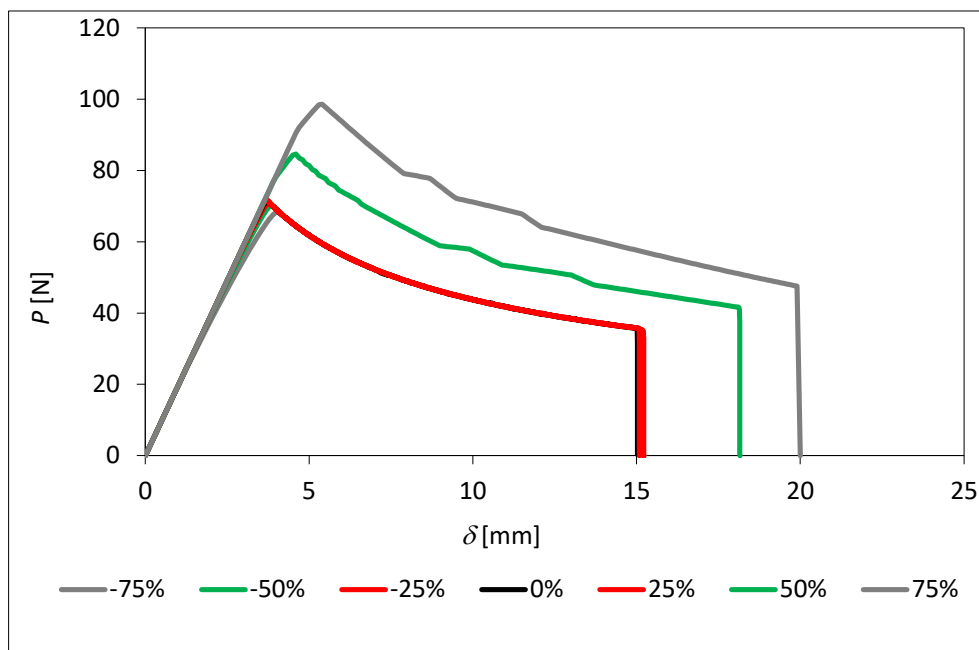


Figura 122 - Influência de  $t_n^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138

Seguidamente são apresentadas na Figura 123 as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas pela variação de  $G_{IC}$ . A variação do valor de  $G_{IC}$  para o adesivo Araldite® AV138 tem um efeito claro no valor de  $P_{máx}$ , de tal forma que este aumenta ou diminui consoante a variação idêntica de  $G_{IC}$ , mantendo aproximadamente a rigidez elástica do provete. Conclui-se assim, que o aumento de  $G_{IC}$  aumenta a rigidez dos provetes dos ensaios DCB. O mesmo se passa quando se diminui o valor de  $G_{IC}$  diminuindo também o  $P_{máx}$ .

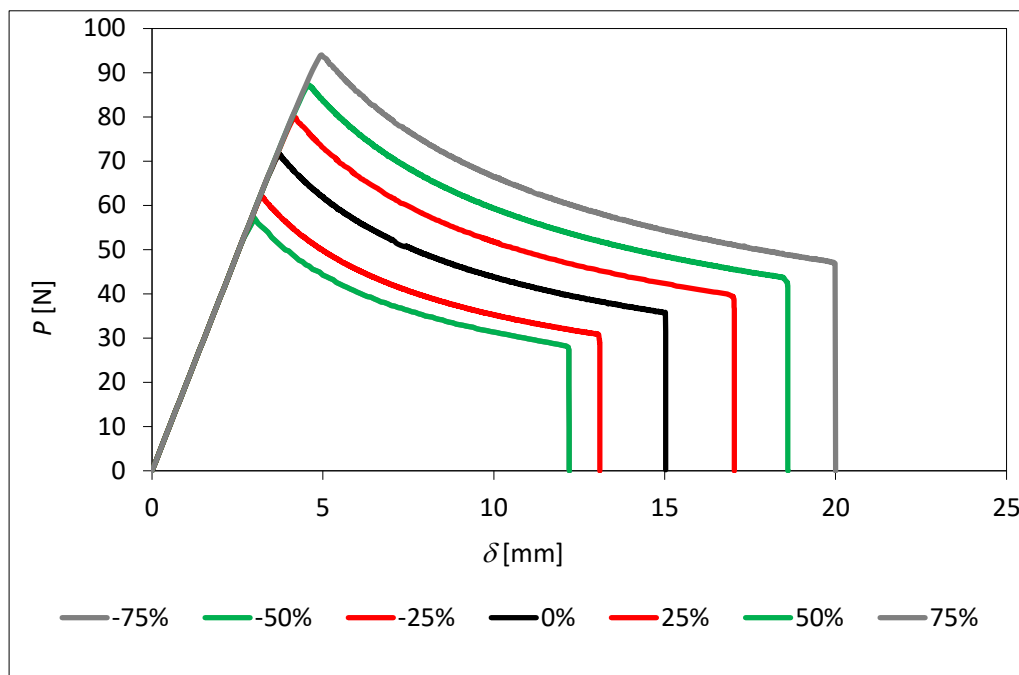


Figura 123 - Influência de  $G_{IC}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes DCB com o adesivo Araldite® AV138

### 3.2.5.2 Ensaio ENF

Na Tabela 28 apresentam-se os valores dos parâmetros de entrada para a análise de sensibilidade das curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® AV138, considerando a variação de  $G$ ,  $t_s^0$  e  $G_{IIC}$  obtidos pela variação de valores entre -75% e 75% do valor médio de  $G$ ,  $t_s^0$  e  $G_{IIC}$ .

