



Obtenção das leis coesivas em corte de adesivos estruturais em função da espessura do adesivo

JOÃO CARLOS PEREIRA FIGUEIREDO

novembro de 2017

OBTENÇÃO DAS LEIS COESIVAS EM CORTE DE ADESIVOS ESTRUTURAIS EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO ADESIVO

João Carlos Pereira Figueiredo

1131390

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



OBTENÇÃO DAS LEIS COESIVAS EM CORTE DE ADESIVOS ESTRUTURAIS EM FUNÇÃO DA ESPESSURA DO ADESIVO

João Carlos Pereira Figueiredo

1131390

Dissertação apresentada ao Instituto Superior de Engenharia do Porto para cumprimento dos requisitos necessários à obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica, realizada sob a orientação de Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho e coorientação de Eduardo André de Sousa Marques, José Joaquim da Mota Machado e Lucas Filipe Martins da Silva.

2017

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

Doutor Leonardo José da Silva Ribeiro

Professor adjunto, ISEP

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor adjunto, ISEP

Coorientadores

Doutor Eduardo André de Sousa Marques

Professor adjunto convidado, ISEP

Mestre José Joaquim da Mota Machado

Investigador, INEGI

Doutor Lucas Filipe Martins da Silva

Professor associado, FEUP

Arguente

Doutor Jorge Américo Oliveira Pinto Belinha

Professor auxiliar convidado, FEUP

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela disponibilidade, dedicação, passagem de conhecimentos e apoio prestado durante a realização do presente trabalho. Sem a sua ajuda não seria possível a conclusão do mesmo.

Aos coorientadores Eduardo André de Sousa Marques, José Joaquim da Mota Machado e Lucas Filipe Martins da Silva, pelo apoio prestado no desenrolar da elaboração da tese principalmente na parte prática e na revisão final da mesma.

Gostaria de agradecer aos meus pais e ao meu irmão pela oportunidade e apoio oferecido durante todo este tempo que culmina com a entrega deste trabalho. À minha namorada, companheira e amiga Andreia pelo apoio, paciência e capacidade de gerir e ajudar em todas as situações. Aos meus companheiros (Rogério Faria, João Teixeira, Rui Machado e Joaquim Cunha), por todo o apoio prestado e espírito de entre ajuda que demonstraram. E ainda aos meus colegas de trabalho e toda a empresa que sempre me apoiaram.

Finalmente ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pelos conhecimentos transmitidos e pela disponibilização de meios para que a realização deste trabalho fosse possível.

PALAVRAS CHAVE

Juntas adesivas; Adesivos estruturais; *End-Notched Flexure* (ENF); Espessura adesiva; Modelos de Dano Coesivo; Taxa crítica de liberação de energia; Método de Elementos Finitos.

RESUMO

Para aumentar a confiança no design de estruturas adesivas, é importante prever com precisão a sua resistência mecânica. Neste contexto, as abordagens da mecânica da fratura possuem vantagens significativas em relação à mecânica dos meios contínuos. A abordagem da mecânica da fratura é frequentemente aplicada por uma análise energética, onde o parâmetro principal para prever a evolução do dano e da fenda é a taxa crítica de liberação de energia de deformação (G_C). Este parâmetro também pode ser dividido em componentes de tração (G_{IC}) e corte (G_{IIC}). Os modelos de dano coesivo (MDC) são uma técnica poderosa de previsão de resistência no âmbito da mecânica de fratura e usam leis coesivas para induzir crescimento da fenda nos modelos numéricos. Este trabalho tem como objetivo estimar G_{IIC} de juntas adesivas de estruturas compósitas pelo ensaio *End-Notched Flexure* (ENF), considerando diferentes valores de espessura de adesivo (t_a). Neste contexto, são comparados diferentes métodos de redução de dados para estimar G_{IIC} . Por outro lado, as leis coesivas de corte da camada adesiva são obtidas pelo método de elementos finitos (MEF) e MDC usando uma técnica inversa, que permita compreender a influência de t_a no comportamento de corte das ligações. Os modelos numéricos capturaram com precisão o comportamento experimental observado do adesivo. Foi encontrada uma clara dependência em relação a G_{IIC} e a resistência coesiva ao corte (t_s^0), dependendo de t_a .

KEYWORDS

Adhesive joint; Structural adhesive; End-Notched Flexure; Adhesive thickness; Cohesive Zone Models; Critical rate of energy release; Finite Element Method.

ABSTRACT

To increase the confidence in the design of bonded structures, it is important to accurately predict their mechanical strength. In this context, Fracture and Damage Mechanics approaches have significant advantages over Continuum Mechanics. The Fracture Mechanics approach is often applied by an energetic analysis, where the main parameter to predict the evolution of damage and failure is the critical strain energy release rate (G_c). This parameter can also be divided into the tensile (G_{Ic}) and shear (G_{IIc}) components. Cohesive Zone Models (CZM) are a powerful strength prediction technique within the scope of Fracture Mechanics and take advantage of cohesive laws to induce crack growth in the numerical models. This work aims to estimate G_{IIc} of adhesive joints of composite structures by the End-Notched Flexure (ENF) test, considering different values of adhesive thickness (t_a). In this context, different data reduction methods to estimate G_{IIc} are compared. On the other hand, the shear cohesive laws of the adhesive layer are obtained by the Finite Element Method (FEM) and CZM using an inverse technique, enabling to understand the influence of t_a on the joints' shear behaviour. The numerical models accurately captured the observed experimental behaviour of the adhesive. A clear dependency was found regarding both G_{IIc} and the shear cohesive strength (t_s^0), depending on t_a .

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

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

JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
NF	Norma Francesa
PTFE	Politetrafluoretileno
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
UV	Ultravioleta
ZPF	Zona de Processo de Fratura

Lista de Símbolos

$\gamma_{\text{máx}}$	Deformação máxima de corte
δ	Deslocamento
Δ	Fator de correção de α_0
Δ_l	Fator de correção do comprimento de fenda
δ_n	Deslocamento coesivo de tração
δ_n^0	Deslocamento coesivo da carga máxima à tração
δ_s	Deslocamento coesivo de corte
δ_s^0	Deslocamento coesivo da carga máxima ao corte

δ_s^f	Deslocamento de rotura ao corte
ε	Deformação
ε_n	Deformação em tração
ε_s	Deformação em corte
ν	Coeficiente de Poisson
σ_y	Tensão de cedência
τ_{max}	Tensão de rotura de corte

Símbolos romanos

$2L$	Distância entre apoios
a	Comprimento de fenda
a_0	Comprimento de fenda inicial (pré-fenda)
a_{eq}	Comprimento de fenda equivalente
B, b	Largura do substrato
C	Taxa de variação da flexibilidade do substrato
c	Fator comprimento ensaio MMB
C	Flexibilidade, Caminho em sentido anti-horário em torno da ponta da fenda
C_0	Flexibilidade inicial
C_{0corr}	Flexibilidade inicial corrigida
E	Módulo de Young
E_f	Módulo de flexão
E_x	Módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção xx

E_y	Módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção yy
G	Módulo de corte do adesivo, Taxa de libertação de energia da deformação
G_c	Taxa crítica de libertação de energia da deformação
G_I	Taxa de libertação de energia em modo I
G_{IC}	Taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração
G_{II}	Taxa de libertação de energia em modo II
G_{IIC}	Taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte
G_{xy}	Módulo de corte transversal dos aderentes
h, h_1, h_2	Espessura do substrato
J	Taxa de energia libertada não linear
K	Tenacidade à fratura
K_c	Tenacidade crítica à fratura
\mathbf{K}	Matriz que relaciona as tensões e deformação em tração e corte nos elementos coesivos
L	Distância entre apoios dividida por 2
$L/2$	Distância entre apoios dividida por 4
L_0	Comprimento de Sobreposição
m	Fator de geometria para provetes TDCB (declive)
P	Carga
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima
P_u	Carga aplicada por unidade de largura dos substratos
T	Carga máxima de inicio da propagação da fenda majorada em 150%

T	Vetor de tração
t_a, t_A	Espessura do adesivo
t_m^0	Resistência coesiva em modo misto
t_n	Tensão coesiva à tração
t_n^0	Resistência coesiva à tração
t_s	Tensão coesiva ao corte
t_s^0	Resistência coesiva ao corte
U	Densidade de energia de deformação do material
u	Campo de deformação

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 ESTRUTURA DE FUSELAGEM COM NOVA TECNOLOGIA DE JUNÇÃO DE COMPONENTES POR ADESIVOS [6].....	9
FIGURA 2 APLICAÇÕES DE ADESIVOS NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL [7]	10
FIGURA 3 ESFORÇOS DE TRAÇÃO A) E COMPRESSÃO B) [2]	11
FIGURA 4 DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE TRAÇÃO E COMPRESSÃO [2]	11
FIGURA 5 ESFORÇO DE CORTE E DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE [1].....	12
FIGURA 6 ESFORÇOS DE CLIVAGEM A) E DE ARRANCAMENTO B) E DISTRIBUIÇÃO DAS TENSÕES DE CLIVAGEM E DE ARRANCAMENTO [1]	12
FIGURA 7 DIFERENTES MODOS DE ROTURA EM JUNTAS ADESIVAS [1].....	13
FIGURA 8 TIPOS DE JUNTAS MAIS COMUNS [4].....	14
FIGURA 9 FAMÍLIAS DE ADESIVOS [1].....	16
FIGURA 10 OBTENÇÃO DE PROVETES MACIÇOS (NF T 76-142) [17]	19
FIGURA 11 PROVETES DE TRAÇÃO DE ACORDO COM A EN ISO 524-2 A)PROVETE LONGO B)PROVETE REDUZIDO (DIMENSÕES EM MM) [1]	20
FIGURA 12 EXEMPLO DE CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO [18]	20
FIGURA 13 PROVETE ARCAN (DIMENSÕES EM MM) [1]	21
FIGURA 14 ESQUEMA DE ENSAIO DE ARCAN [19].....	21
FIGURA 15 PROVETE PLANO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO (ASTM D 695) (DIMENSÕES EM MM) [20] 22	
FIGURA 16 PROVETE PARA ENSAIO DE TRAÇÃO EM JUNTA TOPO A TOPO [21].....	23
FIGURA 17 GEOMETRIA DE UMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES (DIMENSÕES EM MM) [22].....	24
FIGURA 18 GEOMETRIA DO PROVETE TAST [23].....	25
FIGURA 19 ENSAIO DE UM PROVETE TAST COM RECURSO A UM SISTEMA ÓTICO [23].....	25
FIGURA 20 PROVETE PARA ENSAIO DE ARRANCAMENTO JUNTA T [24].....	26
FIGURA 21 GEOMETRIA PROVETE JUNTA T (ASTM D1876) [24]	26
FIGURA 22 SISTEMA DE FIXAÇÃO PARA ENSAIOS DE IMPACTO EM JUNTAS ADESIVAS [1]	26
FIGURA 23 CURVA S-N PARA A ROTURA [1].....	27
FIGURA 24 DISPOSITIVOS PARA ENSAIOS DE FLUÊNCIA A) MOLA CARREGADA EM TRAÇÃO (ASTM D2294-96) B) MOLA CARREGADA EM COMPRESSÃO (ASTM D2293-96) [1]	28

