



## Aplicação de um método de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura em corte de adesivos estruturais

ANA CATARINA CARNEIRO LEITÃO

Outubro de 2015

Aplicação de um método de correlação de imagem  
para a determinação da tenacidade à fratura em corte  
de adesivos estruturais

Dissertação submetida para a obtenção do grau de Mestre em  
Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



16 de outubro de 2015



Relatório da Unidade Curricular de Dissertação do 2º ano do Mestrado em Engenharia  
Mecânica

Candidato: Ana Catarina Carneiro Leitão, N°1121313, 1121313@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



16 de outubro de 2015



*Mariana.*



## *Agradecimentos*

A todos os meus companheiros e professores de curso que ao longo do mestrado me ajudaram e apoiaram por forma a atingir os meus objetivos e a concluir mais uma etapa da minha formação académica. O meu sincero obrigado por todo o apoio demonstrado.

Ao orientador Professor Raul Campilho, agradeço a oportunidade, disponibilidade e o privilégio que me concedeu ao desenvolver este estudo.

À minha família, em especial a minha irmã Mariana, um profundo agradecimento por acreditarem sempre em mim e apostarem na minha formação académica ao longo destes anos.



## *Resumo*

Qualquer estrutura hoje em dia deve ser resistente, robusta e leve, o que aumentou o interesse industrial e investigação nas ligações adesivas, nomeadamente pela melhoria das propriedades de resistência e fratura dos materiais. Com esta técnica de união, o projeto de estruturas pode ser orientado para estruturas mais leves, não só em relação à economia direta de peso relativamente às juntas aparafusadas ou soldadas, mas também por causa da flexibilidade para ligar materiais diferentes. Em qualquer área da indústria, a aplicação em larga escala de uma determinada técnica de ligação supõe que estão disponíveis ferramentas confiáveis para o projeto e previsão da rotura. Neste âmbito, Modelos de Dano Coesivo (MDC) são uma ferramenta essencial, embora seja necessário estimar as leis MDC do adesivo à tração e corte para entrada nos modelos numéricos.

Este trabalho avalia o valor da tenacidade ao corte ( $G_{IIC}$ ) de juntas coladas para três adesivos com ductilidade distinta. O trabalho experimental consiste na caracterização à fratura ao corte da ligação adesiva por métodos convencionais e pelo Integral- $J$ . Além disso, pelo integral- $J$ , é possível definir a forma exata da lei coesiva. Para o integral- $J$ , é utilizado um método de correlação de imagem digital anteriormente desenvolvido para a avaliação do deslocamento ao corte do adesivo na extremidade da fenda ( $\delta_s$ ) durante o ensaio, acoplado a uma sub-rotina em Matlab<sup>®</sup> para a extração automática de  $\delta_s$ . É também apresentado um trabalho numérico para avaliar a adequabilidade de leis coesivas triangulares aproximadas em reproduzir as curvas força-deslocamento ( $P-\delta$ ) experimentais dos ensaios ENF. Também se apresenta uma análise de sensibilidade para compreender a influência dos parâmetros coesivos nas previsões numéricas. Como resultado deste trabalho, foram estimadas experimentalmente as leis coesivas de cada adesivo pelo método direto, e numericamente validadas, para posterior previsão de resistência em juntas adesivas. Em conjunto com a caracterização à tração destes adesivos, é possível a previsão da rotura em modo-misto.

**Palavras-Chave:** Juntas adesivas; tenacidade à fratura; lei coesiva; ensaios experimentais; correlação digital de imagem.



## *Abstract*

Modern and competitive structures are sought to be strong, reliable and lightweight, which increased the industrial and research interest in adhesive bonding, namely improving the materials strength and fracture properties. With this joining technique, design can be oriented towards lighter structures, not only regarding the direct weight saving advantages of the joint over fastened or welded joints, but also because of flexibility to joint different materials. In any field of industry, the large-scale application of a given joint technique supposes that reliable tools for design and failure prediction are available. Within this scope, Cohesive Zone Models (CZM) are a powerful tool, although the CZM laws of the adhesive bond in tension and shear are required as input in the numerical models.

This work evaluates the value of shear fracture toughness ( $G_{IIC}$ ) and CZM laws of bonded joints for three adhesives with distinct ductility, by the End-Notched Flexure (ENF) test. The experimental work consists of the shear fracture characterization of the bond by conventional methods and the  $J$ -integral techniques. Additionally, by the  $J$ -integral technique, the precise shape of the cohesive law is defined. For the  $J$ -integral, a previously developed digital image correlation method is used for the evaluation of the adhesive layer shear displacement at the crack tip ( $\delta_s$ ) during the test, coupled to a Matlab<sup>®</sup> sub-routine for extraction of this parameter automatically. A numerical analysis is also undertaken to assess the validity of parametrized triangular CZM laws to reproduce the experimental load-displacement ( $P$ - $\delta$ ) curves of the ENF tests. A sensitivity analysis was also performed to understand the influence of the CZM parameters on the numerical predictions. As output of this work, shear CZM laws were experimentally estimated for each adhesive by the direct method, and numerically validated, for subsequent use in the strength prediction of bonded joints. Together with the tensile characterization of these adhesives, general mixed-mode fracture prediction is enabled.

**Keywords:** Adhesive joints; fracture toughness; cohesive law; experimental testing; digital image correlation



# Índice

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO .....	IX
ABSTRACT .....	XI
ÍNDICE DE FIGURAS .....	XVII
ÍNDICE DE TABELAS .....	XXI
NOMENCLATURA.....	XXIII
<b>1 INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO .....	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO .....	2
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 <i>Caraterização das juntas adesivas</i> .....	5
2.1.2 <i>Esforços e modos de rotura em juntas adesivas</i> .....	7
2.1.2.1 Esforços de Tração .....	8
2.1.2.2 Esforços de Compressão .....	9
2.1.2.3 Esforços de Corte .....	9
2.1.2.4 Esforços de Clivagem.....	10
2.1.2.5 Esforços de Arrancamento .....	11
2.1.3 <i>Modos de rotura</i> .....	12
2.1.4 <i>Configurações possíveis de junta</i> .....	13
2.2 ADESIVOS ESTRUTURAIIS.....	16
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i> .....	16
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i> .....	17
2.2.2.1 Adesivos Fenólicos .....	17
2.2.2.2 Adesivos Epóxidos.....	17
2.2.2.3 Adesivos Acrílicos .....	18
2.2.2.4 Adesivos à base de resorcinol-formol .....	18
2.2.2.5 Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida.....	19
2.2.2.6 Adesivos de poliuretano .....	19
2.3 ENSAIOS PARA A DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA.....	19
2.3.1 <i>Ensaio em tração (modo I)</i> .....	20
2.3.2 <i>Ensaio em corte (modo II)</i> .....	21
2.3.3 <i>Ensaio em solitação combinada (modo misto I + II)</i> .....	23

2.4	MÉTODOS PARA A DETERMINAÇÃO DE $G_{IIC}$ .....	24
2.4.1	<i>Métodos dependentes da medição do comprimento de fenda</i> .....	25
2.4.1.1	Compliance Calibration Method.....	25
2.4.1.2	Direct Beam Theory .....	25
2.4.1.3	Corrected Beam Theory.....	26
2.4.2	<i>Método baseados num comprimento de fenda equivalente</i> .....	26
2.4.3	<i>Método baseado no integral-J</i> .....	29
2.4.3.1	Utilização de sensores mecânicos para obtenção dos parâmetros.....	31
2.4.3.2	Utilização de métodos óticos para obtenção dos parâmetros .....	33
2.5	ELEMENTOS COESIVOS .....	35
<b>3</b>	<b>TRABALHO EXPERIMENTAL</b> .....	<b>37</b>
3.1	MATERIAIS UTILIZADOS .....	37
3.1.1	<i>Substratos</i> .....	37
3.1.2	<i>Adesivos</i> .....	38
3.1.2.1	Araldite® AV138.....	39
3.1.2.2	Araldite® 2015.....	40
3.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	41
3.1.3	<i>Geometria dos provetes ENF</i> .....	42
3.2	FABRICO DOS PROVETES ENF .....	42
3.2.1	<i>Colagem dos provetes</i> .....	45
3.2.2	<i>Preparação dos provetes para ensaio</i> .....	46
3.3	ENSAIO DOS PROVETES ENF.....	47
3.3.1	<i>Condições de ensaio</i> .....	47
3.3.2	<i>Método ótico</i> .....	48
3.3.3	<i>Realização dos ensaios</i> .....	49
3.3.3.1	Método ótico para a medição de $\delta_s$ .....	50
3.3.3.2	Cálculo de $\delta_s$ .....	51
3.4	RESULTADOS OBTIDOS DOS ENSAIOS ENF.....	53
3.4.1	<i>Araldite® AV138</i> .....	53
3.4.1.1	Estimativa de $G_{IIC}$ pelos métodos convencionais .....	54
3.4.1.2	Estimativa de $G_{IIC}$ pelo Integral-J.....	55
3.4.1.3	Lei coesiva ao corte .....	57
3.4.2	<i>Araldite® 2015</i> .....	58
3.4.2.1	Estimativa de $G_{IIC}$ pelos métodos convencionais.....	59
3.4.2.2	Estimativa de $G_{IIC}$ pelo Integral -J.....	60
3.4.2.3	Lei coesiva ao corte .....	61
3.4.3	<i>Sikaforce® 7752</i> .....	62
3.4.3.1	Estimativa de $G_{IIC}$ pelos métodos convencionais .....	63
3.4.3.2	Estimativa de $G_{IIC}$ pelo Integral - J .....	64
3.4.3.3	Lei coesiva ao corte .....	65
3.5	ANÁLISE DOS RESULTADOS .....	66

<b>4</b>	<b>TRABALHO NUMÉRICO.....</b>	<b>71</b>
4.1	CONDIÇÕES DA ANÁLISE NUMÉRICA .....	71
4.2	MODELO DE DANO COESIVO .....	74
4.2.1	<i>Modelo de dano triangular.....</i>	75
4.3	VALIDAÇÃO DA LEI COESIVA OBTIDA .....	76
4.3.1	<i>Araldite® AV138.....</i>	76
4.3.2	<i>Araldite® 2015.....</i>	79
4.3.3	<i>Sikaforce® 7752.....</i>	81
4.4	ANÁLISE DE RESULTADOS.....	83
4.5	ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À LEI COESIVA OBTIDA .....	84
4.5.1	<i>Araldite® AV138.....</i>	84
4.5.2	<i>Araldite® 2015.....</i>	87
4.5.3	<i>Sikaforce® 7752.....</i>	89
<b>5</b>	<b>CONCLUSÕES.....</b>	<b>93</b>
	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>97</b>



## Índice de Figuras

Figura 1 - Representação esquemática dos fatores envolvidos na seleção e projeto das ligações adesivas [3].....	7
Figura 2 - Tipos de esforços em juntas adesivas: a) tração; b) compressão; c) corte; d) arrancamento e e) clivagem [6].....	8
Figura 3 - Esforço de tração e respetiva distribuição de tensão [6].....	8
Figura 4 - Esforço de compressão e respetiva distribuição de tensão [6] .....	9
Figura 5 - Esforço de corte e respetiva distribuição da tensão [6] .....	10
Figura 6 - Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte [8].....	10
Figura 7 - Esforço de clivagem e respetiva distribuição da tensão [6].....	11
Figura 8 - Esforço de arrancamento e respetiva distribuição da tensão [6].....	11
Figura 9 - Plastificação dos adesivos [6].....	12
Figura 10 - Modos de rotura em juntas adesivas: a) rotura adesiva, b) rotura coesiva, c) rotura mista e d) rotura do aderente.....	12
Figura 11 - Tipos de juntas adesivas mais comuns usadas em engenharia [2].....	13
Figura 12 - Junta de sobreposição simples em rotação na zona de ligação causada pela força aplicada, colocando as extremidades da sobreposição em clivagem [7] .....	13
Figura 13 - Picos de tensão corte nas extremidades da junta de sobreposição simples [4].....	14
Figura 14 - Distribuição da tensão de corte na junta sobreposição simples e na junta de chanfro exterior [4].....	14
Figura 15 - Junta cobre-junta dupla chanfrada e cobre-junta dupla embutida [7].....	15
Figura 16 - Modos fundamentais de carregamento: a) Modo I: tração ( <i>opening</i> ); b) Modo II: corte ( <i>sliding</i> ) e c) Modo III: rasgamento ( <i>tearing</i> ) .....	20
Figura 17 - Representação esquemática do ensaio DCB.....	21
Figura 18 - Configurações de ensaio para Modo II: a) ENF, b) ELS e c) 4ENF .....	22
Figura 19 - Geometria do provete ENF.....	22
Figura 20 - Representação esquemática do ensaio MMF.....	23
Figura 21 - Representação esquemática do ensaio ADCB.....	23
Figura 22 - Configuração esquemática do ensaio MMB [35] .....	24
Figura 23 - Representação esquemática da ZPF e do conceito de $a_{eq}$ [37] .....	27
Figura 24 - Representação esquemática da obtenção do fator de correção do comprimento de fenda inicial [40] .....	27
Figura 25 - Comparação entre materiais elásticos não lineares e materiais elasto-plásticos .....	29
Figura 26 - Nomenclatura utilizada no cálculo do integral $-J$ .....	30

Figura 27 - LVDT usado para medir $\delta_s$ [46].....	32
Figura 28 - Representação esquemática da medição de $\delta_s$ [45].....	32
Figura 29 - Exemplo da colocação de varetas em três pontos para medir a rotação [46].....	33
Figura 30 - a) Ilustração do ensaio ENF; b) deformação do provete em modo II e c) configuração ampliada normalmente utilizada para CDI [25] .....	34
Figura 31 - Ilustração dos pontos recolhidos pelo método ótico para obter $\delta_s$ .....	35
Figura 32 - MDC triangular (formulação em modo puro e modo misto).....	36
Figura 33 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ da liga de alumínio AW 6082-T651 [53]. .....	38
Figura 34 - Adesivo epóxico Araldite® AV138/HV998 .....	39
Figura 35 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [41] .....	40
Figura 36 - Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml e pistola de aplicação.....	40
Figura 37 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [41].....	41
Figura 38 - Formato comercial do Adesivo SikaForce® 7752 L60 .....	41
Figura 39 - Curvas $\sigma$ - $\epsilon$ de provetes maciços do adesivo SikaForce® 7752 [60].....	42
Figura 40 - Dimensões dos provetes para o ensaio ENF.....	42
Figura 41 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S [8].....	43
Figura 42 - Granalhagem mecânica dos substratos a seco [8].....	43
Figura 43 - Representação esquemática da localização dos calços calibrados [8] .....	44
Figura 44 - Calço frontal na posição da pré-fenda [8].....	44
Figura 45 - Aplicação de adesivo, método "zigue-zague" [8].....	45
Figura 46 - Processo de posicionamento durante a cura [8].....	45
Figura 47 - Limpeza dos bordos dos provetes [8] .....	46
Figura 48 - Indicação da escala no provete a ensaiar [8].....	47
Figura 49 - Ensaio experimental ENF e respetivo método ótico [8] .....	48
Figura 50 - Meio ótico utilizado nos ensaios [6].....	49
Figura 51 - Imagem obtida no início de um ensaio, com exemplificação da região de medição abrangida pela mesma [8].....	49
Figura 52 - Ilustração dos pontos recolhidos pelo método ótico ( $p_1$ a $p_6$ ), as curvas ajustadas aos pontos ( $q_{superior}$ e $q_{inferior}$ ) e a curva média ( $q_{medio}$ ) onde $\delta_s$ é medido .....	50
Figura 53 - Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® AV138 .....	54
Figura 54 - Curva de $\delta_s$ em função do tempo do teste para um provete e respetiva aproximação polinomial para o adesivo Araldite® AV138 .....	56
Figura 55 - Curva $G_{II}$ - $\delta_s$ para um provete com o adesivo Araldite® AV138 com aproximação polinomial.....	56
Figura 56 - Curvas $t_s$ - $\delta_s$ para o adesivo Araldite® AV138.....	57
Figura 57 - Curvas $P$ - $\delta$ do adesivo Araldite® 2015 .....	58

Figura 58 - Curva de $\delta_s$ em função do tempo do teste para um provete de Araldite® 2015 e respetiva aproximação polinomial.....	60
Figura 59 - Curva $G_{II}-\delta_s$ para um provete com o adesivo Araldite® 2015 com aproximação polinomial .....	61
Figura 60 - Curvas $t_s-\delta_s$ para o adesivo Araldite® 2015 .....	62
Figura 61 - Curvas $P-\delta$ do adesivo SikaForce® 7752.....	63
Figura 62 - Curva de $\delta_s$ em função do tempo do teste para um provete de SikaForce® 7752 e respetiva aproximação polinomial.....	64
Figura 63 - Curva $G_{II}-\delta_s$ para o adesivo SikaForce® 7752 com aproximação polinomial .....	65
Figura 64 - Curvas $t_s-\delta_s$ para o adesivo SikaForce® 7752.....	66
Figura 65 - Curvas de $\delta_s$ em função do tempo do teste para um provete de cada adesivo e respetiva aproximação polinomial.....	67
Figura 66 - Curvas $G_{II}-\delta_s$ para um provete de cada adesivo e respetiva aproximação polinomial..	67
Figura 67 - Malha de MEF considerada para os provetes ENF a testar numericamente .....	71
Figura 68 - Detalhe da malha MEF na proximidade da extremidade da fenda.....	72
Figura 69 - Detalhe da malha de MEF na zona de contacto entre o provete e um dos cilindros de suporte .....	72
Figura 70 - Detalhe da malha de MEF na zona de contacto entre o provete e o punção de carregamento .....	73
Figura 71 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos .....	73
Figura 72 - Detalhe da zona de contacto no cilindro de suporte .....	73
Figura 73 - Detalhe da zona de contacto entre aderentes na proximidade da extremidade da fenda	74
Figura 74 - Detalhe da zona de contacto no punção de carregamento .....	74
Figura 75 - Leis coesivas triangular, exponencial (a) e trapezoidal (b) .....	75
Figura 76 - Lei $t_s^0-\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138 e respetiva aproximação triangular .....	77
Figura 77 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica do provete AV138_6.....	77
Figura 78 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica do provete AV138_8.....	78
Figura 79 - Lei $t_s^0-\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015 e respetiva aproximação triangular.....	79
Figura 80 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica do provete 2015_1.....	80
Figura 81 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica do provete 2015_4.....	80
Figura 82 - Lei $t_s^0-\delta_s$ experimental no ensaio de um provete com o adesivo SikaForce® 7752 e respetiva aproximação triangular .....	81
Figura 83 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica do provete 7752_2.....	82
Figura 84 - Comparativo das curvas $P-\delta$ experimental e numérica do provete 7752_6.....	82

Figura 85 - Comparação de curvas representativas $t_s$ - $\delta$ para cada um dos adesivos com leis MDC simplificadas.....	84
Figura 86 - Variação de $G_{IIC}$ reproduzida nas curvas $P$ - $\delta$ , para o Araldite® AV138.....	85
Figura 87 - Variação de $t_s^0$ reproduzida nas curvas $P$ - $\delta$ , para o Araldite® AV138 .....	86
Figura 88 - Variação de $G_{IIC}$ reproduzida nas curvas $P$ - $\delta$ , para o Araldite® 2015 .....	87
Figura 89 - Variação de $t_s^0$ reproduzida nas curvas $P$ - $\delta$ , para o Araldite® 2015 .....	89
Figura 90 - Variação de $G_{IIC}$ reproduzida nas curvas $P$ - $\delta$ , para o SikaForce® 7752 .....	90
Figura 91 - Variação de $t_s^0$ reproduzida nas curvas $P$ - $\delta$ para o SikaForce® 7752 .....	91

## Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos adesivos [3] .....	16
Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 .....	37
Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [57].....	38
Tabela 4 - Propriedades elásticas e plásticas dos adesivos [59, 41, 60].....	39
Tabela 5 - Controlo dimensional dos substratos de alumínio (mm).....	43
Tabela 6 - Identificação dos provetes de ensaio e respetivas dimensões (mm) [8].....	47
Tabela 7 - Valores de $G_{IIC}$ [N/mm] para o adesivo Araldite® AV138.....	55
Tabela 8 - Valores de $G_{IIC}$ [N/mm] para o adesivo Araldite® AV138 obtidos pelo Integral-J .....	57
Tabela 9 - Valores de $G_{IIC}$ [N/mm] para o adesivo Araldite® 2015 .....	59
Tabela 10 - Valores de $G_{IIC}$ [N/mm] para o adesivo Araldite® 2015 obtidos pelo Integral-J .....	61
Tabela 11 - Valores de $G_{IIC}$ para o adesivo SikaForce® 7752 .....	63
Tabela 12 - Valores de $G_{IIC}$ [N/mm] para o adesivo SikaForce® 7752 obtidos pelo Integral - J .....	65
Tabela 13 - Valores de $G_{IIC}$ [N/mm] para os três adesivos obtidos pelo integral-J.....	68
Tabela 14 - Média e desvio padrão dos parâmetros coesivos para os três adesivos com o respetivo desvio percentual.....	68
Tabela 15 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o adesivo Araldite® AV138.....	78
Tabela 16 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o adesivo Araldite® 2015.....	81
Tabela 17 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o adesivo SikaForce® 7752.....	83
Tabela 18 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $G_{IIC}$ do adesivo Araldite® AV138 .....	85
Tabela 19 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $t_s^0$ do adesivo Araldite® AV138 .....	86
Tabela 20 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $G_{IIC}$ do adesivo Araldite® 2015 .....	87
Tabela 21 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $t_s^0$ do adesivo Araldite® 2015 .....	88
Tabela 22 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $G_{IIC}$ do adesivo SikaForce® 7752 .....	89
Tabela 23 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o $t_s^0$ do adesivo SikaForce® 7752 .....	90



## *Nomenclatura*

### **Caracteres Romanos**

$\bar{I}(u, v, c)$  - Intensidade média do componente de cor

$2h$  - Altura do provete

$2L$  - Distância entre apoios

$A$  - Área da fenda propagada

$a$  - Comprimento da fenda

$a_0$  - Comprimento de fenda inicial

$a_{eq}$  - Comprimento de fenda equivalente

$B$  - Largura do substrato

$c$  - Valor relativo das duas solicitações no provete (o rácio de modo misto)

$C = \delta/P$  - Flexibilidade

$C_0$  - Flexibilidade inicial

$C_0, C_1, C_2, C_3$  - Constantes do polinómio cúbico para determinação da flexibilidade

$C_{0corr}$  - Flexibilidade inicial corrigida

$C_{corr}$  - Flexibilidade corrigida

$E$  - Módulo de elasticidade

$E_x$  - Módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção  $xx$

$E_y$  - Módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção  $yy$

$G$  - Taxa de libertação de energia de deformação

$G_I$  - Energia de fratura em modo I

$G_{IC}$  - Energia crítica de fratura em modo I

$G_{II}$  - Energia de fratura em modo II

$G_{IIC}$  - Energia crítica de fratura em modo II

$G_{xy}$  - Módulo de corte transversal

$I(x, y, c)$  - Intensidade da componente de cor do pixel

$\mathbf{K}$  - Matriz constitutiva

$K_{nn}, K_{ss}, K_{ns}$  - Parâmetros da matriz  $\mathbf{K}$

$L$  - Distância entre punção de carga e rolete de apoio

$P$  - Carregamento

$P_{\text{máx}}$  - Carga máxima

$P_u$  - Carga por unidade de largura

$q_i$  - Curvatura do aderente

$q_{\text{medial}}$  - Curva medial

$T$  - Vetor de tração

$t_A$  - Espessura de adesivo

$t_m^0$  - Resistência coesiva em modo misto

$t_n^0$  - Resistência coesiva à tração

$t_p$  - Espessura de substrato

$t_s^0$  - Resistência coesiva ao corte

$u$  - Campo de deformação

$U$  - Densidade de energia de deformação do material

## Caracteres gregos

$\Delta$  - Fator de correção do comprimento de fenda

$\Delta_{\text{aZPF}}$  - Contribuição da ZPF para  $a_{\text{eq}}$

$\Delta_I$  - Fator de comprimento da fenda em função da deformação de corte

$\delta_m^f$  - Deslocamento de rotura em modo misto

$\delta P_{\text{máx}}$  - Deslocamento de força máxima

$\delta_s$  - Deslocamento em corte

$\delta_s^0$  - Deslocamento de corte de início de degradação

$\delta_{sc}$  - Deslocamento de rotura ao corte na extremidade da fenda

$\delta$  - Deslocamento

$\varepsilon$  - Deformação

$\varepsilon_f$  - Deformação de rotura à tração

$\gamma$  - Coeficiente para critério da mecânica da fratura

$\theta_0$  - Rotação dos aderentes na ponta da fenda

$\sigma$  - Tensão

$\sigma_f$  - Tensão de rotura à tração

$\sigma_y$  - Tensão de cedência à tração

$\tau_f$  - Tensão de rotura ao corte

$\tau_y$  - Tensão de cedência ao corte

## **Abreviaturas**

2D - Duas dimensões

3D - Três dimensões

4ENF - *Four-Point End-Notched Flexure*

ABS - *Acrylonitrile butadiene styrene*

ADCB - *Asymmetric Double-Cantilever Beam*

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

BS - *British Standards*

CBBM - *Compliance-Based Beam Method*

CBT - *Corrected Beam Theory*

CCM - *Compliance Calibration Method*

CDI - Correlação Digital de Imagem

CMM - *Compact Mixed-Mode*

DBT - *Direct Beam Theory*

DCB - *Double-Cantilever Beam*

ELS - *End Loaded Split*

EN - Norma Europeia

ENF - *End-Notched Flexure*

ISEP - Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISO - *International Organization for Standardization*

LVDT - Transdutor Diferencial de Voltagem Linear

MDC - Modelos de Dano Coesivo

MEF - Método de Elementos Finitos

MEFE - Mecânica da Fratura Linear Elástica

MMB - *Mixed-Mode Bending*

MMF - *Mixed-Mode Flexure*

PS - Poliestireno

PVC - Policloreto de vinil

ZPF - Zona de Processo de Fratura

# 1 Introdução

## 1.1 Contextualização

As ligações adesivas têm vindo a ocupar um lugar de destaque em relação aos métodos de união tradicionais (soldadura, ligações aparafusadas, entre outros) devido às suas excelentes características mecânicas. As ligações adesivas apresentam menores concentrações de tensões, boa resistência à fadiga e possibilidade de unir diferentes tipos de materiais. Como tal, os adesivos estão a ser cada vez mais utilizados nas indústrias como a automóvel, aeronáutica e de construção. No entanto, o seu uso em aplicações estruturais ainda é limitado pois não se consegue prever o seu comportamento a longa duração. Os métodos de previsão de resistência baseados em parâmetros energéticos apresentam vantagens significativas relativamente aos métodos baseados na Resistência dos Materiais, especialmente em estruturas com singularidades de tensões e quando os materiais envolvidos apresentam comportamento plástico. Neste âmbito, os Modelos de Dano Coesivo (MDC) são uma ferramenta com bastante potencial para a modelação de juntas adesivas e combinam critérios da resistência para modelar a iniciação de dano e conceitos Mecânica da Fratura para lidar com a propagação. Assim, não é necessária a existência de um defeito inicial, ao mesmo tempo que se evita os problemas da dependência da malha, caraterísticos dos métodos baseados em tensões. No entanto, os MDC dependem da medição precisa das energias críticas de fratura para previsão da propagação do dano. No âmbito desta técnica de precisão de resistência, é fundamental a determinação da tenacidade de fratura ao corte ( $G_{IIC}$ ) e da respetiva lei coesiva ao corte.

Para uma correta caracterização de juntas adesivas em modo puro II os ensaios mais comuns são o *End-Notched Flexure* (ENF), o *End-Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF). A partir destes ensaios é possível calcular  $G_{IIC}$  por métodos convencionais e pelo Integral- $J$ . Para os métodos tradicionais é possível obter  $G_{IIC}$  através dos métodos de redução *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance-Based Beam Method* (CBBM). Os métodos CCM, CBT e DBT dependem da medição do comprimento de fenda ( $a$ ) durante a propagação. O integral- $J$  permite a contabilização da plasticidade dos materiais na medição de  $G_{IIC}$ , embora requiera a medição do deslocamento de corte

na extremidade da fenda ( $\delta_s$ ). No entanto, com a medição deste parâmetro torna-se possível a obtenção da lei coesiva do adesivo ao corte, necessária para a utilização de técnicas numéricas como os MDC. A medição de  $\delta_s$  é usualmente conseguida pela utilização de sensores mecânicos ou por correlação digital de imagem (CDI).

## 1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se determinar o valor de  $G_{IIC}$  de juntas adesivas entre aderentes de alumínio pelo ensaio ENF, considerando adesivos com diferente ductilidade: o adesivo frágil Araldite® AV138, o adesivo moderadamente dúctil Araldite® 2015 e adesivo dúctil SikaForce® 7752. Inicialmente, são obtidas as curvas força vs. deslocamento (curvas  $P-\delta$ ). Os dados provenientes do ensaio foram tratados para a obtenção das curvas de resistência (curvas- $R$ ), através de vários métodos de redução (CCM, DBT, CBT e CBBM). Para este efeito, é também utilizado o método do integral- $J$ . Pelo método do integral- $J$ , é também possível a obtenção das leis coesivas ao corte dos 3 adesivos. Neste âmbito, é utilizado um método ótico de medição anteriormente desenvolvido [1] para a avaliação de  $\delta_s$ . Com recurso ao *software* ABAQUS® e a um MDC triangular pretende-se validar numericamente as leis coesivas obtidas através da comparação entre as  $P-\delta$  numéricas e experimentais. Também se pretende averiguar o efeitos dos parâmetros coesivos na previsão da curva  $P-\delta$ , e de que forma este efeito varia com o tipo de adesivo.

## 1.3 Organização do relatório

A presente dissertação está organizada da seguinte forma:

No Capítulo 1 é apresentada a contextualização acerca do tema a estudar, indicados os principais objetivos do trabalho e definida a organização do relatório.

No Capítulo 2 é feita uma revisão bibliográfica com os temas fundamentais para o desenvolvimento desta dissertação. Caracterizam-se as ligações adesivas e os adesivos estruturais, descrevem-se os ensaios à fratura mais comuns para cada modo de carregamento e referem-se em mais detalhe as técnicas de obtenção de  $G_{IIC}$  para o ensaio ENF.

No Capítulo 3 é descrito o procedimento experimental, que envolve a caracterização dos materiais utilizados, o fabrico dos provetes, o método ótico para definir os parâmetros necessários à análise, o ensaio realizado, e é também apresentada a análise de resultados para dos três adesivos.

No Capítulo 4, é apresentada a modelação numérica usando o *software* ABAQUS<sup>®</sup>, obedecendo às condições da análise numérica, com o objetivo de validação das leis coesivas obtidas para cada ensaio pelo método direto após parametrização para uma forma triangular. Finalmente, é efetuada uma análise de sensibilidade numérica aos parâmetros constituintes da lei coesiva.

No Capítulo 5 são apresentadas as conclusões deste trabalho com indicações de perspectivas futuras.



# 2 Revisão Bibliográfica

## 2.1 Ligações adesivas

Uma união realizada através do uso de um adesivo é designada por junta adesiva, junta colada ou ligação adesiva. Os elementos que são ligados entre si pelo adesivo são designados por substratos ou aderentes. O adesivo é um material capaz de unir dois corpos através de forças de adesão e coesão interna, sem modificar significativamente as suas estruturas. A ligação adesiva apresenta inúmeras vantagens quando comparada com os métodos tradicionais de ligação tais como soldadura, brasagem, aparafusagem, rebitagem e outras ligações mecânicas [2].

A ligação adesiva não é uma técnica recente. Esta técnica já era usada pelos Egípcios quinze séculos antes de Jesus Cristo, que empregavam colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores que aplicavam em trabalhos feitos em madeira e pedra. Os primeiros adesivos eram muito frágeis. Este problema foi ultrapassado nos anos 40 por Bruyne e seus colegas, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com uma boa tenacidade como, por exemplo, a combinação de polivinilo formal com resol fenólico. Este avanço tecnológico permitiu ligar materiais metálicos e de madeira com excelentes resultados [3].

### 2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Atualmente é cada vez mais utilizada a ligação por adesivos estruturais, substituindo os sistemas de fixação mecânica convencionais tais como: parafusos, brasagem, rebitagem, soldagem e outras ligações mecânicas. O uso de adesivos em ligações estruturais continua a ser um tema de investigação. Um dos requisitos importantes das juntas adesivas é que estes permitam suportar cargas estáticas e dinâmicas, em condições de serviço, durante o seu ciclo de vida. A justificação para o crescente uso das ligações adesivas em detrimento dos outros métodos de ligação reside no facto desta técnica ter as seguintes vantagens [2, 4]:

- Diminuição das concentrações de tensões;

- Elevada capacidade de amortecimento de vibrações;
- Aumento da rigidez das estruturas;
- Redução do número de componentes da junta;
- Resistência superior à fadiga;
- Excelente relação resistência - peso;
- Custo reduzido devido a processos de fabrico mais baratos;
- Melhor aparência visual;
- Excelentes propriedades elétricas e térmicas;
- Possibilidade de ligação de vários tipos de materiais;
- Resistência à corrosão no caso de juntas de substratos incompatíveis.

Embora as ligações adesivas apresentem um grande número de vantagens, é necessário ter em atenção algumas limitações que este tipo de ligação apresenta, nomeadamente [2]:

- 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 de tensões o mais uniforme possível;
- Os adesivos podem necessitar de cura a altas temperaturas;
- Projeto da junta deve ser orientado para que o adesivo seja maioritariamente solicitado ao corte;
- Necessidade de uma cuidada preparação superficial;
- Difícil controlo de qualidade e segurança;
- Não existe um critério de dimensionamento universal que harmonize o projeto para qualquer estrutura;
- Reduzida resistência à temperatura e humidade.

A suscetibilidade da maior parte dos adesivos à degradação por um ou mais fatores ambientais é das principais limitações da aplicação dos adesivos em ligações. A temperatura, a humidade e a radiação solar são alguns parâmetros com influência na durabilidade das juntas adesivas. As juntas adesivas são cada vez mais utilizadas nas aplicações industriais, daí a necessidade de uma análise mais detalhada. Esta análise passa por uma escolha mais adequada da geometria das juntas, dos adesivos e do processo de fabrico das juntas adesivas. A ligação adesiva está dependente de diversos fatores, tais como as forças envolvidas na adesão, os adesivos, o material dos substratos e os processos para a preparação da superfície. Uma das fases do processo de seleção e projeto de juntas adesivas é a realização de ensaios com juntas adesivas ou sobre os próprios adesivos para determinar as suas propriedades [3]. Os fatores referidos são ilustrados na Figura 1.