Tabela 28 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $G$ ,  $t_s$  e  $G_{IIC}$  do adesivo Araldite® AV138

	-75%	-50%	-25%	0%	25%	50%	75%
<b>G</b>	390	780	1170	<b>1560</b>	1950	2340	2730
<b><math>t_s^0</math></b>	5,75	11,5	17,25	<b>23</b>	28,75	34,5	40,25
<b><math>G_{IIC}</math></b>	0,20535	0,4107	0,61605	<b>0,8214</b>	1,02675	1,2321	1,43745

Na Figura 124 constata-se a variação de  $G$  entre -75% a 75%, sendo que as curvas apresentam o mesmo comportamento em todos os casos. Apenas se verificou que com a diminuição de  $G$  a curva  $P$ - $\delta$  resulta numa curva mais linear até  $P_{m\acute{a}x}$ , e conseqüente aumento de  $P_{m\acute{a}x}$ .

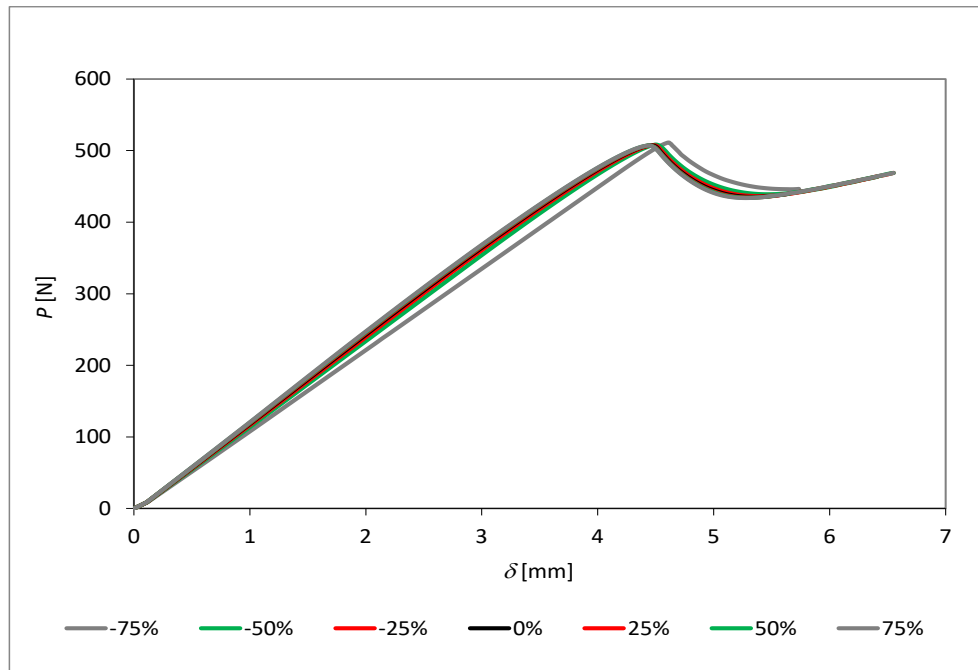


Figura 124 - Influência de  $G$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138

Como se pode ver na Figura 125, o valor de  $t_s^0$  altera a rigidez da curva  $P$ - $\delta$  antes de  $P_{m\acute{a}x}$  que também tem influência sobre  $P_{m\acute{a}x}$ . A redução de  $t_s^0$  provoca uma grande queda de rigidez elástica, acompanhada por uma grande redução de  $P$ . Por outro lado, o aumento de  $t_s^0$  tem pouca influência na carga máxima, uma vez que a curva  $P$ - $\delta$  é praticamente linear até  $P_{m\acute{a}x}$ . O aumento de  $t_s^0$  origina a necessidade de cargas maiores para iniciar a propagação da fenda com elevada rigidez até ao pico da carga. No entanto observou-se uma redução da carga no pós-pico mais abrupta e sem aumento da deformação com a redução de  $t_s^0$ .

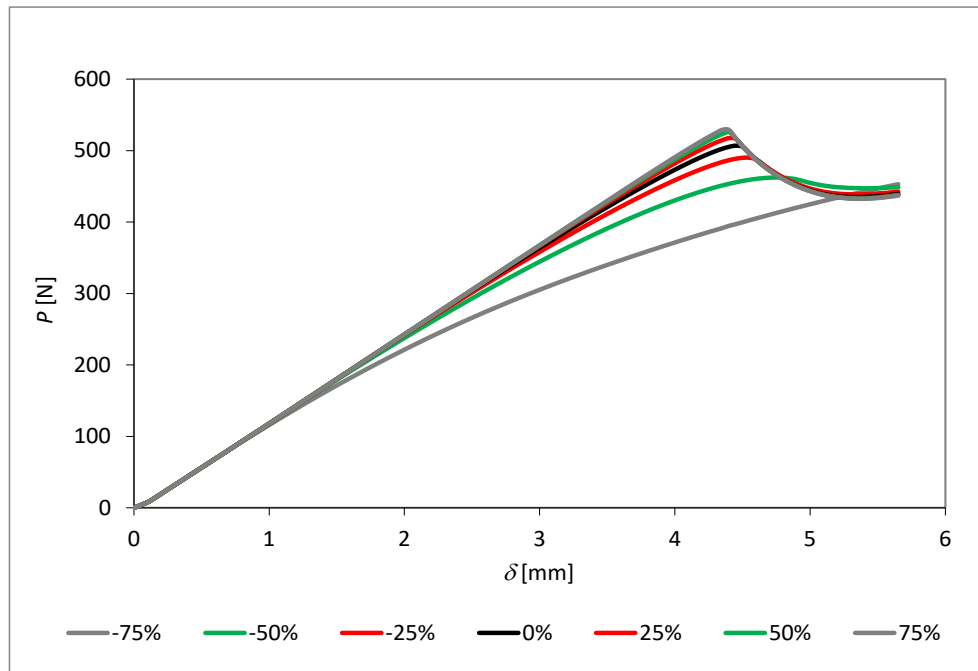


Figura 125 - Influência de  $t_s^0$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138