FIGURA 25 ESQUEMA DO WEDGE TEST A) DIMENSÕES SEGUNDO A ASTM D3672 B) WEDGE TEST REDUZIDO [25].....	29
FIGURA 26 DISPOSITIVO PARA ENSAIO DE DURABILIDADE EM JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [1]...	30
FIGURA 27 DISPOSITIVO DE ENSAIO DA DURABILIDADE EM JUNTAS T POR ARRANCAMENTO QUANDO SE PRETENDE MEDIR A DURABILIDADE EM CONDIÇÕES DE IMERSÃO OU DE CONTROLO DE HUMIDADE RELATIVA [1]	30
FIGURA 28 MODOS DE ROTURA [30]	31
FIGURA 29 PROVETE ENSAIO DCB A) COM BLOCOS DE CARGA B) COM DOBRADIÇAS [31]	32
FIGURA 30 PROVETE DE ENSAIO TDCB [31]	33
FIGURA 31 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO ENF [32]	34
FIGURA 32 ESQUEMA ENSAIO 4 ENF [32]	34
FIGURA 33 ESQUEMA DE ENSAIO ELS [35]	35
FIGURA 34 GEOMETRIA DO ENSAIO ADCB (DIMENSÕES EM MM) [36].....	35
FIGURA 35 GEOMETRIA ENSAIO ATDCB (DIMENSÕES EM MM) [36].....	36
FIGURA 36 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO MMB [1].....	36
FIGURA 37 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO SLB (DIMENSÕES EM MM) [36]	37
FIGURA 38 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA ZPF E DO CONCEITO DE A_{Eq} [43]	39
FIGURA 39 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA OBTENÇÃO DO FATOR DE CORREÇÃO DO COMPRIMENTO DE FENDA [30].....	40
FIGURA 40 VARIAÇÃO DA ENERGIA DE FRATURA COM A ESPESSURA DO ADESIVO, PARA DOIS TIPOS DE ADESIVO [54].....	43
FIGURA 41 CURVAS σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [48].....	50
FIGURA 42 GEOMETRIA DE UM PROVETE ENF.....	51
FIGURA 43 POSICIONAMENTO DE UMA RÉGUA PARA O CORTE DAS FOLHAS DE CARBONO-EPÓXIDO COM AUXÍLIO DE X-ATO.....	53
FIGURA 44 APLICAÇÃO DE CALOR NAS FOLHAS DE CARBONO-EPÓXIDO COM RECURSO A PISTOLA DE CALOR	54
FIGURA 45 COMPRESSÃO E ELIMINAÇÃO DE VAZIOS DAS FOLHAS DE CARBONO-EPÓXIDO	54
FIGURA 46 ASPETO FINAL APÓS O EMPILHAMENTO DAS CAMADAS DE CARBONO-EPÓXIDO.....	55
FIGURA 47 POSICIONAMENTO DA PLACA DE CARBONO-EPÓXIDO NO MOLDE	55
FIGURA 48 LIMPEZA MANUAL DOS ADERENTES COM ACETONA, APÓS PROCESSO DE CORTE.....	56
FIGURA 49 REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DA LOCALIZAÇÃO DOS CALÇOS CALIBRADOS	57

FIGURA 50 MONTAGEM DO CONJUNTO PAR O CALÇO FRONTAL	57
FIGURA 51 APLICAÇÃO DO ADESIVO	58
FIGURA 52 PROCESSO DE FIXAÇÃO DURANTE A CURA	58
FIGURA 53 MÉTODOS DE REMOÇÃO DO EXCESSO DE ADESIVO DOS PROVETES A) COM RECURSO A ALICATE B) COM RECURSO A UMA MÓ	59
FIGURA 54 PINTURA E COLOCAÇÃO DE ESCALAS NOS PROVETES	59
FIGURA 55 POSIÇÃO DO PROVETE PARA REALIZAÇÃO DO ENSAIO	60
FIGURA 56 FOTO ENSAIO ENF	61
FIGURA 57 COMPARATIVO CURVAS P- Δ DIFERENTES ESPESSURAS DE ADESIVO	62
FIGURA 58 CURVAS P- Δ A) ESPESSURA DE 0,1 MM B) ESPESSURA DE 0,2 MM	63
FIGURA 59 CURVAS P- Δ A) ESPESSURA DE 0,5 MM B) ESPESSURA DE 1,0 MM	63
FIGURA 60 CURVAS P- Δ ESPESSURA DE 2,0 MM	64
FIGURA 61 COMPARAÇÃO DAS CURVAS-R PELOS DIFERENTES MÉTODOS DE REDUÇÃO DE DADOS PARA UM EXEMPLO DE AMOSTRA COM $T_A=0,1$ MM	65
FIGURA 62 COMPARAÇÃO DAS CURVAS-R PELOS DIFERENTES MÉTODOS DE REDUÇÃO DE DADOS A) $T_A=1,0$ MM B) $T_A=2,0$ MM	66
FIGURA 63 COMPARAÇÃO DAS CURVAS-R PELOS DIFERENTES MÉTODOS DE REDUÇÃO DE DADOS A) $T_A=0,2$ MM B) $T_A=0,5$ MM	66
FIGURA 64 COMPARAÇÃO DE CURVAS R REPRESENTATIVAS OBTIDAS PELO CBBM PARA TODOS OS T_A .	68
FIGURA 65 VALORES MÉDIOS E DESVIO DE G_{IIC} EM FUNÇÃO DE T_A PELO MÉTODO CBBM	69
FIGURA 66 MALHA DE MEF CONSIDERADA PARA OS PROVETES ENF E CONDIÇÕES DE CARGA	70
FIGURA 67 DETALHE DO REFINAMENTO DA MALHA NO MEF NA PROXIMIDADE DA EXTREMIDADE DA FENDA.	71
FIGURA 68 DETALHE DA MALHA MEF A) ZONA DE CONTACTO ENTRE O PROVETE E UM DOS CILINDROS DE SUPORTE B) ZONA DE CONTACTO ENTRE O PROVETE E O PUNÇÃO DE CARREGAMENTO	72
FIGURA 69 - MDC 2D COM LEI TRIANGULAR [89]	73
FIGURA 70 CURVAS P- Δ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS APÓS O PROCESSO DE AJUSTE DAS CURVAS A) $T_A=0,2$ MM B) $T_A=2,0$ MM	74
FIGURA 71 CURVAS P- Δ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS APÓS O PROCESSO DE AJUSTE DAS CURVAS A) $T_A=0,1$ MM B) $T_A=0,5$ MM	75
FIGURA 72 CURVAS P- Δ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS APÓS O PROCESSO DE AJUSTE DAS CURVAS PARA $T_A=1,0$ MM	75

FIGURA 73 VALORES MÉDIOS E DESVIO PADRÃO DE T_5^0 EM FUNÇÃO DE T_A	76
FIGURA 74 CONJUNTO DE LEIS COESIVAS DE CORTE PARA OS PROJETOS ENF A) $T_A=0,1$ MM B) MÉDIA DAS LEIS COESIVAS PARA TODOS OS VALORES DE T_A	76

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 PROPRIEDADES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS DO CFRP (1 – DIREÇÃO DAS FIBRAS; 2 – DIREÇÃO PERPENDICULAR A 1 NO PLANO DA CAMADA; 3 – DIREÇÃO NORMAL À CAMADA) [48]	49
TABELA 2 PROPRIEDADES MECÂNICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [48]	51
TABELA 3 IDENTIFICAÇÃO DOS PROVETES DE ENSAIO E RESPETIVAS DIMENSÕES (MM)	52
TABELA 4 DIMENSÕES SUBSTRATOS (MM)	56
TABELA 5 G_{IIC} [N/MM] EM FUNÇÃO DE T_A PARA TODOS OS MÉTODOS DE REDUÇÃO DE DADOS	67
TABELA 6 VALORES MÉDIOS OBTIDOS PELA LEI COESIVA TRIANGULAR.....	77

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	2
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ligações adesivas.....	7
2.2	Caracterização das juntas adesivas	7
2.2.1	Aplicações comuns das juntas adesivas	9
2.2.2	Esforços em juntas adesivas.....	10
2.2.3	Modos de rotura em juntas adesivas	13
2.2.4	Configurações possíveis de junta	14
2.2.5	Adesivos estruturais	16
2.3	Determinação das propriedades de adesivos.....	18
2.3.1	Ensaio de adesivo maciço	19
2.3.1.1	Ensaio de tração	19
2.3.1.2	Ensaio de compressão	22
2.3.2	Ensaio de adesivo em junta adesiva	23
2.3.2.1	Ensaio de tração em juntas topo a topo	23
2.3.2.2	Ensaio de corte.....	24
2.3.2.3	Ensaio de arrancamento	26
2.3.2.4	Ensaio de impacto	26
2.3.2.5	Ensaio de fadiga	27
2.3.2.6	Ensaio de fluência.....	27
2.3.2.7	Ensaio de durabilidade.....	28

2.4	Ensaio de caracterização à fratura.....	31
2.4.1	Modo I.....	32
2.4.2	Modo II.....	33
2.4.3	Modo misto I+II.....	35
2.5	Determinação de G_{IC} pelo ensaio ENF.....	37
2.5.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda.....	38
2.5.2	Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente.....	39
2.5.3	Métodos baseados no Integral-J.....	41
2.6	Influência da espessura de adesivo no comportamento das juntas.....	43
2.6.1	Juntas adesivas em modo I.....	43
2.6.2	Juntas adesivas em modo II.....	45
2.6.3	Juntas adesivas em modo misto I+II.....	46
3	DESENVOLVIMENTO.....	49
3.1	Trabalho experimental.....	49
3.1.1	Materiais utilizados.....	49
3.1.1.1	Substratos.....	49
3.1.1.2	Adesivo Araldite® 2015.....	50
3.1.2	Geometria das juntas.....	51
3.1.3	Processo de fabrico.....	53
3.1.4	Ensaio das juntas.....	60
3.1.5	Resultados obtidos.....	61
3.1.5.1	Curvas P- δ	61
3.1.5.2	Curvas R.....	64
3.1.5.3	Análise dos resultados obtidos.....	69
3.2	Trabalho numérico.....	70
3.2.1	Condições da análise numérica.....	70
3.2.2	Modelo de dano coesivo triangular.....	72
3.2.3	Estimativa da lei coesiva em modo II.....	73

3.2.4	Considerações numéricas.....	77
4	CONCLUSÕES.....	81
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	85

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

As juntas adesivas apresentam várias vantagens em relação aos métodos de união tradicionais, tais como soldadura, rebiteagem e ligações aparafusadas, devido às menores concentrações de tensões, boa resistência à fadiga e possibilidade de união de diferentes materiais. No entanto, o seu uso em aplicações estruturais ainda é limitado devido a fatores como a falta de conhecimento do seu comportamento a longa duração. Para o aumento da sua utilização é fundamental a existência de ferramentas de previsão fiáveis. Uma das possibilidades para previsão da resistência é a utilização dos conceitos da resistência dos materiais, que são claramente inadequados na presença de singularidades de tensões, que usualmente ocorrem nas juntas adesivas.