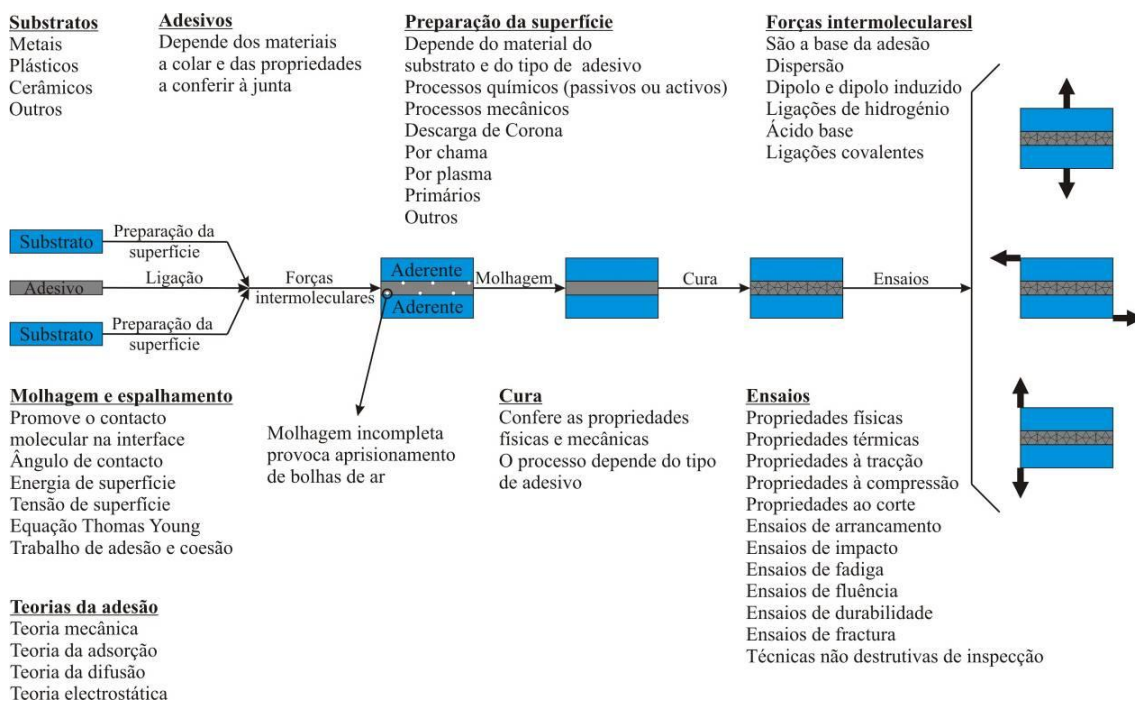


Figura 1 - Representação esquemática dos fatores envolvidos na seleção e projeto das ligações adesivas [3]

## 2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

O projeto de uma ligação é considerado uma das etapas fundamentais para que o adesivo escolhido seja utilizado da forma mais eficiente possível. O projeto tem de ser ajustado aos limites do adesivo e ser otimizado para evitar os tipos de cargas mais severos, ou seja, esforços de arrancamento e clivagem. O projeto de ligações adesivas deve ter em atenção a geometria de forma a evitar as tensões localizadas. Na sua conceção, um dos princípios básicos é que o adesivo deve ser solicitado ao corte devido ao facto de as tensões de corte terem normalmente uma distribuição mais uniforme e da ductilidade ao corte ser muito superior do que a ductilidade à tracção [4]. Os adesivos são colados entre as superfícies dos substratos, e o mecanismo de união depende da força de união do adesivo ao substrato, ou adesão, e da força interna do adesivo, ou coesão. Em geral, a resistência de uma junta adesiva depende da distribuição de tensões no adesivo, e é influenciada pela geometria da junta e pelas propriedades mecânicas do adesivo e dos aderentes [5].

Os principais esforços presentes em juntas adesivas são [2]:

- a) Tração;
- b) Compressão;
- c) Corte;
- d) Arrancamento (*peel*);
- e) Clivagem (*cleavage*).

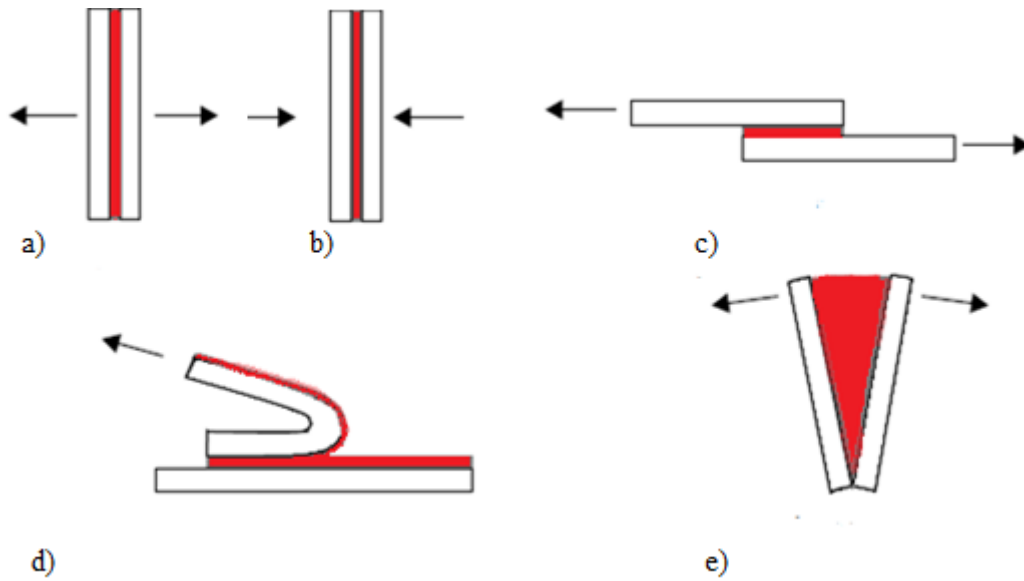


Figura 2 - Tipos de esforços em juntas adesivas: a) tração; b) compressão; c) corte; d) arrancamento e e) clivagem [6]

### 2.1.2.1 Esforços de Tração

As tensões de tração surgem quando as forças são aplicadas perpendicularmente ao plano de colagem (Figura 3). Idealmente distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é uniforme. No entanto, a espessura da cola é difícil de controlar pelo que, na prática, as forças raramente são rigorosamente axiais. Assim, na junta adesiva a distribuição de tensões não é uniforme, originando picos de tensões indesejáveis de arrancamento ou clivagem nas extremidades da zona de sobreposição. As juntas que funcionem em regime de tração devem encontrar-se perfeitamente alinhadas, para garantir um carregamento axial uniforme [7].

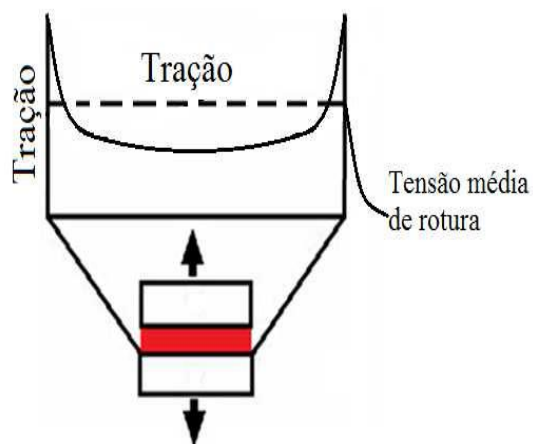


Figura 3 - Esforço de tração e respetiva distribuição de tensão [6]

### 2.1.2.2 Esforços de Compressão

As tensões de compressão (Figura 4) desenvolvem-se quando as forças atuantes tendem a comprimir um aderente contra o outro, sendo distribuídas uniformemente ao longo da área colada na camada do adesivo. A distribuição da tensão de compressão pelo adesivo é constante [7].

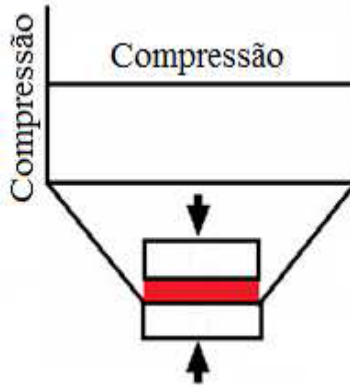


Figura 4 - Esforço de compressão e respetiva distribuição de tensão [6]

### 2.1.2.3 Esforços de Corte

As forças de corte provocam o escorregamento entre os dois aderentes. A distribuição de tensão de corte no caso de uma junta de sobreposição simples encontra-se na Figura 5. Verifica-se que as extremidades da zona ligada estão sujeitas a um maior nível de tensões do que a parte central da ligação. Isto deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade livre até à exterminada oposta da sobreposição [4].

Como está representado na Figura 6, a largura da sobreposição é mais importante que o seu comprimento, ou seja, um aumento da largura da ligação torna a junta mais resistente, pois aumenta a área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que correspondem aos locais onde o nível de esforços transmitidos é mais elevado. Por outro lado, um aumento do comprimento de sobreposição provoca um aumento da resistência da junta mas a uma taxa decrescente, devido ao efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes à medida que se aumenta o comprimento de sobreposição [7].

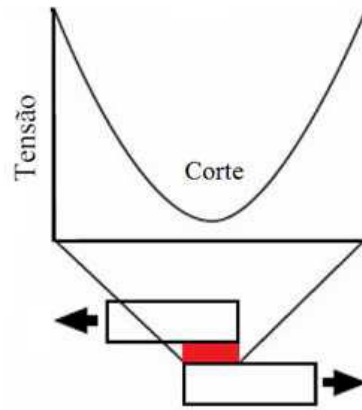


Figura 5 - Esforço de corte e respectiva distribuição da tensão [6]

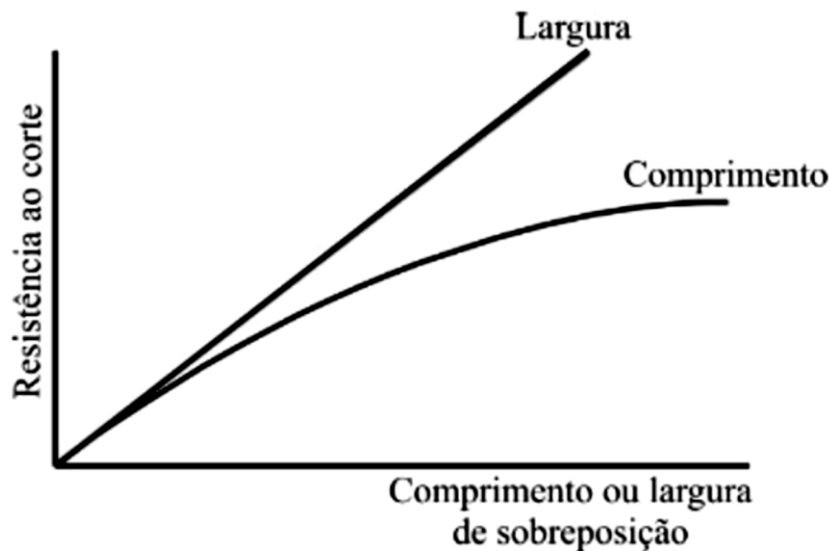


Figura 6 - Efeito do comprimento e da largura de sobreposição na resistência ao corte [8]

#### 2.1.2.4 Esforços de Clivagem

São provocados por forças aplicadas perpendicularmente ao plano da junta e na extremidade de substratos rígidos. Os esforços de clivagem (Figura 7) podem também acontecer em juntas de topo a topo sob carregamento axial, se as forças não forem rigorosamente axiais. De uma forma geral, as juntas sujeitas a este tipo de tensões são menos resistentes do que as solicitadas principalmente ao corte, porque as tensões de clivagem se concentram normalmente em zonas mais localizadas da ligação adesiva (numa ou nas duas extremidades da ligação). Assim, facilmente se compreende que as juntas de sobreposição dupla são mais favoráveis do que as de sobreposição simples, já que, devido à simetria dos esforços e diminuição drástica da flexão, o adesivo é fundamentalmente sujeito a esforços de corte [7, 9].

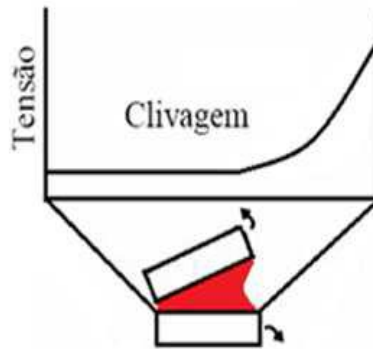


Figura 7 - Esforço de clivagem e respetiva distribuição da tensão [6]

### 2.1.2.5 Esforços de Arrancamento

Os esforços de arrancamento são muito idênticos aos esforços de clivagem. No entanto, no caso do arrancamento, um ou os dois aderentes são bastante flexíveis e podem deformar plasticamente por ação das forças aplicadas (Figura 8). Isto faz com que ocorra concentração das tensões de tração numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação [7].

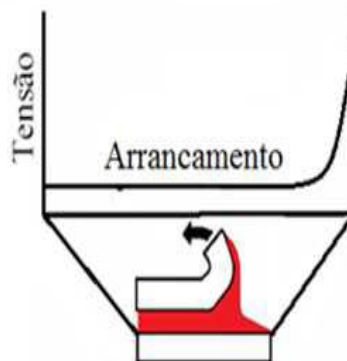


Figura 8 - Esforço de arrancamento e respetiva distribuição da tensão [6]

Para evitar este tipo de esforço deve-se utilizar configurações de juntas que suportem maioritariamente os esforços de corte. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis a este tipo de esforços, uma vez que o dano no adesivo se inicia nas extremidades da ligação para deformações do adesivo muito reduzidas. Já os adesivos dúcteis e flexíveis permitem uma plastificação do adesivo nestas regiões e transferência dos esforços para a zona interior do adesivo, o que conduz a uma maior resistência da junta (Figura 9) [7, 9].

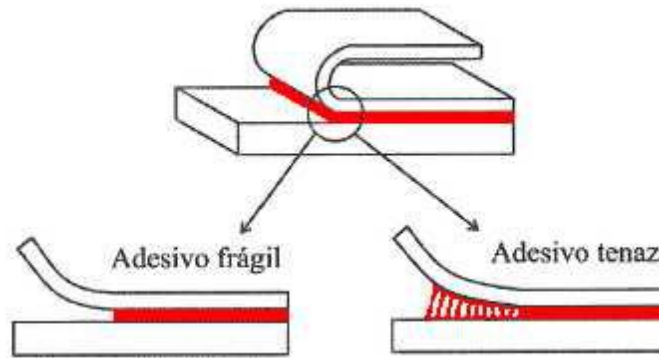


Figura 9 - Plastificação dos adesivos [6]

### 2.1.3 Modos de rotura

Os modos de rotura mais frequentes nas juntas adesivas são os indicados na Figura 10:

- Rotura adesiva, na interface entre o aderente e o adesivo (a);
- Rotura coesiva, no interior do adesivo (b);
- Rotura mista (c);
- Rotura do aderente (d).

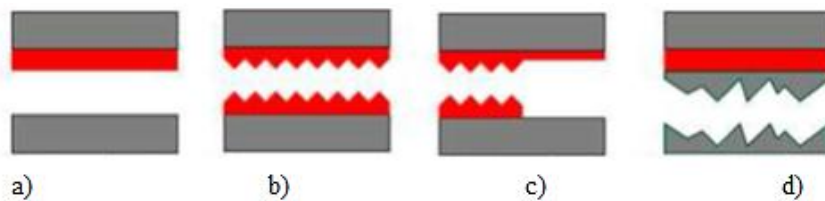


Figura 10 - Modos de rotura em juntas adesivas: a) rotura adesiva, b) rotura coesiva, c) rotura mista e d) rotura do aderente

A rotura adesiva, também conhecida por falha interfacial, ocorre na interface entre um dos aderentes e o adesivo. Após rotura verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta resíduos de adesivo. A superfície de rotura do outro aderente apresenta-se coberta de adesivo. Neste caso, ocorre falha na adesão entre o adesivo e a superfície do aderente. Segundo alguns autores, a rotura adesiva só ocorre se houver má preparação das superfícies. Todavia, trabalhos recentes mostraram que, em juntas coladas de sobreposição simples, existe variação de tensões de arrancamento e de corte ao longo da espessura do adesivo, e que os valores máximos destas tensões ocorrem junto da interface [10]. Isto pode explicar o aparecimento de uma rotura adesiva. Saliente-se ainda que muitas roturas consideradas inicialmente adesivas são, na realidade, roturas coesivas. De facto, uma observação rigorosa da superfície do substrato revela, por vezes, a existência de uma fina película de adesivo [3].

### 2.1.4 Configurações possíveis de junta

Existem várias configurações possíveis de juntas nas ligações adesivas. A distribuição de tensões ao longo da junta depende principalmente da sua geometria e também das propriedades mecânicas do adesivo e dos substratos. Os tipos mais comuns de juntas adesivas estão apresentados na Figura 11.

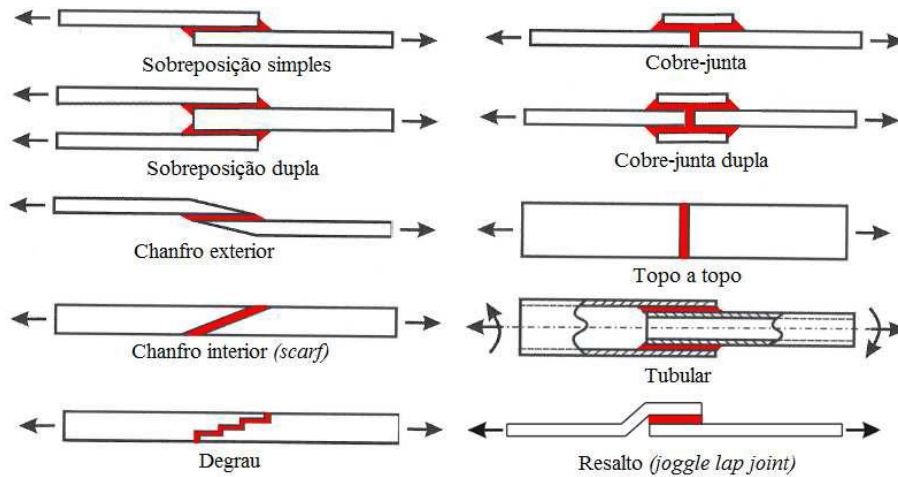


Figura 11 - Tipos de juntas adesivas mais comuns usadas em engenharia [2]

A **junta de sobreposição simples** é a mais usada em aplicações de engenharia. Todavia, a aplicação descentrada da carga provoca efeitos de flexão que originam o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (arrancamento), reduzindo a resistência da junta, como está representado na Figura 12 e Figura 13. Nos bordos da zona ligada ocorre um efeito de entalhe causado pela mudança brusca da geometria. Os dois efeitos combinados (flexão e mudança brusca da secção) ocorrem na zona mais crítica, provocando uma concentração de tensões e uma redução na resistência da junta [11].

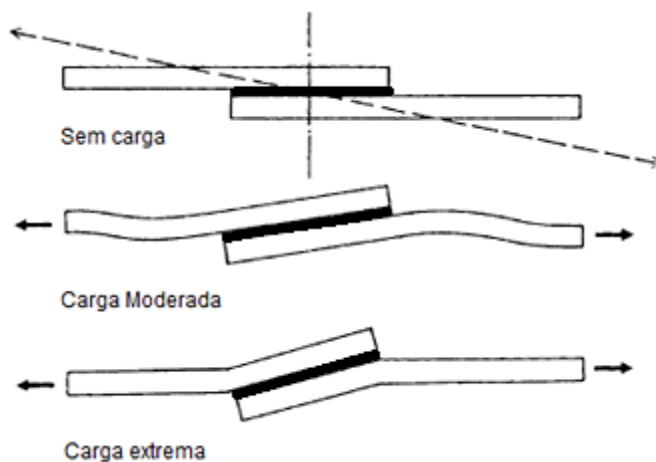


Figura 12 - Junta de sobreposição simples em rotação na zona de ligação causada pela força aplicada, colocando as extremidades da sobreposição em clivagem [7]

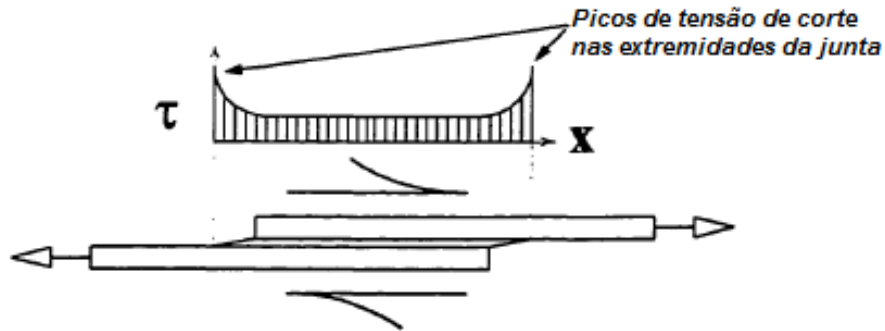


Figura 13 - Picos de tensão corte nas extremidades da junta de sobreposição simples [4]

Para minimizar a flexão da junta pode recorrer-se a **juntas de sobreposição dupla**, em que os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores. A junta de sobreposição dupla apresenta uma configuração simétrica fazendo com que esta seja isenta de flexão. Apesar do uso de filetes no adesivo para diminuir os picos de tensão e consequentemente melhorar a resistência a esforços de corte e arrancamento, muitas vezes isto não é suficiente para alcançar os resultados pretendidos, pelo que a alteração da geometria do substrato se torna fundamental. Como exemplos, existem os casos de juntas com chanfros e juntas em degrau.

A **junta de chanfro exterior** (Figura 14) resulta numa diminuição dos picos de tensão de corte que ocorrem nas extremidades da junta de sobreposição simples. De facto, estes podem ser reduzidos através da modificação geométrica do aderente nessa região, chanfrando as suas extremidades. Esta modificação da geometria resulta numa diminuição da concentração de tensões de corte, cuja distribuição na camada do adesivo se torna mais uniforme.

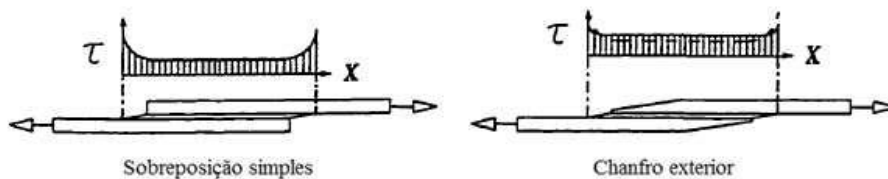


Figura 14 - Distribuição da tensão de corte na junta sobreposição simples e na junta de chanfro exterior [4]

A utilização de **juntas de chanfro interior** (*scarf*) ou em **degraus** permite a diminuição dos gradientes de tensões ao longo do adesivo, o que leva à elevada resistência destas juntas. A diminuição significativa da excentricidade dos esforços também contribui para este facto. Na prática, porém, a dificuldade de maquinar os degraus ou rampas encarecem o processo de fabrico. No caso das juntas em degrau com substratos em compósito, é comum e mais económico executar os degraus durante o empilhamento antes da cura. Este procedimento elimina as operações de maquinagem,

evitando assim a danificação das fibras. Nestes dois tipos de geometrias, a resistência da junta aumenta [12].

As **cobre juntas simples e dupla** apresentam resistência superior às juntas de sobreposição simples e topo a topo. A cobre junta simples é também sujeita a esforços de arrancamento, enquanto a de cobre junta dupla reduz o momento fletor, sendo por isso preferível.

A **junta cobre junta dupla chanfrada**, ou a de **cobre junta embutida** são as desejáveis para suprimir os aos esforços de flexão (Figura 15). Infelizmente, ambas requerem maquinagem, o que poderá ser bastante dispendioso.



Figura 15 - Junta cobre-junta dupla chanfrada e cobre-junta dupla embutida [7]

As **juntas topo a topo** são as mais simples de fabricar. No entanto, não devem ser sujeitas a esforços de flexão, pois o adesivo ficaria sujeito a clivagem. A acentuada concentração de tensões de arrancamento nas suas extremidades faz com que não apresentem uma eficácia elevada.

A **junta tubular** permite a união de tubos e varões/veios, e pode ter a extremidade com espessura de parede constante ou em chanfro. Tem boa resistência a esforços de tração e compressão, podendo gerar-se esforços de arrancamento caso não exista um alinhamento das solicitações aplicadas relativamente ao eixo de revolução. Para tentar anular este efeito, utilizam-se habitualmente chanfros, canais e ressaltos, facilitando assim a inserção de peças, aumentando a área de contacto e a resistência ao arrancamento por efeito mecânico. Estas configurações devem ser usadas no lugar das juntas de topo a topo simples devido à sua maior resistência a esforços de clivagem decorrentes da flexão, mas também porque a área adesiva é maior e, portanto, conseguem-se proporcionar maior resistência de junta. No entanto, estas juntas apresentam algumas desvantagens, tais como serem difíceis de inspecionar pelo interior, e por requererem operações de maquinagem. A aplicação do adesivo também não é simples. A utilização de orifícios para a injeção do adesivo e a abertura de canais para facilitar a saída do ar são algumas das soluções para assegurar que o adesivo preencher toda a cavidade [13].

A **junta de ressalto** (*joggle lap joint*) é a solução mais simples e eficaz para garantir um alinhamento das forças numa junta de sobreposição simples. No entanto, o ressalto traz dificuldades de fabricação acrescidas para esta junta, especialmente para substratos frágeis ou de elevada resistência.

## 2.2 Adesivos estruturais

### 2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

O adesivo estrutural pode ser descrito como um material que não sofre fluência sob ação de cargas significativas. Um adesivo estrutural também pode ser definido como sendo um material usado para unir outros materiais de elevada resistência, tais como a madeira, compósitos ou metal, permitindo que a resistência da ligação adesiva ao corte exceda os 6,9 MPa à temperatura ambiente [14].

Em certas aplicações, os adesivos estruturais são necessários para garantir uma boa ligação adesiva em ambientes adversos durante anos ou mesmo décadas. Segundo Gauthier [15], um adesivo estrutural é definido como um material capaz de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço ou, alternativamente, como um material de comprovada fiabilidade em aplicações nas quais a ligação deve ser mantida, sem ocorrências de rotura, mesmo quando sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo. Admitindo o adesivo como parte integrante da estrutura, este deve apresentar uma resistência equivalente aos materiais constituintes da estrutura a ser colada. Estes adesivos são, portanto, capazes de suportar a transmissão de esforços de grandeza considerável. Além disso, têm boa resistência a variações de temperatura, produtos químicos e vibrações [3].

Tabela 1 - Classificação dos adesivos [3]

ADESIVOS			
Estruturais		Não estruturais	
Fenólicos	fenólicos-vinílicos fenólicos-nitrilo fenólicos-policloropreno	Borrachas sintéticas	silicone policloropreno e nitrilo polisulfureto
Acrílicos	anaeróbicos cianoacrilatos	Poliésteres	
Poliuretano		Termofusíveis	
Poliimida		Inorgânicos	
Epóxido	epóxido-poliamida epóxido-polisulfureto epóxido-fenólicos epóxido-poliuretano epóxido-nitrilo		

Os adesivos estruturais são normalmente fabricados com base em resinas termoendurecíveis modificadas, resinas termoplásticas ou elastômeros [1]. Os adesivos podem ser classificados de

acordo com o seu desempenho, e neste âmbito destacam-se os adesivos estruturais e os adesivos não estruturais, apresentados na Tabela 1.

## **2.2.2 Tipos de adesivos estruturais**

A maioria dos adesivos estruturais são polímeros termoendurecíveis, uma vez que os termoplásticos são mais suscetíveis à fluência e à degradação de propriedades por exposição ambiental. No entanto, são considerados com alguma frequência adesivos cuja formulação base é termoplástica, tais como os cianoacrilatos e os adesivos ditos anaeróbicos. Apresentam-se de seguida as diferentes famílias de adesivos estruturais.

### **2.2.2.1 Adesivos Fenólicos**

Os adesivos fenólicos, em geral, apresentam um baixo custo e possuem boa resistência mecânica a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. Como principais limitações, apontam-se a baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. Para a resolução destes problemas têm sido desenvolvidos adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno). Nestes adesivos fenólicos modificados o processo de cura efetua-se a quente e sob pressão [3]. Durante o processo de cura, que deve realizar-se a altas temperaturas, ocorre libertação de água. Por este motivo, os substratos devem ser porosos ou deve-se impor uma elevada pressão para evitar o aparecimento de vazios na zona da colagem.

Existem ainda as seguintes combinações de adesivos fenólicos:

- a) Fenólicos-vinílicos;
- b) Fenólicos-nitrilo;
- c) Fenólicos com cloropreno.

### **2.2.2.2 Adesivos Epóxidos**

Estes adesivos têm alta resistência mecânica e permitem uma grande versatilidade na sua formulação, uma vez que existem diversas resinas e endurecedores. Estão disponíveis numa grande variedade de formas que vão desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes. São comercializados sob a forma de um só componente ou de vários componentes (normalmente dois). O desenvolvimento de formulações apresentando elevada rigidez aumentou fortemente o uso destes adesivos em muitas indústrias. Estes adesivos apresentam uma enorme diversidade de aplicações,

podendo ser empregues na ligação de quase todos os materiais utilizados na construção mecânica. O processo de cura destes adesivos não necessita da aplicação de pressão, pelo que basta o simples posicionamento das peças a serem coladas. As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser modificadas pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólica) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo). São comuns as combinações de adesivo epóxico com outros adesivos [3]:

- a) Epóxico-poliamida;
- b) Epóxico-polisulfido;
- c) Epóxico-fenólicos
- d) Epóxico-vinílico;
- e) Epóxico-poliuretano;
- f) Epóxico-nitrilo.

### **2.2.2.3 Adesivos Acrílicos**

Nos adesivos acrílicos o processo de cura é realizado pela adição de agentes de polimerização, mais concretamente peróxidos geradores de radicais livres. Os radicais livres, ao reagirem com os monómeros, iniciam a formação de cadeias através da quebra das ligações duplas dos monómeros. Após os monómeros terem a sua ligação quebrada, estes atuam também como agentes de polimerização. Estes adesivos são geralmente utilizados na ligação de termoplásticos como PS (Poliestireno), PVC (Policloreto de vinil), ABS (*Acrylonitrile butadiene styrene*) e borrachas, além de proporcionarem boa adesão em aço e alumínio. Como vantagens são indicadas a elevada resistência à humidade, e a boa resistência ao arrancamento e ao impacto. Possuem baixa contração durante o processo de cura e permitem ligações fortes mesmo quando as superfícies não são convenientemente limpas. Como desvantagens citam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e a elevada inflamabilidade. Dentro família dos adesivos acrílicos existem os acrílicos anaeróbicos, cianoacrilatos e modificados.

### **2.2.2.4 Adesivos à base de resorcinol-formol**

Estes adesivos são um produto de propriedade única no mercado, pois são totalmente à prova de água e resistentes a diversos solventes orgânicos e fungos. Por esse motivo, são especialmente indicados para colagens de materiais em trabalhos navais, aeronáuticos, hidráulicos e outros que poderão ser expostos à ação da água e intempéries (temperatura, chuva, vento, humidade). Para a sua utilização, é obrigatório misturar a resina e o endurecedor. Na indústria das madeiras também são frequentemente usados os adesivos à base de ureia-formol, adesivos de contacto, adesivos à base de cianoacrilato e os adesivos vinílicos ou, como são mais conhecidos, cola branca.

### **2.2.2.5 Adesivos de poliimida e adesivos de bismaleimida**

São os adesivos mais estáveis a altas temperaturas (superiores a 200°C). Estão disponíveis sob a forma de líquidos e filmes, mas são relativamente caros e difíceis de manusear. Requerem longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada, pelo que a sua aplicação é complexa. Os adesivos de bismaleimida têm um processo de cura mais simples.

### **2.2.2.6 Adesivos de poliuretano**

Resultam da reação de um polioliol (ou poliéter-polioliol) com um isocianato e apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes. A cura processa-se lentamente à temperatura ambiente mas podem ser elaborados de forma a abranger uma gama alargada de tempos de cura. A distância entre as superfícies a colar pode ir até os 25 mm. Apresentam boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações, boa tenacidade e bom comportamento quando sujeitos a intempéries. Estes adesivos podem apresentar uma resistência de rotura ao corte da ordem dos 20 MPa, possibilitando a utilização em aplicações estruturais.

## **2.3 Ensaios para a determinação da tenacidade à fratura**

A tenacidade à fratura de um material caracteriza a sua resistência ao crescimento de uma fenda, ou seja, representa a quantidade de energia que o material pode absorver até ao momento da sua rotura. A Mecânica da Fratura assume que a estrutura não é um meio contínuo e que pode conter defeitos, causados pelo próprio fabrico ou induzidos durante o carregamento. Como possíveis defeitos destacam-se as fendas, delaminagens, descolagens, entre outros. Estes defeitos podem fazer com que as tensões e deformações existentes possam ser suscetíveis de dar início à sua propagação e causar a rotura dos componentes [16].

A Mecânica da Fratura surgiu com o intuito de colmatar a incapacidade da mecânica dos meios contínuos em solucionar certos problemas existentes nas estruturas, tais como pontos de descontinuidade de tensões que resultam em singularidade de tensões e de deformações. De facto a mecânica dos meios contínuos considera que a estrutura e o seu material são contínuos e que as tensões calculadas são singulares na extremidade na fenda. A Mecânica da Fratura tem sido aplicada, com sucesso, em muitos problemas de engenharia nos últimos anos. Muitos estudos que lidam com juntas adesivas usam a taxa de libertação de energia de deformação, e o respetivo valor crítico ou tenacidade à fratura [17] em vez de fatores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda se propaga numa interface ou perto dela. Contudo, a fratura de juntas

adesivas ocorre usualmente em modo misto por causa das variações das propriedades entre os diferentes materiais e do campo de tensões complexo. Como tal, é necessária a utilização de critérios de rotura em modo misto, que podem tomar uma forma idêntica aos critérios clássicos de rotura, embora deva ser introduzido o conceito de superfície ou envelope de fratura para lidar com a mixicidade do carregamento. A Mecânica da Fratura possui também algumas desvantagens na previsão da resistência de juntas adesivas, como a necessidade de definição prévia de uma pré-fenda, que por vezes não existe numa estrutura real [18].

Irwin e Kies [19] em 1954 e Westergaard [20] em 1939 definiram os três modos fundamentais de solitação de carga ou de carregamento, baseados nos três eixos principais do espaço tridimensional de tensão, nomeadamente Modo I: a) tração (*opening*); b) Modo II: corte (*sliding*) e c) Modo III: rasgamento (*tearing*), conforme mostra a Figura 16.

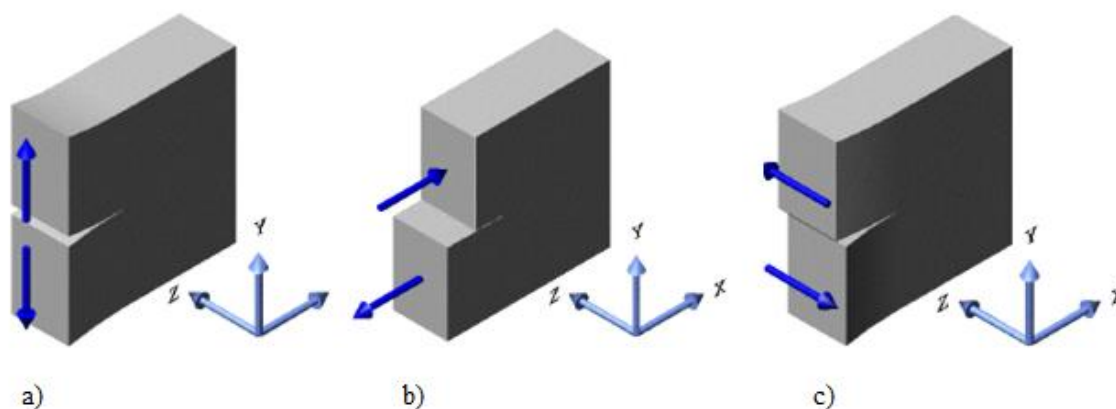


Figura 16 - Modos fundamentais de carregamento: a) Modo I: tração (*opening*); b) Modo II: corte (*sliding*) e c) Modo III: rasgamento (*tearing*)

Embora em materiais isotrópicos as fendas tendam a propagar-se em modo I, em materiais ortotrópicos e em juntas coladas, a propagação ocorre muitas vezes em modo misto (I + II).