Por fim, na Figura 126 verificou-se que o aumento ou diminuição do valor de  $G_{IIC}$  provoca também uma variação principalmente em  $P_{m\acute{a}x}$  na curva  $P$ - $\delta$  com a respetiva variação de  $G_{IIC}$ , enquanto a rigidez elástica fica quase idêntica. Conclui-se assim que o valor de  $G_{IIC}$  influencia principalmente o valor da carga de pico, mantendo a rigidez. O aumento do valor de  $G_{IIC}$  é acompanhado de um aumento do deslocamento aplicado correspondente à carga de pico.

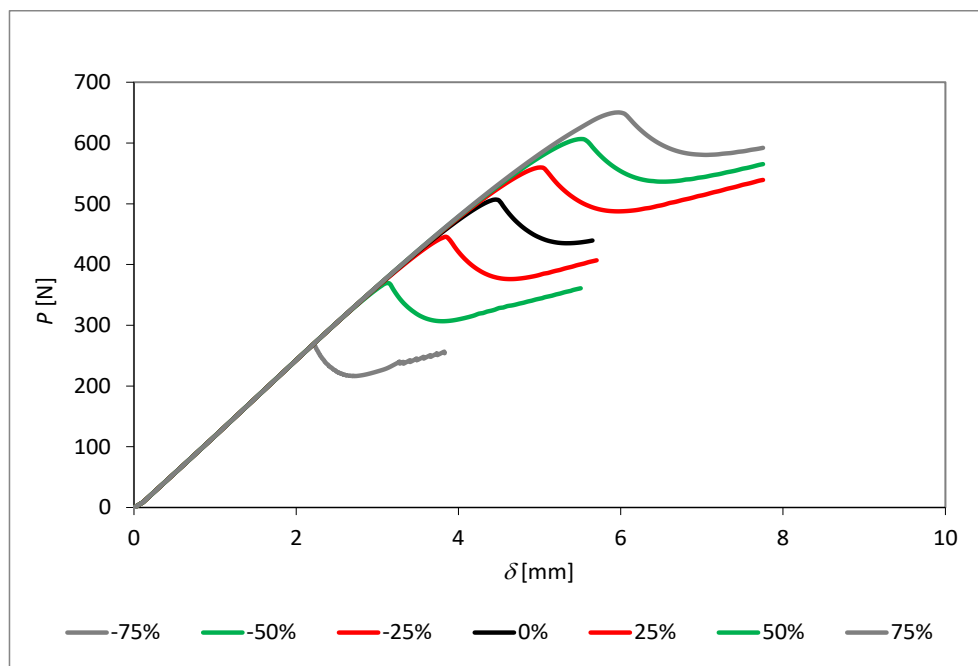


Figura 126 - Influência de  $G_{IIC}$  nas curvas  $P$ - $\delta$  de provetes ENF com o adesivo Araldite® AV138

# CONCLUSÕES



## 4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

A realização deste trabalho teve como principal objetivo caracterizar as propriedades de fratura do adesivo Araldite® AV138 reforçado com partículas de cortiça expandida, utilizando os ensaios *Double-Cantilever Beam* para caracterização à tração e ensaios *End-Notched Flexure* para caracterização ao corte. O adesivo selecionado foi o Araldite® AV138, que se caracteriza pelo seu comportamento frágil, mas de elevada resistência, sendo adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros.

A análise numérica realizada no *software* Abaqus® teve como propósito inicial a validação do modelo de dano coesivo (MDC), para assim simular o comportamento elástico até à resistência máxima e subsequentemente a degradação das propriedades dos materiais até à rotura. O modelo mais utilizado devido à sua simplicidade pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e pelos resultados exatos para a maioria das condições reais, é o modelo triangular. De seguida, foi realizado o estudo do tamanho de malha onde se analisam os resultados de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  para o ensaio DCB e o ensaio ENF para as concentrações de cortiça de 0%, 0,25%, 0,5% e 1%. Deste modo, foi possível estudar através de uma malha mais refinada e menos refinada os valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  para todas as concentrações de cortiça.

Para o ensaio DCB, a análise das curvas  $P_{m\acute{a}x}$  mostra que, de um modo geral, estas apresentam o mesmo comportamento, isto é, quanto mais refinada a malha menor o  $P_{m\acute{a}x}$ . Com esta análise verificou-se que a presença de cortiça aumenta o  $P_{m\acute{a}x}$ . Nos resultados de  $\delta P_{m\acute{a}x}$ , as curvas apresentam o mesmo comportamento, na medida em que, quanto mais refinada a malha, menor é o valor de  $\delta P_{m\acute{a}x}$ . Nos resultados de  $\delta_{m\acute{a}x}$  em todas as concentrações de cortiça, aumenta o valor de  $\delta_{m\acute{a}x}$ . Por fim, conclui-se que  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  tendem a estabilizar-se, entre 0 e 0,2 mm. Logo, consta-se que 0,2 mm será o melhor valor para o estudo da malha.