A mecânica da fratura estuda abordagens que normalmente baseadas em conceitos energéticos de taxa de libertação de energia, que adquirem especial relevância em relação aos estudos com base em fatores de intensidade de tensão. Os Modelos de Dano Coesivo (MDC) surgem para superar as desvantagens de cada método mencionado anteriormente, combinando aspetos de análise de tensões para modelar a iniciação de dano e conceitos da mecânica da fratura para lidar com a propagação de dano. Os MDC são uma técnica da mecânica do dano e são aplicados como suplemento na análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF), e têm revelado bons resultados em previsões do comportamento de juntas. Estes consistem em estabelecer leis de tração-separação (leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas. Estas leis coesivas variam bastante com a geometria das ligações adesivas, especialmente com a variação da espessura do adesivo (t_a). A variação de t_a está bem compreendida no que concerne ao modo puro I, em modo puro II existe muito pouca informação na literatura que possa ser utilizada. Como tal, é extremamente importante o estudo do efeito de t_a nas leis coesivas ao corte.

A caracterização à fratura de juntas adesivas sob modo puro I tem sido amplamente estudada por diversos autores. No entanto, relativamente ao modo II a informação é inferior ao modo I devido a alguns aspetos específicos inerentes aos ensaios mais usuais: *End-Notched Flexure* (ENF), o *End-Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF). Destes três ensaios mencionados anteriormente, ENF é o mais adequado para a caracterização de adesivos em modo II, devido à sua simplicidade e qualidade dos resultados obtidos. O ensaio ELS possui alguma variabilidade o que aumenta a complexidade do tratamento de dados. Por outro lado, o ensaio 4ENF requer uma configuração de ensaio complexa e apresenta alguns problemas relacionados com o atrito.

1.2 Objetivos

O objetivo principal deste trabalho é a determinação da taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte (G_{IIC}) e a obtenção da respetiva lei coesiva ao corte de um adesivo estrutural. É utilizado o ensaio ENF e um adesivo de ductilidade intermédia, Araldite® 2015, para estudar o comportamento das juntas adesivas com o aumento de t_a , através da obtenção das curvas força vs. deslocamento (curvas $P-\delta$).

Outro dos objetivos é a obtenção das curvas de resistência (curvas- R), sendo necessário a medição do comprimento de fenda durante os ensaios. As curvas- R são obtidas através de 4 métodos de redução, *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance Based Beam Method* (CBBM). Estes 4 métodos são comparados entre eles, para mostrar a coerência dos resultados obtidos.

Por último pretende-se obter as leis coesivas de corte, recorrendo para isso ao MEF através do *software* ABAQUS®, que permite simular numericamente os ensaios realizados experimentalmente. As leis coesivas são obtidas pelo método inverso de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais e é efetuado destas mesmas leis em função de t_a .

1.3 Organização do relatório

Esta tese encontra-se estruturada da seguinte forma:

- Capítulo 1 – É apresentada a contextualização do trabalho realizado, descritos os objetivos do trabalho e organização do relatório.
- Capítulo 2 – Descreve a revisão bibliográfica, onde são abordados os temas referentes ao trabalho, tais como ligações adesivas, tipos de juntas adesivas, técnicas de avaliação de propriedades dos adesivos, ensaios de caracterização à fratura, métodos para determinação de G_{IIC} e MDC.
- Capítulo 3 – Este capítulo encontra-se dividido em 2 subcapítulos:
Subcapítulo 3.1 – É apresentado todo o procedimento experimental que envolve a caracterização da geometria dos ensaios ENF, dos materiais utilizados e do fabrico dos provetes. São descritos os ensaios realizados, determinado o valor de G_{IIC} para cada um dos adesivos testados pelos métodos de redução anteriormente descritos e feita a análise e comparação dos resultados obtidos.
Subcapítulo 3.2 – É apresentada a modelação dos ensaios com recurso ao *software* ABAQUS® obedecendo às condições da análise numérica, com o objetivo de determinação da lei coesiva associada a cada ensaio realizado. É testada numericamente a capacidade dos 4 métodos de redução usados em prever o valor de G_{IIC} .

- Capítulo 4 – São apresentadas todas as conclusões retiradas ao longo da realização deste trabalho e apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Uma união elaborada através do uso de um adesivo é denominada por junta adesiva, junta colada ou ligação adesiva. Os elementos estruturais da junta, que são ligados entre si pelo adesivo, são designados por substratos ou aderentes. O termo substrato é geralmente utilizado para designar os componentes da junta antes da ligação adesiva. Após a colagem, estes passam a designar-se aderentes. A utilização de juntas adesivas na indústria tem tido um crescimento exponencial nos últimos anos. A facilidade da sua conceção, as maiores cadências produtivas, menores custos, facilidade de utilização na união de materiais diferentes, melhor resistência à fadiga e elevada capacidade de amortecimento de vibrações, são muitas das vantagens das ligações adesivas quando comparadas com os métodos tradicionais de ligação tais como soldadura, brasagem, aparafusagem, rebitagem e outras ligações mecânicas [1].

O sucesso da tecnologia dos adesivos e da adesão tem sido possível devido a um grande esforço de pesquisa e desenvolvimento tecnológico em diferentes áreas do conhecimento, tais como a química orgânica e físico-química de macromoléculas, físico-química de superfícies, mecânica da fratura e resistência dos materiais, além de outras. Assim, a ciência e tecnologia das ligações adesivas é uma área pluridisciplinar, que requer o domínio de conhecimento teórico e experimental numa série de disciplinas científicas, nomeadamente as ciências primárias anteriormente mencionadas, em que a sobreposição de certas áreas forma as disciplinas de ciência das superfícies, materiais poliméricos e projeto da junta, todas importantes na ciência da adesão [2, 3].

2.2 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas estão cada vez mais presentes nas mais variadas indústrias, e possuem ainda uma margem de progressão na sua utilização, em função das suas vantagens competitivas. Estas ligações são capazes de suportar esforços equivalentes aos das ligações mecânicas, efetuando a transmissão eficiente da carga entre os componentes ligados e mantendo a sua integridade estrutural durante o seu tempo de vida sob as condições a que estão sujeitas [1, 3].

A substituição das ligações convencionais tais como ligações aparafusadas, ligações rebitadas, brasagem e soldadura por juntas adesivas deve-se às indústrias aeronáuticas e navais, que têm sido as principais responsáveis pelo desenvolvimento de juntas adesivas estruturais [4].

O desenvolvimento destas ligações permite ligar materiais de alta resistência, como é o caso dos compósitos de matriz polimérica, onde as ligações rebitadas e aparafusadas são alternativas menos eficientes devido à baixa ductilidade e à fraca resistência ao esmagamento dos compósitos [5].

Deste modo, a ligação adesiva possui as seguintes vantagens [1, 3]:

- Permite obter uma ligação com distribuição mais uniforme das cargas estáticas e dinâmicas, distribuindo as tensões sobre a área total da ligação ao contrário de concentrá-las apenas em determinados pontos. A montagem com adesivos é mais resistente à fadiga, motivada pela ausência do efeito de concentração de tensões pela não existência de furos na ligação;
- Garante uma fixação contínua, capacidade de vedação, isolamento térmico e amortecimento de vibrações devido ao comportamento viscoelástico dos adesivos;
- Possibilita a união de diferentes materiais, com redução de peso e do número de peças em relação às ligações aparafusadas e rebitadas;
- Minimiza os problemas de corrosão, sobretudo nas ligações de materiais diferentes. Não há alterações estruturais, e as menores temperaturas de processamento não afetam as propriedades dos materiais, quando comparado com o processo de soldadura;
- Permite o fabrico de formas complexas, junção de superfícies irregulares e obtenção de uma boa aparência estética e aerodinâmica das peças. Depois da montagem as costuras de ligação não são visíveis, ao contrário do que acontece com a soldadura;
- Fabrico económico e rápido, sendo uma operação simples, rápida e de fácil automatização permitindo desta forma aumentar a produção e baixar os custos.

As ligações adesivas têm também algumas limitações [1, 3]:

- Para obter bons resultados é geralmente necessária uma cuidada preparação das superfícies, por vezes complexa, morosa e dispendiosa através de, por exemplo, abrasão mecânica, ataques químicos, desengorduramento, etc., para garantir uma boa adesão e durabilidade da ligação;
- Os ciclos de cura de alguns adesivos são relativamente longos e podem requerer a aplicação de pressão e de altas temperaturas. Isto pode constituir uma limitação ao tamanho da peça, caso exija o recurso a um forno ou autoclave;
- Geralmente a durabilidade das juntas adesivas é influenciada pela degradação e limitação da resistência dos adesivos, quando expostos a condições extremas de calor, humidade, radiação UV, água, etc.;
- O controlo de qualidade e a inspeção são mais difíceis, embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas;

- A ligação não é realizada instantaneamente, o que torna necessário a utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição. Se as peças não forem coladas com suficiente precisão, após o endurecimento do adesivo não é possível a sua desmontagem sem destruição da junta, tornando assim impossível retificar a ligação;
- A ausência de um critério universal de dimensionamento que permita projetar qualquer estrutura poderá ser uma das grandes desvantagens na utilização dos adesivos.