### 2.3.1 Ensaio em tração (modo I)

O modo puro I (tração) caracteriza-se pela abertura da fenda na direção perpendicular ao seu plano, por efeito das tensões de tração nessa direção. É o modo mais crítico no que se refere à propagação da fenda. O ensaio DCB (Figura 17) é, hoje em dia, universalmente aceite para caracterização da fratura em modo I [21]. Este ensaio é normalizado para a medição do valor da energia crítica de fratura à tração ( $G_{IC}$ ) em juntas coladas pela norma ASTM D3433-99.

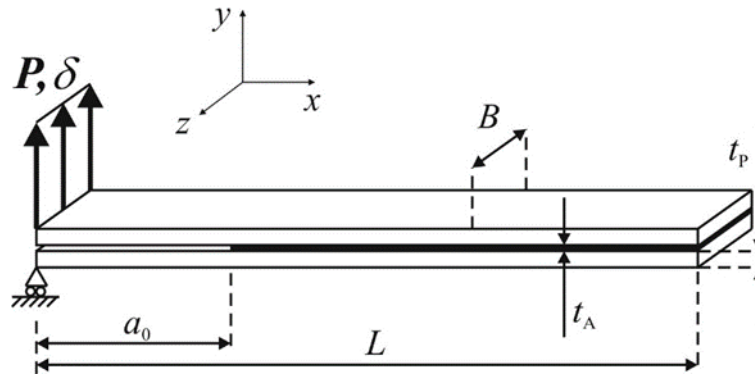


Figura 17 - Representação esquemática do ensaio DCB

Os provetes DCB são constituídos por dois braços de igual comprimento  $L$ , espessura constante substrato ( $t_p$ ) e largura do substrato ( $B$ ). No caso de juntas adesivas, o adesivo encontra-se entre os substratos e possui uma espessura de adesivo ( $t_A$ ) sendo considerado o comprimento de fenda inicial  $a_0$  desde a zona onde é aplicada a solitação até à extremidade da pré-fenda presente no adesivo. O ensaio consiste em solicitar os braços do provete em abertura a uma velocidade constante. Durante o ensaio e à medida que o provete é solicitado em abertura (modo I) são registados os valores de  $P$  e  $\delta$  e é medido o comprimento de fenda  $a$  em intervalos de tempo pré-estabelecidos. Existem vários métodos de obtenção de  $G_{IC}$ , nomeadamente métodos baseados na teoria das vigas (corrigida ou não), métodos baseados no comprimento de equivalente ou o integral- $J$  [22].

### 2.3.2 Ensaio em corte (modo II)

Existem vários tipos de ensaios para determinar  $G_{IIC}$  (Figura 18). Para caracterização à fratura em modo II de juntas coladas não existe qualquer norma. Os ensaios mais comuns são o ENF, ELS e 4ENF. 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 [23]. 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 [24]. O ensaio ENF é o mais utilizado para a caracterização de materiais à fratura em modo II, sobretudo devido à sua simplicidade [25].

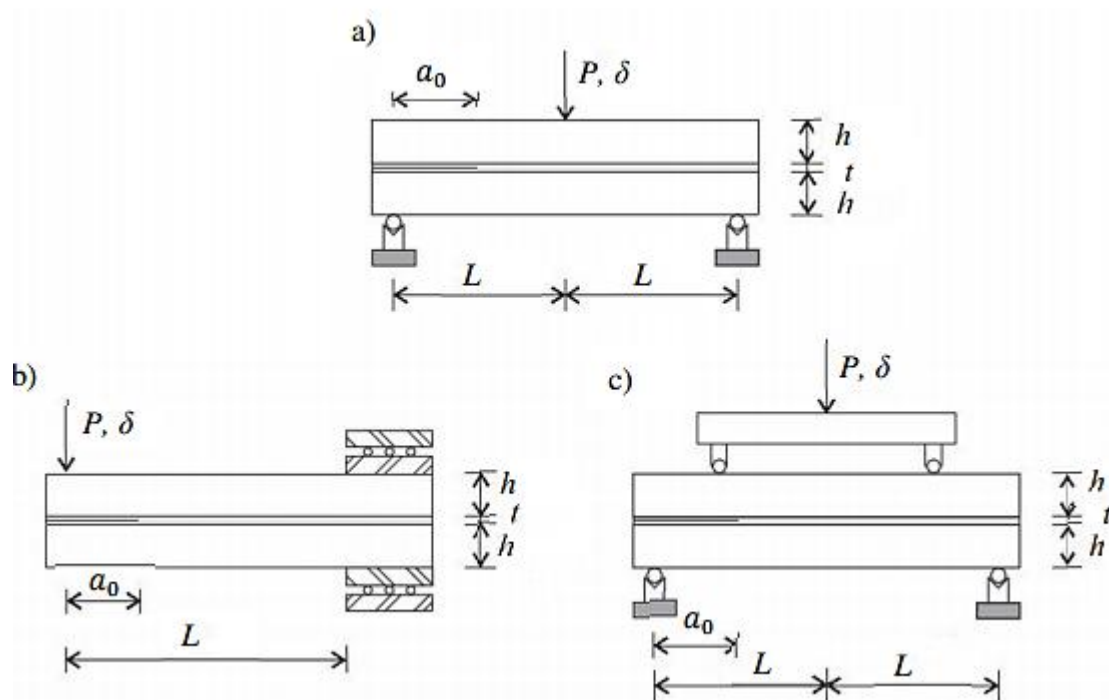


Figura 18 - Configurações de ensaio para Modo II: a) ENF, b) ELS e c) 4ENF

O ensaio ENF pode ser descrito como uma viga simplesmente apoiada nas extremidades e carregada a meia vão. A representação esquemática do ensaio é apresentada na Figura 19.

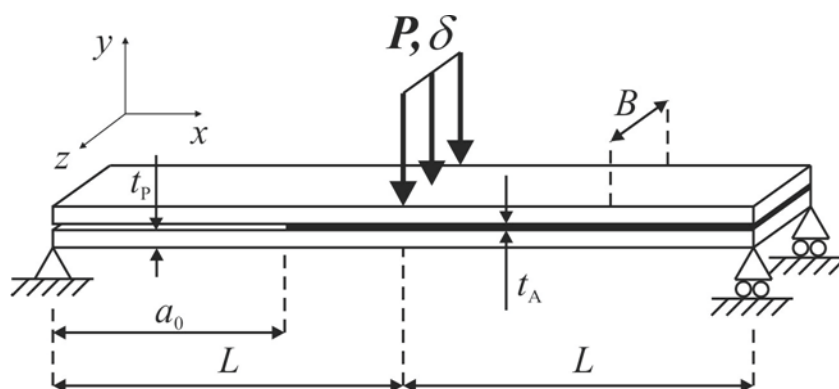


Figura 19 - Geometria do provete ENF

Nos ensaios ENF são empregues provetes dotados de  $a_0$ . A meio do vão do provete é aplicada uma força  $P$ , que provoca a variação do comprimento da fenda. As grandezas medidas durante o ensaio são  $P$  e  $a$ , além do deslocamento  $\delta$  do ponto de aplicação da força  $P$ . Para que a propagação da fenda seja estável, é necessário que o comprimento de fenda inicial seja pelo menos igual a 70% de  $L$  [26].

Devido ao tipo de solicitação aplicada, a fenda propaga-se sem separação dos aderentes, o que dificulta a correta medição de  $a$ . Uma vez que a fenda cresce sem abertura, não mostra uma clara

visualização da ponta da mesma. Isto é particularmente significativo, já que as técnicas clássicas de determinação de  $G_{IIC}$  geralmente necessitam da medição de  $a$  durante a propagação [27].

### 2.3.3 Ensaio em solicitação combinada (modo misto I + II)

Existem diversos ensaios para a caracterização do comportamento de juntas coladas em modo misto, embora nenhum deles esteja normalizado. Alguns autores como Russel e Street [28], Xu et al. [29] e Parvatareddy e Dillard [30] usaram o ensaio *Mixed-Mode Flexure* (MMF), cuja geometria é idêntica à do ensaio ENF. No entanto, no ensaio MMF, uma das extremidades do provete está apenas apoiada no braço superior (Figura 20), o que origina um modo de abertura (modo I) e também um modo de corte (modo II).

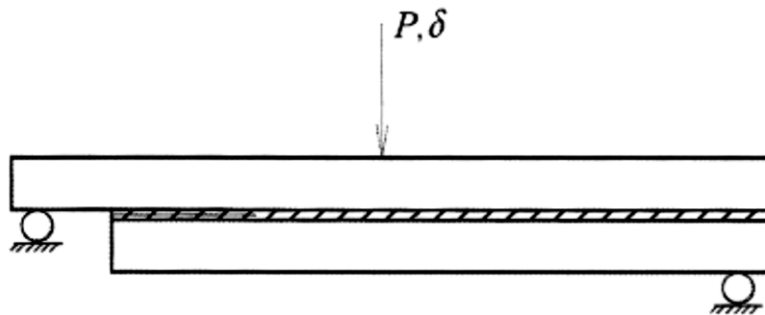


Figura 20 - Representação esquemática do ensaio MMF

Outra alternativa para caracterização em modo misto é o ensaio DCB assimétrico ou *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB). O ensaio ADCB é uma generalização do ensaio DCB para caracterização de materiais em modo misto, em que a diferença de espessuras dos braços do provete origina a combinação de solicitações (Figura 21).

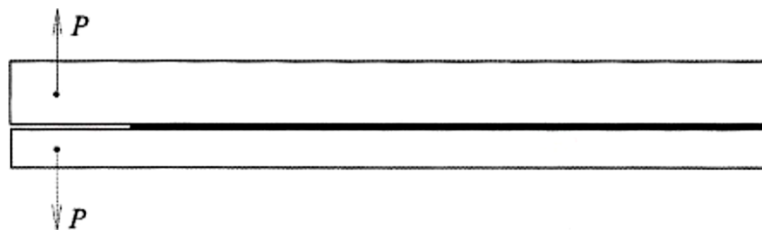


Figura 21 - Representação esquemática do ensaio ADCB

De referir que, nestes ensaios, a variação da relação entre modos requer alterações geométricas aos provetes. Para obviar a esta dificuldade, Pang [31] propôs o ensaio *Compact Mixed-Mode* (CMM) que, dependendo da orientação da solicitação relativamente ao provete, permite a obtenção de diferentes combinações de solicitações.

O ensaio MMB (*Mixed-Mode Bending*) é uma combinação dos ensaios DCB e ENF para caracterização das juntas em modo I e II, respetivamente (Figura 22). Este é o ensaio mais popular para determinar a tenacidade à fratura interlaminar de materiais compósitos monolíticos. Recentemente, tornou-se o método de ensaio padrão para este efeito, normalizado pela norma ASTM D6671-01. Este ensaio, inicialmente desenvolvido por Reeder e Crews [32], tem vindo a sofrer aperfeiçoamentos e já alguns autores o utilizaram no contexto de juntas coladas (Liu et al. [33] e Dillard e Singh [34]). O valor relativo das duas solicitações aplicadas ao provete determina o rácio de modo misto na extremidade da fenda. As duas solicitações podem ser aplicadas através de um braço submetido a uma única força  $P$ . A distância  $c$  define o valor relativo das duas solicitações no provete e determina o rácio de modo misto existente num dado ensaio.

Uma das vantagens deste tipo de ensaio está relacionada com a possibilidade de se poder testar diferentes rácios de modo misto sem ser necessário alterar a geometria dos provetes, bastando para tal variar o comprimento  $c$ . Verifica-se também que, para a maioria das configurações de modo misto, a propagação do dano é estável, embora a iniciação seja instável. Finalmente, refira-se também que a relação de modo misto se mantém praticamente constante durante a propagação da fenda [32].

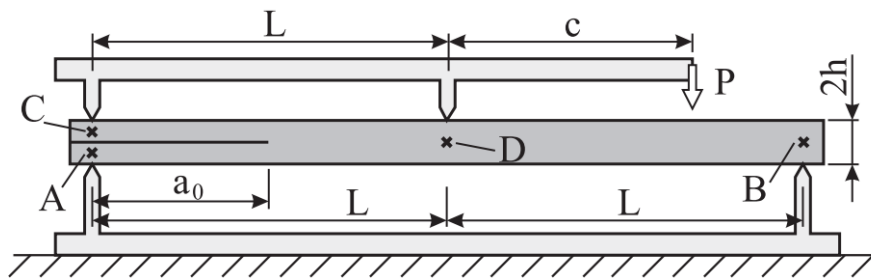


Figura 22 - Configuração esquemática do ensaio MMB [35]

## 2.4 Métodos para a determinação de $G_{IIC}$

A determinação do  $G_{IIC}$  pelo ensaio ENF pode-se dividir em três tipos de métodos: os que necessitam da medição do comprimento de fenda, os que se baseiam no comprimento de fenda equivalente ( $a_{eq}$ ) e o método do integral- $J$ .

### 2.4.1 Métodos dependentes da medição do comprimento de fenda

Os métodos CCM, CBT e DBT dependem da medição do comprimento da fenda durante a propagação. Enquanto o método CCM já provou ser bastante preciso, por razões distintas, em trabalhos anteriores verificou-se que o DBT e CBT podem apresentar discrepâncias relativamente ao valor correto [36]. Nos adesivos dúcteis, observa-se existência de uma Zona de Processo de Fratura (ZPF) significativa na frente da fenda devido a fenómenos como plasticidade e iniciação de micro fendas. Estes fenómenos dificultam a localização da extremidade da fenda durante o ensaio, o que pode levar a erros significativos na caracterização à fratura por estes métodos.

#### 2.4.1.1 Compliance Calibration Method

Os esquemas de redução de dados clássicos para obter  $G_{IIC}$  são geralmente baseados em teorias de calibração ou teorias de vigas. Pelo CCM, o valor de  $G_{IIC}$  é avaliado através da equação de Irwin-Kies [19]

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (1)$$

onde  $C = \delta/P$  é a flexibilidade do provete durante a propagação da fenda. Podem ser utilizados polinómios cúbicos ( $C = C_1 a^3 + C_0$ ) para ajustar as curvas  $C = f(a)$  [37], apesar do método por vezes apresentar problemas na obtenção da curva- $R$ , devido ao ajuste da derivada  $dC/da$ . Desta forma obtém-se a seguinte equação

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

#### 2.4.1.2 Direct Beam Theory

O método DBT baseia-se na teoria das vigas direta e considera os efeitos de corte dos aderentes, embora não leve em conta as correções do comprimento de fenda, ao contrário do CBT [38]. Este método usa a seguinte expressão para o cálculo de  $G_{IIC}$

$$G_{IIC} = \frac{9P\delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)}. \quad (3)$$

### 2.4.1.3 Corrected Beam Theory

Alternativamente aos dois métodos anteriormente descritos, pode ser usado o método CBT. Wang e Williams [39] definiram que  $G_{IIC}$  pode ser calculado pela seguinte expressão

$$G_{IIC} = \frac{9(a + 0,42\Delta_I)^2 P^2}{16b^2 E_x t_p^3}, \quad (4)$$

onde  $E_x$  representa o módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção  $xx$  e  $\Delta_I$  é a correção do comprimento da fenda em função da deformação de corte.  $\Delta_I$  é dado pela seguinte equação [36]

$$\Delta_I = t_p \sqrt{\frac{E_x}{11G_{xy}} \left[ 3 - 2 \left( \frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (5)$$

com

$$\Gamma = 1,18 \sqrt{\frac{E_x E_y}{G_{xy}}}. \quad (6)$$

$E_y$  é o módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção  $yy$  da espessura e  $G_{xy}$  o módulo de corte transversal dos aderentes.

## 2.4.2 Método baseados num comprimento de fenda equivalente

de Moura et al. [37] propõe o método CBBM para o ensaio ENF, permitindo a estimativa de  $G_{IIC}$  baseado no conceito de  $a_{eq}$  e possibilitando estimar  $G_{IIC}$  usando apenas a curva  $P-\delta$ . De facto, devido à forma como a carga é aplicada, a fenda tende a fechar durante a sua propagação o que pode impedir a visualização e localização correta da frente da mesma. Nos métodos apresentados até ao momento, não são considerados os efeitos da extensão da ZPF no valor de  $a$ . De modo a superar estas dificuldades, pode ser aplicado este método, baseado na  $a_{eq}$ , de modo a obter  $G_{IIC}$  sob carregamento puro em modo II em provetes ENF. Tal como para o ensaio DCB [37] o método também é baseado no conceito da flexibilidade de vigas e na teoria de vigas, sendo portanto adotada a mesma nomenclatura CBBM (*Compliance-Based Beam Method*).

Este método depende do valor de  $C$  durante o ensaio e tem como base o conceito de  $a_{eq}$  e a Teoria das Vigas de Timoshenko [36]. Sabe-se que a ZPF desenvolve-se imediatamente à frente da fenda devido à nucleação de micro fissuras através do adesivo e devido à sua plastificação. Este fenómeno dificulta a localização precisa da extremidade da fenda. A extensão desta zona é tanto maior quanto

mais dúctil for o adesivo. Esta zona é também demasiado importante para ser desprezada, uma vez que afeta a tenacidade medida do adesivo bem como a energia nele dissipada. Deve ser considerado o  $a_{eq}$  durante a propagação da fenda (Figura 23). Assim sendo, considera-se que

$$a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF} \quad (7)$$

O parâmetro  $\Delta$  é um fator de correção de  $a_0$ . Este parâmetro pode ser determinado experimentalmente ou numericamente utilizando diferentes comprimentos de fenda iniciais, de tal modo que para cada valor de  $a_0$  corresponde a  $C$ . Este procedimento permite definir uma regressão linear  $C^{1/3} = f(a_0)$  e definir  $\Delta$  pela intersecção da reta de ajuste com o eixo das abcissas (Figura 24).

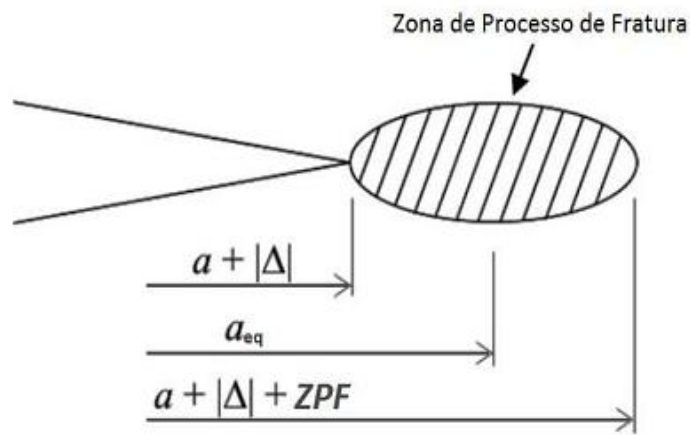


Figura 23 - Representação esquemática da ZPF e do conceito de  $a_{eq}$  [37]

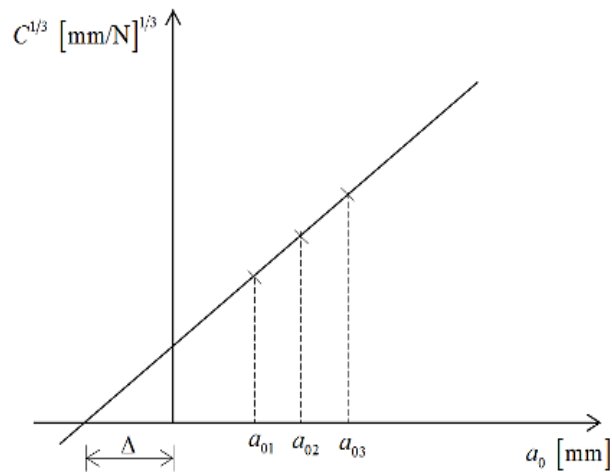


Figura 24 - Representação esquemática da obtenção do fator de correção do comprimento de fenda inicial [40]

Durante a propagação da fenda, a flexibilidade experimental deve incorporar não só o comprimento de fenda real  $a$ , como também o efeito da ZPF. Através do Teorema de Castigliano pode escrever-se

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_x B t^3} + \frac{3L}{10G_{xy} B t_p} \quad (8)$$

$E_x$  é obtido usando  $C_0$  e o comprimento e  $a_0$ ,

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8B t^3 C_{0\text{corr}}} \quad (9)$$

onde  $C_{0\text{corr}}$  é a flexibilidade inicial corrigida e é dada por:

$$C_{0\text{corr}} = C_0 - \frac{3L}{10G_{xy} B t_p} \quad (10)$$

Durante a propagação da fenda, é considerada uma correção ao comprimento de fenda real na expressão (8) para ter em conta a ZPF. Substituindo  $E_f$  da equação (9) e  $a_{\text{eq}}$  no lugar de  $E_x$  e  $a$ , respetivamente, na expressão (8), tem-se que

$$a_{\text{eq}} = a + \Delta a_{\text{ZPF}} = \left[ \frac{C_{\text{corr}}}{C_{0\text{corr}}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left( \frac{C_{\text{corr}}}{C_{0\text{corr}}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3}, \quad (11)$$

onde  $C_{\text{corr}}$  é a flexibilidade corrigida e é dada pela expressão (10) substituindo  $C_0$  por  $C$ . Usando os efeitos da ZPF que posteriormente serão incluídos na equação (12) no cálculo de  $G_{\text{IIC}}$ , o módulo de elasticidade equivalente é um valor calculado que depende da flexibilidade inicial  $C_0$  e do comprimento de fenda inicial ( $a_0$ ), evitando assim a influência da variabilidade dos substratos nos resultados.

O valor de  $G_{\text{IIC}}$  pode ser obtido a partir da expressão Irwin-Kies

$$G_{\text{IIC}} = \frac{9P^2 a_{\text{eq}}^2}{16B^2 E_f t_p^3} \quad (12)$$

Seguindo esta metodologia, a curva- $R$  em modo II é obtida em função de  $a_{\text{eq}}$  e a energia de fratura crítica  $G_{\text{IIC}}$  é obtida a partir do seu patamar. O método depende apenas da medição  $P$  e  $\delta$  durante o ensaio experimental. Assim, é superada a limitação associada à monitorização de  $a$ , uma vez que a fenda é um parâmetro calculado em vez de medido. Por outro lado, os adesivos dúcteis são caracterizados por uma ZPF extensa, que deve ser contabilizada, uma vez que a sua presença afeta o

comportamento de fratura. A parte ascendente inicial da curva- $R$ , normalmente obtida por este método [36], corresponde ao desenvolvimento da ZPF antes da propagação. Quando a ZPF está completamente desenvolvida, a fenda começa a propagar, e observa-se um patamar evidente na curva- $R$ . Este patamar define o valor de  $G_{IIc}$ .

### 2.4.3 Método baseado no integral- $J$

O integral- $J$  é um integral de linha ou de superfície que permite caracterizar o campo de tensões e deformações localizado na vizinhança de uma fenda. Considere-se um corpo homogêneo, de material elástico linear ou não (Figura 25), submetido a um campo de deformações bidimensionais onde todas as tensões dependem das coordenadas cartesianas  $x$  e  $y$ . O método do integral- $J$  é baseado na avaliação de  $J$  ao longo de dois caminhos alternativos: um interno e um caminho exterior. O integral- $J$  é um integral de linha em torno da ponta da fenda, invariante para qualquer percurso utilizado desde que se inicie na face inferior e termine na face superior da fenda, conforme ilustrado na Figura 26. Este método é adequado para cargas monótonicas, como ocorre no ensaio ENF [41]. O conceito proposto inicialmente por Rice [42] tem um tratamento essencialmente mecânico, apoiado numa forte base matemática, desconsiderando aspetos micro estruturais da fratura.

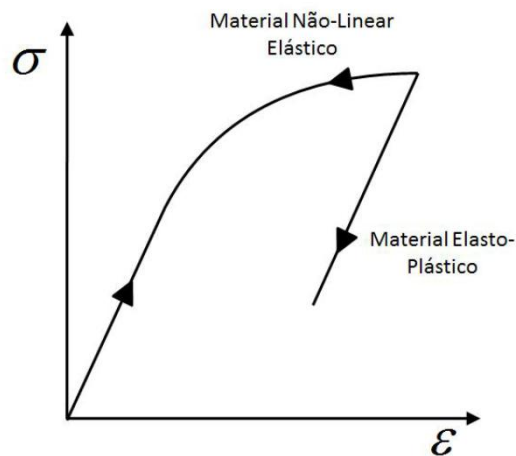


Figura 25 - Comparação entre materiais elásticos não lineares e materiais elasto-plásticos

Na literatura podem encontrar-se generalizações do integral de contorno a integrais de superfície. Em situações tridimensionais, o cálculo de valores pontuais de  $J$  na ausência de forças de corpo consiste numa integração sobre uma superfície fechada, definida à volta de um ponto particular da frente de fenda. Esta superfície é, em geral, difícil de definir e a integração nessa fase é difícil de realizar numa configuração tridimensional da fenda discretizada em elementos finitos. Pode-se assim dizer que a forma tridimensional do integral  $J$  é mais apropriada para a determinação de uma taxa de libertação de energia global do que para obter valores pontuais ao longo da fenda. O integral  $J$  é

bastante aceite na avaliação da rotura em condições elasto-plásticas. De facto, é um método particularmente atrativo porque é simples de usar, é rápido de obter uma solução em termos computacionais, e apresenta resultados precisos, mesmo com malhas grosseiras.

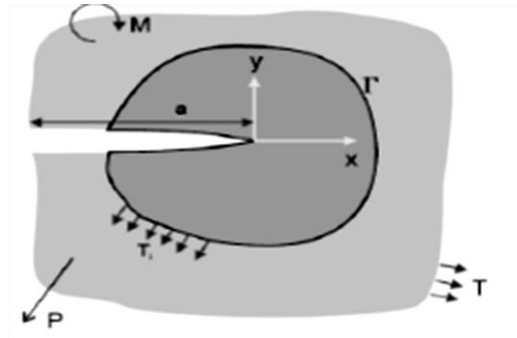


Figura 26 - Nomenclatura utilizada no cálculo do integral - $J$

Andersson e Stigh (2004) obtiveram as relações tração-deformação que são determinadas por deformação de casca pura. A taxa de liberação de energia e a energia de fratura estão intimamente relacionadas com a lei constitutiva. Isto é mostrado pelo uso da expressão geral do integral- $J$  (Rice [42])

$$J = \int_C (U dy - T \times \frac{du}{dx} dc), \quad (13)$$

onde  $C$  define o caminho em sentido anti-horário em torno da ponta da fenda,  $U$  é a densidade de energia de deformação do material,  $T$  é o vetor de tração, e  $u$  é o campo de deformação.

Stigh et al. [43], em trabalho realizado baseado no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que o integral- $J$  pode ser calculado ao longo de um caminho arbitrário que contorna a fenda. Para a fratura em modo II pelo ensaio ENF, está disponível uma formulação de cálculo de  $G_{II}$  pelo método do integral- $J$  (Zhu et al. [18]). O valor do integral- $J$  é dado por

$$G_{II} = \frac{9 (P_u a)^2}{16 E_x t_p^3} + \frac{3 P_u \delta_s}{8 t_p}, \quad (14)$$

em que  $P_u$  representa a carga por unidade de largura,  $E_x$  o módulo de Young dos aderentes e  $\delta_s$  entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda. O primeiro termo corresponde à solução da MEFE (Mecânica da Fratura Linear Elástica) e o segundo termo refere-se à influência de uma camada de adesivo flexível na avaliação de  $G_{II}$ . A exatidão desta expressão está dependente do comportamento elástico linear dos aderentes, que precisa de ser verificado, quer durante o projeto da

geometria dos provetes quer após cada teste ser realizado. Ao avaliar o integral- $J$  em torno da região do dano ou zona de processo de fratura da camada adesiva, é possível escrever

$$G_{II} = \int_0^{\delta_{sc}} t_s(\delta_s) d\delta_s, \quad (15)$$

sendo  $\delta_{sc}$  o deslocamento de rotura ao corte na extremidade da fenda. A expressão (15) dá uma relação direta entre o estado de tensão na ponta da fenda e  $G_{II}$ . A evolução da  $G_{II}$  com  $\delta_s$  é a seguinte: antes da propagação da fenda,  $G_{II}$  aumenta até atingir um patamar na curva  $G_{II}-\delta_s$ . Este valor de patamar corresponde ao valor de  $G_{IIC}$ .

A lei coesiva ao corte ( $t_s-\delta_s$ ) é obtida diferenciação da equação anterior, o que pode ser efetuado pelo ajuste de funções polinomiais ou séries de Prony à curva  $G_{II}-\delta_s$  e respetiva derivada. Assim sendo obtém-se

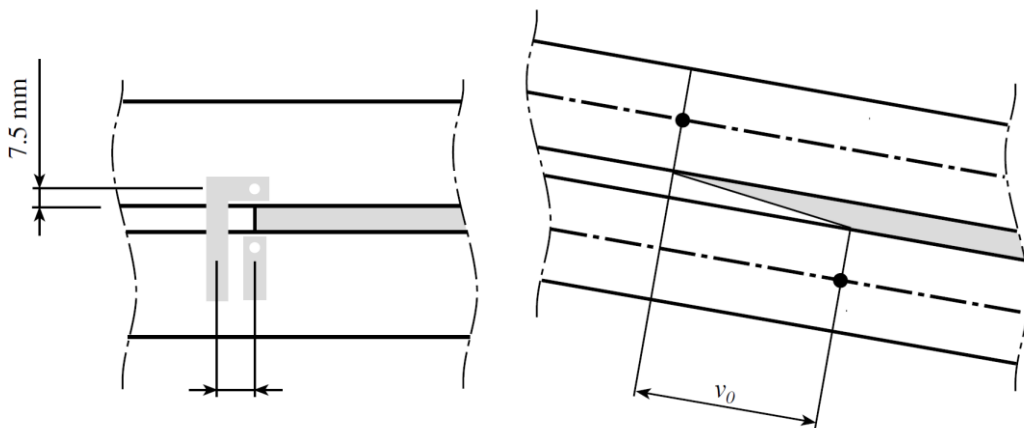
$$t_s(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (16)$$

Devido aos efeitos de compressão e fricção nas faces da fenda do ensaio ENF, que podem comprometer a validade das leis coesivas obtidas, alguns autores [44] consideraram antes o ensaio Arcan para obter a lei coesiva ao corte de juntas adesivas. Assim sendo, o procedimento do ensaio consiste em medir a relação de  $P$ ,  $a$  e  $\delta_s$ .

#### 2.4.3.1 Utilização de sensores mecânicos para obtenção dos parâmetros

Pela formulação apresentada no capítulo anterior, é necessária a medição de  $\delta_s$  para a obtenção de  $G_{IIC}$ . Uma possibilidade é a medição deste parâmetro com um transdutor diferencial de voltagem linear (LVDT) montado entre apoios rígidos, um fixo para cada aderente, para proporcionar a medição em tempo real de  $\delta_s$  (Figura 27).

Leffler et al. [45] utilizou um método alternativo ao LVDT para obter  $\delta_s$ , que consiste na utilização de extensometria. É colocado o extensómetro ligado a duas placas, que são fixas em cada aderente numa das faces laterais do provete. O extensómetro é colocado acima ou abaixo do início da fenda, como é mostrado na Figura 28. Foi também utilizada uma camara acoplada a um microscópio na face lateral oposta à colocação do extensómetro para filmagem da extremidade da fenda. Como resultado da aplicação deste método obteve-se uma evolução exponencialmente crescente de  $\delta_s$  nos ensaios ENF.

Figura 27 - LVDT usado para medir  $\delta_s$  [46]Figura 28 - Representação esquemática da medição de  $\delta_s$  [45]

Existem outros métodos para a medição de  $G_{IIC}$  pelo Integral- $J$ , nomeadamente o desenvolvido por Stigh et al. [46], em que é necessária a medição das rotações do provete em três pontos, nomeadamente nos pontos de apoio e no ponto de carregamento. Esta abordagem admite que os aderentes deformem plasticamente, o que permite que o tamanho dos provetes seja mais reduzido, mas requiere a medição adicional da rotação em três locais nas amostras durante o ensaio. Para este efeito, são colocadas três varetas sob a amostra nos pontos de apoio e carregamento, como está ilustrado na Figura 29. É depois usado um sistema de imagem para medir as rotações, em que são tiradas fotos em intervalos regulares de tempo durante o ensaio. As rotações das varetas são obtidas através de um programa específico para este ensaio, desenvolvido em Matlab<sup>®</sup>. Isto é feito identificando as posições horizontais das varetas verticais em duas posições diferentes.

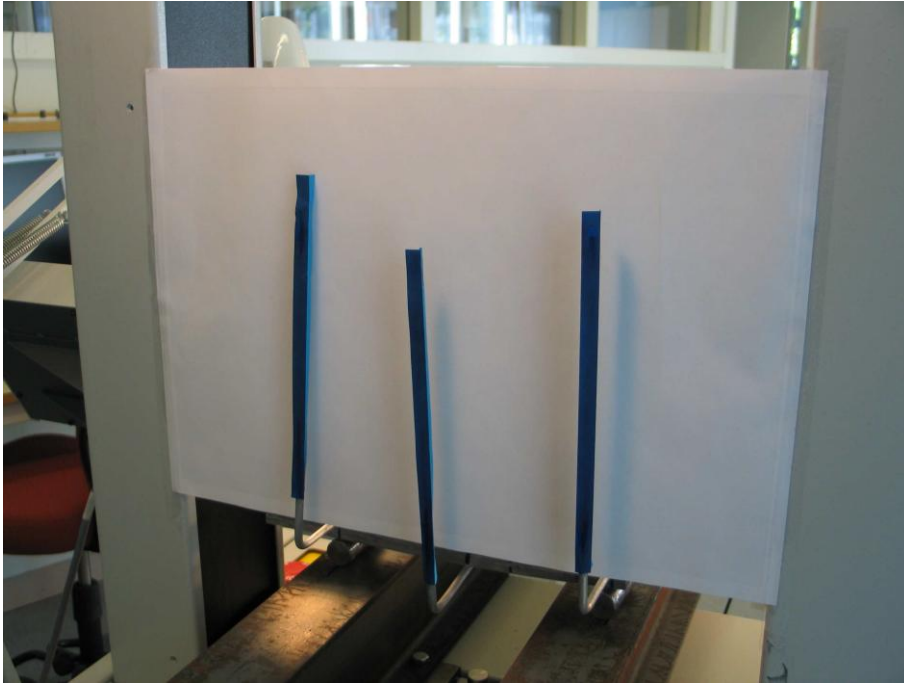


Figura 29 - Exemplo da colocação de varetas em três pontos para medir a rotação [46]

#### 2.4.3.2 Utilização de métodos óticos para obtenção dos parâmetros

A medição ótica de deslocamentos e deformações de materiais sujeitos a diferentes tipos de esforços tem sido bastante utilizada na avaliação das propriedades dos materiais, na determinação da sua resistência, e na análise de parâmetros relacionados com a fratura dos mesmos. Já se estudaram várias técnicas óticas como a interferometria de Moiré, a holografia e a interferometria *spleckle*. A evolução nos últimos anos de técnicas de CDI com recurso à computação permitiu o acesso a técnicas de medição dos campos cinemáticos (campo dos deslocamentos e das deformações).

Um dos grandes inconvenientes das várias técnicas de interferometria prende-se com o facto de a superfície a analisar sofrer deslocamentos elevados durante a realização de ensaios, levando assim a uma descorrelação de imagens obtidas [47]. Técnicas óticas como a CDI não possuem esse tipo de limitações. Esta técnica foi inicialmente desenvolvida por Sutton et al. [48] e Bruck et al. [49]. A CDI é um método ótico de medição que utiliza um algoritmo de correlação matemática para calcular os deslocamentos das superfícies exteriores dos objetos sujeitos a cargas mecânicas. A técnica consiste em capturar imagens consecutivas através do uso de uma câmara digital (Figura 30), durante o período de deformação do material [25].