Para o ensaio ENF, o  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta consoante o tamanho da malha e com aumento da cortiça. Como os valores de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  também aumentam para malhas menos refinadas, podendo concluir-se que a presença de cortiça no adesivo aumenta  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e que entre 0,05 mm e 0,5 mm  $\delta P_{m\acute{a}x}$  começa a uniformizar. Por último, com a presença de cortiça verifica-se que a curva  $\delta_{m\acute{a}x}$  aumenta. Entre 0 e 0,2 mm de tamanho de malha há uma tendência das curvas para estabilizar, o que leva à conclusão de que, o refinamento recomendado é entre o intervalo de 0,05 a 0,2 mm.

Na validação da lei coesiva triangular usou-se a comparação das curvas  $P-\delta$  numéricas com as experimentais, nomeadamente no que concerne aos valores de  $P_{m\acute{a}x}$ , rigidez inicial e comportamento durante a propagação da fenda.

Para os ensaios DCB e ENF, foram analisados os valores de  $P-\delta$  com as respetivas dimensões de provete, e para cada concentração de cortiça 0%, 0,25%, 0,5% e 1% no adesivo Araldite® AV138. Os resultados obtidos pelo modelo de dano coesivo triangular no ensaio DCB apresentam uma rigidez inicial semelhante ao valor experimental, ou seja, desde o início da aplicação da carga até ao início de propagação do dano. O comportamento das curvas  $P-\delta$  durante a fase de propagação justifica-se pelo facto de a propagação do dano em ensaios DCB ser governada por  $G_{Ic}$ . Por fim, apresentou-se o erro médio para cada provete, sendo este calculado relativamente ao valor experimental.

Nos resultados de  $P_{m\acute{a}x}$ ,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta_{m\acute{a}x}$  para o provete DCB com 0% de cortiça é possível visualizar as diferenças entre a curva experimental e numérica, onde os valores experimentais de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta P_{m\acute{a}x}$ , em relação aos valores numéricos, apresentam um erro médio de 5,35% e 6,43%, respetivamente. O erro médio de  $\delta_{m\acute{a}x}$  é de 61,90%. O provete com 0,25% de cortiça em relação ao ensaio anterior aumenta  $P_{m\acute{a}x}$ , podendo concluir-se que o facto de haver cortiça presente no adesivo aumenta o valor de  $P_{m\acute{a}x}$ . O erro médio de  $\delta_{m\acute{a}x}$  corresponde a um aumento considerável relativamente ao provete sem cortiça. Pode-se observar, que no provete com 0,5% de cortiça o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta, apresentando um erro médio com uma variação muito reduzida. Já os valores de  $\delta P_{m\acute{a}x}$  apresentam um erro médio idêntico às condições de ensaio anteriores. Nestes provetes o erro médio de  $\delta_{m\acute{a}x}$  diminui em relação aos ensaios anteriores. Finalizando a análise do ensaio DCB, o ensaio com 1% de cortiça sofreu uma diminuição no valor de  $P_{m\acute{a}x}$ , contrariamente aos ensaios anteriores. Os valores representativos dos provetes com 1% de cortiça entre experimental e numérico apresentam variações idênticas aos ensaios anteriores.

Nos resultados de  $P_{m\acute{a}x}$  e  $\delta P_{m\acute{a}x}$  para o provete ENF com 0% de cortiça os valores experimentais, em relação aos valores numéricos, apresentam um erro médio de 0,52% e 1,98%, respetivamente. O erro médio de  $\delta_{m\acute{a}x}$  é de 17,33%. Com a presença de 0,25% de cortiça, o erro médio em  $P_{m\acute{a}x}$  aumenta minimamente em consideração ao ensaio anterior, mas o erro médio de  $\delta P_{m\acute{a}x}$  diminui. O erro médio de  $\delta_{m\acute{a}x}$  diminuiu significativamente em comparação com o ensaio sem cortiça. Com 0,5% de cortiça,  $\delta P_{m\acute{a}x}$  melhora significativamente em relação aos ensaios anteriores. O valor de  $P_{m\acute{a}x}$  atinge valores superiores aos ensaios com 0% e 0,25% de cortiça. Em termos de  $\delta P_{m\acute{a}x}$  o ensaio com 0,5% de cortiça apresenta o melhor valor de erro médio. Nestes provetes o erro médio de  $\delta_{m\acute{a}x}$  aumentou em relação ao ensaio anterior. Por fim, com 1% de cortiça o ensaio possui maior  $P_{m\acute{a}x}$  do que com 0,5%.

Foi realizado um estudo da sensibilidade dos parâmetros coesivos que consiste na averiguação da influência de  $t_n^0$ ,  $t_s^0$ ,  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$  no comportamento dos modelos numéricos dos ensaios DCB e ENF. Nesta análise, foi realizado um estudo de sensibilidade destes quatro parâmetros no resultado da curva  $P-\delta$  numérica, onde se consideraram variações de -75% a +75% do valor médio experimental.

No ensaio DCB a influência de  $E$  no adesivo Araldite® AV138, em termos de rigidez, é idêntica entre a variação -25% a 75%, apenas se verifica um aumento em -50% e -75% e seguidamente o valor de  $\delta$  aumenta. O valor de  $t_n^0$  na variação entre -75% a 25% exhibe-se em curvas idênticas, não se verificando alterações. Mas nas variações superiores a 50% do valor de  $t_n^0$ , regista-se um aumento da rigidez. Nas curvas  $P-\delta$  obtidas pela variação de  $G_{IC}$ , o adesivo Araldite® AV138 tem um efeito claro no valor de  $P_{máx}$ , de tal forma que este aumenta ou diminui consoante a variação idêntica de  $G_{IC}$ , mantendo aproximadamente a rigidez elástica do provete.