2.2.1 Aplicações comuns das juntas adesivas

As juntas adesivas têm vindo a sofrer um elevado desenvolvimento devido às indústrias aeronáutica e naval, pois as vantagens relativamente ao peso, capacidade de ligar materiais dispares e corrosão levam a que estas indústrias invistam nesta tecnologia. No entanto, com a evolução das juntas adesivas, estas chegaram à indústria automóvel, construção civil e desporto de alta competição.

A indústria aeronáutica produz neste momento aeronaves comerciais onde mais de 50% da estrutura das aeronaves é constituída por *Carbon Fiber-Reinforced Polymer (CFRP)*, em detrimento de materiais como alumínio. Com a utilização deste material as próprias ligações sofreram alterações, sendo utilizadas as juntas adesivas até na estrutura das aeronaves (Figura 1). Algumas das características que levaram à sua utilização são, o seu reduzido peso, boa resistência à fadiga, amortecimento de vibração sónica e por facilmente se conseguir obter superfícies aerodinâmicas [6].

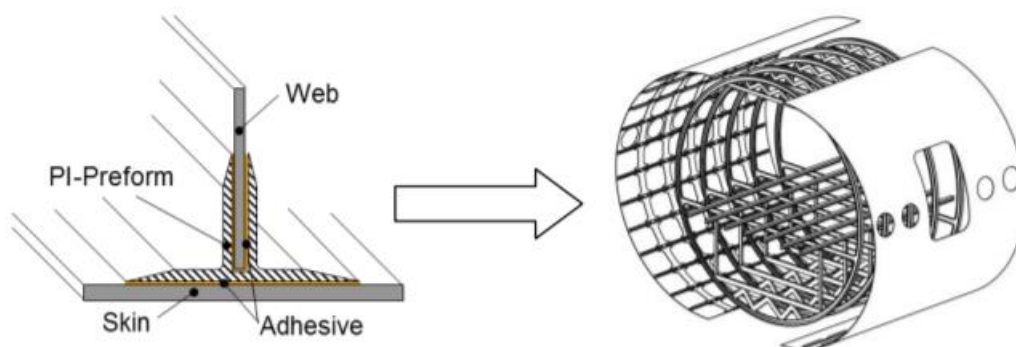


Figura 1 Estrutura de fuselagem com nova tecnologia de junção de componentes por adesivos [6]

Outra das aplicações das ligações adesivas é a indústria automóvel (Figura 2), inicialmente através da colagem de alguns componentes e também para preenchimento em lacunas de soldadura de forma a evitar a corrosão [7].

Com a aplicação de juntas adesivas, a indústria automóvel pretende aumentar a eficiência dos transportes, redução de consumos, peso e emissões, e melhorias a nível de segurança. Assim, as juntas adesivas começaram a ser utilizadas na construção do

chassis que é sujeito a esforços complexos, incluindo solicitações de tração e de corte. Consoante o tipo de materiais, estruturas e adesivos utilizados na conceção das juntas adesivas, a capacidade de absorção de energia vai variar, o que permite uma maior flexibilidade na conceção, e torna esta indústria mais eficiente em aspetos mecânicos, de consumo de energia e resistência à corrosão.



Figura 2 Aplicações de adesivos na indústria automóvel [7]

A indústria naval viu chegar a utilização das ligações adesivas primeiramente para uso militar. Este tipo de ligações fornecia características importantes para combater contra o meio marítimo altamente corrosivo.

Nesta indústria, a aplicação de juntas adesivas vai desde elementos estruturais, como casco e convés, o que permite obter boa resistência à humidade, temperatura e boa durabilidade. As aplicações nesta indústria resultam, normalmente, em esforços de flexão, corte e torção.

2.2.2 Esforços em juntas adesivas

Nas estruturas com adesivos as juntas são as zonas mais frágeis, merecendo desde o projeto das mesmas especial atenção. Para um projeto eficiente a junta adesiva deve ser solicitada maioritariamente ao corte, pois a ductilidade dos adesivos ao corte é normalmente muito superior do que a ductilidade à tração.

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 substratos.

Os tipos de esforços a que as juntas adesivas podem estar submetidas são [1, 2]:

- Tração;
- Compressão;
- Corte;
- Clivagem (*Cleavage*);
- Arrancamento (*Peel*).

Esforços de tração

As tensões de tração desenvolvem-se quando as forças atuam perpendicularmente ao plano de colagem (Figura 3). Nesta condição, a distribuição das tensões normais através do comprimento da colagem é uniforme (Figura 4). Contudo, em juntas adesivas aparecem picos de tensões de clivagem ou de arrancamento nas extremidades da zona de sobreposição [2].

Esforços de compressão

Estes esforços derivam de forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro (Figura 3). A distribuição da tensão pelo adesivo é constante (Figura 4), tal como acontece para a tração. Na realidade uma junta em compressão pura praticamente não precisa de adesivo [2].

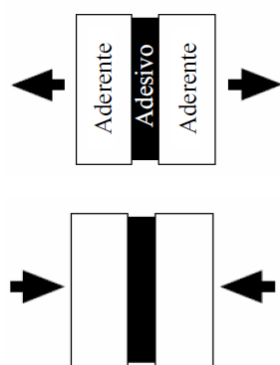


Figura 3 Esforços de tração a) e compressão b) [2]

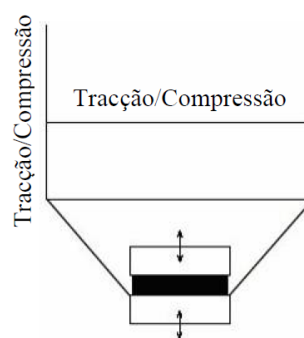


Figura 4 Distribuição da tensão de tração e compressão [2]

Esforços de corte

As forças de corte provocam o escorregamento entre os dois aderentes (Figura 5). As extremidades da junta estão sujeitas a um maior nível de tensões do que a parte central da ligação (Figura 5). Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição (L_0), uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta da sobreposição [8].

Este efeito torna-se mais marcante com o aumento de L_0 . Por este motivo, a largura da sobreposição é mais importante que o seu comprimento. O aumento da largura da ligação torna a junta mais resistente, porque aumenta a área em cada um dos extremos da zona de sobreposição, que corresponde aos locais onde o nível de tensões é mais elevado.

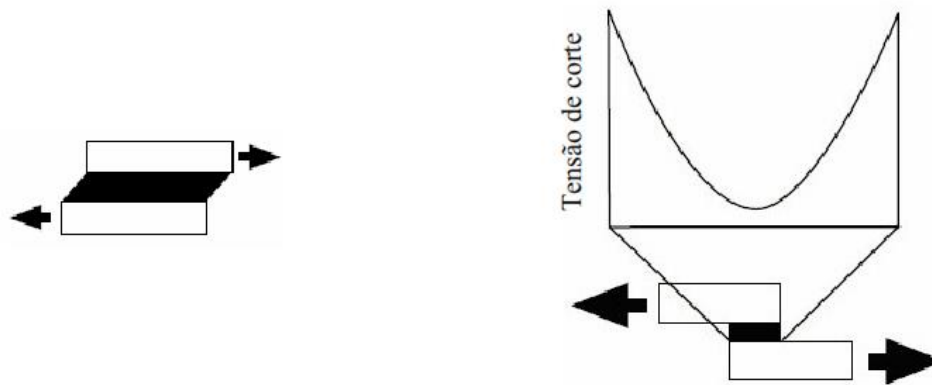


Figura 5 Esforço de corte e distribuição da tensão de corte [1]

Esforços de clivagem

As tensões de clivagem ocorrem quando forças na extremidade de uma junta rígida atuam de forma a afastar os aderentes. A distribuição da tensão no adesivo quando os aderentes são submetidos a um esforço de clivagem é esquematizada na Figura 6. A tensão máxima ocorre na extremidade solicitada e diminui gradualmente ao longo da camada adesiva, estendendo-se num comprimento considerável [9].

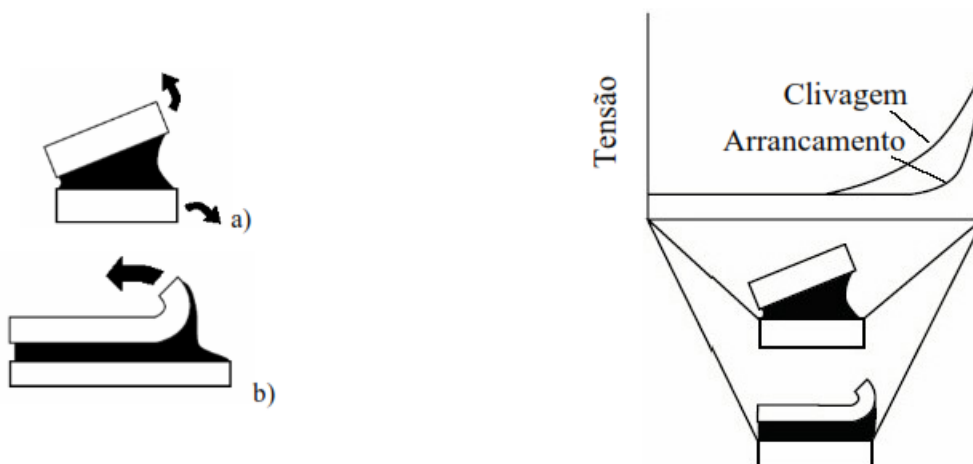


Figura 6 Esforços de clivagem a) e de arrancamento b) e distribuição das tensões de clivagem e de arrancamento [1]

Esforços de arrancamento

Bastante idêntico ao verificado para os 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, o que leva à concentração das tensões de tração numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação [9].

A ductilidade e a rigidez do adesivo afetam significativamente a sensibilidade da junta a esforços de arrancamento ou de clivagem. De facto, adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis a este tipo de esforços, uma vez que o dano no adesivo inicia-se nas extremidades da ligação para deformações do adesivo muito reduzidas. Por outro lado, 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 [10].

2.2.3 Modos de rotura em juntas adesivas

Independentemente dos esforços aplicados à junta adesiva, podem ocorrer diferentes tipos de roturas. Numa junta adesiva ideal o elemento mais fraco é o substrato, no entanto por vezes o que acontece é que o adesivo é o elo mais fraco porque as forças de adesão entre adesivo e substrato são mais fortes do que as forças de coesão que atuam no seio do adesivo [1]. Deste modo podem-se classificar os modos de rotura de juntas adesivas da seguinte forma:

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva;
- Rotura por tração de um dos aderentes;
- Rotura mista.