Para a determinação dos parâmetros é necessário que durante a realização do ensaio seja fotografada a zona de interesse dos provetes com uma câmara digital em intervalos constantes de tempo (por exemplo 5 em 5 segundos). As imagens devem ter uma boa resolução de forma para possibilitar o

seu tratamento através da CDI (a resolução da imagem deve conduzir no mínimo cerca de 4 pixels por milímetro). A análise das imagens tiradas durante o teste é realizada por um *software* através de algoritmos de processamento de imagem baseados na comparação com a imagem padrão. No âmbito da medição, por CDI, da posição da fenda durante a propagação, observa-se que a fenda cresce da esquerda para a direita normalmente na direção horizontal como um caminho escuro e fino numa área pintada de branco. A fenda é assim visível como uma variação de intensidade, o que resulta numa imagem binária, facilitando a detecção da extremidade da fenda por parte do *software*.

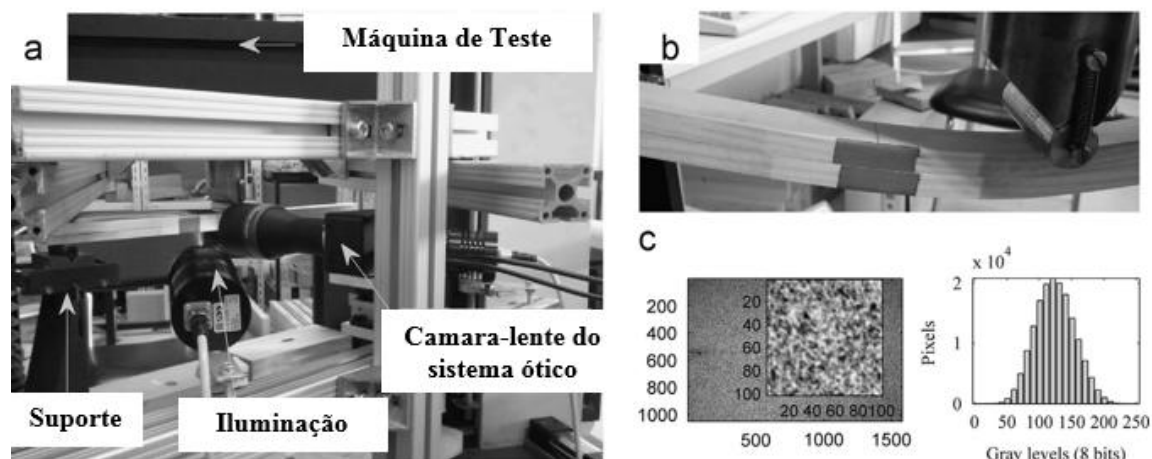


Figura 30 - a) Ilustração do ensaio ENF; b) deformação do provete em modo II e c) configuração ampliada normalmente utilizada para CDI [25]

A CDI tem vindo a ser largamente aplicada em diversos campos [50]. Recentemente, diversas metodologias têm sido desenvolvidas utilizando o método de CDI para estudar e caracterizar o comportamento à fratura de diversos materiais [51].

No trabalho de Campilho et al. [22], estudou-se o comportamento nas juntas adesivas entre aderentes de alumínio, considerando diferentes valores de espessura de adesivo. O trabalho experimental consistiu na definição de  $G_{IC}$  utilizando um método convencional, CBBM, e o integral- $J$ . Na abordagem do Integral- $J$  foi utilizado um método ótico durante o teste para o cálculo de  $\delta_s$  e rotação dos aderentes na extremidade da fenda ( $\theta$ ). O método ótico descrito no trabalho é uma melhoria do um trabalho anterior de Campilho et al. [52]. Para calcular os parâmetros de  $\delta_s$  identificou-se oito pontos (Figura 31), com os pontos entre  $p_1$  e  $p_6$  impressos com uma cor distinta (embora não seja perceptível na Figura 31). Usando a localização dos pontos na primeira imagem do ensaio os pontos das fotos a seguir são identificados automaticamente utilizando um algoritmo de computador implementado em Matlab®.

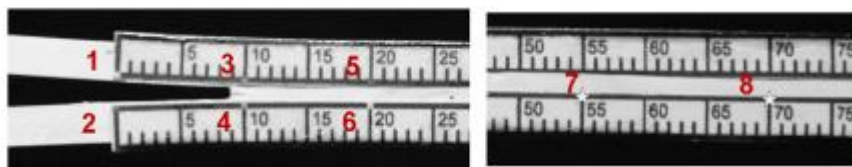


Figura 31 - Ilustração dos pontos recolhidos pelo método ótico para obter  $\delta_s$

Como resultado, verificou-se que os dois métodos de cálculo de  $G_{IIC}$  apresentam boa concordância entre eles, embora Integral- $J$  apresente resultados ligeiramente superiores. A diferença de  $G_{IC}$  foi maior para os valores menores de espessura de adesivo.

## 2.5 Elementos coesivos

A Mecânica da Fratura e os MDC têm sido objeto da atenção de vários investigadores pelas potencialidades demonstradas na avaliação da resistência mecânica de juntas coladas [53]. A taxa crítica de libertação de energia é o parâmetro mais relevante nos MDC, e as situações de carregamento mais estudadas são as de modo I e modo II. Os MDC combinam na sua formulação critérios de Resistência dos Materiais e da Mecânica da Fratura para prever o comportamento das estruturas [54]. Uma das vantagens principais destes modelos está relacionada com a sua capacidade para simular a iniciação e o crescimento não-auto-semelhante do dano. Não é necessária a existência de uma fenda inicial, e a propagação do dano ocorre sem a intervenção do utilizador. Estes modelos não dependem de uma fenda inicial pré-definida, ao contrário das abordagens convencionais pela Mecânica de Fratura.

Normalmente, usam-se critérios baseados em tensões e na mecânica da fratura para simular o início e crescimento do dano, respetivamente. Os modelos de dano coesivos são baseados em elementos de mola [55] ou elementos finitos de interface [56], ligando elementos sólidos bidimensionais ou tridimensionais. Estes elementos são colocados nos planos mais propícios à iniciação e propagação do dano que, em muitas estruturas, podem ser difíceis de identificar. No entanto, uma característica importante das ligações adesivas é que a propagação do dano é restrita a planos bem definidos, correspondentes a regiões perto ou nas interfaces entre o adesivo e os aderentes, ou mesmo no interior do adesivo, minorando assim esta limitação dos MDC. Estes modelos baseiam-se, geralmente, numa relação de amaciamento entre as tensões e os deslocamentos relativos entre as faces da fenda, simulando-se assim uma degradação gradual das propriedades dos materiais. A Figura 32 apresenta o MDC triangular (formulação em modo puro e modo misto) disponível no ABAQUS®. A forma destas leis de amaciamento também pode ser adaptada ao comportamento do material ou interface que se está a simular. Este princípio também pode ser aplicado à plasticidade da camada de adesivo, que pode ser simulada com leis trapezoidais [53]. As áreas debaixo de cada lei coesiva, em cada

modo, são igualadas à taxa crítica de libertação de energia de deformação do adesivo ou interface no respetivo modo (I ou II). Em modo puro, a propagação de dano num determinado ponto de integração ocorre quando as tensões forem libertadas na respetiva lei de tração-separação. Em modo misto, são muitas vezes usados critérios energéticos para combinar os modos puros I e II (análises bidimensionais) ou I, II e III (análises tridimensionais), simulando assim o comportamento típico de modo misto inerente a estas juntas. Com esta metodologia, é possível obter a curva  $P-\delta$  até à rotura e o modo de rotura respetivo.

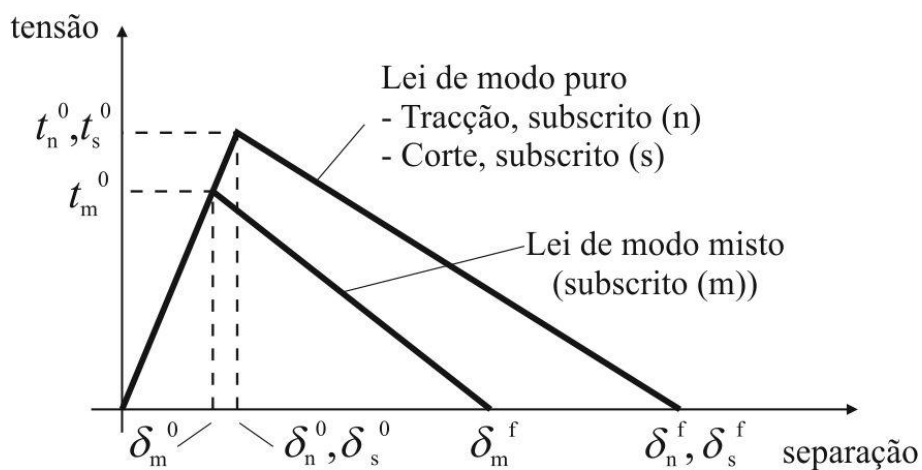


Figura 32 - MDC triangular (formulação em modo puro e modo misto)

# 3 Trabalho Experimental

Neste trabalho utilizaram-se os dados experimentais de Azevedo [8] relativos a ensaios ENF com 3 tipos de adesivos. Inicialmente, descrevem-se os passos realizados do trabalho experimental referido. Toda esta componente experimental foi realizada nas instalações do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). O trabalho da presente tese consistiu na utilização das curvas  $P-\delta$  e imagens fotográficas para efetuar todo o tratamento dos dados conducente à estimação do valor de  $G_{IIC}$  para cada provete e trabalho subsequente no âmbito da determinação de  $G_{IIC}$  e leis coesivas ao corte pelo integral- $J$ .

## 3.1 Materiais utilizados

### 3.1.1 Substratos

Os substratos utilizados na realização dos provetes ENF consistem na liga de alumínio 6082 T651, que é uma liga da série 6000, com 82% de alumínio; e magnésio e silício com principais elementos de liga. A Tabela 2 e Tabela 3 apresentam a composição química e propriedades mecânicas desta liga de alumínio, respetivamente, conforme especificado pelo fabricante.

Tabela 2 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651

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

Tabela 3 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [57]

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

A Figura 33 representa as curvas tensão-deformação à tração ( $\sigma$ - $\epsilon$ ) desta liga de alumínio à tração obtidas no trabalho de Campilho et al. [58], de acordo com a norma ASTM-E8M-04 [57]. Foram registadas as seguintes propriedades:

- Módulo de Young ( $E$ ):  $70,07 \pm 0,83$  GPa;
- Tensão de cedência ( $\sigma_y$ ):  $261,67 \pm 7,65$  MPa;
- Tensão de rotura ( $\sigma_f$ ):  $324,00 \pm 0,16$  MPa;
- Deformação de rotura à tração ( $\epsilon_f$ ):  $21,70 \pm 4,24\%$ .

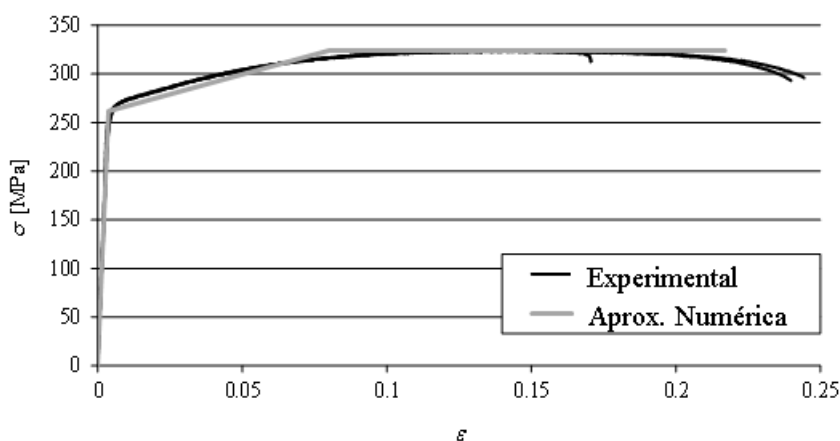


Figura 33 - Curvas  $\sigma$ - $\epsilon$  da liga de alumínio AW 6082-T651 [53].

### 3.1.2 Adesivos

Os adesivos utilizados nos ensaios já foram testados em trabalhos anteriores (Neto et al. [59], Campilho et al. [41] e Faneco [60]). As propriedades mecânicas mais relevantes estão indicadas na Tabela 4. Os adesivos selecionados são todos eles bi-componente (resina e endurecedor), dois deles epóxicos, o Araldite® AV138 e 2015, e um poliuretano, o SikaForce® 7752. Estes adesivos apresentam uma viscosidade baixa, o que facilita a aplicação dos mesmos, enquanto a forma bi-componente é vantajosa em relação à de filme na medida que permite flexibilidade na escolha de  $t_A$ .

Tabela 4 - Propriedades elásticas e plásticas dos adesivos [59, 41, 60]

Propriedades	AV138	2015	7752
Módulo de Young, $E$ [GPa]	4,89±0,81	1,85±0,21	0,49±0,09
Coefficiente de Poisson, $\nu$	0,35 <sup>a</sup>	0,33 <sup>a</sup>	0,30 <sup>a</sup>
Tensão de cedência à tração, $\sigma_y$ [MPa]	36,49±2,47	12,63±0,61	3,24±0,48
Tensão de rotura à tração, $\sigma_f$ [MPa]	39,45±3,18	21,63±1,61	11,48±0,25
Deformação de rotura à tração, $\varepsilon_f$ [%]	1,21±0,10	4,77±0,15	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, $G$ [GPa]	1,56±0,01	0,56±0,21	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte, $\tau_y$ [MPa]	25,1±0,33	14,6±1,3	5,16±1,14
Tensão de rotura ao corte, $\tau_f$ [MPa]	30,2±0,40	17,9±1,8	10,17±0,64
Deformação de rotura ao corte, $\gamma_f$ [%]	7,8±0,7	43,9±3,4	54,82±6,38
Tenacidade à tração, $G_{IC}$ [N/mm]	0,20 <sup>b</sup>	0,43±0,02	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, $G_{IIC}$ [N/mm]	0,38 <sup>b</sup>	4,70±0,34	5,41±0,47
<sup>a</sup> Dados do fabricante			
<sup>b</sup> Valor estimados no trabalho Neto et al. [59]			

### 3.1.2.1 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 (Figura 34) com o endurecedor HV998 é um adesivo do fabricante *Huntsman Advanced Materials* considerado estrutural de base epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentando-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis, excelente resistência química e resistente a temperaturas até aos 120°C.

O Araldite® AV138, quando combinado nas proporções corretas, descreve-se como um adesivo epóxido frágil mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [41]. A Figura 35 apresenta curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  típicas dos provetes ensaiados à tração, obtidas experimentalmente no trabalho de Campilho et al. [41].



Figura 34 - Adesivo epóxido Araldite® AV138/HV998

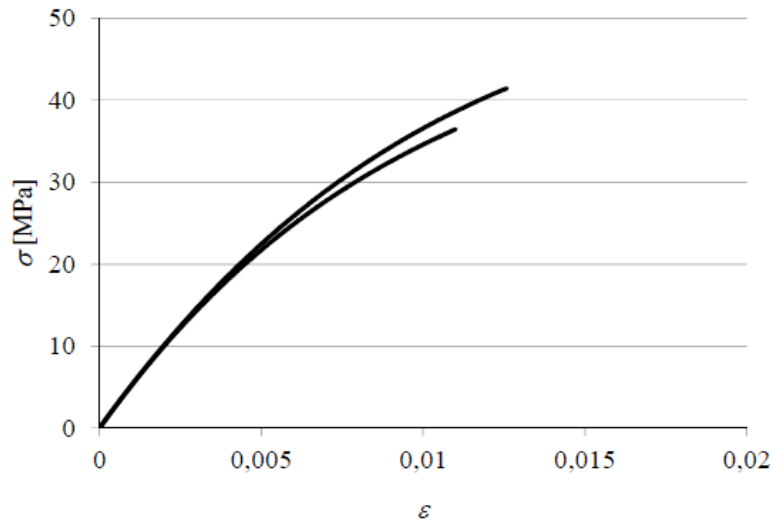


Figura 35 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [41]

### 3.1.2.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 (Figura 36) é um adesivo estrutural do fabricante *Huntsman Advanced Materials* de base epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentando-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa contração e uma alta resistência ao corte e clivagem, apresentando uma ductilidade moderada e alta resistência. É bastante utilizado na ligação de substratos metálicos e compósitos. A sua aplicação é feita com uma pistola manual e bico de deposição que força a circulação dos componentes em iguais quantidades através de um bico que promove a sua mistura. As curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 37 [41].



Figura 36 - Formato comercial do adesivo Araldite® 2015 de 50 ml e pistola de aplicação

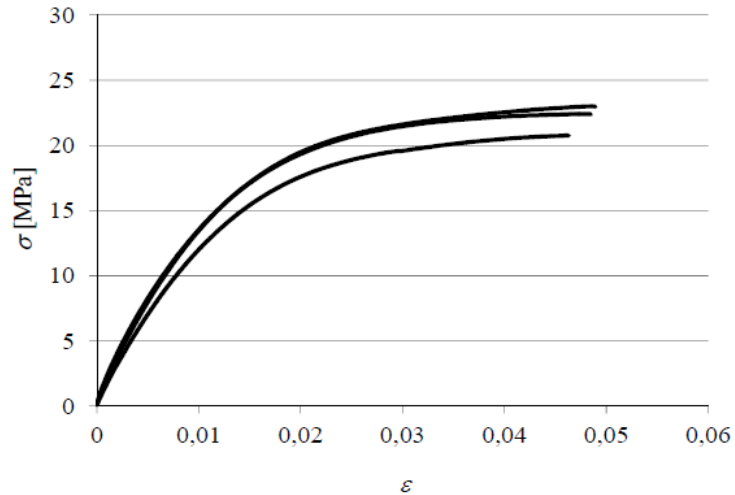


Figura 37 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [41]

### 3.1.2.3 Sikaforce® 7752

O SikaForce® 7752 L60 (VP) é um adesivo poliuretano estrutural tixotrópico de dois componentes, formado por uma resina polioli com cargas e endurecedor de base isocianato, com baixa emissão de gases e perdas voláteis, e com boa resistência a altas temperaturas.



Figura 38 - Formato comercial do Adesivo SikaForce® 7752 L60

O SikaForce® 7752 L60 (Figura 38) é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, grande resistência ao impacto e boa flexibilidade a baixas temperaturas. O adesivo SikaForce® 7752 L60 é bastante dúctil, e encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. As curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  dos provetes maciços ensaiados à tração são dadas na Figura 39 [60].

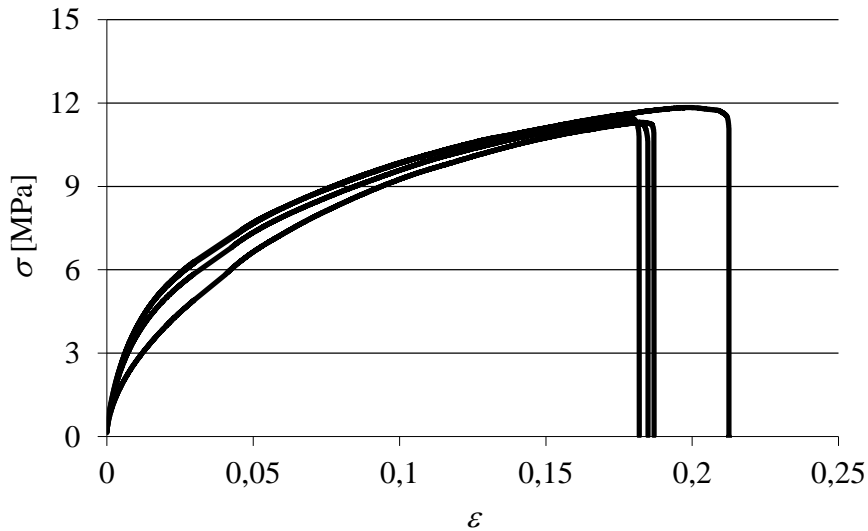


Figura 39 - Curvas  $\sigma$ - $\varepsilon$  de provetes maciços do adesivo SikaForce<sup>®</sup> 7752 [60]

### 3.1.3 Geometria dos provetes ENF

Os provetes para os ensaios ENF foram produzidos seguindo a geometria indicada na Figura 40. Foram fabricadas 3 séries de 8 provetes, variando o tipo de adesivo utilizado (Araldite<sup>®</sup> AV138, Araldite<sup>®</sup> 2015 e SikaForce<sup>®</sup> 7752).

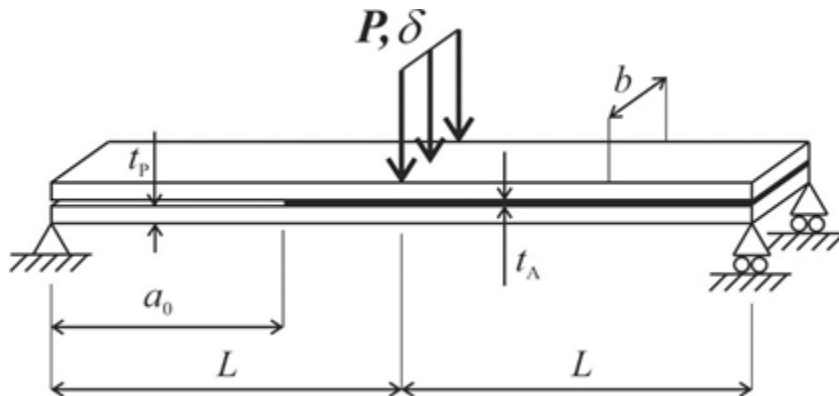


Figura 40 - Dimensões dos provetes para o ensaio ENF

## 3.2 Fabrico dos provetes ENF

Para o fabrico dos provetes foram seguidos os passos que se descrevem de seguida [8]. O trabalho experimental iniciou-se com o fabrico de 24 provetes com a geometria ENF, 8 com cada adesivo. Os substratos de alumínio 6082 T651 utilizados nos 24 provetes de ensaios foram obtidos de chapa de

3 mm de espessura, adquirida em tiras de  $25 \pm 1$  mm de largura. Foram cortados 48 substratos com um comprimento de  $230 \pm 0,5$  mm (Tabela 5).

Tabela 5 - Controlo dimensional dos substratos de alumínio (mm)

Comprimento dos substratos	$230 \pm 0,5$
Largura dos substratos	$25 \pm 0,05$
Espessura dos substratos	$3 \pm 0,5$

Iniciou-se a preparação das superfícies através de decapagem mecânica por projeção de partículas utilizando uma granalhadora (com granalha de alumina), como está representado na Figura 41 e Figura 42.



Figura 41 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S [8]

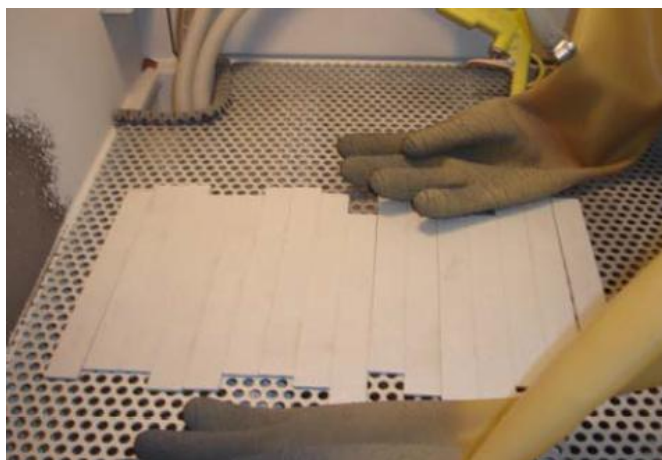


Figura 42 - Granalhagem mecânica dos substratos a seco [8]

Foi feita a limpeza de todas as superfícies recorrendo a folhas de papel embebidas em acetona, para garantir a remoção total de partículas soltas. Este é um passo crucial na união adesiva. Por inspeção visual averiguou-se a eficácia da limpeza pela presença de brancura no papel utilizado. Nesta fase, deve-se ter especial atenção ao contacto com as mãos nas superfícies limpas. A Figura 43 mostra a técnica escolhida para garantir uma espessura de adesivo constante e a obtenção da pré-fenda inicial, que consistiu na utilização de fitas de aço calibradas para a produção dos calços.

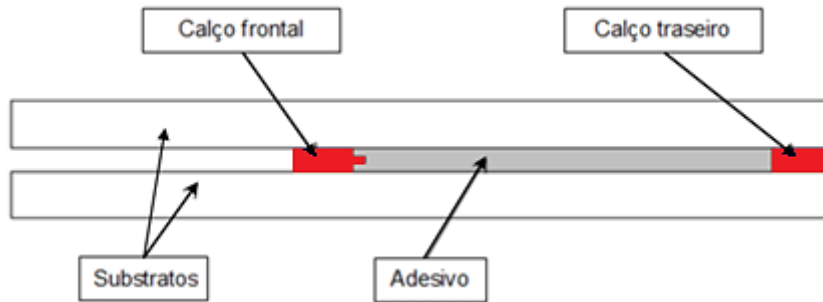


Figura 43 - Representação esquemática da localização dos calços calibrados [8]

Na produção dos calços traseiros foi utilizada uma fita de aço calibrado de 0,2 mm de espessura. Na produção do calço frontal foi utilizado o método proposto por Lee et al. [61] que consiste em fabricar um calço composto por uma lâmina de 0,1 mm de espessura intercalado por duas fitas de aço calibrado de 0,05 mm de espessura, com a lâmina ligeiramente adiantada com o objetivo de criar uma pré-fenda no adesivo (Figura 44).



Figura 44 - Calço frontal na posição da pré-fenda [8]

### 3.2.1 Colagem dos provetes

Efetua-se a aplicação do adesivo sobre um dos substratos de cada provete. No caso do Araldite® 2015 é utilizada uma pistola manual que pressiona a resina e o endurecedor de modo a que estes sejam expelidos por um bico de mistura, permitindo assim regular a deposição do adesivo no provete. A deposição do adesivo foi efetuada sob a forma de linhas ao longo do comprimento do provete, utilizando um processo em "zigue-zague" (Figura 45). No caso dos adesivos Araldite® AV138 e SikaForce® 7752, a deposição foi efetuada manualmente com auxílio de espátula, após mistura de dois componentes, cuja dosagem relativa foi obtida por pesagem em balança digital.

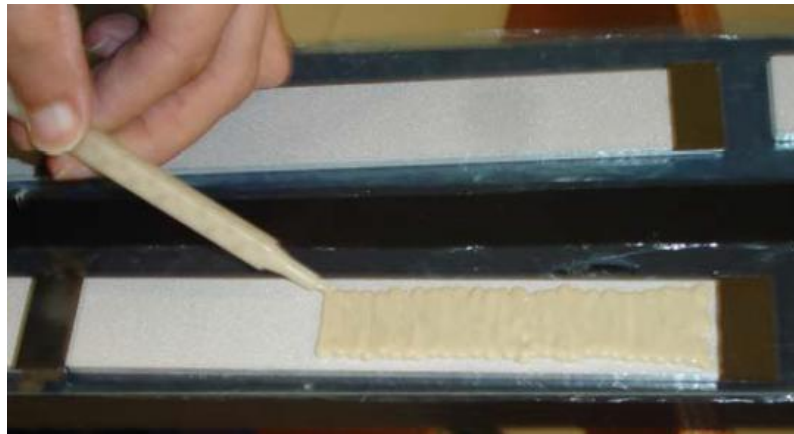


Figura 45 - Aplicação de adesivo, método "zigue-zague" [8]

O processo de cura decorre à temperatura ambiente, com a temperatura a rondar os 20°C, e com os substratos pressionados por aplicação de grampos para garantir a espessura desejada do adesivo (Figura 46). Realizou-se a medição do valor da pré-fenda antes do ensaio.



Figura 46 - Processo de posicionamento durante a cura [8]

### 3.2.2 Preparação dos provetes para ensaio

Após a cura e com auxílio de um alicate, foram removidos os calços dos provetes bem como os excessos de adesivo dos bordos, utilizando uma mó em pedra (Figura 47).



Figura 47 - Limpeza dos bordos dos provetes [8]

Procedeu-se à pintura com tinta de corretor de uma das faces laterais do provete, incidindo sobre a linha de adesivo. Seguidamente, provocou-se a iniciação da propagação da fenda de forma manual, forçando a separação dos substratos de forma cuidadosa, intercalando entre substratos uma ferramenta pontiaguda e sem causar dano na junta, ao mesmo tempo que se monitoriza a extremidade da fenda por intermédio de um microscópio ótico, até que seja perceptível a propagação da fenda. A propagação do início de fenda tem como objetivo evitar o aumento artificial do valor medido de  $G_{IIC}$  no início da propagação da fenda, induzido pelo raio da lâmina, e identificação da extremidade de fenda para aplicação da escala que vai ser criada durante o ensaio para monitorização do valor de  $a$ . A propagação manual da fenda não deve exceder 3 a 4 mm.

Seguiu-se a propagação das escalas para avaliação quantitativa da propagação da fenda. A escala colada no substrato superior deve ficar rigorosamente alinhada pela escala do substrato inferior e ambas afastadas minimamente da linha do adesivo, para que estas não obstruam a visualização da progressão da fenda durante a realização do ensaio. Para posicionamento da escala, e para medição pelo método ótico, considerou-se que a extremidade da fenda coincide com os 10 mm da escala (Figura 48). Para obtenção do comprimento de fenda durante o ensaio, considera-se que este é igual a  $a_0$  somado do valor medido pela escala [8].



Figura 48 - Indicação da escala no provete a ensaiar [8]

### 3.3 Ensaio dos provetes ENF

A Tabela 6 apresenta a identificação dos provetes e os respectivos valores individuais de pré-fenda.

Tabela 6 - Identificação dos provetes de ensaio e respetivas dimensões (mm) [8]

Provete nº	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752 L60
	Pré-fenda $a_0$ (mm)		
1	65,90	48,84	49,92
2	51,65	53,87	60,13
3	50,60	51,60	58,02
4	84,80	48,76	58,84
5	66,10	49,67	53,31
6	64,15	48,93	51,49
7	67,15	52,19	54,53
8	66,15	51,22	55,97

#### 3.3.1 Condições de ensaio

Os provetes foram sujeitos a carregamento contínuo numa máquina de ensaios SHUMASZU AG-X 100 ligada a um computador externo que fez a aquisição de dados de força e deslocamento. A máquina estava configurada de forma a realizar ensaios de flexão a 3 pontos e equipada com uma célula de carga de 100 kN, usando velocidade de solitação constante. De cada ensaio obteve-se um registo da variação da carga em função do deslocamento do punção de solitação. Os ensaios decorreram com condições ambientes de temperatura e humidade.

A disposição do provete de ensaio ENF na máquina está representada na Figura 49. Este ensaio caracteriza-se pelo facto do provete estar disposto numa posição de viga simplesmente apoiada nos seus extremos, sendo aplicada uma carga a meio vão. Os rolos de suporte são de facto rolamentos que rodam sem atrito em torno de um veio fixo, para que o provete possa deformar livremente durante a aplicação da carga. Estes rolos estão distanciados  $2L$  com auxílio de uma escala existente no seu suporte. O provete é colocado sobre os dois rolos exteriores, tendo em atenção o seu alinhamento e disposição centrada pelo cilindro de solicitação. Para auxílio nesta tarefa foi efetuada uma marcação na face lateral dos provetes, identificando a localização dos pontos de apoio e carga.



Figura 49 - Ensaio experimental ENF e respetivo método ótico [8]

A velocidade de teste foi de 0,75 mm/min para adesivo Araldite® AV138 e 2,00 mm/min para os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 L60, escolhida em função da taxa de deformação desejada para os ensaios, que deve ser suficientemente pequena para permitir a monitorização da fenda durante os testes. Uma vez que a propagação de fenda ocorre a um valor constante de  $G_{IIC}$ , são sugeridas, pelo menos, 20-30 medições para construir a curva- $R$  [22].

### 3.3.2 Método ótico

Para a determinação de  $\delta_c$ , foi utilizado um método ótico de CDI. A monitorização da propagação da fenda foi efetuada com o auxílio de uma câmara de alta resolução apoiada numa base sólida para gravação de imagens, numa cadência de intervalos de tempo especificados em 5 segundos [8]. Para o registo fotográfico da propagação da fenda recorreu-se a uma câmara fotográfica digital da Canon "Canon EOS 650D" com uma resolução de 18 megapixel, processador de imagem DIGIC 5, com sistema de focagem automática de 9 pontos e equipada com uma lente EF-S de 18 a 55 mm, mostrada na Figura 50.



Figura 50 - Meio ótico utilizado nos ensaios [6]

### 3.3.3 Realização dos ensaios

A câmara de alta resolução (Figura 49) foi posicionada de forma a capturar a face lateral do provete, com um afastamento aproximado de 120 mm, garantindo que a câmara se encontrava paralela à linha do adesivo. Este procedimento permite a visualização da escala desde o início da zona de medição até à posição do cilindro de carga, para assegurar a captação de imagens da propagação de fenda na região de medição de  $G_{IIc}$ .



Figura 51 - Imagem obtida no início de um ensaio, com exemplificação da região de medição abrangida pela mesma [8]

Antes do início do ensaio é capturada a imagem "0". Iniciado o ensaio, as fotos são tiradas com intervalos de 5 s até que a fenda atinja o ponto de carregamento, onde a fenda deixa de sofrer corte puro e passa a ocorrer a ação combinada do corte com compressão da fenda, devido ao cilindro de carregamento que tende a esmagar a película de adesivo. Houve o cuidado especial de garantir que a câmara estava paralela ao provete e que a distância entre estes era suficiente para fotografar a zona de interesse até à proximidade do cilindro de carregamento [8].

### 3.3.3.1 Método óptico para a medição de $\delta_s$

Foi desenvolvido à parte desta dissertação um algoritmo numérico para medir  $\delta_s$ . O método ótico requer a identificação de seis pontos,  $p_1$  a  $p_6$ , que posteriormente definem as curvaturas do provete superior e inferior. O valor de  $\delta_s$  é dado pelo comprimento do arco entre  $p_3'$  e  $p_4'$ , que são as projeções de  $p_3$  e  $p_4$ , respetivamente, na curva média do provete.

O processo inicia-se com a identificação manual dos 6 pontos na primeira foto do ensaio. Os pontos  $p_1$  a  $p_6$  são impressos com uma cor distinta, o que ajuda a encontrar os seus locais corretos (Figura 52). Os locais identificados manualmente só funcionam como estimativa, uma vez que as localizações dos pontos são automaticamente refinadas de modo que estes se posicionem no centróide das áreas coloridas fazendo com que o algoritmo seja invariante à definição dos pontos pelo utilizador.