No ensaio ENF constata-se a variação de  $G$  entre -75% a 75%, sendo que as curvas apresentam o mesmo comportamento em todos os casos. Apenas se verificou que com a diminuição de  $G$  a curva  $P-\delta$  resulta numa curva mais linear até  $P_{máx}$ , e conseqüente aumento de  $P_{máx}$ . Já o valor de  $t_s^0$  altera a rigidez da curva  $P-\delta$  antes de  $P_{máx}$ , tendo também influência sobre  $P_{máx}$ . A redução de  $t_s^0$  provoca uma grande queda de rigidez elástica, acompanhada por uma grande redução de  $P_{máx}$ . Por fim, verificou-se que o aumento ou diminuição do valor  $G_{IIC}$  provoca também uma variação em  $P_{máx}$  na curva  $P-\delta$  com a respetiva variação de  $G_{IIC}$ , enquanto que a rigidez elástica fica quase idêntica.

Com a realização desta dissertação, foi possível compreender que o reforço de partículas de cortiça no adesivo Araldite® AV138 para os ensaios DCB e ENF melhoram as propriedades mecânicas do adesivo.

Como sugestões de trabalhos futuros, apresentam-se as seguintes:

- O estudo comparativo com outro tipo de adesivo, e com as mesmas concentrações de cortiça;
- Realização de outros ensaios para determinação das mesmas propriedades, como por exemplo tração em juntas topo a topo, ensaios losipescu, TDCB e ELS;
- Testar com outro tipo de leis coesivas;



# REFERÊNCIAS



## 5 REFERÊNCIAS

1. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, Nova Iorque, USA: McGraw-Hill.
2. da Silva, L.F.M. e R.D.S.G. Campilho, *Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints*. 2011: Springer.
3. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, e M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. Vol. Edições Técnicas. 2007, Porto: Publindústria.
4. de Moura, M., A. de Moraes, e A.J.P.P. de Magalhães, *Materiais compósitos-Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico.(2005)*. Vol. 369. Porto: Publindústria.
5. DeVries, K. e D.O.J.C. Adams, *Mechanical testing of adhesive joints*. Vol. 6. 2002, Amsterdam: Elsevier Science B.V. 193-234.
6. *Engineering Adhesives Ltd* Available from: [www.permabond.co.uk/](http://www.permabond.co.uk/).
7. *Industries*. Available from: [www.cautus.pt/industrias.html](http://www.cautus.pt/industrias.html).
8. Schmid Fuertes, T.A., T. Kruse, T. Körwien, e M.J.C.I. Geistbeck, *Bonding of CFRP primary aerospace structures—discussion of the certification boundary conditions and related technology fields addressing the needs for development*. 2015. **22**(8): p. 795-808.
9. *Adesivos Estruturais de Película para Aeronaves*. Available from: <https://www.henkel-adhesives.com/pt/pt/industrias/industria-aeroespacial/adesivos-estruturais-para-industria-aeroespacial.html>.
10. Adams, R.D., J. Comyn, e W.C. Wake, *Structural adhesive joints in engineering*. 2nd ed. 1997, London: Chapman & Hall.
11. Pinto, A.M.G., *Dissertação de Doutoramento: Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, FEUP.
12. Da Silva, L.F., D.A. Dillard, B. Blackman, e R.D. Adams, *Testing adhesive joints: best practices*. 2012, Germany: England: John Wiley & Sons.
13. Broughton, B. e M.J.N.M.C. Gower, *Preparation and testing of adhesive joints. Measurement Good Practice Guide No. 47*. 2001, UK: National Physical laboratory.
14. Da Silva, L.F., A. Öchsner, e R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011, Verlag Berlin, Heidelberg: Springer Science & Business Media.
15. Berry, N.G. e J.R.M.J.P. d'Almeida, *Efeito da presença de defeitos no comportamento mecânico de juntas coladas carbono-epoxi*. 2000. **10**(3): p. 138-148.
16. Kim, K.-S., J.-S. Yoo, Y.-M. Yi, e C.-G.J.C.s. Kim, *Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods*. 2006. **72**(4): p. 477-485.

17. Carbas, R.J.C., *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*. 2008.
18. Duncan, B. e G. Dean, *Test methods for determining shear property data for adhesives suitable for design. Part 1: Notched-beam shear (Iosipescu) and notched-plate shear (Arcan) methods for bulk and joint test specimens. Part A: Summary*. 1996.
19. Inglis, C.E.J.T.I.N.A., *Stresses in a plate due to the presence of cracks and sharp corners*. 1913. **55**: p. 219-241.
20. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
21. Zhu, Y., K.M. Liechti, e K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction–separation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(1): p. 31-51.
22. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*. 2009, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
23. Chaves, F.J.P., *Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints*. 2013: Tese de Doutoramento. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto.
24. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10–11): p. 2224-2230.
25. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, e J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.
26. ASTM D3433-99, *Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2012: ASTM International, West Conshohocken, PA, 2012.
27. Gustafson, P.A. e A.M. Waas, *The influence of adhesive constitutive parameters in cohesive zone finite element models of adhesively bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(10): p. 2201-2215.
28. Davis, M., D.J.I.j.o.a. Bond, e adhesives, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. 1999. **19**(2-3): p. 91-105.
29. Schuecker, C. e B.D. Davidson, *Effect of friction on the perceived mode II delamination toughness from three-and four-point bend end-notched flexure tests*, in *Composite structures: theory and practice*. 2001, ASTM International.
30. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13–14): p. 2065-2077.
31. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, e J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
32. De Moura, M., N. Dourado, J. Morais, F.J.F. Pereira, F.o.E. Materials, e Structures, *Numerical analysis of the ENF and ELS tests applied to mode II fracture characterization of cortical bone tissue*. 2011. **34**(3): p. 149-158.
33. Volkersen, O., *Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung 15, 1938: p. 41-47.