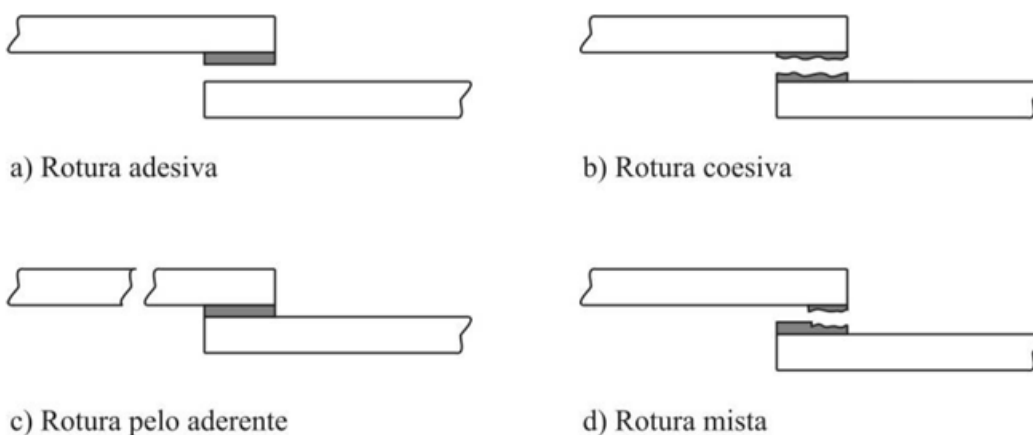


Figura 7 Diferentes modos de rotura em juntas adesivas [1]

Rotura adesiva

Acontece na interface de um dos aderentes. Após rotura verifica-se que uma das superfícies está completamente coberta de adesivo enquanto a outra apenas contém vestígios deste (Figura 7). Este tipo de rotura surge devido a uma má preparação da superfície [1].

Rotura coesiva

Este tipo de rotura surge quando a ligação entre o adesivo e o aderente é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, verificando-se neste caso que ambas as superfícies do substrato possuem uma película de adesivo (Figura 7). Assim, a ligação entre o adesivo e o aderente são mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo [1].

Rotura pelo aderente

No projeto de juntas adesivas a conceção ideal é quando a rotura se verifica num dos substratos, o que mostra que a ligação adesiva é mais resistente do que o material de base [1, 2].

Rotura mista

Caracteriza-se como sendo uma mistura do que acontece na rotura adesiva com a rotura coesiva [2]. Este tipo de rotura pode ocorrer em casos de preparação deficiente da junta, falhas de adesão ou falta de homogeneidade do adesivo aplicado.

2.2.4 Configurações possíveis de junta

Existem várias configurações possíveis de junta adequando-se aos esforços que estão sujeitos e aplicações. Apresentam-se na Figura 8 os tipos de juntas mais comuns.

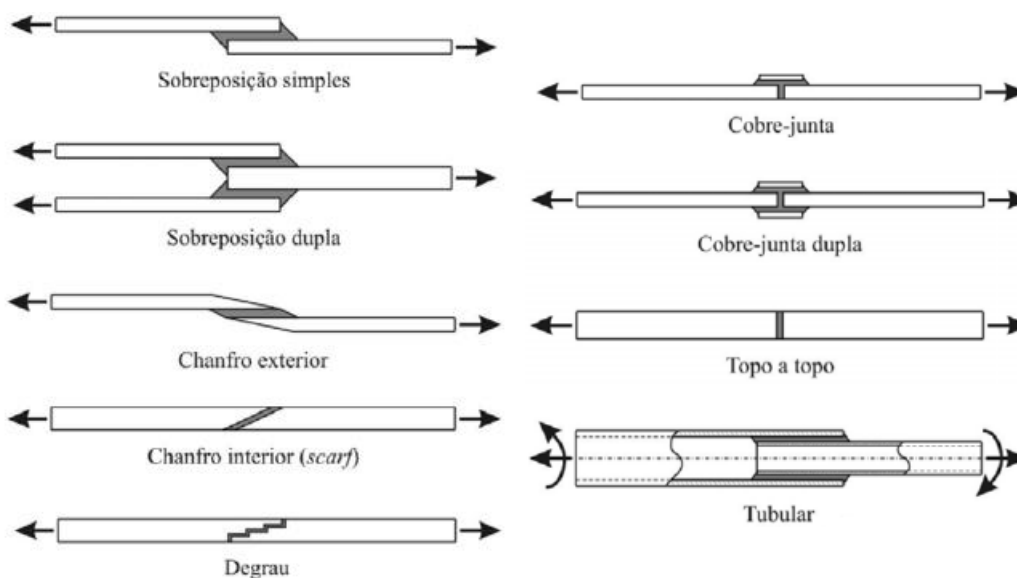


Figura 8 Tipos de juntas mais comuns [4]

- **Juntas de sobreposição simples/dupla**

As juntas de sobreposição são muito usadas em aplicações industriais, pois são fáceis de fabricar e existe muita informação sobre o seu comportamento [11].

O carregamento é realizado provocando um esforço ideal (esforço de corte) na zona adesiva. Quando a aplicação da carga é descentrada ocorre a flexão dos substratos, o que produz uma rotação da junta que altera a linha de aplicação da carga na zona de sobreposição e origina o aparecimento de tensões normais na direção da espessura do adesivo (t_a) (esforços de arrancamento) [9].

Este problema é solucionado com recurso a juntas de sobreposição dupla, em que os efeitos da flexão são consideravelmente inferiores. No entanto, a fabricação é mais morosa, e nem sempre possível realizar [1].

- **Juntas de chanfro exterior/interior e juntas em degraus**

Nas extremidades da junta de sobreposição simples ocorrem picos de tensão de corte. Uma das formas para reduzir esses picos de tensão é através da modificação geométrica do aderente nessa região, chanfrando as suas extremidades. Assim, ocorre uma diminuição de concentração de tensões ficando desta forma as tensões mais uniformes o que aumenta a sua resistência [9, 12]. A significativa diminuição da excentricidade dos esforços também contribui para este facto [13].

A dificuldade de maquinar os degraus ou as rampas encarece o seu processo de fabrico. Com substratos em compósito, torna-se mais económico e comum realizar os degraus durante o empilhamento antes da cura, eliminando assim as operações de maquinaria [3].

- **Juntas cobre-junta/cobre-junta dupla**

Estas juntas apresentam uma boa resistência, superior às juntas de sobreposição simples e topo a topo. A cobre junta-junta dupla é preferível em comparação com a cobre-junta, pois reduz os esforços de flexão, sendo este tipo de juntas utilizado para resistir a esforços de flexão. A sua preparação é mais dispendiosa pois requerem maquinaria na sua preparação [1, 9].

- **Juntas topo a topo**

São juntas mais simples de conceber. Apesar disso, apresentam uma eficácia muito baixa, devido às acentuadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação. Este tipo de juntas adesivas não suporta esforços de flexão pois estes induzem clivagem ao adesivo [1, 2].

- **Juntas tubulares**

São habitualmente utilizadas na ligação de varões e tubos. São mais vantajosas relativamente às topo-a-topo, pois além de diminuir o efeito de arrancamento também

se consegue uma área resistente maior [1, 2]. A inacessibilidade do seu interior impossibilita a sua inspeção. 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 preencha toda a cavidade [9].

2.2.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais surgiram na indústria quando começaram a sustentar cargas consideráveis. Desde então são utilizados nas mais diversas ligações. Um adesivo estrutural pode ser definido como sendo um material usado para unir outros materiais de elevada resistência, tais como madeira, compósitos, ou metal, permitindo que a resistência da ligação adesiva ao corte exceda os 6,9 MPa à temperatura ambiente [14]. Outra definição é dada por Gauthier [15], que diz que 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 provada fiabilidade em aplicações nas quais a ligação deve ser mantida, sem ocorrência de falha, mesmo quando sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo. Admitindo o adesivo como parte integrante da estrutura, em oposição aos produtos de revestimento ou de estanquicidade, ele deve apresentar uma resistência equivalente aos materiais constituintes da estrutura a ser colada. Nesta perspectiva, a designação de adesivo estrutural é atribuída aos adesivos capazes de suportarem a transmissão de esforços de grandeza considerável [2].

ADESIVOS	
Estruturais	Não estruturais
Fenólicos	Borrachas sintéticas
<ul style="list-style-type: none"> fenólicos-vinílicos fenólicos-nitrilo fenólicos-policloropreno 	<ul style="list-style-type: none"> silicone policloropreno e nitrilo polisulfureto
Acrílicos	Poliésteres
<ul style="list-style-type: none"> anaeróbicos cianoacrilatos 	Termofusíveis
Poliuretano	Inorgânicos
Poliimida	
Epóxido	
<ul style="list-style-type: none"> epóxido-poliamida epóxido-polisulfureto epóxido-fenólicos epóxido-poliuretano epóxido-nitrilo 	

Figura 9 Famílias de adesivos [1]

A classificação dos adesivos pode ser feita por várias características tais como temperatura de cura, rigidez, resistência à humidade, composição química, custo, desempenho, entre outras características [1]. Se a classificação passar por adesivos

estruturais e não-estruturais como se pode ver pela Figura 9, então os adesivos estruturais são divididos em cinco famílias de adesivos, que são maioritariamente polímeros termoendurecíveis. As principais famílias de adesivos estruturais a ter em consideração são:

- Adesivos fenólicos;
- Adesivos acrílicos;
- Adesivos poliuretanos;
- Adesivos de poliimidas;
- Adesivos epóxidos.

Adesivos fenólicos

Este tipo de adesivos começaram a ser usados inicialmente em ligações entre substratos de madeira, sendo posteriormente usado nas ligações de metais [2]. Têm como características principais um baixo custo, boa resistência mecânica, boa resistência a temperaturas elevadas, boa resistência a fungos e boa estabilidade dimensional. As suas juntas são normalmente frágeis devido à baixa resistência ao impacto e vibrações e também às elevadas tensões internas geradas pela contração durante o processo de cura [1, 9]. Para combater este problema são adicionados elastómeros ou resinas vinílicas como forma de melhorar a tenacidade e capacidade de resistência ao arrancamento [1].

Adesivos acrílicos

Os adesivos acrílicos (Figura 9) dividem-se em anaeróbicos, cianoacrilatos e acrílicos modificados. A elevada resistência à humidade, boa resistência ao arrancamento, boa resistência ao impacto e baixa contração durante o processo de cura, permitem ligações fortes mesmo quando as superfícies não são convenientemente limpas, o que constitui uma vantagem destes tipos de adesivos. Assim, estes adesivos são utilizados na ligação de termoplásticos como PS, PVC, ABS e borrachas, aço e alumínio [3, 9]. Como desvantagens possuem baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada inflamabilidade [2].