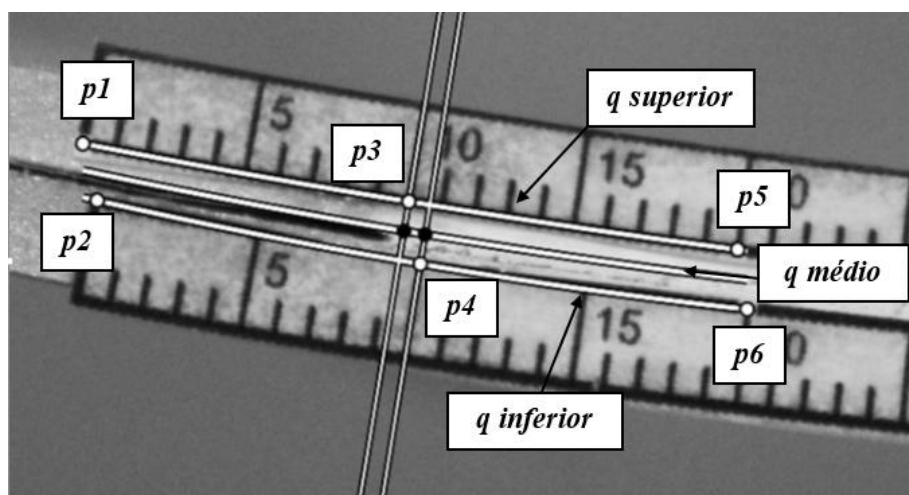


Figura 52 - Ilustração dos pontos recolhidos pelo método ótico ( $p_1$  a  $p_6$ ), as curvas ajustadas aos pontos ( $q_{\text{superior}}$  e  $q_{\text{inferior}}$ ) e a curva média ( $q_{\text{médio}}$ ) onde  $\delta_s$  é medido

A partir dos pontos identificados na primeira foto, os pontos para as próximas imagens são automaticamente rastreados com um algoritmo no Matlab<sup>®</sup>. Para cada ponto  $p_i$ , é extraída uma região retangular centrada em  $p_i$  a partir da primeira imagem formando um modelo ( $t$ ). Este modelo descreve o padrão de imagem que rodeia o ponto e é usado para encontrar o ponto na imagem seguinte. Assim localiza-se a posição ( $u, v$ ) nas imagens seguintes ( $I$ ) que tem a maior correlação cruzada normalizada com o modelo. Para aproveitar as informações da cor, o espaço de cores das imagens ( $e$ , conseqüentemente, dos modelos) são transformado no sistema CIELAB. Este sistema representa o valor de um pixel por três componentes,  $L$ ,  $a$  e  $b$ , em que  $L$  representa a luminosidade e  $a$  e  $b$  definem a cor. Uma vez que os pontos  $p_1$  a  $p_6$  são diferenciados pela sua cor, apenas as componentes  $a$  e  $b$  são utilizadas, tornando o método invariante a alterações de luminosidade. A correlação cruzada

normalizada ( $\gamma$ ) de modelo  $t$  com a imagem na posição  $(u, v)$  de imagem  $I$  para a um componente  $c$  é dada por

$$\gamma(u, v, c) = \frac{\sum_{x,y} [I(x, y, c) - \bar{I}_{u,v,c}] \cdot [t(x-u, y-v, c) - \bar{t}_c]}{\left\{ \sum_{x,y} [I(x, y, c) - \bar{I}_{u,v,c}]^2 \cdot \sum_{x,y} [t(x-u, y-v, c) - \bar{t}_c]^2 \right\}^{0.5}}, \quad (17)$$

onde  $I(x, y, c)$  é a intensidade da componente de cor do pixel  $c(x, y)$  de imagem  $I$ ,  $t(x, y, c)$  é a intensidade do componente de cor  $c$  do pixel  $(x, y)$  do modelo de  $t$  e  $\bar{I}(u, v, c)$  representa a intensidade média do componente de cor  $c$  na região de imagem centrada no pixel  $(u, v)$  com o mesmo tamanho que  $t$ , que reproduz a intensidade média da cor  $c$  para o modelo  $t$ . Finalmente, a correlação cruzada normalizada para um único pixel tendo em conta os componentes  $a$  e  $b$  é definida como

$$\gamma(u, v) = \sqrt{\gamma(u, v, a)^2 + \gamma(u, v, b)^2}. \quad (18)$$

Ao calcular  $\gamma$  para todos os pixels  $I$  obtém-se uma matriz em que o valor máximo absoluto produz a localização da região em  $I$  que tem a maior correlação com  $t$  e assim, o local mais provável de  $p_i$  na imagem seguinte. Este processo é repetido para cada um dos seis pontos identificados na primeira imagem. Depois de identificar com êxito todos os pontos da segunda imagem, os novos modelos são calculados a partir da segunda imagem de pesquisa para os 6 pontos na terceira imagem, e assim por diante até concluir o processamento de todas as imagens que compreendem cada ensaio.

### 3.3.3.2 Cálculo de $\delta_s$

O valor de  $\delta_s$  é obtido medindo o comprimento do arco entre  $p_3$  e  $p_4$  na curva que se encontra entre os dois aderentes, a curva média (Figura 52). As curvaturas dos aderentes são descritas por polinómios quadráticos, de acordo com a equação (19)

$$q_i(x) = a_i x^2 + b_i x + c_i, \quad (19)$$

onde  $q_i$  representa a curvatura do aderente  $i$ , e  $a_i$ ,  $b_i$  e  $c_i$  são os coeficientes do polinómio. Os coeficientes são encontrados ajustando funções quadráticas para as coordenadas dos pontos de  $y$  pelo método dos mínimos quadrados, como

$$\begin{aligned} q_{superior}([x_1, x_3, x_5]^T) &= ([y_1, y_3, y_5]^T) \\ q_{inferior}([x_2, x_4, x_6]^T) &= ([y_2, y_4, y_6]^T). \end{aligned} \quad (20)$$

Em teoria,  $q_{superior}$  e  $q_{inferior}$  seriam estritamente paralelos e  $\delta_s$  poderia ser calculado projetando  $p_3$  para a curva inferior, ou  $p_4$  para a curva superior. No entanto, na prática isto não se verifica e, deste modo,  $\delta_s$  é calculado pelas projeções de  $p_3$  e  $p_4$  na curva média da amostra. A curva medial,  $q_{medial}$ , é definida pela média dos coeficientes superiores e inferiores das curvaturas,

$$q_{medial}(x) = a_{medial}x^2 + b_{medial}x + c_{medial} = \frac{a_{superior} + a_{inferior}}{2}x^2 + \frac{b_{superior} + b_{inferior}}{2}x + \frac{c_{superior} + c_{inferior}}{2}. \quad (21)$$

A projeção de um ponto  $p_i = (x_i, y_i)$  na curva média é obtida encontrando a linha que é perpendicular à curva medial e que passa por  $p_i$ . O A perpendicular à curva medial num dado ponto é a linha que é perpendicular à tangente da curva neste ponto, e é dada pelo primeira derivada de  $q_{medial}$ ,

$$q'_{medial}(x) = 2a_{medial}x + b_{medial}. \quad (22)$$

A projeção  $(x'_i, y'_i)$  de um determinado ponto  $(x_i, y_i)$  é encontrada através a resolução do sistema de equação

$$\begin{cases} a_{normal} = -\frac{1}{2a_{medial}x'_i + b_{medial}} \\ b_{normal} = y'_i - a_{normal}x'_i \\ y_i = a_{normal}x_i + b_{normal} \\ y'_i = a_{medial}x'^2_i + b_{medial}x'_i + c_{medial} \end{cases}. \quad (23)$$

As primeiras duas equações definem os coeficientes  $a_{normal}$  e  $b_{normal}$  da linha que é perpendicular a  $q_{medial}$  e que passa pelo ponto projetado  $(x'_i, y'_i)$ , a terceira equação obriga a esta perpendicular a passar pelo ponto original  $(x_i, y_i)$ , e a quarta equação força o ponto projetado a pertencer à curva medial.

Este sistema não-linear de equações é resolvido numericamente no Matlab<sup>®</sup>, retornando sempre uma solução única no domínio dos números reais. Com os valores de  $p_3'$  e  $p_4'$ ,  $\delta_s^p$  (valor de  $\delta_s$  em pixels) pode ser encontrado medindo o comprimento do arco de  $q_{medial}$  entre estes dois pontos

$$\delta_s^p = \int_{x'_3}^{x'_4} \sqrt{1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2} dx = \int_{x'_3}^{x'_4} \sqrt{1 + (a_{medial}x + b_{medial})^2} dx. \quad (24)$$

$\delta_s^p$  está em unidades de imagem (pixels) e precisa de ser convertido para unidades do mundo real (por exemplo milímetros). Uma vez que o comprimento dos arcos  $(p_1, p_5)$  e  $(p_2, p_6)$  é conhecido como

sendo igual a  $d = 20$  mm, este é usado para encontrar o tamanho do pixel e, assim, para converter  $\delta_s^p$  para milímetros,

$$\delta_s^t = \frac{\delta_s^p d}{2} \left( \int_{x_1}^{x_5} \sqrt{1 + (a_{\text{superior}} x + b_{\text{superior}})^2} dx + \int_{x_2}^{x_6} \sqrt{1 + (a_{\text{inferior}} x + b_{\text{inferior}})^2} dx \right)^{-1}. \quad (25)$$

O tamanho do pixel era em média 0,011 milímetros e, assim, o erro máximo estimado do processo de aquisição da imagem é de  $\pm 0,006$  milímetros. Finalmente,  $\delta_s$  pode ser definido como,

$$\delta_s = \delta_s^t - \delta_s^0, \quad (26)$$

onde  $\delta_s^0$  é o valor inicial de  $\delta_s^t$ .

### 3.4 Resultados obtidos dos ensaios ENF

Neste subcapítulo apresentam-se os resultados obtidos nos ensaios ENF, nomeadamente as curvas  $P$ - $\delta$ , a estimativa de  $G_{IIC}$  pelos métodos convencionais e integral- $J$ , e as leis coesivas obtidas por aplicação do método direto ao integral- $J$ .

Através do procedimento de ensaio anteriormente descrito, foi possível correlacionar os dados obtidos de  $P$  e  $\delta$  com o valor de  $a$  durante os ensaios, o que é necessário para a obtenção de  $G_{IIC}$  pelos vários métodos que necessitam da medição de  $a$ . A correlação é efetuada pelo conhecimento do instante de tempo correspondente a cada imagem e a velocidade de ensaio dos provetes, o que permitiu o tratamento de dados conducente à obtenção dos valores de  $G_{IIC}$  para os 3 adesivos. É também feita uma análise crítica dos resultados obtidos.

Apenas um ensaio em cada série de juntas adesivas não foi considerado válido, o provete numero 4 no adesivo Araldite® AV138, o provete número 2 no adesivo Araldite® 2015 e o provete número 8 para o adesivo SikaForce® 7752, devido a uma disparidade de resultados assinalável relativamente aos restantes provetes da respetiva série.

#### 3.4.1 Araldite® AV138

Na série de juntas adesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi excluído o provete número 4 devido a disparidade de resultados. A Figura 53 mostra as curvas obtidas para os sete provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo Araldite® AV138. Trata-se de um adesivo com um comportamento de rotura frágil, onde se verifica uma rotura abrupta após ser atingida a carga máxima, em que o valor de  $P$  cai abruptamente, dando origem à propagação instável da fenda.

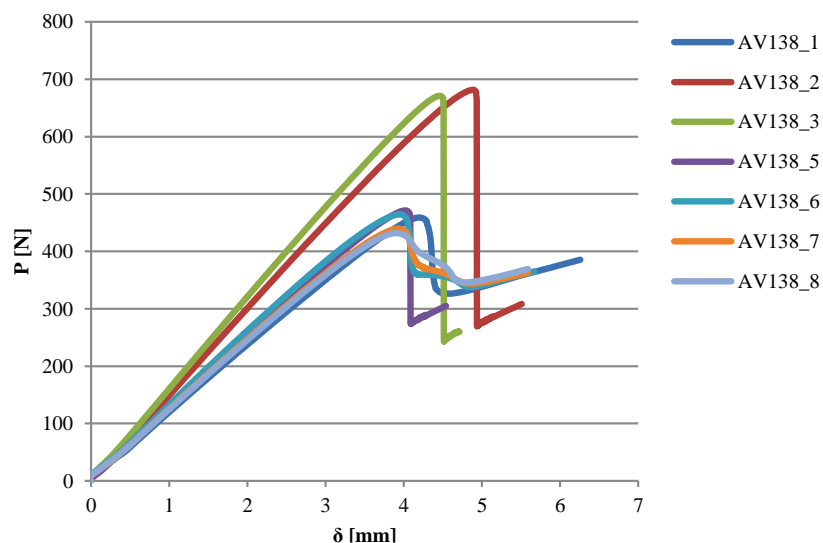


Figura 53 - Curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® AV138

Os provetes AV138\_2 e AV138\_3 apresentam uma diferença de rigidez inicial comparativamente aos outros provetes, o que se deve à existência de um valor do  $a_0$  inferior aos restantes, por problemas relacionados com o fabrico dos provetes. No entanto, este efeito foi contabilizado no tratamento subsequente dos dados pelos vários métodos, pelo que não terá influência na medição de  $G_{IIC}$ . Independentemente deste facto, a repetibilidade das restantes curvas é bastante boa em termos de rigidez dos provetes até à iniciação da fenda. O comportamento durante a propagação foi algo instável, o que se atribui à elevada rigidez e baixa ductilidade do adesivo, que tipicamente conduzem a este comportamento. Para o conjunto de dados apresentados, os valores máximos de carga máxima, ( $P_{m\acute{a}x}$ ) e respetivo deslocamento foram os seguintes:  $P_{m\acute{a}x} = 516,9 \pm 109,7$  N e  $\delta = 4,2951 \pm 0,3516$  mm.

### 3.4.1.1 Estimativa de $G_{IIC}$ pelos métodos convencionais

A determinação de  $G_{IIC}$  é baseada nas curvas de resistência, ou curvas- $R$ , que representam a evolução da taxa de libertação de energia de deformação ao corte em função do comprimento de fenda durante o ensaio. No caso 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 contante. Este valor de patamar corresponde ao valor de  $G_{IIC}$  do respetivo adesivo.

Tabela 7 - Valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] para o adesivo Araldite® AV138

Provete nº	Araldite® AV138			
	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	0,469	0,566	0,440	0,572
2	a	0,709	0,566	0,712
3	a	0,650	0,608	0,724
4	-	-	-	-
5	a	0,578	0,519	0,594
6	0,568	0,579	0,487	0,562
7	0,605	0,581	0,478	0,576
8	0,603	0,583	0,481	0,585
Média	0,561	0,606	0,511	0,618
Desvio padrão	0,064	0,053	0,058	0,069

a) Provete em que não foi possível obter o ajuste do polinómio  $C=f(a)$

Na Tabela 7 apresentam-se os valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] dos setes ensaios válidos por todos os métodos, bem como a média e o desvio padrão. Verifica-se que existe uma boa repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes. Os métodos CCM, DBT e CBBM apresentam a mesma tendência, enquanto o CBT subestima o valor de  $G_{IIC}$  comparativamente aos outros métodos [36]. Considera-se o CBBM como valor de referência, devido ao facto de ser um método robusto e que traduz com precisão o valor de  $G_{IIC}$  [36]. Em comparação com este, o CCM apresenta um valor inferior em 9,22%, o DBT em 1,94% e o CBT em 17,31%. Confirma-se assim que o CBT apresenta resultados substancialmente inferiores aos restantes.

### 3.4.1.2 Estimativa de $G_{IIC}$ pelo Integral- $J$

Os resultados aqui apresentados seguem o procedimento do método direto. O valor de  $\delta_s$  foi obtido com 5 s de intervalo para cada provete, utilizando o método de extração automática de dados descrito no capítulo 3.3.2. A Figura 54 apresenta a curva de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete, que consiste numa forma exponencial, consistente com trabalhos anteriores [45].

A aproximação polinomial representada na Figura 55 é necessária para remover o ruído decorrente de este ser um procedimento experimental sujeito a erros de medição, sendo o ruído maior para o adesivo mais frágil, como é o caso deste adesivo Araldite® AV138. De notar que foram adotados os graus de polinómios distintos (variando entre o 4º e 6º grau) para cada provete, sendo estes ajustados de forma a se atingir o melhor fator de correlação aos dados experimentais. Para a representação gráfica eliminou-se os dados a partir do início da fenda uma vez que a partir deste ponto a informação já não é relevante para estimar a lei coesiva. O valor máximo obtido de  $\delta_s$  para o provete considerado foi de 0,0623 mm para um tempo de teste de 330 segundos.

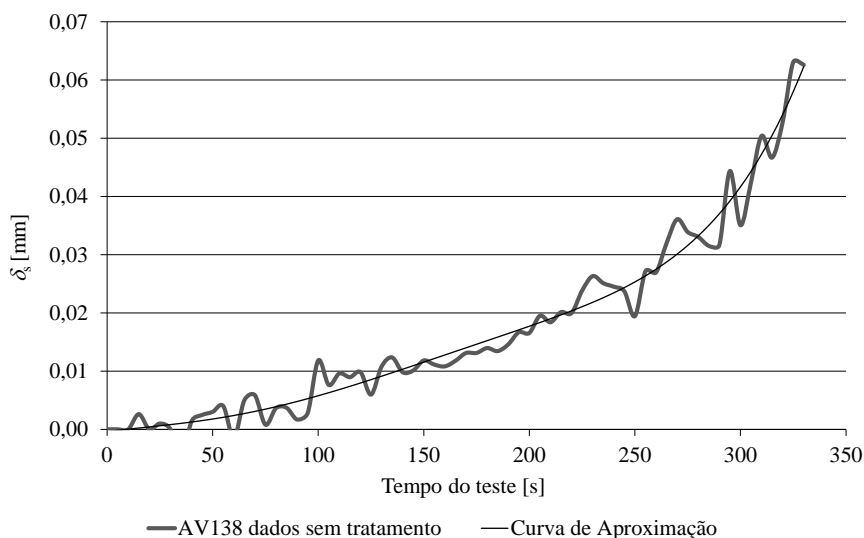


Figura 54 - Curva de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete e respectiva aproximação polinomial para o adesivo Araldite® AV138

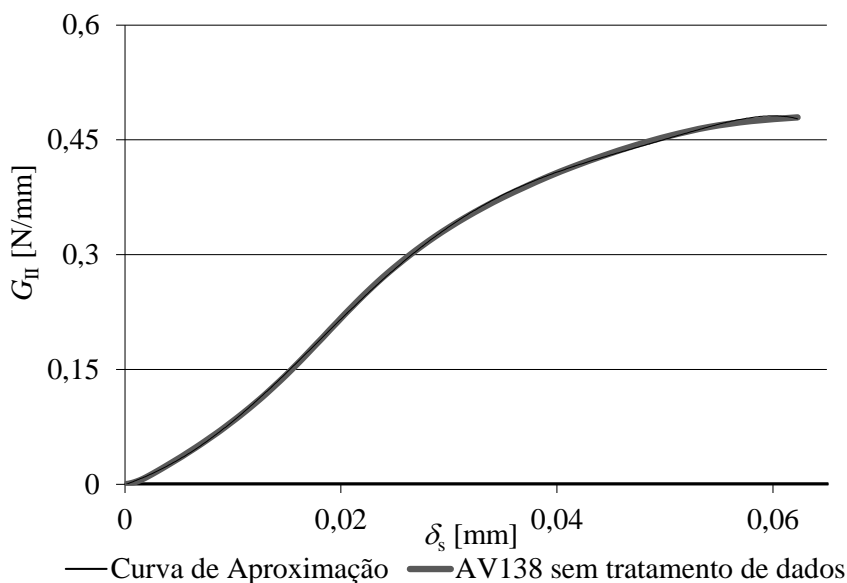


Figura 55 - Curva  $G_{II}-\delta_s$  para um provete com o adesivo Araldite® AV138 com aproximação polinomial

A Figura 55 representa a curva  $G_{II}-\delta_s$  para um provete de Araldite® AV138, cuja forma até ao início da propagação da fenda é coerente com as análises publicadas [62]. Pode observar-se que, no início do teste,  $G_{II}$  aumenta muito lentamente. De seguida a taxa de aumento cresce rapidamente e, finalmente, é atingido um valor de estacionário. Como mencionado anteriormente, esta última fase indica o início do crescimento da fenda e corresponde à estimativa de  $G_{IIC}$ . Para o provete Araldite® AV138 representado, o valor medido de  $G_{IIC}$  [N/mm] é de 0,479 com um  $\delta_s$  máximo de 0,0623 mm.

A Tabela 8 apresenta o valor de  $G_{IIC}$  obtido através da aplicação do Integral- $J$  para todos os provetes. Comparando o valor média apresentado com o método CBBM, observa-se um desvio de 6,14 %. Posteriormente, todos os adesivos serão comparados e discutidos os seus resultados de modo a obter as leis coesivas.

Tabela 8 - Valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] para o adesivo Araldite® AV138 obtidos pelo Integral- $J$

Provete n°	Araldite® AV138
1	0,552
2	0,732
3	0,676
4	-
5	0,566
6	0,533
7	0,523
8	0,479
Média	0,580
Desvio padrão	0,090

### 3.4.1.3 Lei coesiva ao corte

A Figura 57 apresenta as curvas  $t_s$ - $\delta_s$  obtidas pelo método direto, ou seja, por aplicação da equação (27) às curvas  $G_{II}$ - $\delta_s$ .

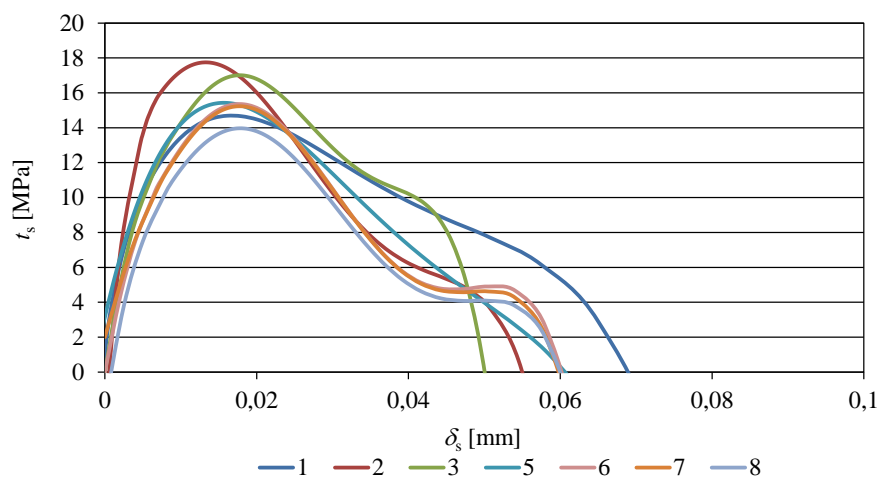


Figura 56 - Curvas  $t_s$ - $\delta_s$  para o adesivo Araldite® AV138

Verifica-se uma boa concordância entre os vários provetes. Obtiveram-se os seguintes valores médios e desvios padrão para os parâmetros coesivos (entre parêntesis apresenta-se o desvio percentual): carga máxima em corte  $t_s^0=15,6\pm 1,39$  MPa (8,9%), deslocamento de carga máxima ao

cutura  $\delta_s^0=0,0167\pm0,0016$  mm (9,80%) e deslocamento rotura ao corte  $\delta_{sc}=0,0618\pm0,0214$  mm (34,6%). Pode-se considerar que a dispersão entre os provetes do mesmo adesivo é aceitável exceto para o valor  $\delta_{sc}$  que apresenta um desvio percentual acima dos 10%, contudo, os restantes parâmetros apresentam um desvio inferior a este valor.

### 3.4.2 Araldite® 2015

A Figura 57 mostra as curvas  $P-\delta$  obtidas para os sete provetes considerados válidos. Neste caso, constata-se uma grande repetibilidade dos ensaios realizados ao nível dos aspetos mais relevantes, nomeadamente rigidez elástica e comportamento durante a propagação da fenda, o que antevê a obtenção de resultados de  $G_{IIC}$  coerentes entre os vários provetes.

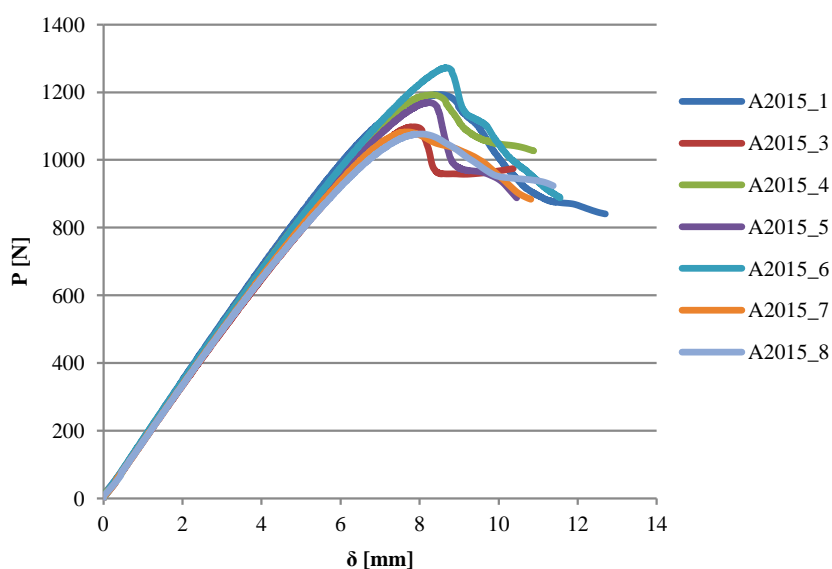


Figura 57 - Curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015

É notória a presença de três fases nas curvas  $P-\delta$  do adesivo Araldite® 2015. Na primeira fase, a evolução da carga/deslocamento é linear, com um comportamento elástico reversível. Na segunda fase, um pouco antes do ponto de carga máxima, verifica-se uma perda da linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível do adesivo (formação da ZPF). Na vizinhança de  $P_{máx}$  a energia armazenada no provete atinge o seu valor crítico,  $G_{IIC}$ , correspondente ao início da propagação da fenda. Após ser atingida  $P_{máx}$ , ocorre a terceira fase, em que a carga aplicada diminui progressivamente, o que corresponde a uma propagação estável da fenda. Analisando os dados apresentados, os valores máximos de  $P_{máx}$  e respetivo deslocamento registaram os seguintes valores:  $P_{máx}=1155,16\pm72,53$  N e  $\delta= 8,2727\pm0,3869$  mm. As curvas  $P-\delta$  apresentadas pelo adesivo Araldite® 2015 demonstram que se trata de um adesivo com um comportamento com

alguma ductilidade, uma vez que se verifica uma rotura mais suavizada com valores de deslocamento por volta de 8,3 mm, verificando-se aproximadamente o dobro do deslocamento de rotura comparativamente ao Araldite® AV138. O valor da carga máxima é ligeiramente superior ao dobro do apresentado pelo Araldite® AV138 [8].

### 3.4.2.1 Estimativa de $G_{IIC}$ pelos métodos convencionais

A Tabela 9 apresenta os valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] para os sete ensaios válidos por todos os métodos convencionais, observando-se uma concordância entre as amostras razoavelmente boa. Comparando os valores de  $G_{IIC}$  obtidos pelos vários métodos, verifica-se a existência de uma boa repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, o que comprova a realização de provetes com condições idênticas e ajuda à autenticidade dos resultados obtidos. As curvas respeitantes aos vários métodos seguem a mesma tendência, com acordo bastante bom entre o DBT e o CBBM, enquanto o CBT subestima  $G_{IIC}$  comparativamente aos outros métodos. O CCM apresenta algumas oscilações, o que está relacionado com o ajuste do polinómio de  $C=f(a)$  [36].

Tabela 9 - Valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] para o adesivo Araldite® 2015

Proвете n°	Araldite® 2015			
	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	3,029	3,083	2,644	3,420
2	-	-	-	-
3	3,675	2,401	2,177	2,545
4	3,214	2,916	2,544	2,943
5	2,812	2,741	2,476	2,801
6	3,357	3,088	2,644	3,136
7	2,696	2,831	2,624	2,901
8	3,008	2,952	2,512	3,025
Média	3,113	2,859	2,517	2,967
Desvio padrão	0,334	0,238	0,164	0,273

Utilizando o método CBBM como referência, verifica-se que o CCM apresenta um valor superior em 4,92%, o DBT um valor inferior em 3,64% e o CBT um valor também inferior em 15,17%. De notar que o CBT apresenta resultados substancialmente inferior aos restantes, uma vez que este método requer a medição do comprimento da fenda durante a fase de propagação, o que foi efetuado de forma manual e, como tal, é propenso a introduzir erros adicionais [36].

### 3.4.2.2 Estimativa de $G_{IIC}$ pelo Integral -J

A Figura 58 apresenta a curva de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete de Araldite® 2015 e respetiva aproximação polinomial. Verifica-se que a curva tem um comportamento exponencial. Comparando a curva com a apresentada para o adesivo AV138, esta revela um valor de  $\delta_s$  bastante superior para aproximadamente a mesma fração de tempo. O valor de  $\delta_s$  obtido por este método no instante de início de propagação da fenda é de 0,340 mm para 378 segundos, superior ao observado para Araldite® AV138, por se tratar de um adesivo dúctil.

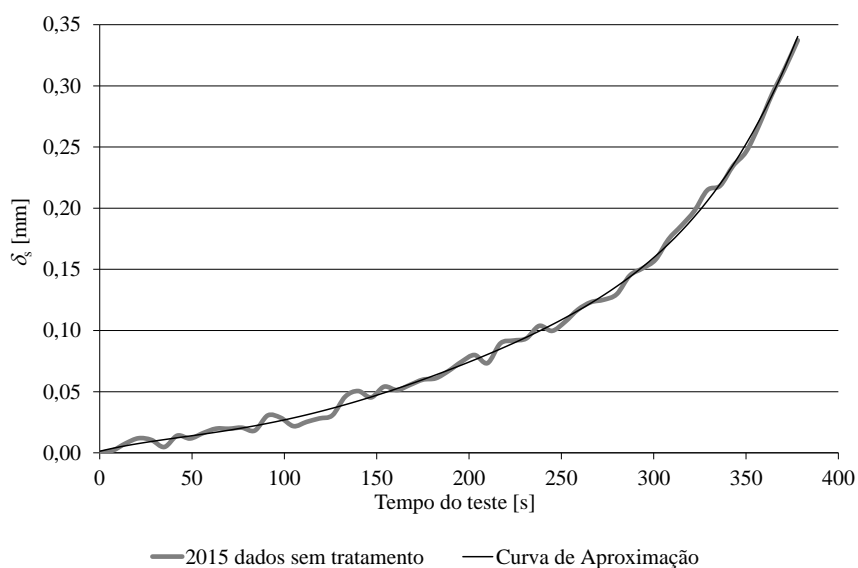


Figura 58 - Curva de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete de Araldite® 2015 e respetiva aproximação polinomial

Avaliando a curva  $G_{II} - \delta_s$  apresentada na Figura 59, verifica-se que para o provete em causa o valor de patamar referente a  $G_{IIC}$  é de 3,444 N/mm com um valor de  $\delta_s$  de 0,3681 mm. Comparando-o com o adesivo anterior, confirma-se a diferente ductilidade anteriormente mencionada. A Tabela 10 apresenta os valores obtidos através do integral-J para todos os provetes. Sabendo que o método de referência é o CBBM, verificou-se que o desvio percentual relativo à média é de 7,212 %.

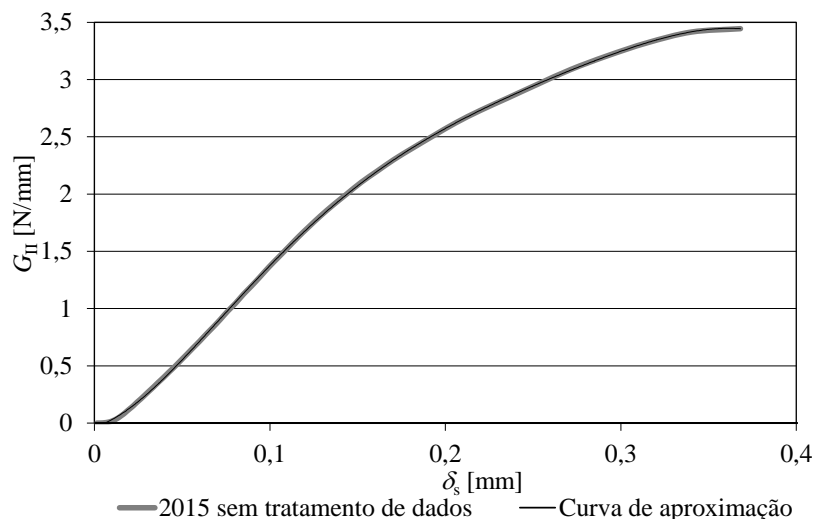


Figura 59 - Curva  $G_{II}-\delta_s$  para um provete com o adesivo Araldite® 2015 com aproximação polinomial

Tabela 10 - Valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] para o adesivo Araldite® 2015 obtidos pelo Integral- $J$

Provete nº	Araldite® 2015
1	3,444
2	3,585
3	2,873
4	3,298
5	3,123
6	3,140
7	3,080
8	2,901
Média	3,181
Desvio padrão	0,249

### 3.4.2.3 Lei coesiva ao corte

A Figura 60 mostra as curvas  $t_s-\delta_s$  pelo método direto para o adesivo Araldite® 2015. Os parâmetros coesivos foram os seguintes (média, desvio padrão, e desvio percentual em percentagem entre parêntesis): carga máxima em corte  $t_s^0=15,5\pm 0,683$  MPa (4,4%), deslocamento de carga máxima ao corte  $\delta_s^0=0,0702\pm 0,0122$  mm (17,40%) e deslocamento de rotura ao corte  $\delta_{sc}=0,372\pm 0,0246$  mm (6,6%). Considera-se que a dispersão entre os provetes é aceitável e mostra alta correlação entre os diversos ensaios com o mesmo adesivo. O desvio percentual é geralmente inferior a 10 %, com exceção de  $\delta_s^0$  que apresenta um desvio percentual acima.

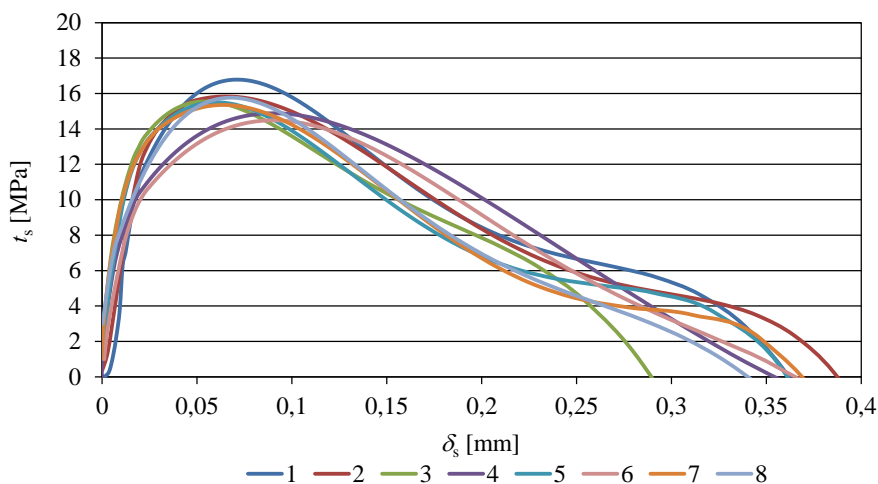


Figura 60 - Curvas  $t_s$ - $\delta_s$  para o adesivo Araldite® 2015

### 3.4.3 Sikaforce® 7752

A Figura 61 mostra as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas para os sete provetes considerados válidos das juntas coladas com o adesivo SikaForce® 7752 L60. Para esta série de ensaios, tal como observado nos casos anteriores, registou-se uma boa concordância entre as curvas  $P$ - $\delta$  dos vários provetes a nível de rigidez no domínio elástico, carga máxima e respetivo deslocamento. As curvas  $P$ - $\delta$  apresentadas pelo adesivo SikaForce® 7752 demonstram que se trata de um adesivo com um comportamento dúctil, para o qual se verifica uma rotura muito suavizada com valores de deslocamento aplicado de cerca de 14,4 mm, correspondente à carga máxima, verificando-se um valor 3,4 vezes superior ao adesivo Araldite® AV138 e cerca de 1,6 vezes superior ao adesivo Araldite® 2015. O valor de carga máxima é ligeiramente superior ao dobro do apresentado pelo adesivo Araldite® AV138, mas muito semelhante ao do adesivo Araldite® 2015.