34. Adams, R.D. e N.A. Peppiatt, *Stress analysis of adhesive-bonded lap joints*. The Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 1974. **9**(3): p. 185-196.
35. Harris, J.A. e R.A. Adams, *Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1984. **4**(2): p. 65-78.
36. Curiel Sosa, J.L. e N. Karapurath, *Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method*. Composites Science and Technology, 2012. **72**(7): p. 788-791.
37. Panigrahi, S.K. e B. Pradhan, *Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites*. Journal of Reinforced Plastics and Composites, 2007. **26**(2): p. 183-201.
38. 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.
39. Hutchinson, J., *Plastic stress and strain fields at a crack tip*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1968. **16**(5): p. 337-342.
40. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**(2): p. 379-386.
41. Fernlund, G. e J.K. Spelt, *Failure load prediction of structural adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1991. **11**(4): p. 221-227.
42. 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.
43. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
44. Duan, K., X. Hu, e Y.-W. Mai, *Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2004. **18**(1): p. 39-53.
45. Turon, A., J. Costa, P.P. Camanho, e C.G. Dávila, *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: Applied Science and Manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
46. Kafkalidis, M.S. e M.D. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
47. Yang, Q.D. e M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture, 2001. **110**(2): p. 175-187.
48. Banea, M.D., L.F.M.d. Silva, e R.D.S.G. Campilho, *Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2012. **26**(7): p. 939-953.
49. Allix, O. e A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996. **77**(2): p. 111-140.
50. Alfano, G. e M.A. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*.

- International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.
51. Chandra, N., H. Li, C. Shet, e H. Ghonem, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
52. Chen, J., *Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
53. Pinto, A.M.G., A.G. Magalhães, R.D.S.G. Campilho, M.F.S.F. de Moura, e A.P.M. Baptista, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009. **85**(6): p. 351-376.
54. Liljedahl, C.D.M., A.D. Crocombe, M.A. Wahab, e I.A. Ashcroft, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**(1-2): p. 147-161.
55. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2007. **21**(9): p. 855-870.
56. de Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques, e P. De Castro, *Prediction of compressive strength of carbon–epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. Composite Structures, 2000. **50**(2): p. 151-157.
57. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, e J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
58. Carlberger, T. e U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
59. Jung Lee, M., T. Min Cho, W. Seock Kim, B. Chai Lee, e J. Ju Lee, *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**(5): p. 322-328.
60. Pandya, K.C. e J.G. Williams, *Measurement of cohesive zone parameters in tough polyethylene*. Polymer Engineering & Science, 2000. **40**(8): p. 1765-1776.
61. Chai, H., *Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds*. Experimental Mechanics, 1992. **32**(4): p. 296-303.
62. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, A.M.G. Pinto, J.J.L. Morais, e J.J.M.S. Domingues, *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering, 2009. **40**(2): p. 149-157.
63. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
64. Stigh, U., K.S. Alfredsson, T. Andersson, A. Biel, T. Carlberger, e K. Salomonsson, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
65. Mohammadi, S., *Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures*. 2008: Wiley.