Adesivos poliuretanos

Resultam da reação do polioliol (ou poliéter-polioliol) com um isocianato, apresentando-se geralmente sob a forma de dois componentes. A cura é realizada lentamente, e pode ser executada à temperatura ambiente. As principais vantagens são a excelente tenacidade, que faz com que a junta possa acomodar deformações elevadas, assim como um custo moderado, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques e vibrações e bom comportamento quando sujeitos a intempéries [16].

Adesivos de poliimidas

Estes adesivos são indicados para trabalhar a altas temperaturas (superiores a 200°C). A sua cura é longa pois requerem vários ciclos de pressão a temperaturas elevadas, pelo que a sua aplicação é complexa. Este tipo de adesivos é muito utilizado na indústria aeroespacial pois possuem boa resistência a longo prazo e às altas temperaturas, bem como elevada dureza, embora sejam frágeis [2, 9].

Adesivos epóxidos

Estes adesivos são aplicados numa gama alargada de materiais e permitem formar ligações fortes e duradouras, devido à sua excelente resistência à tração e ao corte, excelente resistência a óleos, humidade e muitos solventes, baixa contração de cura e elevada resistência à fluência [2].

São utilizados normalmente dois componentes, nomeadamente a resina e o endurecedor, o que permite desta forma obter várias formulações que vão desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes [1, 2].

Nos adesivos de dois componentes o processo de cura pode ser acelerado por ação da temperatura. Vulgarmente um aumento de temperatura na ordem dos 10°C provoca uma duplicação na velocidade da reação. O processo de cura pode variar desde 10 min até vários dias [2].

Outra das vantagens destes adesivos é a possibilidade de modificar as suas propriedades mediante a adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólicas, etc.) ou de elastómeros (poliuretano, nitrilo, silicone, etc.) [9].

2.3 Determinação das propriedades de adesivos

A determinação das propriedades dos adesivos é fundamental para avaliar onde e como este pode ser aplicado e qual os valores de resistência que este admite. Assim, as propriedades mecânicas e de fratura são objetivos destes estudos, bem como as tensões na junta, a sua vida útil, módulo de elasticidade e coeficiente de Poisson.

Estes ensaios cumprem algumas normas, tais como:

- *American Society for Testing and Materials (ASTM)*;
- *British Standards (BS)*;
- *International Organization for Standardization (ISO)*;
- *European Normalization (EN)*;
- Norma Francesa (NF).

Assim, as normas apresentam técnicas de preparação de amostras, tratamento das superfícies, ensaios, ciclos de cura, entre outros aspetos.

2.3.1 Ensaios de adesivo maciço

2.3.1.1 Ensaios de tração

Ensaio de tração em provetes maciços

Os provetes maciços obtêm-se geralmente por injeção do adesivo para um molde com a forma final ou por pressão entre placas (Figura 10). Os adesivos de um só componente que são relativamente líquidos utilizam o primeiro processo e o segundo método é mais adequado a adesivos mais viscosos, adesivos em forma de filme ou de dois componentes [17].

Estes ensaios podem ser realizados segundo a norma NF T 76-142, que descreve todo o processo para que a obtenção de provetes seja inexistente de poros. Este consiste em colocar o adesivo no centro do molde e depois efetuar pressão (2 MPa ou 20 atm). Inicialmente existe um vazio entre o adesivo e a placa de silicone, que permite que, no momento de aplicação de pressão, o adesivo se espalhe por todo o molde evitando assim entrada de ar e dessa forma a formação de bolhas de ar/poros [17].

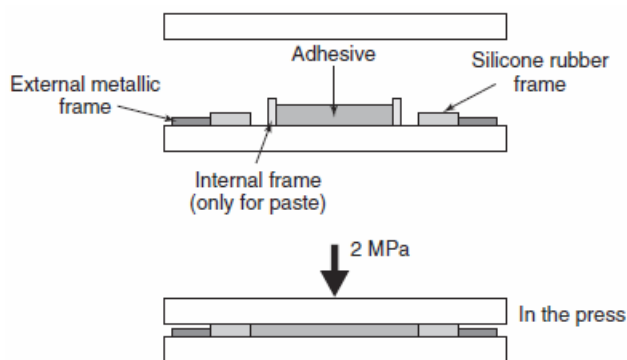


Figura 10 Obtenção de provetes maciços (NF T 76-142) [17]

O passo seguinte é a maquinação dos provetes de forma a que a sua geometria fique de acordo com as normas do ensaio EN ISO 527-2, também denominada de forma de “osso de cão” (Figura 11) [1, 17].

No ensaio dos provetes da Figura 11, a sua fixação é feita por pinças convencionais. No caso de adesivos de alta resistência são utilizadas pinças de alta pressão para a fixação dos provetes. São feitas as medições de carga e deslocamento, o que permite obter a curva tensão-deformação (Figura 12), obtendo-se através desta o módulo de Young (E), resistência à tração e tensão de cedência [18].

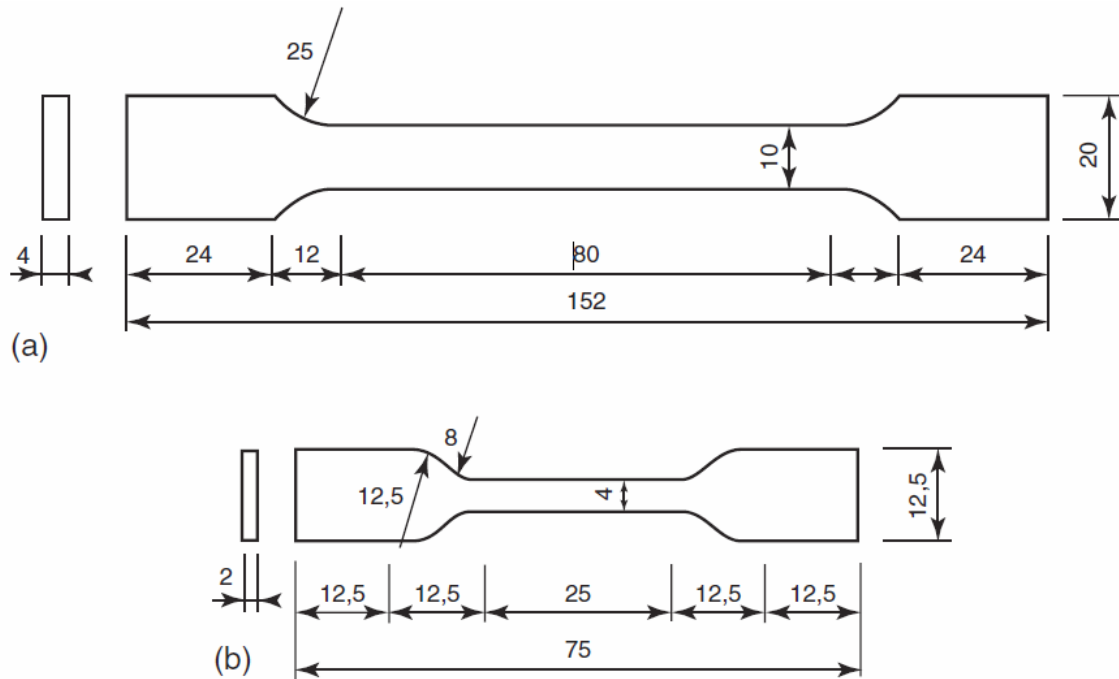


Figura 11 Provetes de tração de acordo com a EN ISO 524-2 a)Provete longo b)Provete reduzido (dimensões em mm) [1]

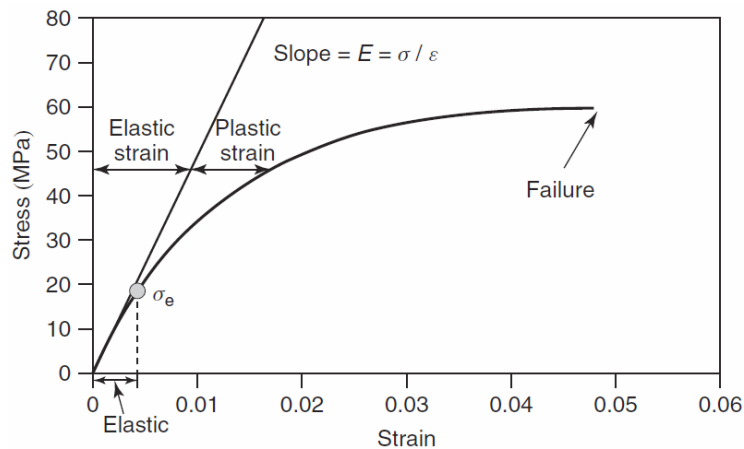


Figura 12 Exemplo de curva tensão-deformação [18]

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

O ensaio *Notched plate shear method* (ou Arcan) é usado para obtenção de propriedades de corte. Estes ensaios são também denominados de borboleta devido à sua forma semelhante a uma borboleta (Figura 13) [19].

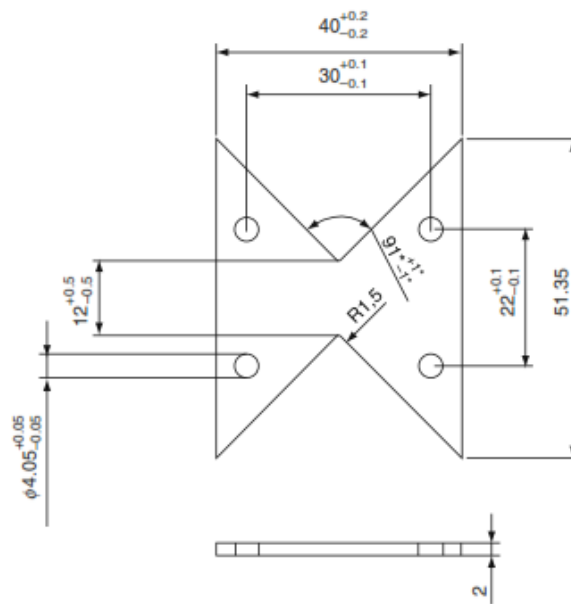


Figura 13 Provete Arcan (dimensões em mm) [1]

Este tipo de ensaio é utilizado para plásticos, compósitos e adesivos para obtenção das suas propriedades, e pode ser utilizado com espessuras menores, o que aproxima a caracterização do comportamento mecânico às condições mais empregues em juntas, em que o adesivo apresenta uma espessura muito fina.