Para os ensaios com o adesivo SikaForce® 7752 verificou-se que, durante o ensaio, a aparente propagação da fenda medida pela rotura da camada de tinta branca não correspondia à realidade. Isto deveu-se à grande ductilidade do adesivo, o que fez com que a camada de tinta rompesse muito antes da propagação real da fenda. Como tal, para este adesivo, apenas se efetuou a estimativa de  $G_{IIC}$  pelo método CBBM. O adesivo SikaForce® 7752 apresenta as três fases da curva  $P$ - $\delta$  ainda bem mais definidas do que o adesivo Araldite® 2015. A primeira fase a evolução da carga/deslocamento é linear, com um comportamento reversível e elástico. A segunda fase está bem mais definida do que no adesivo Araldite® 2015 e a surgir bem antes do ponto de carga máxima, verificando-se a perda da linearidade correspondente à ocorrência de um processo irreversível de plastificação do adesivo. Após a  $P_{m\acute{a}x}$  ocorre a terceira fase, em que a carga aplicada diminui progressivamente de uma forma muito suave, o que corresponde a uma propagação estável da fenda. Observando os dados

apresentados, o valor médio de  $P_{\text{máx}}$  e respectivo deslocamento foram de  $P_{\text{máx}} = 1139,74 \pm 46,37$  N e  $\delta = 14,4133 \pm 0,9490$  mm.

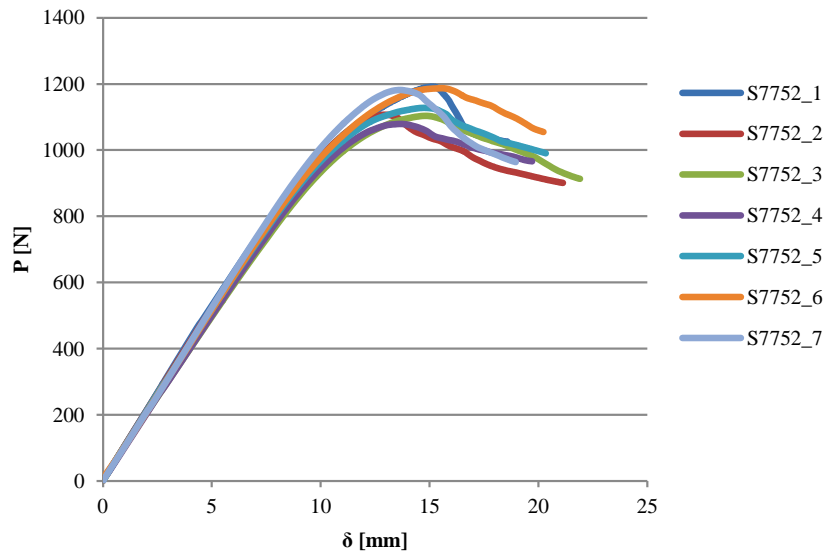


Figura 61 - Curvas  $P$ - $\delta$  do adesivo SikaForce® 7752

### 3.4.3.1 Estimativa de $G_{IIC}$ pelos métodos convencionais

A Tabela 11 resume os valores de  $G_{IIC}$  (N/mm) dos sete ensaios válidos pelo método CBBM, onde se observa que a concordância entre as amostras é razoável.

Tabela 11 - Valores de  $G_{IIC}$  para o adesivo SikaForce® 7752

Provete nº	SikaForce® 7752
	CBBM
1	5,825
2	5,877
3	5,474
4	4,813
5	5,676
6	5,648
7	5,619
8	-
Média	5,562
Desvio Padrão	0,356

Verifica-se a existência de repetibilidade entre os valores obtidos para os vários provetes, excetuando o provete S7752\_4 que apresenta um valor ligeiramente inferior, o que valida a realização de provetes com condições idênticas e é indicativo da coerência dos resultados obtidos. O adesivo apresenta um comportamento extremamente dúctil e, como tal, a visualização da propagação da fenda não foi

perceptível, acabando por estalar primeiramente a tinta corretora de auxílio da visualização, sem que a fenda propagasse [8]. Assim, a partir dos ensaios com o adesivo SikaForce® 7752 obteve-se, durante o ensaio, a aparente propagação da fenda medida pela rotura da camada de tinta branca que não correspondia à realidade. Como tal, para este adesivo, apenas se mediu  $G_{IIC}$  pelo método CBBM.

### 3.4.3.2 Estimativa de $G_{IIC}$ pelo Integral - $J$

A Figura 62 mostra a curva de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete de SikaForce® 7752 e respetiva aproximação polinomial. Relativamente aos adesivos anteriores, observa-se na mesma um crescimento exponencial, mas com amplitude maior até início da propagação da fenda, tendo-se registado o valor de  $\delta_s$  em 0,662 mm para uma fração de tempo de 435 segundos.

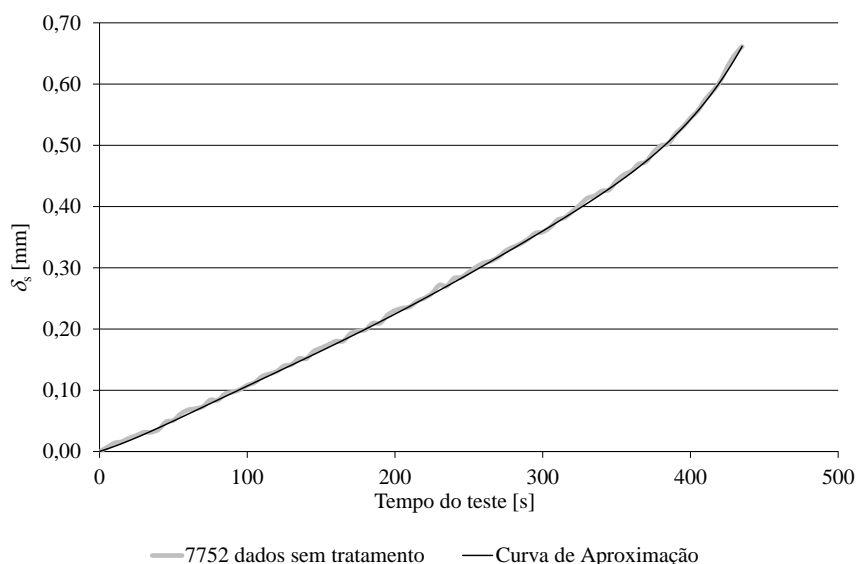


Figura 62 - Curva de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete de SikaForce® 7752 e respetiva aproximação polinomial

A curva  $G_{II} - \delta_s$  apresentada na Figura 62 para um provete com o adesivo SikaForce® 7752 mostra o valor referente ao  $G_{IIC}$  de 5,790 N/mm para um valor de  $\delta_s$  de 0,870 mm. Os valores obtidos de  $G_{IIC}$  através do integral  $J$  para todos os provetes estão apresentados na Tabela 12. Como referido anteriormente, faz-se a comparação de resultados relativamente ao método CBBM. Assim sendo, o desvio percentual relativo à média é de 1,89 %.

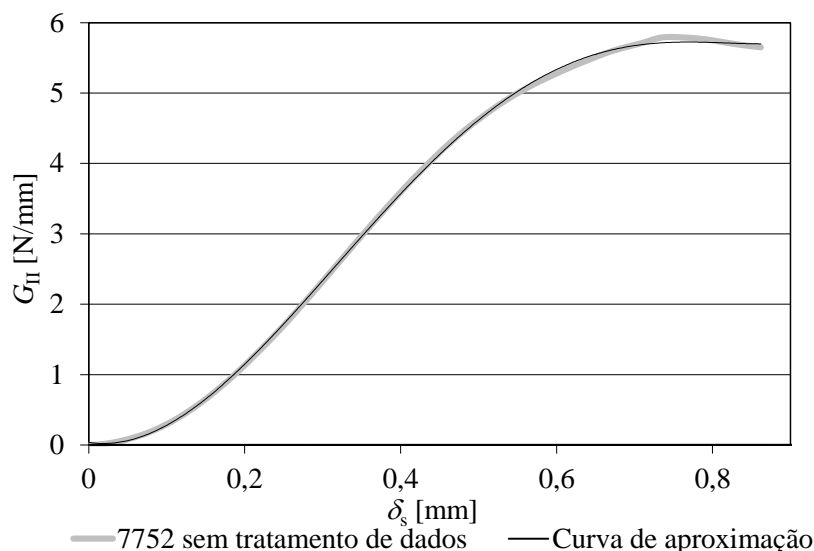


Figura 63 - Curva  $G_{II} - \delta_s$  para o adesivo SikaForce® 7752 com aproximação polinomial

Tabela 12 - Valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] para o adesivo SikaForce® 7752 obtidos pelo Integral - J

Provete n°	SikaForce® 7752 CBBM
1	-
2	5,067
3	6,050
4	5,360
5	6,070
6	5,173
7	5,790
8	6,160
Média	5,667
Desvio padrão	0,459

### 3.4.3.3 Lei coesiva ao corte

Nesta fase são apresentadas as curvas  $t_s - \delta_s$  (Figura 64) obtidas para o adesivo SikaForce® 7752.

A média e o desvio dos parâmetros de coesivos (com o desvio percentual entre parenteses) foram os seguintes: carga máxima em corte  $t_s^0 = 11,8 \pm 0,807$  MPa (6,9%) deslocamento de carga máxima ao corte  $\delta_s^0 = 0,328 \pm 0,0182$  mm (5,5%) e deslocamento de rotura ao corte  $\delta_{sc} = 0,781 \pm 0,107$  mm (13,7%). Verifica-se que, comparando com os adesivos anteriores, as curvas do adesivo SikaForce® 7752 apresentam valores menores relativamente a  $t_s^0$  e  $\delta_{sc}$ , enquanto  $\delta_s^0$  é superior.

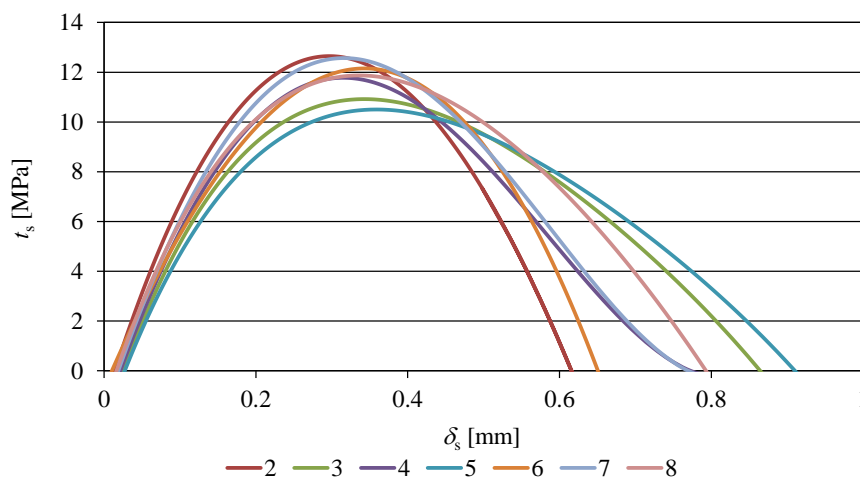


Figura 64 - Curvas  $t_s$ - $\delta_s$  para o adesivo SikaForce® 7752

### 3.5 Análise dos resultados

Como é conhecido, as propriedades dos adesivos influenciam altamente a resistência da junta. Sabendo que um dos objetivos do trabalho é estimar  $G_{IIC}$  para os diferentes tipos de adesivos com o ensaio ENF, realizar-se-á uma análise de resultados para os diferentes métodos: DBT, CBT, CCM, CBBM e integral- $J$ . Todos demonstraram boa concordância; contudo, o método CBT apresenta valores menores de  $G_{IIC}$  (aproximadamente 17%). Comparando os requisitos de tempo entre os vários métodos, o CCM, DBT, e CBT precisam da medição de  $a$  durante o teste, o que não acontece com o CBBM. Para além disso, o CCM envolve o ajuste polinomial da curva  $C=f(a)$  e sua derivação. A aplicação do integral- $J$ , embora permita estimar a lei coesiva por diferenciação na curva  $G_{II}=f(\delta_s)$  é baseado na medição  $\delta_s$ , o que exige uma técnica de alta precisão dos devido aos valores externamente reduzidos até iniciar a propagação da fenda. No entanto, tem a grande vantagem de fornecer a lei coesiva completa para precisão de resistência por MDC. A Figura 65 apresenta as curvas de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete de cada adesivo e respetiva aproximação polinomial. Verifica-se uma clara diferença nos valores máximos de  $\delta_s$  entre adesivos, que seguem de perto a ductilidade dos adesivos. Inclusivamente, o  $\delta_s$  no início da propagação da fenda para o Araldite® AV138 é inferior a 1/10 de um milímetro. Depois de obter as curvas  $\delta_s$ - $t_s$ , foi possível estimar a curva  $G_{II}$ - $\delta_s$  por aplicação direta da equação (28). A estimativa de  $G_{IIC}$  é dada pelo valor de estacionário de  $G_{II}$  na curva  $G_{II}$ - $\delta_s$ , que corresponde ao início da propagação da fenda. A Figura 66 mostra as curvas  $G_{II}$ - $\delta_s$  para um provete de cada adesivo e respetiva aproximação polinomial [63]. Para os provetes na Figura 66, os valores estimados para  $G_{IIC}$  foram os seguintes: para o adesivo Araldite® AV138 obteve-se 0,479 N/mm, no caso do adesivo Araldite® 2015 o  $G_{IIC}$  foi de 3,444 N/mm e por fim para o SikaForce® 7752 foi de 5,790 N/mm. Analisando os valores obtidos, o adesivo SikaForce® 7752 é

aquele que necessita de mais energia de deformação para ocorrer a propagação do dano. Os resultados totais para todas as amostras são apresentados na Tabela 13. Estes revelam uma boa repetibilidade, com desvios percentuais abaixo de 10%, exceto para o Araldite® AV138. Os resultados são consistentes com o CBBM da Tabela 7 (Araldite® AV138), Tabela 9 (Araldite® 2015) e Tabela 11 (SikaForce® 7752), com um desvio máximo entre os valores médios de 7,21% para a Araldite® 2015.

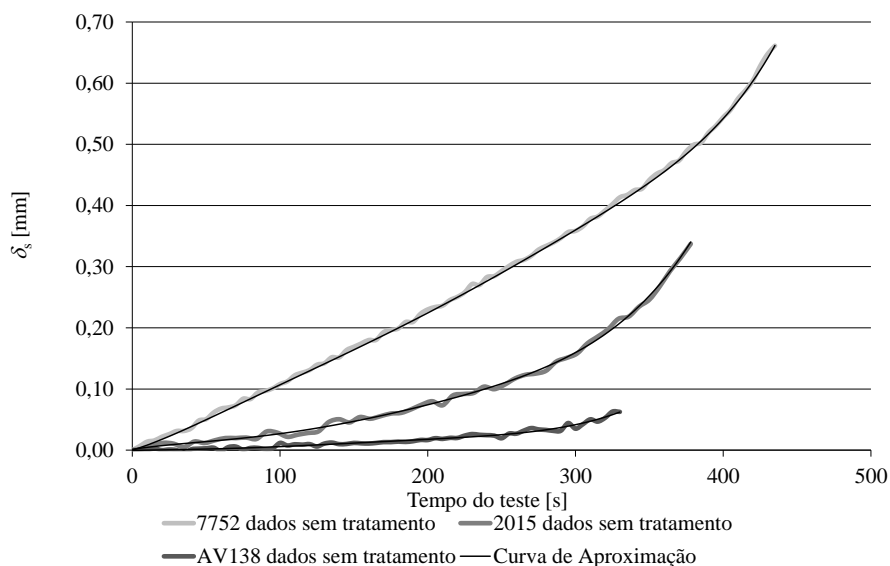


Figura 65 - Curvas de  $\delta_s$  em função do tempo do teste para um provete de cada adesivo e respectiva aproximação polinomial

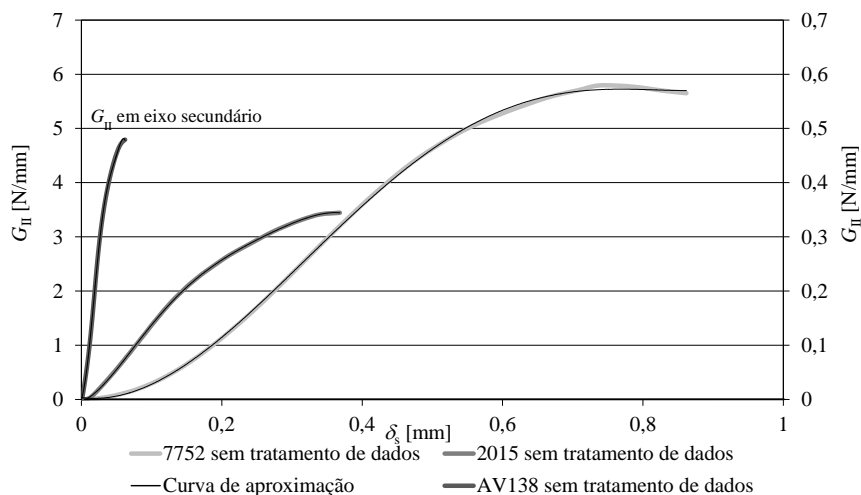


Figura 66 - Curvas  $G_{II} - \delta_s$  para um provete de cada adesivo e respectiva aproximação polinomial

Tabela 13 - Valores de  $G_{IIC}$  [N/mm] para os três adesivos obtidos pelo integral- $J$

Provete n°	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	0,552	3,444	-
2	0,732	3,585	5,067
3	0,676	2,873	6,050
4	-	3,298	5,360
5	0,566	3,123	6,070
6	0,533	3,140	5,173
7	0,523	3,080	5,790
8	0,479	2,901	6,160
Média	0,580	3,181	5,667
Desvio Padrão	0,090	0,249	0,459

As curvas  $t_s$ - $\delta_s$  indicadas na Figura 56 (Araldite® AV138), Figura 60 (Araldite® 2015) e Figura 64 (SikaForce® 7752) foram obtidas pelo método direto para os três adesivos. As curvas demonstram que  $t_s^0$  é semelhante entre o adesivo Araldite® AV138 e o Araldite® 2015 enquanto o SikaForce® 7752 apresenta valores menores. A Tabela 14 apresenta os parâmetros em estudo e os respectivos desvios percentuais para cada um dos adesivos. O valor de deslocamento de rotura ao corte  $\delta_{sc}$  difere para os três adesivos de acordo com a diferença mencionada anteriormente na Figura 65. Para todos os adesivos, foi encontrada uma boa concordância entre as curvas do mesmo adesivo no que diz respeito à rigidez inicial,  $t_s^0$  e  $\delta_{sc}$ .

Tabela 14 - Média e desvio padrão dos parâmetros coesivos para os três adesivos com o respetivo desvio percentual

Parâmetros	Araldite® AV138	Desvio Percentual	Araldite® 2015	Desvio Percentual	SikaForce® 7752	Desvio Percentual
Carga máxima em corte $t_s^0$ (MPa)	15,6±1,39	8,9%	15,5±0,683	4,4 %	11,8±0,807	6,9 %
Deslocamento de carga máxima ao corte $\delta_s^0$ (mm)	0,0167±0,00 163	9,80 %	0,0702±0,01 22	17,4 %	0,328±0,018 2	5,5 %
Deslocamento de rotura ao corte $\delta_{sc}$ (mm)	0,0618±0,02 14	34,6%	0,372±0,024 6	6,6%	0,781±0,107	13,7 %

Pode-se considerar que a dispersão entre os provetes do mesmo adesivo é aceitável e mostra uma alta correlação entre as amostras. O desvio percentual foi geralmente inferior a 10%, com exceção de alguns casos em que  $\delta_s^0$  e  $\delta_{sc}$  ultrapassam este valor. Com os resultados obtidos observa-se que o

SikaForce® 7752 é o mais dúctil, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil. Como é sabido, as propriedades dos adesivos influenciam de forma significativa a resistência da junta. De facto, um adesivo mais resistente não significa necessariamente uma resistência superior em junta adesiva. Na verdade, um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada, mas não permite a redistribuição do esforço para o interior desta. Como resultado, a tensão média de rotura ao corte é muito baixa. Este é o comportamento expectável do Araldite® AV138. Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e de baixo módulo de elasticidade têm geralmente uma resistência baixa. No entanto, estes são capazes de distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica, o que torna as juntas mais resistentes do que aqueles com adesivos mais resistentes e frágeis [64]. Enquadram-se nesta categoria o Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752, que apresenta um comportamento dúctil para adesivos estruturais e uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138.



# 4 Trabalho numérico

A simulação numérica com recurso a computador é uma ferramenta bastante utilizada na conceção de projetos na engenharia. O desenvolvimento das técnicas de simulação tem sido o motor impulsionador para obter os resultados mais concretos e fiáveis. O trabalho numérico neste estudo tem como objetivo principal a reprodução dos resultados experimentais através da utilização de leis de dano coesivo obtido pelo método direto, para posterior previsão de resistência de juntas com estes adesivos. É também efetuada uma análise de sensibilidade dos parâmetros coesivos, para compreender a sua influência nos resultados da simulação. As simulações foram feitas recorrendo ao MEF (Método de Elementos Finitos), incluindo o MDC formulado seguidamente [53].

## 4.1 Condições da análise numérica

Neste estudo recorreu-se ao *software* ABAQUS®, um dos principais *softwares* utilizados para estudo de juntas adesivas e estruturas complexas [11]. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões (2D), com elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4 do ABAQUS). Para simular o adesivo foi usado um elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS), já utilizado em estudos anteriores [58], e que utilizou o modelo de dano coesivo com lei triangular de amaciamento. Para os elementos MDC na camada do adesivo, apenas foi considerado um elemento na direção da espessura do adesivo. Na análise de rotura por MDC foram consideradas não linearidades geométricas. Apresenta-se na Figura 67 o refinamento de malha utilizado nos modelos dos provetes ENF. Conforme se pode observar, o refinamento é variável em função da zona do provete.

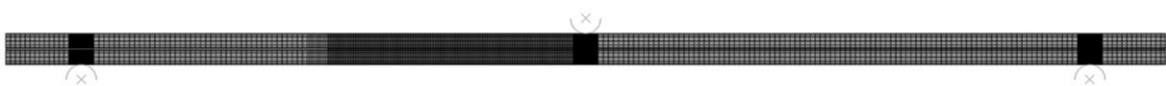


Figura 67 - Malha de MEF considerada para os provetes ENF a testar numericamente

A Figura 68 corresponde a um detalhe da malha na proximidade da extremidade da fenda, onde se pode observar os elementos coesivos representativos do adesivo com a dimensão de  $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ .

Na zona correspondente à pré-fenda, a malha não é tão refinada no sentido do comprimento dos provetes, uma vez que esta zona não estará sujeita a grandes gradientes de tensões. Na direção da espessura, foi utilizada uma gradação do tamanho dos elementos (efeito *bias*), no sentido do maior refinamento na proximidade do adesivo, devido à necessidade de modelação do adesivo com precisão, e também nas faces horizontais exteriores dos aderentes, para maior precisão das condições de contato com os cilindros de suporte e carregamento.

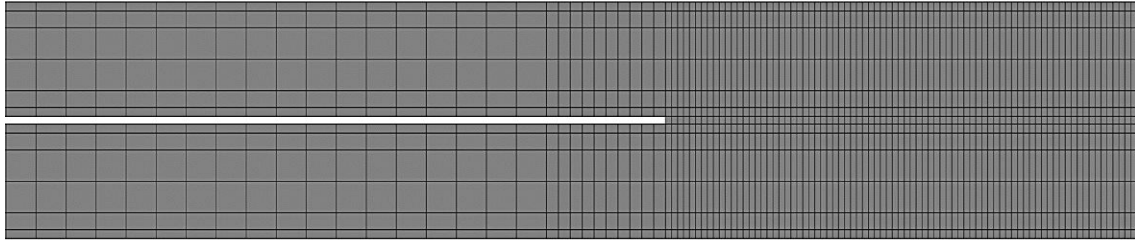


Figura 68 - Detalhe da malha MEF na proximidade da extremidade da fenda

Na Figura 69 exemplifica-se o refinamento da malha na zona de contacto entre o provete e um dos cilindros de suporte, na qual se utilizaram elementos com 0,05 mm de lado na zona que durante a análise estará em contato com o respetivo cilindro de suporte.

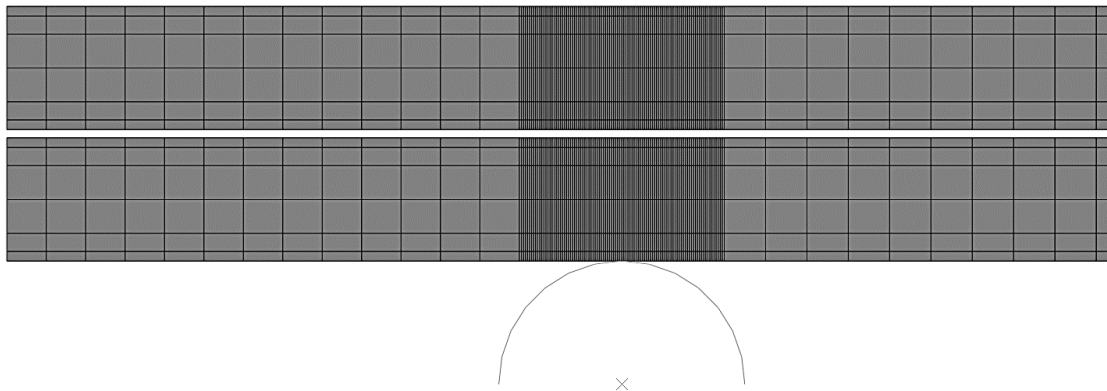


Figura 69 - Detalhe da malha de MEF na zona de contacto entre o provete e um dos cilindros de suporte

É representado na Figura 70 o detalhe da malha na zona de contato entre o provete e o cilindro de solicitação, onde se pode observar um refinamento de malha idêntico ao descrito anteriormente, e também uma malha mais grosseira na zona de propagação de dano à direita do cilindro de solicitação, uma vez que esta região já excede os limites de análise do ensaio ENF. As variações do número de elementos e do efeito *bias* na malha têm como intuito diminuir o esforço computacional, permitindo uma redução do tempo para obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensões.

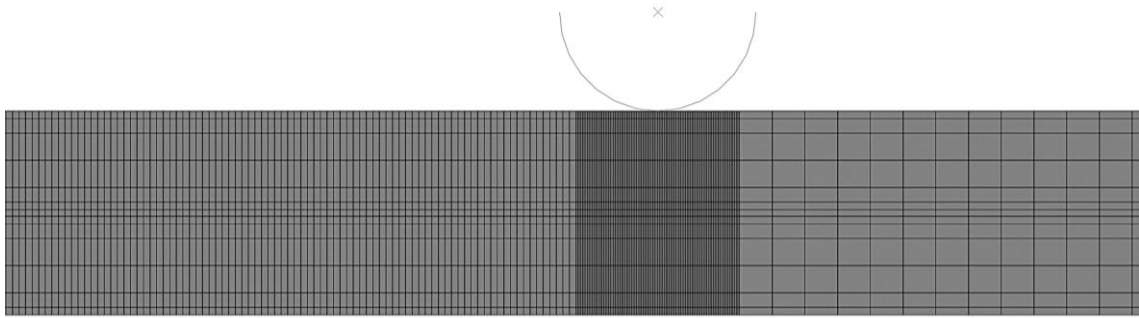


Figura 70 - Detalhe da malha de MEF na zona de contacto entre o provete e o punção de carregamento

Quanto às condições fronteira e de carregamento (Figura 71), de forma a modelar as condições reais dos ensaios experimentais, restringiram-se os cilindros de suporte nas duas direções e rotação no plano, restringiu-se o cilindro de carregamento na direção horizontal e aplicou-se um deslocamento vertical com sentido descendente e, finalmente, restringiu-se um nó a meio do comprimento do provete na direção horizontal para evitar o deslocamento horizontal do mesmo.

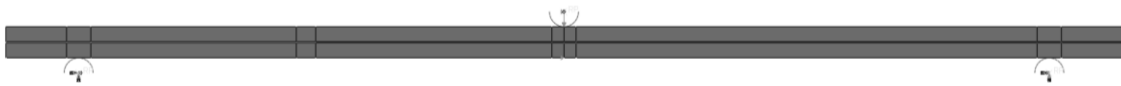


Figura 71 - Condições fronteira e de carregamento impostas nos modelos numéricos

Foi necessário introduzir condições de contato (Figura 72, Figura 73 e Figura 74) entre cada um dos três cilindros e o provete, e também entre os dois substratos na zona da pré-fenda, para garantir o deslizamento sem atrito e para evitar a interpenetração entre corpos. Foi utilizada uma formulação com pequeno deslizamento do tipo *surface to surface*, um comportamento tangencial sem fricção e um comportamento normal do tipo *hard contact*.

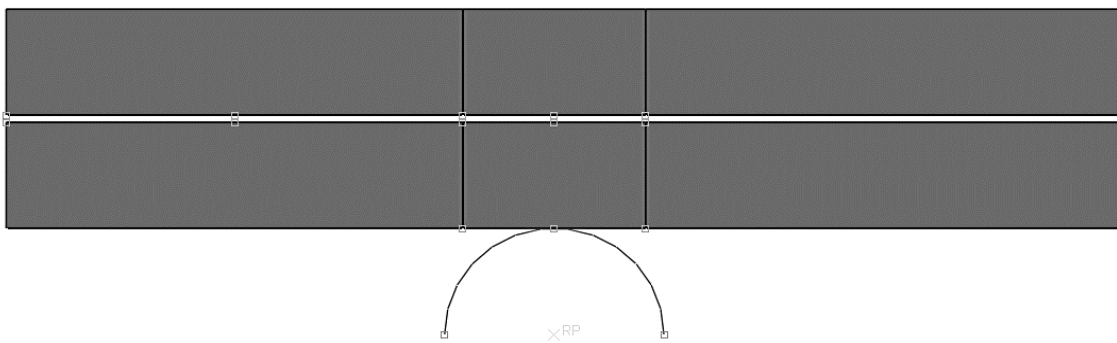


Figura 72 - Detalhe da zona de contacto no cilindro de suporte

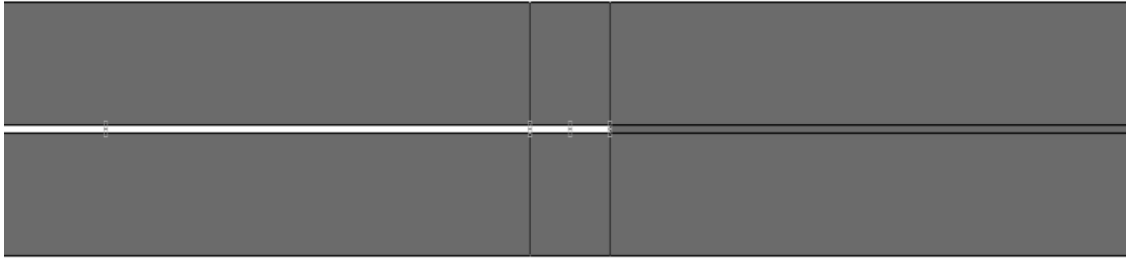


Figura 73 - Detalhe da zona de contacto entre aderentes na proximidade da extremidade da fenda

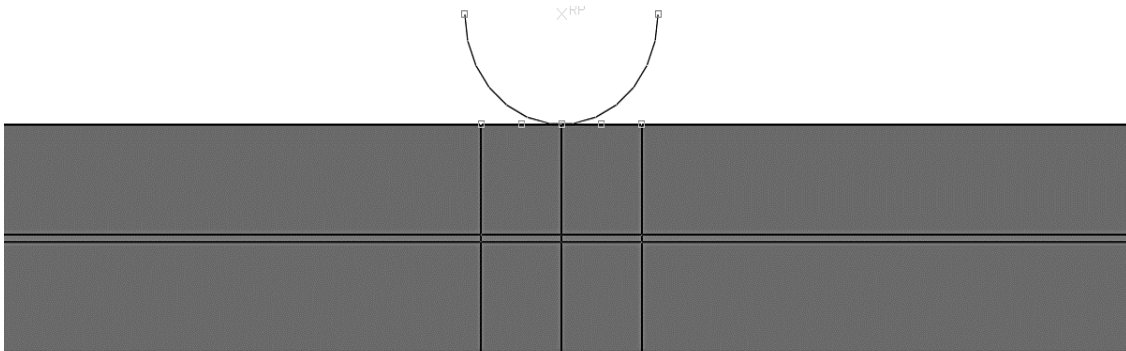


Figura 74 - Detalhe da zona de contacto no punção de carregamento

## 4.2 Modelo de dano coesivo

Os MDC baseiam-se 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 coesiva ( $t_n^0$  em tração ou  $t_s^0$  em corte) e subsequentemente a degradação das propriedades dos materiais até à rotura [63]. A aplicação de MDC tem sido muito frequente nos últimos anos em estudos de juntas adesivas [53, 54]. Os MDC tiveram início com os trabalhos de Barenblatt e Dugdale [65, 66, 67]. Neste estudo, foi proposto o conceito de zona coesiva para descrever o dano, sob cargas estáticas, da zona de processo coesiva no início da fenda. A partir daí, os MDC começaram a ser testados como forma de simular o início de dano e a respetiva propagação na zona coesiva e interfacial entre materiais. Estes modelos apresentam a vantagem de serem facilmente incorporados em programas que têm como base o MEF, o que lhes permite avaliar o comportamento de vários materiais à fratura. Os modelos desenvolvidos ao longo dos anos incluem leis triangulares, linear-parabólicas, polinomiais, exponenciais e trapezoidais [68]. Na Figura 75 estão representadas esquematicamente três formas de leis coesivas, triangular, trapezoidal e exponencial, com respetiva nomenclatura para as leis de tração e corte.

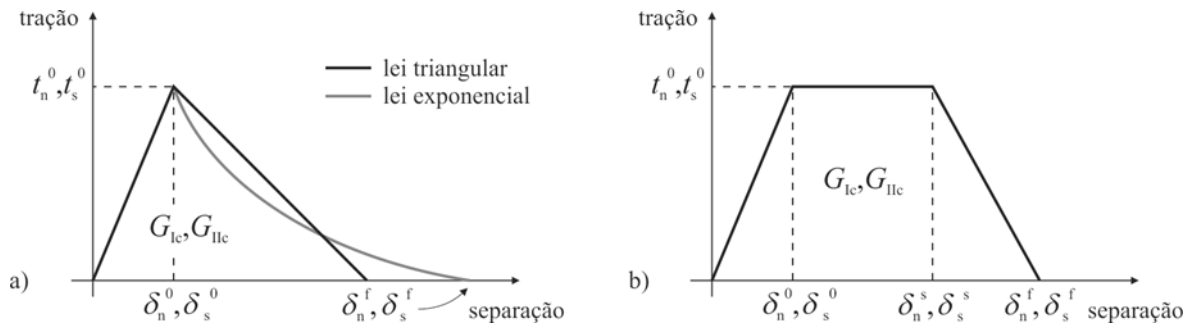


Figura 75 - Leis coesivas triangular, exponencial (a) e trapezoidal (b)

Na presente dissertação consideraram-se adesivos com comportamento bastante distinto, pelo que a discussão do tipo de lei coesiva se torna extremamente relevante. De facto, conforme se mostrará de seguida, a lei triangular é mais adequada à simulação de juntas adesivas com adesivos frágeis do que dúcteis e o modelo trapezoidal adapta-se melhor na simulação de adesivos dúcteis [69].