66. Belytschko, T. e T. Black, *Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **45**(5): p. 601-620.
67. Moës, N., J. Dolbow, e T. Belytschko, *A finite element method for crack growth without remeshing*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 1999. **46**(1): p. 131-150.
68. Abaqus®, *Documentation. D. Systèmes*. 2013: Vélizy-Villacoublay.
69. Campilho, R.D.S.G., M.D. Banea, F.J.P. Chaves, e L.F.M.d. Silva, *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
70. Roylance, D.J.D.o.m.s. e M.I.o.T. engineering, Cambridge, *Introduction to composite materials*. 2000.
71. Greiveldinger, M., D. Jacquet, D. Verchere, e M.E. Shanahan. *Collage de substrats huilés—Devenir et influence de l'huile sur la formation d'une interphase*. in *Annales de Chimie Science des Matériaux*. 2000. Elsevier.
72. Mario, O., *Etude du vieillissement des assemblages structuraux acier/aluminium: influence de l'environnement sur le dimensionnement*. 2007.
73. Kulkarni, M.G., P.H. Geubelle, e K.J.M.o.M. Matouš, *Multi-scale modeling of heterogeneous adhesives: Effect of particle decohesion*. 2009. **41**(5): p. 573-583.
74. Joannès, S., J. Renard, e V.J.I.j.o.f. Gantchenko, *The role of talc particles in a structural adhesive submitted to fatigue loadings*. 2010. **32**(1): p. 66-71.
75. Barbosa, A.Q., L.F. da Silva, A. Öchsner, J. Abenojar, e J.C.J.T.J.o.A. del Real, *Influence of the size and amount of cork particles on the impact toughness of a structural adhesive*. 2012. **88**(4-6): p. 452-470.
76. Gil, L.J.M., *Cork composites: a review*. 2009. **2**(3): p. 776-789.
77. Barbosa, A., L. Da Silva, A. Öchsner, E. Marques, e J. Abenojar, *Micro Cork Particles as Adhesive Reinforcement Material for Brittle Resins*, in *Materials Design and Applications*. 2017, Springer. p. 399-418.
78. Barbosa, A.Q., L. Da Silva, J. Abenojar, M. Figueiredo, e A.J.C.P.B.E. Öchsner, *Toughness of a brittle epoxy resin reinforced with micro cork particles: Effect of size, amount and surface treatment*. 2017. **114**: p. 299-310.
79. Gil, L. e Portugal, *Cortiça: produção, tecnologia e aplicação*. 1998.
80. Gibson, L., K. Easterling, M.F.J.P.o.t.R.S.o.L.A.M. Ashby, e P. Sciences, *The structure and mechanics of cork*. 1981. **377**(1769): p. 99-117.
81. Rosa, M. e M.J.J.o.m.s. Fortes, *Deformation and fracture of cork in tension*. 1991. **26**(2): p. 341-348.
82. Rosa, M.E. e M.J.J.o.m.s. Fortes, *Rate effects on the compression and recovery of dimensions of cork*. 1988. **23**(3): p. 879-885.
83. Romano, A., M.A.J.P.c. Martins-Loução, tissue, e o. culture, *In vitro cold storage of cork oak shoot cultures*. 1999. **59**(2): p. 155-157.
84. Gibson, L.J. e M.F. Ashby, *Cellular solids: structure and properties*. 1999: Cambridge university press.
85. Gil, L.J.F.i.M., *Cork: sustainability and new applications*. 2015. **1**: p. 38.

86. Fernandes, E.M., V.M. Correlo, J.A. Chagas, J.F. Mano, R.L.J.C.S. Reis, e Technology, *Cork based composites using polyolefin's as matrix: morphology and mechanical performance*. 2010. **70**(16): p. 2310-2318.
87. Gil, L.J.B. e Bioenergy, *Cork powder waste: an overview*. 1997. **13**(1-2): p. 59-61.
88. Packham, D., *In Handbook of adhesion second edition*. 2005, England: John Wiley & Sons.
89. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2005, Netherlands: Elsevier.
90. Huang, Y., D. Hunston, A.J. Kinloch, e C.K. Riew, *Mechanisms of toughening thermoset resins*. 1993, ACS Publications: Washington, D.C., United States.
91. Kalpakjian, S., *Manufacturing engineering and technology*. 2001, New Delhi, India: Pearson Education India.
92. Bagherpour, S., *Fibre reinforced polyester composites*. 2012, UK: InTech London.
93. Wallenberger, F.T., J.C. Watson, e H.J.I. Li, ASM International, Ohio, USA, *Glass Fibers*. PPG Industries. 2000.
94. Prashanth, S., K. Subbaya, K. Nithin, S.J.J.o.M.S. Sachhidananda, e Engineering, *Fiber reinforced composites-a review*. 2017. **6**(3): p. 1-6.
95. Demerchant, C., *Comparison of carbon fiber, kevlar (aramid) and E-glass used in composites for boatbuilding*. 2015.
96. Rosato, D.V. e D.V. Rosato, *Reinforced plastics handbook*. 2004, Netherlands: Elsevier.
97. MInus, M. e S.J.J. Kumar, *The processing, properties, and structure of carbon fibers*. 2005. **57**(2): p. 52-58.
98. Dorey, G.J.J.o.P.D.A.P., *Carbon fibres and their applications*. 1987. **20**(3): p. 245.
99. Barbosa, A., L. da Silva, A.J.P.o.t.I.o.M.E. Öchsner, Part L: Journal of Materials: Design, e Applications, *Effect of the amount of cork particles on the strength and glass transition temperature of a structural adhesive*. 2014. **228**(4): p. 323-333.
100. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 2007: CRC press.
101. Song, W., A. Magid, D. Li, e K.-Y.J.J.o.E.M. Lee, *Application of recycled carbon-fibre-reinforced polymers as reinforcement for epoxy foams*. 2020. **269**: p. 110766.
102. Lefeuvre, A., S. Garnier, L. Jacquemin, B. Pillain, G.J.R. Sonnemann, Conservation, e Recycling, *Anticipating in-use stocks of carbon fiber reinforced polymers and related waste flows generated by the commercial aeronautical sector until 2050*. 2017. **125**: p. 264-272.
103. Jang, J. e B.J.P.t. Lim, *Investigation of a fiber-reinforced plastic/rubber adhesive system using statistical experimental design*. 2001. **20**(2): p. 117-123.
104. Kunz-Douglass, S., P.W. Beaumont, e M.J.J.o.M.S. Ashby, *A model for the toughness of epoxy-rubber particulate composites*. 1980. **15**(5): p. 1109-1123.
105. Khoramishad, H., S.J.I.J.o.A. Razavi, e Adhesives, *Metallic fiber-reinforced adhesively bonded joints*. 2014. **55**: p. 114-122.