O provete possui dois entalhes simétricos a 90° e um raio de concordância de 1,5 mm, minimizando assim a concentração de tensões, e uma furação que permite a sua fixação num dispositivo para realizar o ensaio (Figura 14) [19]. A produção deste provete é obtida por maquinação, pois as tolerâncias para as suas dimensões assim o exigem.

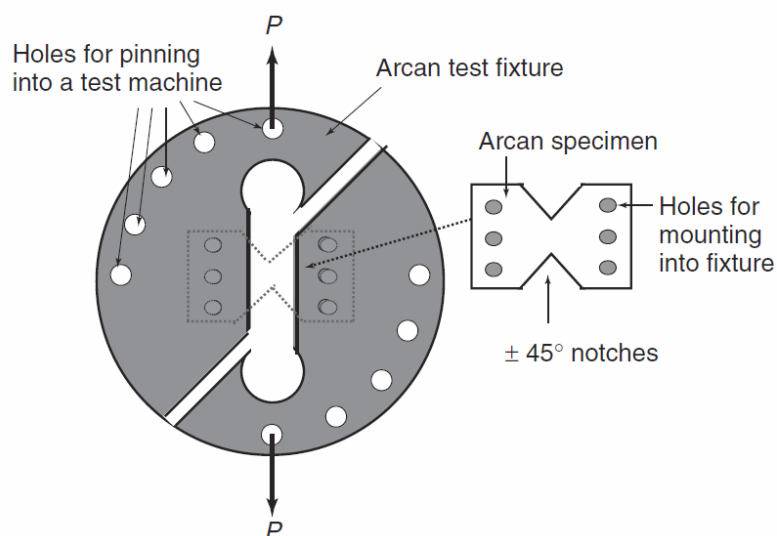


Figura 14 Esquema de ensaio de Arcan [19]

2.3.1.2 Ensaio de compressão

Este tipo de ensaio é menos comum do que os ensaios de tração ou corte, já que normalmente é assumido que o adesivo possui as propriedades à tração e compressão [20]. Como os polímeros possuem melhor resistência a compressão do que à tração por vezes torna-se vantajoso saber se os valores diferem muito dos da tensão. A proporção do esforço de compressão comparativamente com o esforço de tração geralmente varia entre 1,2 e 1,4 [4]. A norma seguida no ensaio de adesivos é a de materiais poliméricos, a ASTM D695-96, que descreve o procedimento de uma amostra em placa e que é em tudo semelhante ao de tração (Figura 15). No entanto, o método só é válido apenas para adesivos rígidos [20].

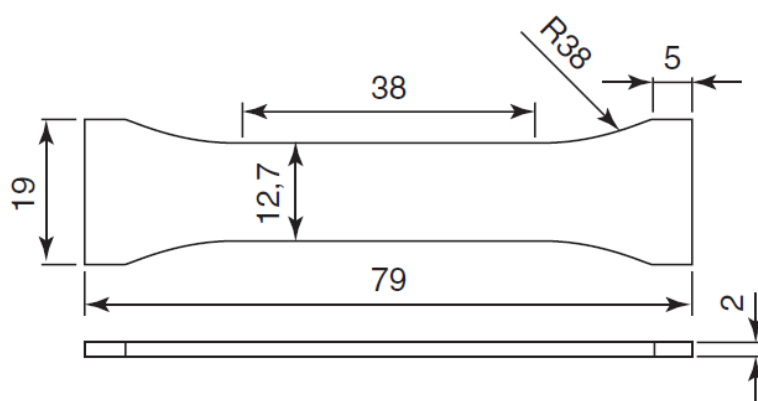


Figura 15 Provete plano para ensaio de compressão (ASTM D 695) (dimensões em mm) [20]

Estes ensaios apresentam dois inconvenientes importantes: o atrito nos topos e a tendência para a encurvadura, que limita o comprimento dos provetes. No entanto, para diminuir o risco de encurvadura é utilizado um gabarito, sendo que este sistema provoca o endurecimento do adesivo [20].

O efeito do atrito entre os blocos de carregamento e os topos do provete na curva tensão-deformação pode ser significativo, principalmente em provetes curtos. No entanto, é possível diminuí-lo mediante a aplicação de lubrificantes, tais como filmes de PTFE (películas em Teflon), grafite ou silicone, ou ainda através da inclusão de papel abrasivo entre os blocos de carregamento e os provetes. Assim deve-se ter atenção aos resultados do ensaio, pois estes dois fatores podem nos dar resultados que não são a verdadeira propriedade do material [4, 20].

2.3.2 Ensaios de adesivo em junta adesiva

2.3.2.1 Ensaios de tração em juntas topo a topo

Este tipo de ensaio segue a norma ASTM D 897 e é usado para determinar as propriedades à tração dos adesivos. Existem três requisitos obrigatórios para se conseguirem bons resultados, são eles os seguintes [21]:

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

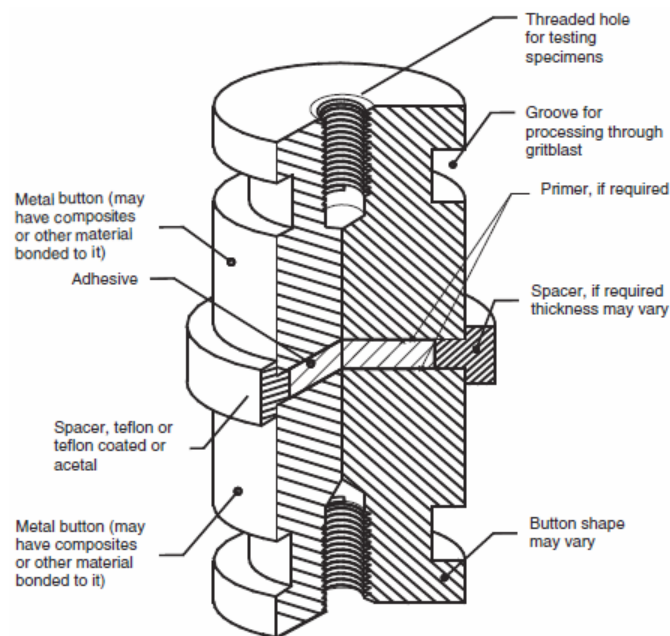


Figura 16 Provette para ensaio de tração em junta topo a topo [21]

O ensaio é realizado com dois aderentes circulares em aço e ligados entre si pelo adesivo (Figura 16), permitindo assim obter informação respeitante de E e coeficiente de Poisson (ν) [1].

As tensões são calculadas dividindo a força aplicada pela área colada. Alguns autores demonstraram que a distribuição de tensões não é uniforme, tal resulta do efeito de Poisson, da constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos quando existe uma diferença sensível de rigidez entre eles, ou ainda por desalinhamento [1].

2.3.2.2 Ensaios de corte

As estruturas coladas são geralmente projetadas para que o adesivo seja essencialmente sujeito a esforços de corte, porque para este tipo de solicitação o adesivo apresenta melhores características mecânicas.

Juntas adesivas de sobreposição simples

Ensaios de corte em juntas de sobreposição simples são muito comuns, pois as juntas são de fabrico simples e económico, e estas juntas são também muito usadas na indústria. Estes ensaios são realizados pelas normas ASTM D1002 e ISO 4857 onde a tensão de corte média na camada adesiva é dada pela carga aplicada dividida pela área de sobreposição ligada [22].

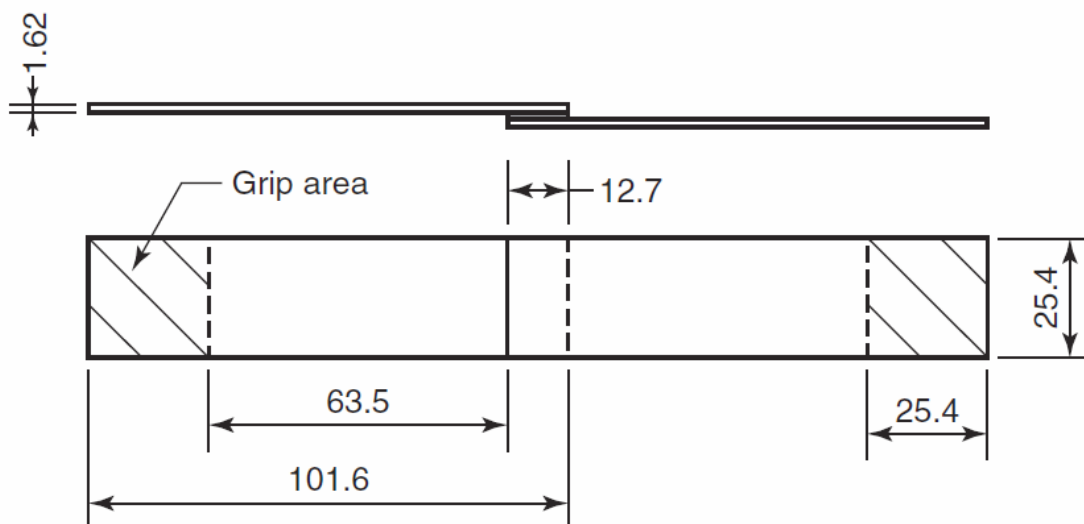


Figura 17 Geometria de uma junta de sobreposição simples (dimensões em mm) [22]

Os aderentes estão sujeitos a uma solicitação de tração, enquanto a camada de adesivo está sujeita a esforços de corte, embora combinados com esforços de arrancamento. Os esforços de arrancamento resultam da própria geometria da junta (Figura 17), na qual existe um desalinhamento das forças de tração, mesmo quando são colocados calços (reguladores de espessura) nos locais de amarração [1].

O ensaio em junta de sobreposição simples é, contudo, usado como método comparativo para estudo de adesivos, desde que se garantam a uniformização dos restantes parâmetros que podem afetar o resultado dos ensaios [1].

Thick Adherend Shear Test (TAST)

Este método de ensaio pode ser usado para determinar:

- A tensão de corte até a rotura do adesivo (τ_{\max});
- O módulo de corte do adesivo (G);

- Outras propriedades podem ser obtidas a partir da curva de tensão vs. deformação, tal como o módulo secante e a deformação máxima de corte ($\gamma_{m\acute{a}x}$);
- Os efeitos de diversas condições nas propriedades de corte, como por exemplo temperatura, meio ambiente, velocidade de ensaio, entre outros.