#### 4.2.1 Modelo de dano triangular

O uso dos MDC tem a vantagem de simular o comportamento de estruturas até à rotura face a solicitações externas e possibilita incluir nos modelos numéricos várias possibilidades de rotura em diferentes zonas ou entre as interfaces de materiais. O modelo de dano triangular está implementado no *software* ABAQUS® 2D e em três dimensões (3D). O modelo triangular em 2D está representado na Figura 32 O modelo 3D, embora muito semelhante ao anterior, inclui uma componente adicional ao corte. A lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, enquanto a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto. A lei de dano triangular assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva ( $\mathbf{K}_{COH}$ ) que contém os parâmetros de rigidez, e que relaciona as tensões e deformações em tração e corte ao longo dos elementos coesivos da seguinte forma

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{nn} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (29)$$

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por

$$\begin{aligned} K_{nn} &= E \\ K_{ss} &= G \\ K_{ns} &= 0. \end{aligned} \quad (30)$$

Neste trabalho considerou-se o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [58], definido de acordo com a equação

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1. \quad (31)$$

$\langle \rangle$  são os parênteses de Macaulay que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto, através da equação (31), a rigidez do material é degradada [36]. Quando a resistência coesiva em modo misto ( $t_m^0$ ) é atingido (Figura 32) pela igualdade da equação (31), a rigidez do material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (pelo deslocamento de rotura em modo misto,  $\delta_m^f$ , representado na Figura 32) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de  $G_{IC}$  e  $G_{IIC}$

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (32)$$

### 4.3 Validação da lei coesiva obtida

As simulações numéricas foram realizadas com as condições apresentadas anteriormente, com o objetivo de estabelecer, para cada adesivo testado, uma lei coesiva representativa do comportamento ao corte dos adesivos, de tal forma que esta possa ser utilizada numa fase posterior para prever a resistência de juntas adesivas.

O método utilizado, considerado como método direto (Integral- $J$ ), consistiu na idealização, para cada provete, de uma lei coesiva triangular que melhor se ajuste à respetiva lei obtida pelo método direto. Posteriormente, comparou-se a curva  $P$ - $\delta$  correspondente com a respetiva curva experimental. A análise dos diferentes adesivos será apresentada nos próximos subcapítulos, onde se apresentam as curvas  $P$ - $\delta$  experimentais e numéricas de dois provetes representativos de cada adesivo estudado, e onde são também discutidos os valores médios de  $P_{m\acute{a}x}$ , e  $\delta P_{m\acute{a}x}$  com o respetivo cálculo do erro.

#### 4.3.1 Araldite® AV138

A Figura 76 mostra a lei  $t_s^0$ - $\delta_s$  obtida experimentalmente no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138 e a respetiva aproximação triangular, cujo bom grau de aproximação é representativo de todos os ensaios.

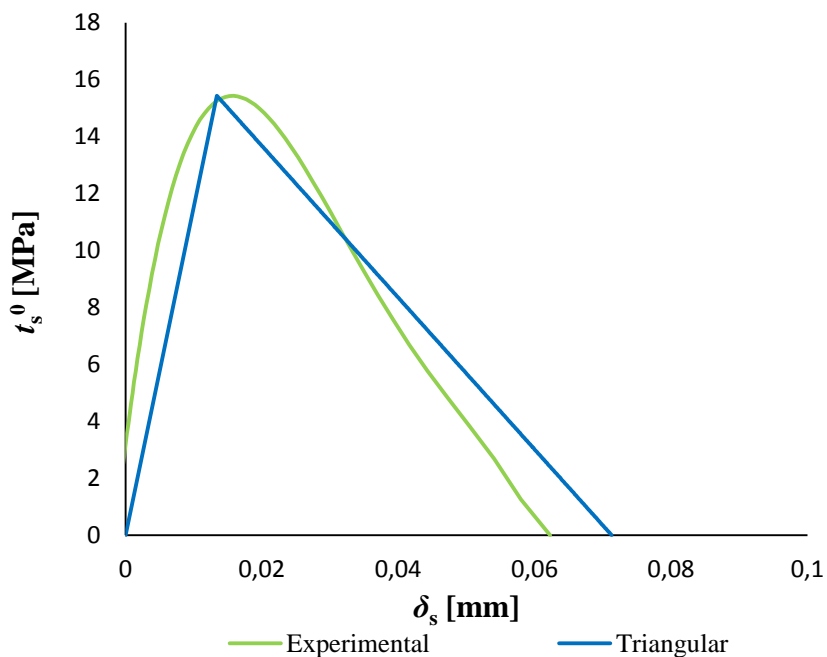


Figura 76 - Lei  $t_s^0$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® AV138 e respectiva aproximação triangular

A Figura 77 e Figura 78 mostram as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais de dois ensaios ENF com o adesivo Araldite® AV138, após a aplicação de uma lei coesiva triangular obtida pelo método direto. Verifica-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais, nomeadamente a zona do pós-pico que, como já foi referido, corresponde à propagação da fenda e, como tal, a zona de maior importância. De um modo geral, as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes. Para o adesivo em questão apresenta-se a Tabela 15, que indica os valores individuais de  $P_{m\acute{a}x}$  e o respetivo  $\delta P_{m\acute{a}x}$ , e o erro percentual destes dois parâmetros.

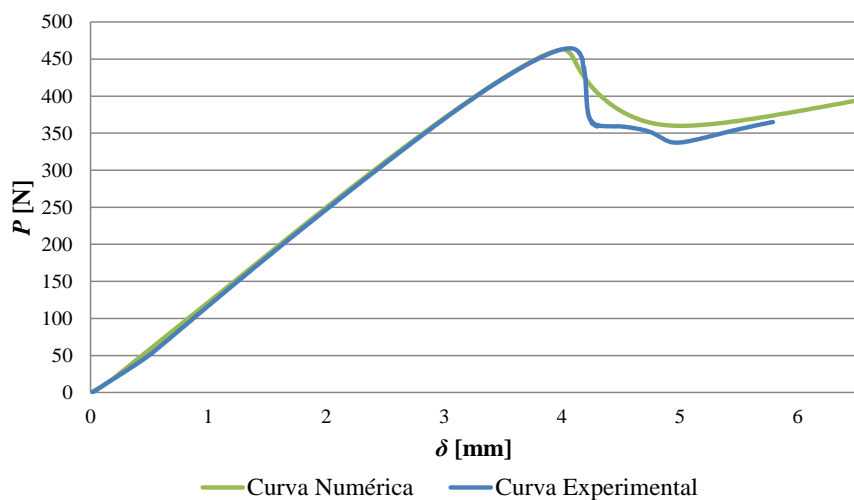


Figura 77 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica do provete AV138\_6

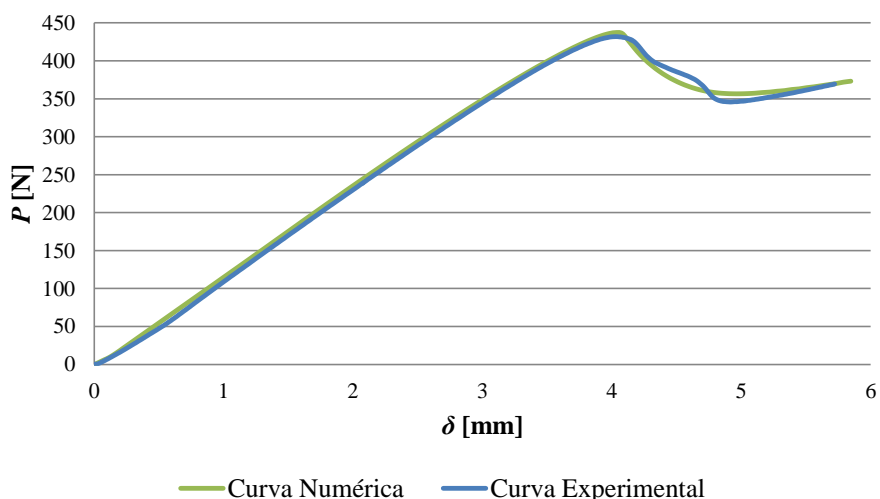


Figura 78 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica do provete AV138\_8

Tabela 15 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o adesivo Araldite®

AV138

Provete	Araldite® AV138					
	$P_{\text{máx}}$ [N]		Erro %	$\delta P_{\text{máx}}$ [mm]		Erro %
	Experimental	Numérico		Experimental	Numérico	
1	458,95	456,20	0,603	4,202	4,144	1,392
2	681,57	666,48	2,264	4,875	4,725	3,179
3	671,00	651,31	3,023	4,543	4,484	1,323
4	Anulado					
5	471,29	463,26	1,733	4,068	4,055	0,329
6	464,53	462,86	0,360	4,075	4,022	1,307
7	439,53	429,03	2,446	4,056	3,864	4,965
8	431,88	437,15	1,204	4,028	4,023	0,118
	<b>Média</b>		<b>1,662</b>	<b>Média</b>		<b>1,802</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,915</b>	<b>Desvio Padrão</b>		<b>1,583</b>

O provete 4 não foi considerado na análise devido à impossibilidade de cálculo de  $G_{IIC}$  e lei coesiva, conforme já referido no capítulo 3.4.1. Constata-se que os valores obtidos apresentam um excelente grau de concordância. O erro percentual médio para  $P_{\text{máx}}$  é de  $1,662 \pm 0,915\%$  e, para  $\delta P_{\text{máx}}$ , este é de  $1,802 \pm 1,583\%$ .

No geral, em função dos resultados obtidos considera-se que as leis coesivas obtidas experimentalmente pelo método direto para cada um dos provetes considerados válidos permitem reproduzir de forma bastante satisfatória o comportamento do adesivo.

### 4.3.2 Araldite® 2015

A Figura 79 (que é representativa de todos os ensaios) mostra que as leis coesivas triangulares obtidas para o adesivo Araldite® 2015 reproduzem de forma aceitável o comportamento do adesivo obtido pelo método direto. No entanto, devido ao comportamento moderadamente dúctil deste adesivo, uma lei coesiva trapezoidal também seria adequada, para melhor reproduzir o comportamento na proximidade de  $P_{\text{máx}}$  [70].

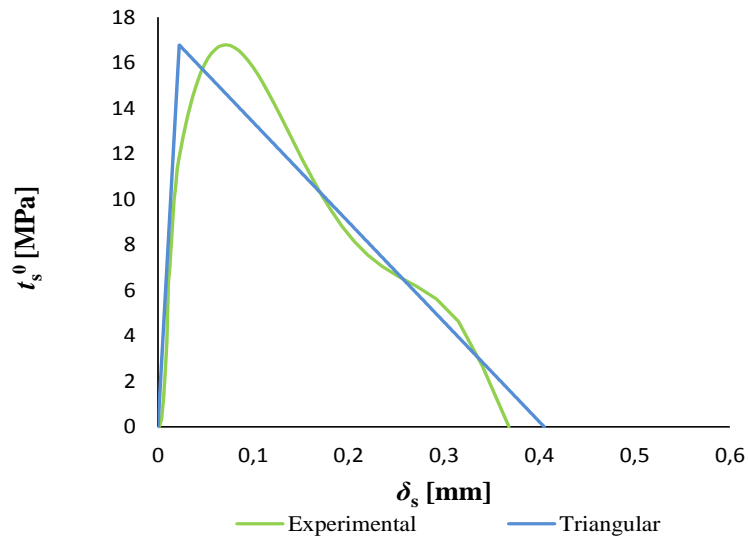


Figura 79 - Lei  $t_s^0$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo Araldite® 2015 e respectiva aproximação triangular

A Figura 80 e Figura 81 mostram exemplos da correlação obtida entre as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais para o adesivo Araldite® 2015. Na generalidade dos ensaios, verificou-se uma concordância bastante aceitável entre os resultados, mesmo no comportamento pós-pico, que é a zona que corresponde à propagação da fenda durante o ensaio. Observa-se assim, de um modo geral, que as curvas  $P$ - $\delta$  obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes. Apresenta-se a Tabela 16, que resume os resultados obtidos de  $P_{\text{máx}}$  e  $\delta P_{\text{máx}}$  em todos os ensaios.

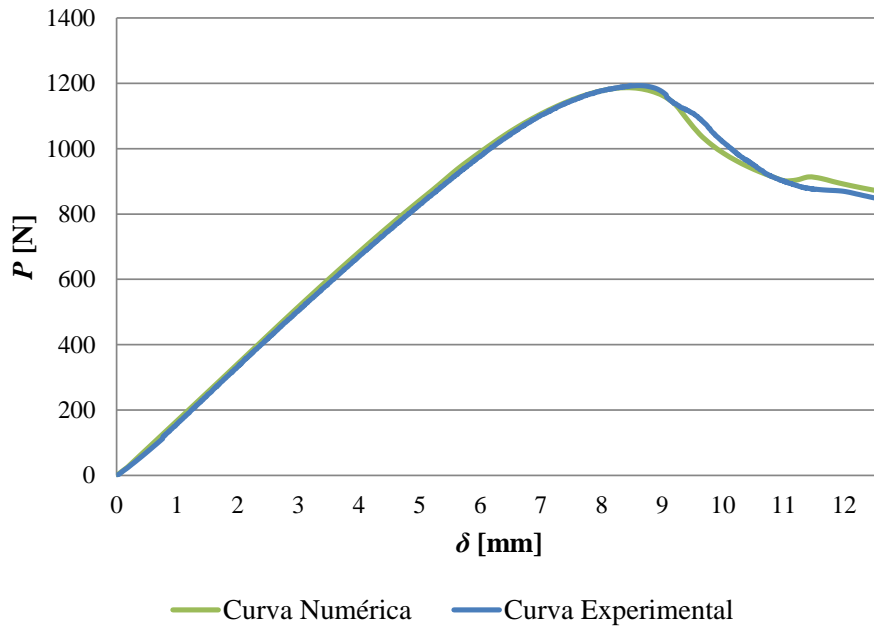


Figura 80 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica do provete 2015\_1

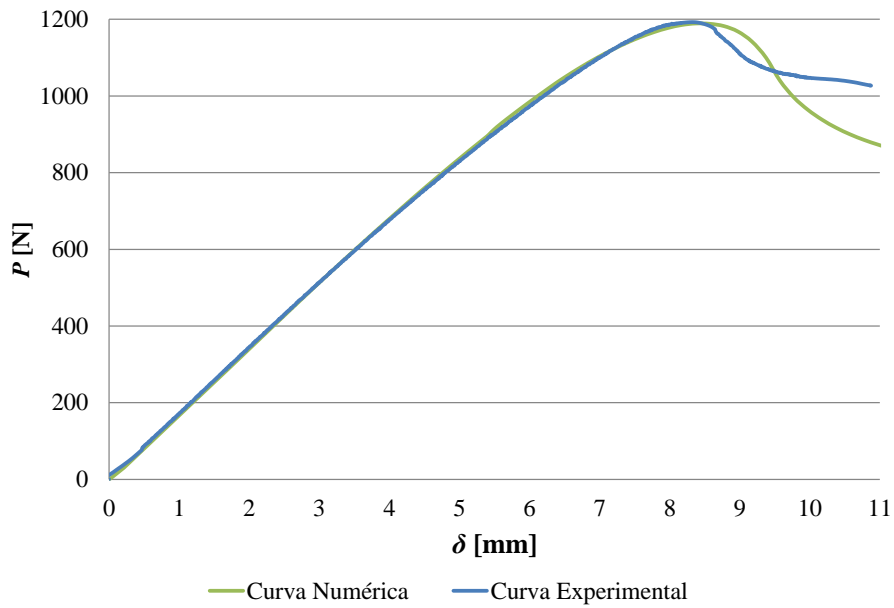


Figura 81 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica do provete 2015\_4

Verifica-se que, para os valores apresentados na Tabela 16, se obteve um bom grau de concordância. O erro percentual médio para  $P_{\text{máx}}$  é de  $0,64 \pm 0,468$  % e, para  $\delta P_{\text{máx}}$ , este é de  $1,29 \pm 0,918$  %.

Tabela 16 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o adesivo Araldite® 2015

Provete	Araldite® 2015					
	$P_{\text{máx}}$ [N]		Erro %	$\delta P_{\text{máx}}$ [mm]		Erro %
	Experimental	Numérico		Experimental	Numérico	
1	1193,22	1186,73	0,55	8,626	8,417	2,48
2	1162,62	1154,55	0,70	9,300	9,215	0,92
3	1097,85	1090,35	0,69	7,941	7,946	0,06
4	1192,64	1189,15	0,29	8,324	8,374	0,60
5	1170,06	1157,91	1,05	8,184	8,379	2,33
6	1272,00	1252,51	1,56	8,417	8,450	0,388
7	1082,77	1084,52	0,16	7,704	7,884	2,29
8	1076,84	1077,87	0,10	7,876	7,973	1,22
	<b>Média</b>		<b>0,64</b>	<b>Média</b>		<b>1,29</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,468</b>	<b>Desvio Padrão</b>		<b>0,918</b>

### 4.3.3 Sikaforce® 7752

Após aproximação das leis coesivas obtidas pelo método direto a leis triangulares (Figura 82 para um provete representativo dos ensaios), considera-se que estas não são as mais adequadas por promoverem uma degradação excessiva dos esforços transmitidos após o início do dano. Devido ao comportamento deste adesivo, é expectável que uma lei coesiva trapezoidal melhore substancialmente as previsões das curvas  $P$ - $\delta$ .

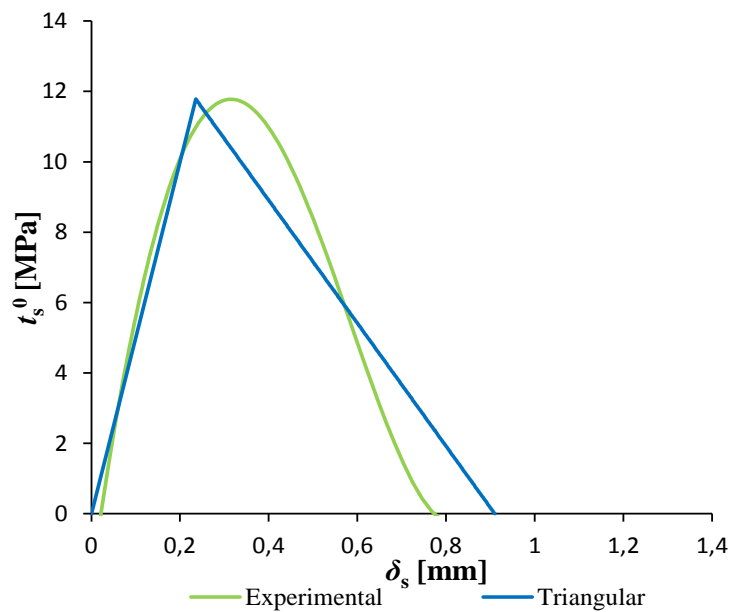


Figura 82 - Lei  $t_s$ - $\delta_s$  experimental no ensaio de um provete com o adesivo SikaForce® 7752 e respetiva aproximação triangular

A Figura 83 e Figura 84 mostram exemplos de curvas  $P$ - $\delta$  numéricas e experimentais para o adesivo SikaForce® 7752. Constata-se que os valores de  $P_{\text{máx}}$  numéricos são significativamente inferiores aos experimentais, o que se irá traduzir num erro maior do que nos adesivos anteriores. A Tabela 17 faz a comparação dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o adesivo SikaForce® 7752.

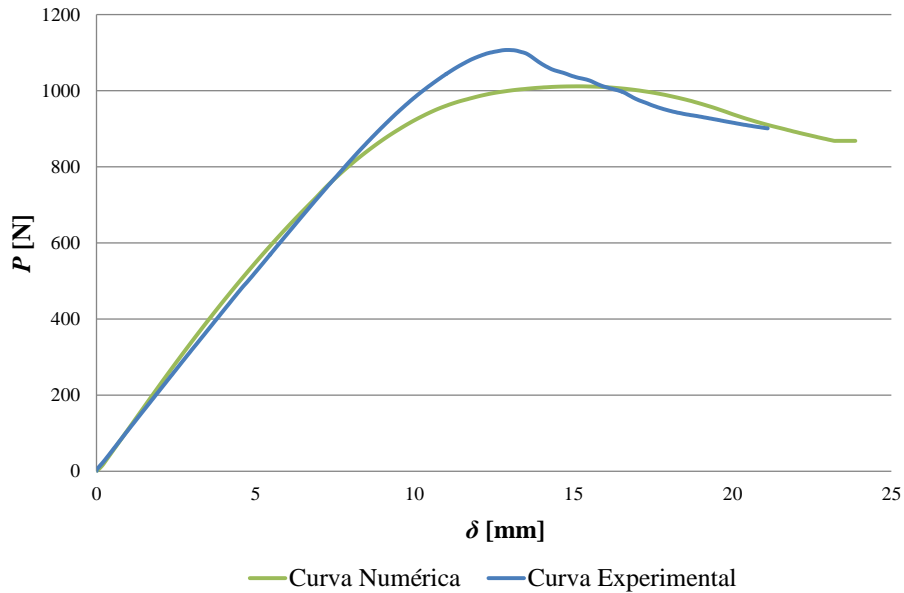


Figura 83 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica do provete 7752\_2

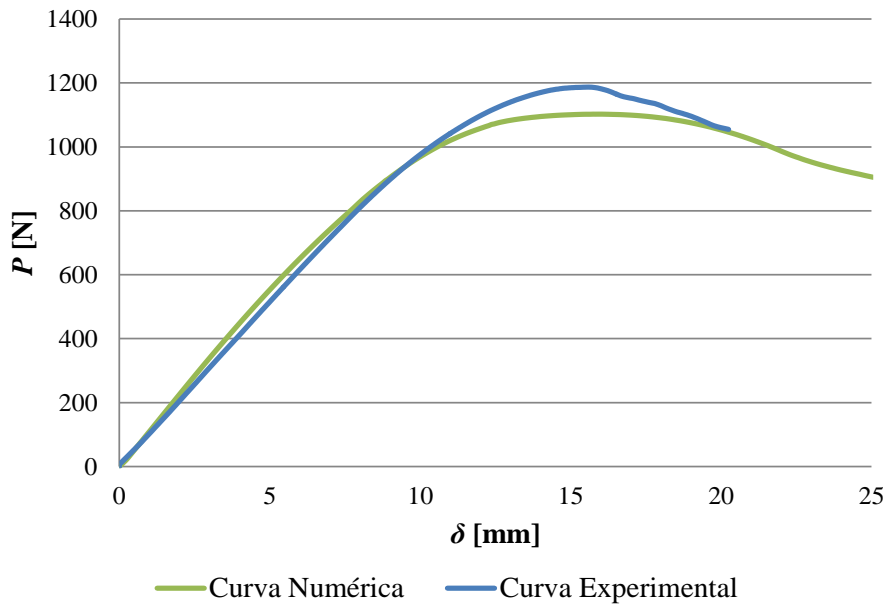


Figura 84 - Comparativo das curvas  $P$ - $\delta$  experimental e numérica do provete 7752\_6

Tabela 17 - Comparação dos valores obtidos experimentalmente e numericamente para o adesivo SikaForce®

7752

Provete	SikaForce® 7752					
	$P_{\text{máx}}$ [N]		Erro %	$\delta P_{\text{máx}}$ [mm]		Erro %
	Experimental	Numérico		Experimental	Numérico	
1	1191,69	1115,17	6,86	15,049	18,682	19,45
2	1106,93	1011,44	9,44	12,884	15,149	14,95
3	1103,60	1037,32	6,39	14,841	18,925	21,58
4	1079,21	1021,73	5,63	13,689	17,405	21,35
5	1127,81	1078,59	4,56	14,685	18,272	19,63
6	1187,11	1102,45	7,68	15,586	15,975	2,44
7	1181,80	1097,65	7,67	13,664	16,75	18,42
8	1181,80	1078,80	9,55	13,664	16,689	18,13
	<b>Média</b>		<b>7,22</b>	<b>Média</b>		<b>16,99</b>
	<b>Desvio Padrão</b>		<b>1,63</b>	<b>Desvio Padrão</b>		<b>5,83</b>

Ao analisar a Tabela 17, verifica-se que o erro percentual médio para  $P_{\text{máx}}$  é de  $7,22 \pm 1,63\%$  e, para  $\delta P_{\text{máx}}$ , este é de  $16,99 \pm 5,83\%$ .

#### 4.4 Análise de resultados

Neste capítulo apresenta-se a comparação de curvas típicas  $t_s$ - $\delta_s$  para cada um dos adesivos com leis simplificadas triangulares ou trapezoidais. A Figura 85 compara uma lei típica de cada adesivo com a lei MDC parametrizada que se adapta melhor a cada curva. Sendo o Araldite® AV138 um adesivo de comportamento frágil, este é melhor modelado por uma lei triangular. O adesivo Araldite® 2015 poderia ser modelado por um MDC triangular com um grau de precisão aceitável. Contudo, tendo em conta a geometria da curva e para capturar a zona de pico, a lei que se enquadra melhor é a lei trapezoidal. Para o adesivo SikaForce®7752, devido à sua ductilidade, deverá ser utilizada uma lei trapezoidal, para modelar o comportamento plástico deste adesivo. Estes resultados podem ser comparados com a análise obtida em [70], relativamente ao comportamento à tração dos adesivos Araldite® AV138 e 2015, e um poliuretano com características semelhantes ao SikaForce® 7752 (o SikaForce® 7888). O Araldite® AV138 também revelou um comportamento extremamente frágil, onde também foi proposta uma lei triangular. Por outro lado constatou-se que os adesivos Araldite® 2015 e o SikaForce® 7888 poderiam ser melhor reproduzidos por uma lei trapezoidal. Juntamente com os dados de caracterização de tração (as leis de tração para a Araldite® AV138 e 2015 estão disponíveis na referência [70]) e critérios de iniciação e propagação de dano, é possível prever a resistência de juntas coladas sob condições de cargas genéricas, para a modelação de MDC.

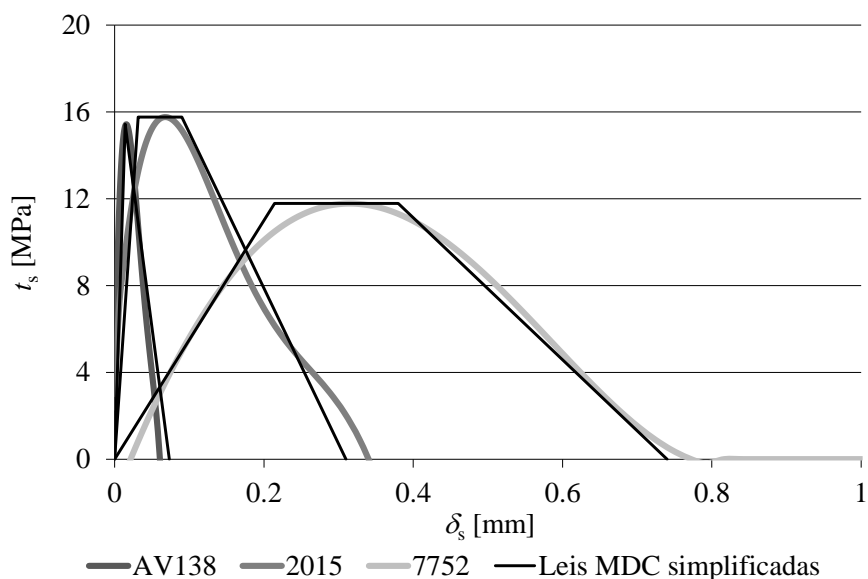


Figura 85 - Comparação de curvas representativas  $t_s$ - $\delta_s$  para cada um dos adesivos com leis MDC simplificadas

## 4.5 Análise de sensibilidade à lei coesiva obtida

No sentido de averiguar a influência dos parâmetros coesivos na previsão numérica das curvas  $P$ - $\delta$ , fez-se uma análise de sensibilidade destes parâmetros para os três adesivos em estudo. Para este efeito, foram utilizados diferentes valores de tenacidade, variando entre  $\pm 10\%$  e  $\pm 25\%$  do valor médio obtido pela aplicação do método direto (integral- $J$ ) para cada adesivo. Também se fez variar o valor de  $t_s^0$  (entre  $\pm 10\%$  e os  $\pm 50\%$  do valor médio obtido experimentalmente). Esta análise foi feita através da ferramenta numérica ABAQUS<sup>®</sup>, tendo como principal objetivo verificar os efeitos desta variação de parâmetros coesivos nas curvas  $P$ - $\delta$ .

### 4.5.1 Araldite<sup>®</sup> AV138

A Tabela 18 apresenta os valores de entrada para a análise da sensibilidade, considerando a variação de  $G_{IIC}$ . O efeito da variação dos parâmetros será observado nas curvas  $P$ - $\delta$ .

Pode-se observar na Figura 86 que, ao fazer variar o valor de  $G_{IIC}$  (-25%, -10%, +10% e +25%), tal afeta de forma significativa a curva  $P$ - $\delta$  do ensaio. De facto, embora a rigidez dos provetes se mantenha inalterada praticamente até  $P_{m\acute{a}x}$ , este valor reflete as variações de  $G_{IIC}$  tanto para aumento como para a redução deste parâmetro. De facto, observa-se uma translação de  $P_{m\acute{a}x}$  paralelamente à linha da rigidez inicial dos provetes, com variações proporcionais à percentagem de variação de  $G_{IIC}$ . Desta forma, o aumento ou redução de  $G_{IIC}$  traduz-se também numa variação análoga de  $\delta P_{m\acute{a}x}$ .

Tabela 18 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $G_{IIC}$  do adesivo Araldite® AV138

Análise de Sensibilidade	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
Valor médio obtido pelo integral- $J$	15,560	0,580
$G_{IIC} + 10\%$	15,560	0,638
$G_{IIC} + 25\%$	15,560	0,725
$G_{IIC} - 10\%$	15,560	0,522
$G_{IIC} - 25\%$	15,560	0,435

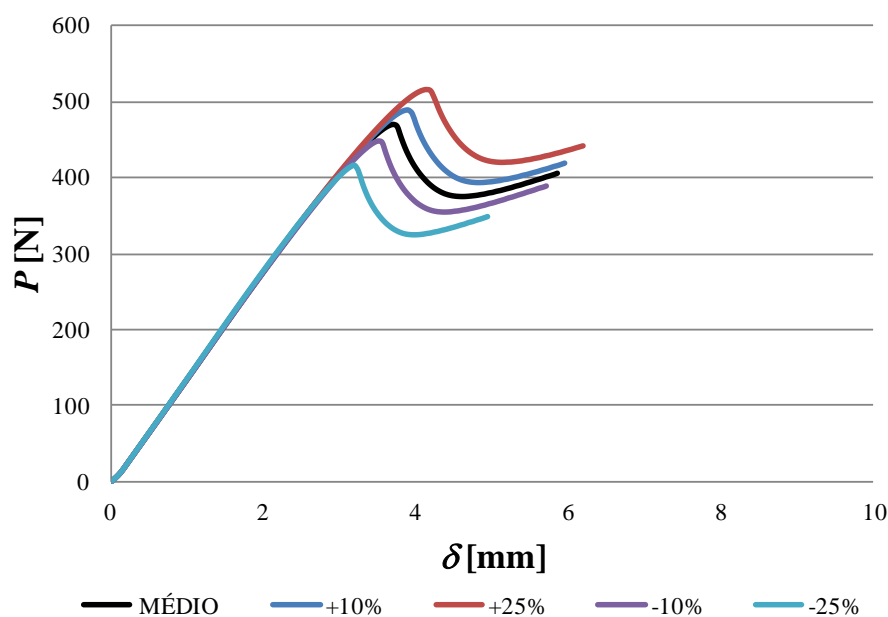


Figura 86 - Variação de  $G_{IIC}$  reproduzida nas curvas  $P$ - $\delta$ , para o Araldite® AV138

A Tabela 19 apresenta os valores dos parâmetros de entrada para a análise de sensibilidade da curva  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® AV138, agora considerando a variação de  $t_s^0$ , considerando variações de - 50%, -10%, +10% e +50% do valor médio de  $t_s^0$  obtido pelo método direto.

Na Figura 87 comparam-se as curvas  $P$ - $\delta$  numéricas para as condições mencionadas. Observou-se a variação  $P_{máx}$ , registando-se um ligeiro aumento na carga necessária para se iniciar a propagação da fenda com o aumento de  $t_s^0$  e uma redução mais significativa de  $P_{máx}$  com a diminuição de  $t_s^0$ . Esta diferença deve-se ao facto de que, para aumentos de  $t_s^0$ , a variação de  $P_{máx}$  está obviamente limitada pela rigidez máxima admissível que, para a condição inicial, já é praticamente linear. A variação de  $P_{máx}$  reflete-se diretamente na rigidez até  $P_{máx}$  de forma proporcional, isto é, há um ligeiro aumento de rigidez com o aumento de  $t_s^0$ , e uma redução mais significativa, desde valores de  $P$  bastante reduzidos, com a diminuição de  $t_s^0$ .

Tabela 19 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $t_s^0$  do adesivo Araldite® AV138

Análise de Sensibilidade	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
Valor médio obtido pelo integral- $J$	15,560	0,580
$t_s^0 + 10\%$	17,116	0,580
$t_s^0 + 50\%$	23,340	0,580
$t_s^0 - 10\%$	14,004	0,580
$t_s^0 - 50\%$	7,780	0,580

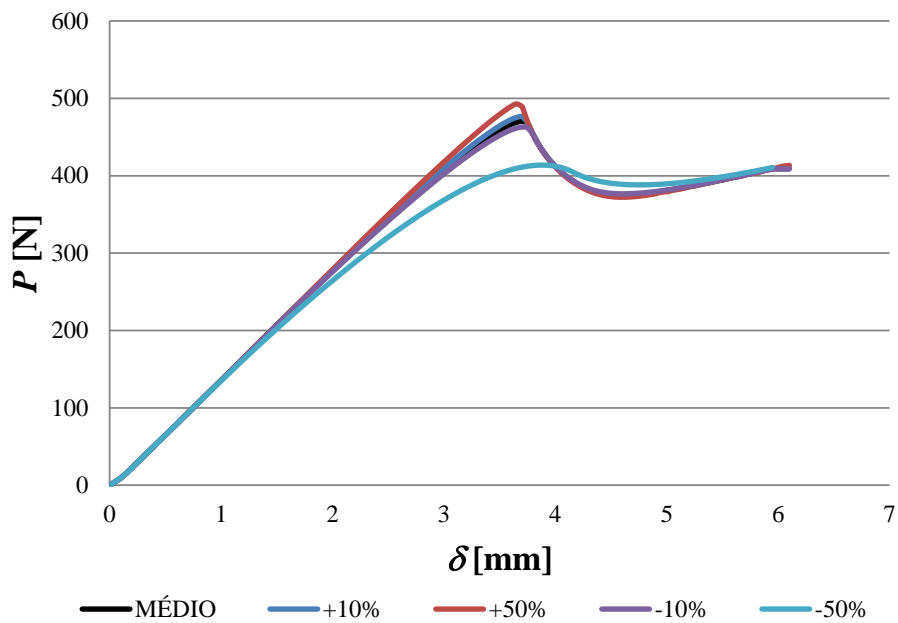


Figura 87 - Variação de  $t_s^0$  reproduzida nas curvas  $P$ - $\delta$ , para o Araldite® AV138

Para o adesivo em estudo, conclui-se que o valor de  $G_{IIC}$  influencia o valor da carga de pico, mantendo a rigidez, enquanto o aumento de  $t_s^0$  origina a necessidade de cargas maiores para iniciar a propagação da fenda com elevada rigidez até ao  $P_{máx}$ . Verificou-se uma redução da carga no pós-pico mais abrupta com o aumento de  $t_s^0$ . Isto indica que é possível obter uma lei coesiva única correspondente a cada ensaio.

### 4.5.2 Araldite® 2015

A Tabela 20 indica os valores de entrada para a análise de sensibilidade da curva  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite® 2015, fazendo variar o valor de  $G_{IIC}$  (-25%, -10%, +10% e +25% relativamente ao valor médio de  $G_{IIC}$  obtido pelo método direto).