106. Kaji, M., M. Farahani, M.J.J.o.a.s. Ansari, e Technology, *A reinforcing technique for the adhesive bonded composite joints using metallic wires*. 2017. **31**(17): p. 1963-1975.
107. Nemati Giv, A., M. Ayatollahi, S. Razavi, e H.J.T.J.o.A. Khoramishad, *The effect of orientations of metal macrofiber reinforcements on mechanical properties of adhesively bonded single lap joints*. 2018. **94**(7): p. 541-561.
108. You, M., Y. Zheng, X.-L. Zheng, W.-J.J.I.j.o.a. Liu, e adhesives, *Effect of metal as part of fillet on the tensile shear strength of adhesively bonded single lap joints*. 2003. **23**(5): p. 365-369.
109. Razavi, S., M. Ayatollahi, E. Esmaili, e L.J.E.J.o.M.-A.S. Da Silva, *Mixed-mode fracture response of metallic fiber-reinforced epoxy adhesive*. 2017. **65**: p. 349-359.
110. Razavi, S., E.S. Bale, e F.J.P.S.I. Berto, *Mechanical behavior of metallic fiber-reinforced adhesive under cyclic loading*. 2020. **26**: p. 225-228.
111. Silva, S., M. Sabino, E. Fernandes, V. Correlo, L. Boesel, e R.J.I.M.R. Reis, *Cork: properties, capabilities and applications*. 2005. **50**(6): p. 345-365.
112. dos Santos, R.G., R. Carvalho, E.R. Silva, J.C. Bordado, A.C. Cardoso, M. do Rosário Costa, M.M.J.I.C. Mateus, e Products, *Natural polymeric water-based adhesive from cork liquefaction*. 2016. **84**: p. 314-319.
113. Barbosa, A., L. Da Silva, J. Abenojar, J. Del Real, R.M. Paiva, e A.J.T.A. Öchsner, *Kinetic analysis and characterization of an epoxy/cork adhesive*. 2015. **604**: p. 52-60.
114. Delzendehrooy, F., M. Ayatollahi, A. Akhavan-Safar, e L.J.C.P.B.E. da Silva, *Strength improvement of adhesively bonded single lap joints with date palm fibers: Effect of type, size, treatment method and density of fibers*. 2020. **188**: p. 107874.
115. Endo, M., T. Hayashi, Y. Ahm Kim, M. Terrones, M.S.J.P.T.o.t.R.S.o.L.S.A.M. Dresselhaus, Physical, e E. Sciences, *Applications of carbon nanotubes in the twenty-first century*. 2004. **362**(1823): p. 2223-2238.
116. Moniruzzaman, M. e K.I.J.M. Winey, *Polymer nanocomposites containing carbon nanotubes*. 2006. **39**(16): p. 5194-5205.
117. Bai, J.J.C., *Evidence of the reinforcement role of chemical vapour deposition multi-walled carbon nanotubes in a polymer matrix*. 2003. **41**(6): p. 1325-1328.
118. Yu, S., Y. Kang Juay, M.J.J.o.N. Shyan Young, e Nanotechnology, *Fabrication and characterization of carbon nanotube reinforced poly (methyl methacrylate) nanocomposites*. 2008. **8**(4): p. 1852-1857.
119. Yu, S., W.M. Wong, X. Hu, e Y.K.J.J.o.A.P.S. Juay, *The characteristics of carbon nanotube-reinforced poly (phenylene sulfide) nanocomposites*. 2009. **113**(6): p. 3477-3483.
120. Khoramishad, H. e M.J.T.J.o.A. Khakzad, *Toughening epoxy adhesives with multi-walled carbon nanotubes*. 2018. **94**(1): p. 15-29.
121. Wernik, J., S.J.M. Meguid, e Design, *On the mechanical characterization of carbon nanotube reinforced epoxy adhesives*. 2014. **59**: p. 19-32.
122. Yu, S., M.N. Tong, G.J.M. Critchlow, e Design, *Use of carbon nanotubes reinforced epoxy as adhesives to join aluminum plates*. 2010. **31**: p. S126-S129.

123. Monteiro, P.J.D.J., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural modificado com pó de cortiça expandida*. Tese de Mestrado no Ramo de Materiais e Tecnologia de Fabrico, ISEP, 2020.
124. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014.
125. Campilho, R.D.S.G., D.C. Moura, D.J.S. Gonçalves, J.F.M.G. da Silva, M.D. Banea, e L.F.M. da Silva, *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. *Composites Part B: Engineering*, 2013. **50**: p. 120-126.
126. Campilho, R.D., M.D. Banea, J. Neto, L.F.J.I.j.o.a. da Silva, e adhesives, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. 2013. **44**: p. 48-56.
127. Neto, J., R.D. Campilho, L.J.I.J.o.A. Da Silva, e Adhesives, *Parametric study of adhesive joints with composites*. 2012. **37**: p. 96-101.
128. *Ficha técnica do adesivo Araldite AV138*.
129. Gil, L., *Cork*, in *Materials for construction and civil engineering*. 2015, Springer. p. 585-627.
130. Gil, L.J.S.M.d.L.A.A.P.d.C., *A cortiça como material de construção—Manual Técnico*. 2007.
131. *Aglomerado puro expandido*. Available from: <https://www.apcor.pt/cortiça/processo-de-transformacao/percurso-industrial/aglomerado-puro-expandido/>.
132. Lee, D.-B., T. Ikeda, N. Miyazaki, e N.-S.J.J.E.M.T. Choi, *Effect of bond thickness on the fracture toughness of adhesive joints*. 2004. **126**(1): p. 14-18.
133. Campilho, R.D., M. De Moura, J.J.C.S. Domingues, e Technology, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. 2005. **65**(13): p. 1948-1958.
134. Campilho, R.D.S.G., M. De Moura, J.J.I.J.o.A. Domingues, e Adhesives, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. 2009. **29**(2): p. 195-205.