Tabela 20 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $G_{IIC}$  do adesivo Araldite® 2015

Análise de Sensibilidade	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
Valor médio obtido pelo integral- $J$	15,516	3,180
$G_{IIC} + 10\%$	15,516	3,498
$G_{IIC} + 25\%$	15,516	3,975
$G_{IIC} - 10\%$	15,516	2,862
$G_{IIC} - 25\%$	15,516	2,385

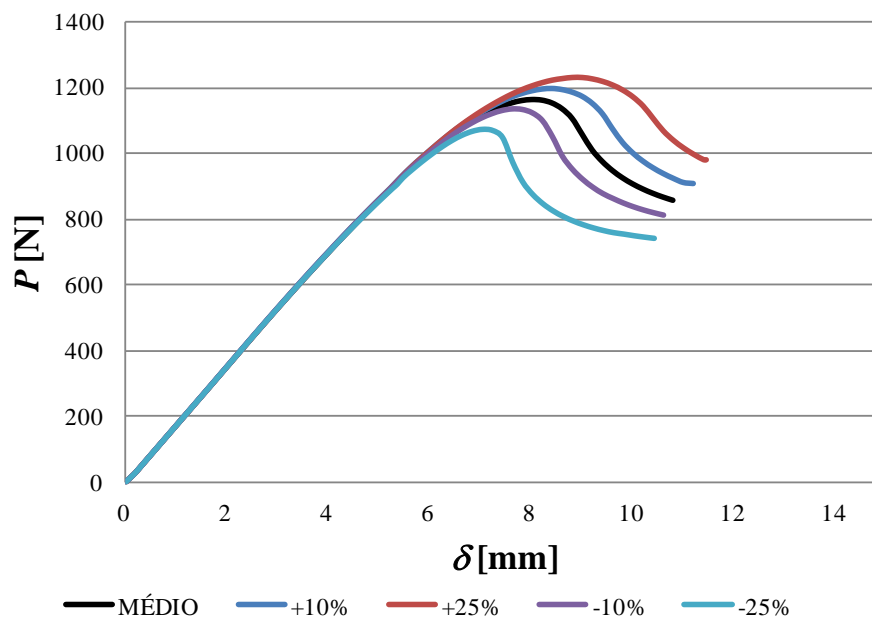


Figura 88 - Variação de  $G_{IIC}$  reproduzida nas curvas  $P$ - $\delta$ , para o Araldite® 2015

A Figura 88 mostra as curvas  $P$ - $\delta$  correspondentes às variações referidas de  $G_{IIC}$ . Observa-se um efeito significativo na curva  $P$ - $\delta$ , tal como aconteceu com o adesivo Araldite® AV138, o valor de  $P_{máx}$  volta a acompanhar a subida e a descida de  $G_{IIC}$ , embora sem alterar de forma perceptível a rigidez da curva  $P$ - $\delta$  até ao início do dano. Isto era esperado, uma vez que  $G_{IIC}$  deverá ser proporcional a  $P^2$ ,

conforme se encontra patente nas expressões de cálculo de  $G_{IIC}$  anteriormente apresentadas. O aumento do valor de  $G_{IIC}$  é acompanhado de um aumento de  $\delta P_{m\acute{a}x}$  e vice-versa.

A Tabela 21 indica os valores que foram usados na análise de sensibilidade da curva  $P$ - $\delta$  do adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015, considerando agora a variação de  $t_s^0$  (-50%, -10%, +10% e +50% do valor médio experimental).

Tabela 21 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $t_s^0$  do adesivo Araldite<sup>®</sup> 2015

<b>Análise de Sensibilidade</b>	<b><math>t_s^0</math> [MPa]</b>	<b><math>G_{IIC}</math> [N/mm]</b>
Valor médio obtido pelo integral- $J$	15,510	3,180
$t_s^0 + 10\%$	17,061	3,180
$t_s^0 + 50\%$	23,265	3,180
$t_s^0 - 10\%$	13,959	3,180
$t_s^0 - 50\%$	7,755	3,180

Na Figura 89 são comparados os resultados obtidos pelas curvas  $P$ - $\delta$  com as diferentes variações de  $t_s^0$ . Observa-se a variação da tensão de pico, registrando-se um aumento significativo na carga necessária para se iniciar a propagação da fenda com o aumento de  $t_s^0$ . No entanto, a redução de  $t_s^0$  abaixo de um dado valor provoca uma grande diminuição de rigidez antes da propagação da fenda e também de  $P_{m\acute{a}x}$ . Em geral, o comportamento é muito semelhante ao observado para o Araldite<sup>®</sup> AV138, embora o aumento de  $P_{m\acute{a}x}$  com o respectivo incremento de  $t_s^0$  seja superior ao anteriormente descrito para o adesivo anterior, pois agora o adesivo tem na curva inicial um maior amaciamento antes de  $P_{m\acute{a}x}$ , o que permite um acréscimo maior de  $P_{m\acute{a}x}$  com o aumento de  $t_s^0$ .

A variação da curva  $P$ - $\delta$  em função de  $G_{IIC}$  para este adesivo é bastante idêntica à observada para o Araldite<sup>®</sup> AV138, embora para este adesivo as curvas apresentem um ligeiro amaciamento antes de atingir  $P_{m\acute{a}x}$ . Como se observou no adesivo Araldite<sup>®</sup> AV138, comprova-se que  $t_s^0$  influencia de forma mais significativa o valor de  $P_{m\acute{a}x}$  para reduções de  $t_s^0$  do que para aumentos, embora a diferença não seja tão significativa como a observada para o Araldite<sup>®</sup> AV138. Conclui-se assim, também para este adesivo, que existe uma lei coesiva única que traduz de uma forma fiel cada ensaio realizado.

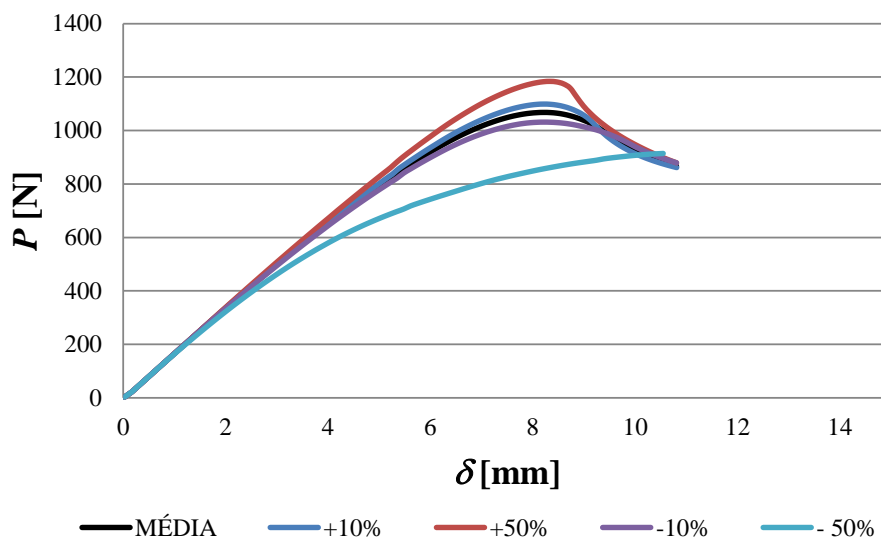


Figura 89 - Variação de  $t_s^0$  reproduzida nas curvas  $P$ - $\delta$ , para o Araldite® 2015

#### 4.5.3 Sikaforce® 7752

A Tabela 22 apresenta os parâmetros numéricos de entrada para realizar o estudo de sensibilidade da curva  $P$ - $\delta$  para o adesivo SikaForce® 7752, fazendo variar  $G_{IIC}$  em -25%, -10%, +10% e +25% do valor médio de  $G_{IIC}$ .

Tabela 22 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $G_{IIC}$  do adesivo SikaForce® 7752

Análise de Sensibilidade	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
Valor médio obtido pelo integral- $J$	11,590	5,670
$G_{IIC} + 10\%$	11,590	6,237
$G_{IIC} + 25\%$	11,590	7,088
$G_{IIC} - 10\%$	11,590	5,103
$G_{IIC} - 25\%$	11,590	4,253

O comportamento de pico neste adesivo é diferente do registado para os adesivos anteriores na medida em que apresenta características bastante dúcteis. Contudo, de acordo com a análise da Figura 90,  $G_{IIC}$  tem um efeito análogo aos adesivos anteriores, ou seja, alteração de  $P_{m\acute{a}x}$  em função de variação análoga de  $G_{IIC}$ , de forma aproximadamente proporcional. No entanto, neste adesivo é claro que o aumento de  $\delta P_{m\acute{a}x}$  é afetado de forma mais significativa com  $G_{IIC}$  do que no caso dos adesivos anteriores. Considera-se que esta diferença é devida à grande ductilidade deste adesivo.

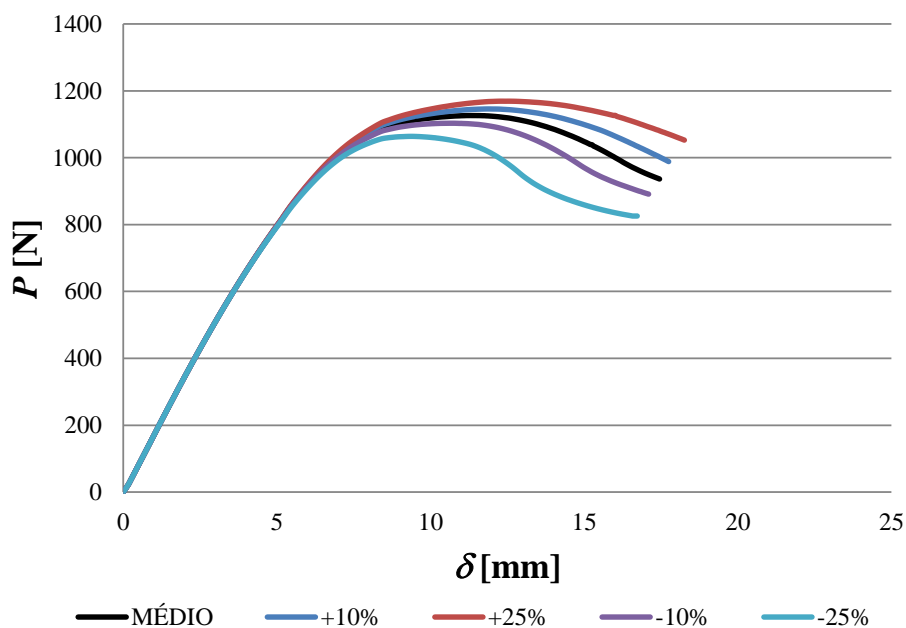


Figura 90 - Variação de  $G_{IIC}$  reproduzida nas curvas  $P-\delta$ , para o SikaForce® 7752

A Tabela 23 indica os valores que foram usados na análise de sensibilidade das curvas  $P-\delta$  do adesivo SikaForce® 7752, considerando variações idênticas de  $t_s^0$  relativamente aos adesivos anteriores (-50%, -10%, +10% e +50% do valor médio de  $t_s^0$ ).

Tabela 23 - Parâmetros numéricos de entrada, variando o  $t_s^0$  do adesivo SikaForce® 7752

Análise de Sensibilidade	$t_s^0$ [MPa]	$G_{IIC}$ [N/mm]
Valor médio obtido pelo integral- $J$	11,590	5,670
$t_s^0 + 10\%$	12,749	5,670
$t_s^0 + 50\%$	17,385	5,670
$t_s^0 - 10\%$	10,431	5,670
$t_s^0 - 50\%$	5,795	5,670

A Figura 91 mostra que o comportamento registado com a variação de  $t_s^0$  se traduz numa variação da curva  $P-\delta$  idêntica à observada para os dois adesivos anteriores. Deste modo,  $t_s^0$  afeta principalmente a rigidez antes de  $P_{máx}$  e o próprio valor de  $P_{máx}$ .

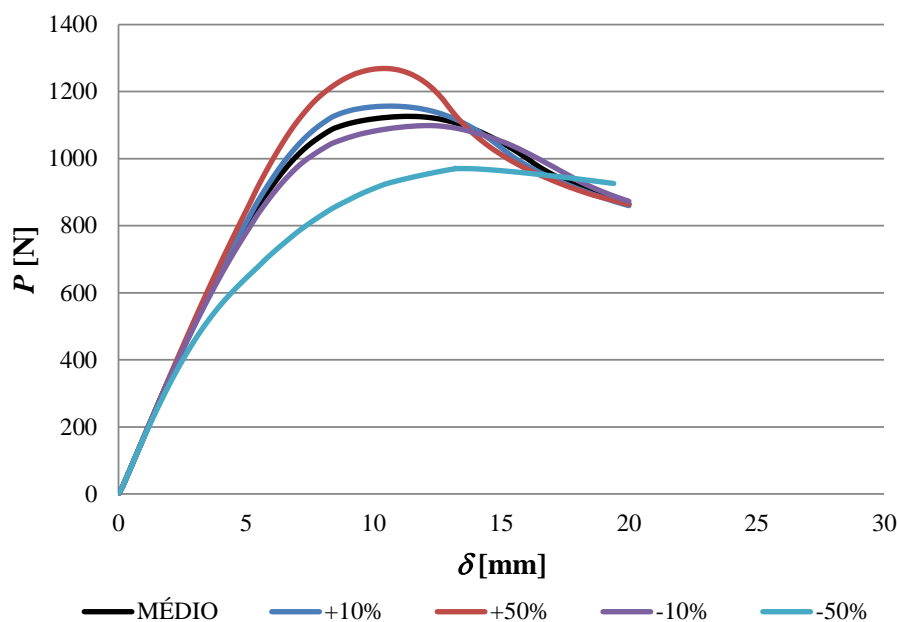


Figura 91 - Variação de  $t_s^0$  reproduzida nas curvas  $P-\delta$  para o SikaForce® 7752

A variação da curva  $P-\delta$  em função de  $G_{IIC}$  para este adesivo é ligeiramente diferente das observadas nos adesivos anteriores. O amaciamento analisado no Araldite® 2015 antes de atingir  $P_{máx}$  também se verifica para o SikaForce® 7752, embora neste caso de forma mais significativa. Neste adesivo, também há variações distintas relativamente aos parâmetros  $t_s^0$  e  $G_{IIC}$ , o que mostra que é possível de obter, com esta aproximação, uma lei coesiva única que caracterize o comportamento deste adesivo ao corte.

A análise do efeito de  $G_{IIC}$  para os 3 adesivos (Figura 86, Figura 88 e Figura 90) mostra que as variações nas curvas  $P-\delta$  são sempre similares entre variações positivas e negativas deste parâmetro, embora a forma das curvas seja bastante diferente, o que decorre da diferente ductilidade dos adesivos. Por outro lado, efetuando a comparação do efeito de  $t_s^0$  para os três adesivos (Figura 87, Figura 89 e Figura 91) observa-se que, para o adesivo mais frágil (Araldite® AV138), o aumento deste parâmetro provoca um aumento muito reduzido de  $P_{máx}$  comparativamente à redução observada com a redução de  $t_s^0$ . Com o aumento da ductilidade do adesivo, o efeito de  $t_s^0$  em  $P_{máx}$  aproxima-se entre a redução e aumento de  $t_s^0$  até que este é praticamente idêntico para o SikaForce® 7752. Esta diferença está relacionada com o comportamento mais linear até  $P_{máx}$  para adesivos frágeis, o que nestas circunstâncias impossibilita grandes aumentos na linearidade até  $P_{máx}$ .



# 5 Conclusões

Inicialmente, este trabalho consistiu em estimar  $G_{IIC}$  para diferentes tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o SikaForce® 7752) utilizando o ensaio ENF. Este valor foi estimado por diferentes métodos: DBT, CBT, CCM, CBBM e integral- $J$ . No caso do integral- $J$ , o procedimento envolveu a utilização de um método CDI para o cálculo de  $\delta_s$ . Verificou-se que os valores médios na determinação experimental de  $G_{IIC}$  obtidos pelos métodos convencionais e pelo método direto para o adesivo Araldite® AV138 foram os seguintes [N/mm]:  $0,561 \pm 0,064$  (CCM),  $0,606 \pm 0,053$  (DBT),  $0,511 \pm 0,058$  (CBT),  $0,618 \pm 0,069$  e  $0,580 \pm 0,090$  (integral- $J$ ). No caso do Araldite® 2015 os resultados foram [N/mm]:  $3,113 \pm 0,334$  (CCM),  $2,859 \pm 0,238$  (DBT),  $2,517 \pm 0,164$  (CBT),  $2,967 \pm 0,273$  e  $3,181 \pm 0,249$  (integral- $J$ ). Para o adesivo SikaForce® 7752, dos métodos convencionais, apenas se utilizou o CBBM, que resultou em  $5,562 \pm 0,356$  [N/mm]. Para o integral- $J$  o valor de  $G_{IIC}$  foi  $5,667 \pm 0,459$  [N/mm].

Todos os métodos demonstraram boa concordância; contudo, o método CBT apresenta valores menores de  $G_{IIC}$  relativamente aos restantes (aproximadamente 17%). Comparando os requisitos de tempo entre os vários métodos, o CCM, DBT, e CBT necessitam da medição de  $a$  durante o teste, o que não acontece com o CBBM. Para além disso, o CCM envolve o ajuste polinomial da curva  $C=f(a)$  e sua derivação. Comparando os vários métodos, observa-se que o CBBM é o mais robusto e fiável, já que evita a medição de  $a$ , eliminando assim esta fonte de erro na medição de  $G_{IIC}$ . Para além deste facto, contabiliza de forma rigorosa a plasticidade na medição de  $G_{IIC}$ . Os restantes necessitam da medição de  $a$ , o que pode conduzir a erros significativos, nomeadamente se existir uma discrepância entre a rotura do adesivo e da tinta corretora usada para melhorar a visualização de fenda.

A aplicação do integral- $J$ , embora permita estimar a lei coesiva por diferenciação da curva  $G_{II}=f(\delta_s)$  é baseado na medição  $\delta_s$ , o que exige uma técnica de alta precisão devido aos valores extremamente reduzidos até iniciar a propagação da fenda, especialmente para adesivos frágeis. No entanto, tem a grande vantagem de fornecer a lei coesiva completa para previsão de resistência por MDC. Neste trabalho, utilizou-se um método de CDI para a determinação deste parâmetro. Após a análise das curvas  $t_s-\delta_s$  obtidas pelo método directo, obtiveram-se os seguintes parâmetros coesivos médios (entre parêntesis apresenta-se o desvio percentual): para o adesivo Araldite® AV138,  $t_s^0=15,6 \pm 1,39$

MPa (8,9%),  $\delta_s^0=0,0167\pm0,0016$  mm (9,80%) e  $\delta_{sc}=0,0618\pm0,0214$  mm (34,6%). Para o adesivo Araldite® 2015 obteve-se  $t_s^0=15,5\pm0,683$  MPa (4,4%),  $\delta_s^0=0,0702\pm0,0122$  mm (17,40%) e  $\delta_{sc}=0,372\pm0,0246$  mm (6,6%). Para o adesivo SikaForce® 7752, a média e o desvio dos parâmetros coesivos foram de  $t_s^0=11,8\pm0,807$  MPa (6,9%),  $\delta_s^0=0,328\pm0,0182$  mm (5,5%) e  $\delta_{sc}=0,781\pm0,107$  mm (13,7%).

A dispersão entre os provetes do mesmo adesivo é aceitável e mostra uma alta correlação entre as amostras. O desvio percentual dos parâmetros das leis coesivas foi geralmente inferior a 10 %, com a exceção de alguns casos em que  $\delta_s^0$  e  $\delta_{sc}$  ultrapassaram este valor. Com os resultados dos parâmetros coesivos comprova-se que SikaForce®7752 é o adesivo mais dúctil, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil. Sabe-se que um adesivo resistente mas frágil como o Araldite® AV138 atinge localmente nos bordos da junta adesiva uma tensão elevada, mas não permite a redistribuição do esforço para o interior desta. Como resultado, a tensão média de rotura da junta respetiva ao corte é muito baixa. Por outro lado, os adesivos menos resistentes e dúcteis, como o Araldite® 2015 e especialmente o SikaForce®7752, são capazes de distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica, o que torna as juntas mais resistentes do que aquelas com adesivos mais resistentes e frágeis.

A análise numérica realizada teve como objetivo inicial a validação das leis coesivas obtidas pelo método direto, após parametrização para uma lei triangular, após a aplicação de uma lei coesiva triangular. A comparação das curvas  $P-\delta$  foi realizada em termos de  $P_{m\acute{a}x}$  e respetivo  $\delta P_{m\acute{a}x}$ . Assim sendo, para o adesivo Araldite® AV138, o erro percentual médio entre as curvas  $P-\delta$  numéricas e experimentais para  $P_{m\acute{a}x}$  é de  $1,662\pm0,915\%$  e, para  $\delta P_{m\acute{a}x}$ , é de  $1,802\pm1,583\%$ . No caso do Araldite® 2015, regista-se um erro percentual médio para  $P_{m\acute{a}x}$  de  $1,662\pm0,915\%$  e, para  $\delta P_{m\acute{a}x}$ , de  $1,802\pm1,583\%$ . Quanto ao SikaForce® 7752, verifica-se um erro percentual médio para  $P_{m\acute{a}x}$  de  $7,22\pm1,63\%$  e, para  $\delta P_{m\acute{a}x}$ , este é de  $16,99\pm5,83\%$ . As leis coesivas ao corte obtidas pelo método direto confirmam o comportamento frágil do Araldite® AV138, já que este é melhor modelado por uma lei triangular. Quanto ao adesivo Araldite® 2015, este pode ser modelado por um MDC triangular com um grau de precisão aceitável. Contudo, tendo em conta a geometria da curva e para capturar a zona de pico, a lei que se enquadra melhor é provavelmente a lei trapezoidal. Para o adesivo SikaForce® 7752, devido à sua ductilidade, deverá ser utilizada uma lei trapezoidal, para modelar de forma correta o comportamento plástico deste adesivo.

Foi ainda realizado numericamente um estudo de sensibilidade para averiguar a influência dos parâmetros coesivos na previsão das curvas  $P$ - $\delta$ . Para este efeito, foram utilizados diferentes valores de  $G_{IIC}$ , entre  $\pm 10\%$  e  $\pm 25\%$  do valor médio obtido pela aplicação do método direto (integral- $J$ ) para cada adesivo. Também se fez variar o valor de  $t_s^0$  (entre  $\pm 10\%$  e os  $\pm 50\%$  do valor médio obtido experimentalmente).

A análise do efeito de  $G_{IIC}$  para os três adesivos mostra que as variações nas curvas  $P$ - $\delta$  são sempre similares entre variações positivas e negativas deste parâmetro, embora a forma das curvas seja bastante diferente, o que decorre da diferente ductilidade dos adesivos. Por outro lado, efetuando a comparação do efeito de  $t_s^0$  observa-se que, para o adesivo mais frágil (Araldite® AV138), o aumento de  $P_{m\acute{a}x}$  é muito reduzido para incrementos de  $t_s^0$ , comparativamente à redução observada com a diminuição de  $t_s^0$ . Com o aumento da ductilidade do adesivo, o efeito de  $t_s^0$  em  $P_{m\acute{a}x}$  aproxima-se entre reduções e aumentos de  $t_s^0$ , até que este é praticamente idêntico para o SikaForce® 7752. Esta diferença está relacionada com o comportamento mais linear até  $P_{m\acute{a}x}$  para adesivos frágeis com as propriedades iniciais consideradas, o que nestas circunstâncias impossibilita grandes aumentos na linearidade até  $P_{m\acute{a}x}$  para o Araldite® AV138.

A utilização das leis coesivas ao corte determinadas nesta dissertação, em conjunto com a caracterização dos mesmos adesivos à tração, permite a criação de leis coesivas em modo misto para cada um dos adesivos. Estas, por sua vez, permitirão efetuar a previsão de resistência em juntas de geometria genérica, com vantagens decorrentes dos custos e tempos de projeto de estruturas com juntas adesivas.

Como trabalhos futuros sugere-se os seguintes temas:

- Determinar as leis coesivas dos adesivos testados nesta dissertação à tração pelo método direto, para possibilitar a leis coesivas em modo misto e assim prever a resistência de juntas adesivas genéricas;
- Adequar diferentes tipos de leis coesivas para os adesivos dúcteis testados nesta dissertação, para obter um melhor acordo dos resultados obtidos;
- Averiguar a influência da velocidade de ensaio nas leis coesivas ao corte obtidas pelo método direto;
- Estudar a influência de parâmetros geométricos como a espessura do adesivo ou do aderente nas leis coesivas ao corte pelo método direto.



## Referências

- [1] A. C. C. Leitão, R. D. S. G. Campilho e D. C. Moura, “Shear characterization of adhesive layers by advanced optical techniques,” *Experimental Mechanics*, in press.
- [2] L. F. M. da Silva, A. G. Magalhães e M. F. S. F. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, Porto: Publindustria, 2007.
- [3] A. M. G. Pinto, “Ligações Adesivas Entre Materiais Poliméricos: Tese de Doutorado,” FEUP, Porto, 2007.
- [4] S. Ebnesajjad e A. H. Landrock, *Adhesives Technology Handbook*, 3rd Edition, Amsterdam, Netherlands: William Andrew, 2014.
- [5] J. Panek, *Polysulfide sealants and adhesives*, Van Nostrand Reinhold, New York: Handbook of Adhesives (I. Skeist, ed.), 3rd ed, 1990..
- [6] C. J. Constante, “Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais,” Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [7] P. E. W. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants* 2nd ed., New York, N.Y: McGraw-Hill, 2000.
- [8] J. C. S. Azevedo, “Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio ENF,” Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [9] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, “Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes,” *International Journal & Adhesives*, vol. 29, pp. 195-205, 2009.
- [10] J. P. M. Gonçalves, M. F. S. F. de Moura e P. M. S. T. de Castro, “A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesives joints,” *Internacional Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 22, pp. 357-365, 2002.
- [11] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, “Modeling single and double lap repairs on composite materials.,” *Composite Science and Technology*, vol. 65, pp. 1948-1958, 2005.
- [12] M. Das, E. Madenci e D. R. Ambur, “Three-dimensional nonlinear analyses of scarf repair in composite laminates and sandwich panels,” *Journal of Mechanics of Materials and Structures*, vol. 9, pp. 1641-1658, 2008.

- [13] J. R. Montes, C. M. Lucas e J. C. R. Romero, *Procesos industriales para materiales no metálicos*, Madrid España: 2ª Edición: Edutirial Vision Net..
- [14] A. V. Pocius, *Adhesion and Adhesives Technology: An Introduction*, Hanser, 2002.
- [15] M. M. Gauthier, "Sorting out structural adhesives," em *Advanced Materials & Processes.*, ASM - International , 1990, p. 138.
- [16] M. A. Pereira, "Fratuira interlaminar de compósitos de matriz polimérica," Tese de Doutorado, Universidade de Aveiro, 2006.
- [17] G. S. J. Fernlund, "Failure load prediction," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 11, pp. 213-227, 1991.
- [18] Y. Zhu, 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*, vol. 46, n° 31-51, 2009.
- [19] G. R. Irwin e J. Kies., "Critical energy rate analysis of fracture strength," *Welding Journal (Research Supplement)* , vol. 33, pp. 193-198, 1954.
- [20] H. M. Westergaard, "Bearing pressures and cracks.," *Journal of Applied Mechanics*, vol. 6, pp. A49-A53, 1955.
- [21] J. A. B. P. Neto, "Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito," Tese de Mestrado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2011.
- [22] R. D. S. G. Campilho, D. C. de 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 & Adhesives*, vol. 53, pp. 15-22, 2014.
- [23] M. F. S. F. de Moura, J. P. M. Gonçalves, J. A. G. Chousal e R. D. S. G. Campilho, "Cohesive and Continuum Mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behavior of bonded joint," *International Journal of Adhesion & Adhesives.*, vol. 28, pp. 419-426, 2008.
- [24] A. Arrese, N. Carbajal, G. Vargas e F. Mujika, "A new method for determining mode II R-curve by the End-Notched Flexure test," *Engineering Fracture Mechanics*, pp. 51-70, 2009.
- [25] F. G. A. Silva, J. J. L. Morais, N. Dourado, J. Xavier, F. A. M. Pereira e M. F. S. F. de Moura, "Determination of cohesive laws in wood bonded joints under mode II loading using the ENF test," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, pp. 54-61, 2014.
- [26] H. Yoshihara, "Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, pp. 2065-2077, 2004.
- [27] B. Blackman, A. J. Brunner e J. Williams, "Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem.," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, pp. 2443-2455., 2006.

- [28] A. J. Russel e K. N. Street, "Moisture and temperature effects on the mixed-mode delamination fracture of unidirectional graphite/epoxy ASTM STP," vol. 876, pp. 349-370., 1985.
- [29] H. H. K. Xu, L. Wei, N. P. Padture, B. R. Lawn e R. L. Yeckley, "Effect of microstructural coarsening on Hertzian contact damage in silicon nitride," *Journal of Materials Science*, vol. 30, pp. 869-878, 1995.
- [30] P. Hari e D. A. Dillard, "Effect of mode-mixity on the fracture toughness of Ti-6Al-4V/FM-5 adhesive joints," *International Journal of Fracture*, vol. 96, pp. 215-228, 1999.
- [31] H. L. J. Pang, "Mixed mode fracture analysis and toughness of adhesive joints.," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 51, pp. 575-583, 1995.
- [32] J. R. Reeder e J. H. Crews, "Mixed mode bending method for delamination testing," *AIAA Journal*, vol. 28, pp. 1270-1276, 1990.
- [33] Z. Liu, R. F. Gibson e G. M. Newaz, "Modification of the Composite Laminate Mixed Mode Bending Test for Fracture Testing of Adhesive Joints," em *Proceedings of the American Society of Composites, 15th Technical Conference*, Texas, 2000.
- [34] D. A. Dillard e H. K. Singh, "Observations of decreased fracture toughness for mixed mode fracture testing of adhesively bonded joints," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 23, pp. 1515-1530., 2009.
- [35] C. Sarrado, A. Turon, J. Renart e J. Costa, "An experimental data reduction method for the Mixed Mode Bending test based on the J-integral approach," *Composites Science and Technology*, vol. 117, pp. 85-91, 2015.
- [36] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho e J. P. M. Gonçalves, "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints.," *International of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 1589-1595, 2009.
- [37] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho e G. J. P. M. M., "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading," *Composites Science and Techonogy*, vol. 68, pp. 2224-2230, 2008.
- [38] A. Elmarakbi, *Advanced composite materials for automotive applications: Structural integrity and crashworthiness*, Wiley, Hoboken, 2014.
- [39] Y. Wang e J. G. Williams, "Corrections for mode II fracture toughness specimens of composite materials," *Composite Science Technology*, vol. 43, pp. 251-256, 1992.
- [40] R. D. S. G. Campilho, "Repair of composite and wood structures.," Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, 2009.

- [41] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, J. A. B. P. Neto e L. F. M. d. Silva, “Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 88, pp. 513-533, 2013.
- [42] R. J. Rice, “A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks,” *Journal of Applied Mechanics*, vol. 35, pp. 379-386, 1968.
- [43] U. Stigh, K. S. Alfredsson, T. Anderson, 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*, vol. 165, pp. 149-162, 2010.
- [44] S. Marzi, A. Biel e U. Stigh, “On experimental methods to investigate the effect of layer thickness on the fracture behavior of adhesively bonded joints,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 31, pp. 840-850, 2011.
- [45] K. Leffler, K. Alfredsson e U. Stigh, “Shear behaviour of adhesive layers,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, pp. 530-545, 2007.
- [46] U. Stigh, S. K. Alfredsson e A. Biel, “Measurement of cohesive laws and related problems,” em *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Lake Buena Vista, Florida, USA, November 13-19, 2009.
- [47] J. Brillaud e F. Lagattu, “Limits and possibilities of laser speckle and white-light image-correlation methods: theory and experiments,” *In Applied Optics*, vol. 41, p. 6603–6613., 2002.
- [48] M. A. Sutton, W. J. Wolters, W. H. Peters, W. F. Ranson e S. R. McNeil., “Determination of Displacements Using an Improved Digital Correlation Method,” vol. 1, In *Image and Vision Computing*, 1983, pp. 133-139.
- [49] H. A. Bruck, S. R. McNeil, M. A. Sutton e W. H. Peters, “Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction,” *Experimental Mechanics*, vol. 29, pp. 261-267, 1989.
- [50] T. C. Chu, W. F. Ranson e M. A. Sutton, “Applications of digital-image-correlation techniques to experimental mechanics,” *Experimental Mechanics*, vol. 25, pp. 232-244, 1985.
- [51] J. Chen, X. Zhang, N. Zhan e X. Hu, “Deformation measurement across crack using two-step extended digital image correlation method,” *Optics Lasers Engineering*, vol. 48, pp. 1126-1131, 2010.
- [52] R. D. S. G. Campilho, 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*, vol. 6, pp. 50-120, 2013.

- [53] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, “Computational modelling of the residual strength of repaired composite laminates using a cohesive damage model,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 22, pp. 1565-1591, 2008.
- [54] M. S. Kafkalidis 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*, vol. 39, pp. 4367-4383, 2002.
- [55] W. Cui e M. R. Wisnom, “A combined stress-based and fracture-mechanics based model for predicting delamination in composites,” *Composites*, vol. 24, pp. 467-474, 1993.
- [56] Z. Petrossian e M. R. Wisnom, “Prediction of delamination initiation and growth from discontinuous plies using interface elements,” *Composites: Part A – Applied Science and Manufacturing*, vol. 29, pp. 503-515, 1998.
- [57] ASTM, *E8/E8M Standard test methods for tension testing of metallic materials*, 2004.
- [58] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, A. M. G. Pinto, L. F. M. da Silva e A. M. P. de Jesus, “Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 31, pp. 363-372, 2011.
- [59] J. A. B. P. Neto, R. D. S. G. Campilho e L. F. M. d. Silva, “Parametric study of adhesive joints with composites,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 37, pp. 96-101, 2012.
- [60] T. M. D. S. Faneco, “Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade,” Tese de Mestrado, Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [61] D. B. Lee, T. Ileda, N. Miyazaki e N. S. Choi, “Effect of bond thickness on the fracture toughness of adhesive joints,” *Journal of Engineering Materials and Technology Transactions of the Asme*, vol. 126, pp. 14-18, 2004.
- [62] G. Ji, Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe e S. S. Pang, “Effects of adhesive thickness on global and local mode-I interfacial fracture of bonded joints,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 47, pp. 2445-2458, 2010.
- [63] A. G. Turon, C. G. Dávila, P. P. Camanho e J. Costa, “An engineering solution for mesh size effects in the simulation of delamination using cohesive zone models,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74, pp. 1665-1682, 2007.
- [64] T. M. J., *Handbook of plastics joining: a practical guide - 2nd ed*, United States: William Andrew Inc, 2008.
- [65] D. S. Dugdale, “Yielding of steel sheets containing slits,” *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, vol. 8, pp. 100-104, 1960.

- [66] G. I. Barenblatt, "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axially symmetric cracks," *Applied Mathematics and Mechanics*, vol. 23, pp. 622-636, 1959.
- [67] G. I. Barenblatt, "The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture," *Advances in Applied Mechanics*, vol. 7, pp. 55-129, 1962.
- [68] L. F. M. da Silva e R. D. S. G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*, Porto: Springer, 2012.
- [69] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura, D. A. Ramantani, J. J. L. Morais, A. M. J. P. Barreto e J. J. M. S. Domingues, "Adhesively-bonded repair proposal for wood members damage by horizontal shear using carbon-epoxy patches," *Internacional Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 86, pp. 649-670, 2010.
- [70] C. J. Constante, R. D. S. G. Campilho e D. C. Moura, "Tensile fracture characterization of adhesive joints by standard and optical techniques," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 136, pp. 292-304, 2015.