O ensaio TAST é uma metodologia normalizada pelas normas ISO 11003-2 e ASTM D3983. A geometria característica do provete (Figura 18), com espessura elevada dos substratos e L_0 reduzido, elimina quase por completo o arrancamento nas extremidades da junta e garante tensões de corte praticamente uniformes ao longo da ligação, o que permite a caracterização do adesivo praticamente em corte puro [23].

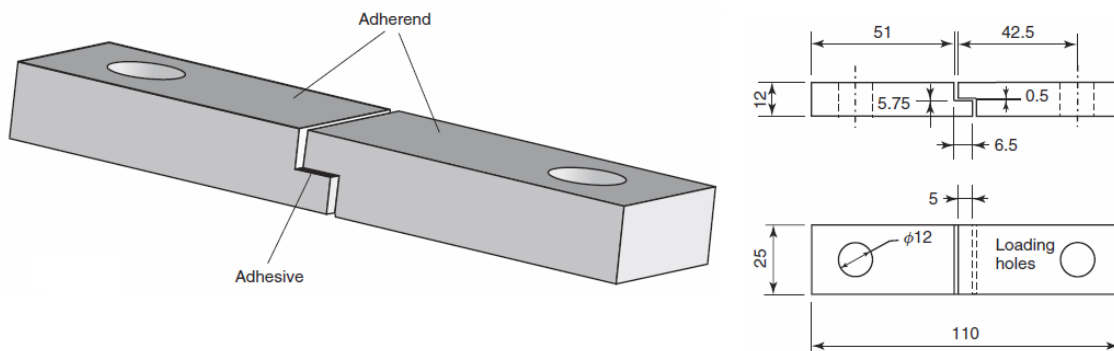


Figura 18 Geometria do provete TAST [23]

Com este ensaio pretende-se avaliar a resistência ao corte puro dos adesivos selecionados e, por exemplo, comparar as deformações obtidas por um extensómetro de contacto (Figura 19), frequentemente usado em ensaios de tração, e as obtidas através de um sistema ótico [1, 23].

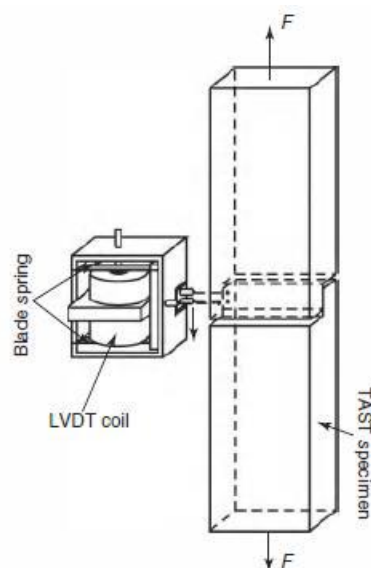


Figura 19 Ensaio de um provete TAST com recurso a um sistema ótico [23]

2.3.2.3 Ensaios de arrancamento

Este tipo de ensaio está normalizado pela norma ASTM D1876 (Figura 21) e é aplicável à caracterização da resistência ao arrancamento de ligações adesivas em substratos flexíveis [24].

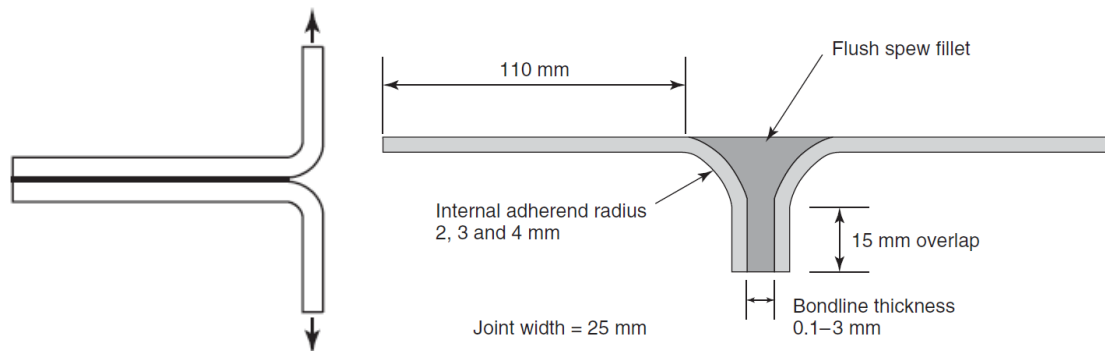


Figura 20 Provete para ensaio de arrancamento junta T [24]

Figura 21 Geometria provete junta T (ASTM D1876) [24]

O ensaio é realizado conforme se demonstra na Figura 20, em que um dos aderentes é fixo a uma base mais rígida e o outro aderente é solicitado pela máquina de ensaio. Normalmente este tipo de ensaio é usado quando ambos os aderentes são flexíveis. O ângulo e a força de arrancamento dependem da espessura do suporte [1, 24].

2.3.2.4 Ensaios de impacto

O comportamento sob condições de carregamento de impacto (Figura 22) é uma característica importante de muitas estruturas como por exemplo veículos, tendo esta que ser levada em consideração na fase de projeto das estruturas e dos seus componentes.

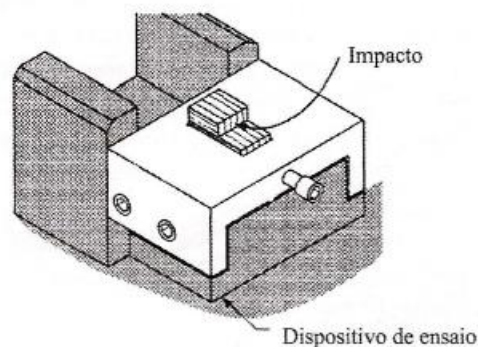


Figura 22 Sistema de fixação para ensaios de impacto em juntas adesivas [1]

A norma a seguir para estes ensaios é a ASTM 950, que descreve um procedimento baseado no ensaio de Charpy para metais [1]. O resultado do ensaio é apresentado como a energia absorvida para produzir a rotura do provete, dividida pela área colada, e expresso em J/m^2 [1].

2.3.2.5 Ensaio de fadiga

Os ensaios de fadiga colocam uma determinada carga ou deslocamento variável em ciclos repetidos consoante a especificação do teste. Este ensaio segue a norma ASTM D3166, que fornece procedimentos para testar e medir a resistência à fadiga em substratos metálicos ou poliméricos. O comportamento sob condições cíclicas é uma função do tipo de adesivo e, fundamentalmente, da geometria da junta [1, 9].

Os ensaios que são realizados têm normalmente como objetivo permitir representar num diagrama a curva tensão máxima vs. número de ciclos para a rotura (Figura 23), mostrando o comportamento de uma determinada ligação adesiva [1].

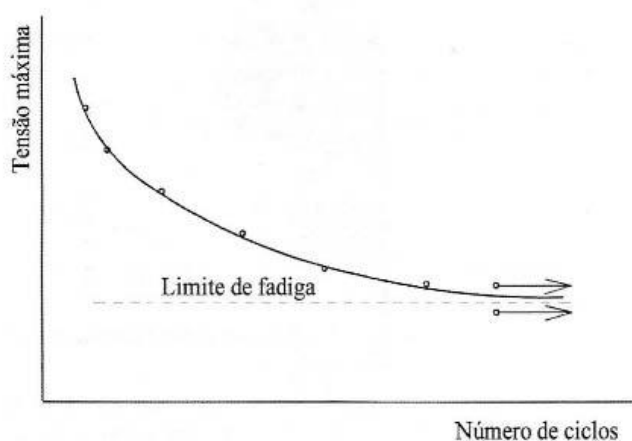


Figura 23 Curva S-N para a rotura [1]

A tensão de fadiga está dependente do adesivo, das condições de cura, geometria de juntas, modo de carregamento, amplitude e frequência de carga cíclica. Estes dados são muito úteis na parte de projeto para estimar o limite de vida das juntas, bem como as cargas a que estas podem estar sujeitas [9].

2.3.2.6 Ensaio de fluência

As juntas adesivas nem sempre sofrem esforços por curtos períodos de tempo. Muitas vezes a aplicação exige que a junta adesiva tenha um carregamento contínuo. Durante este tempo ocorre uma mudança dimensional resultante do efeito de fluência no adesivo [9].

Para obter esta informação realizam-se os ensaios de fluência, que são demorados e com um custo elevado. Seguem a norma ASTM D1002 para construção dos provetes, usualmente juntas de sobreposição simples. As normas ASTM D2294-96 e ASTM D2293-96 são aplicadas para os sistemas de ensaio para carregamentos em tração e compressão (Figura 24), respetivamente [1].

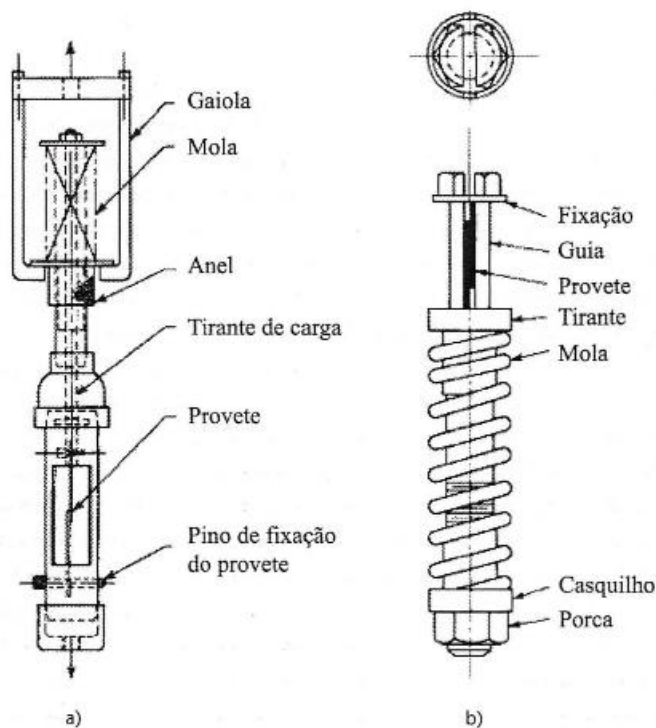


Figura 24 Dispositivos para ensaios de fluência a) mola carregada em tração (ASTM D2294-96) b) mola carregada em compressão (ASTM D2293-96) [1]

Dependendo das características do adesivo, do nível de carregamento aplicado e das condições de ensaio, o tempo necessário para se verificarem deformações mensuráveis pode ser bastante longo. O registo durante o ensaio é o alongamento verificado entre traços que foram previamente marcados na zona de sobreposição.

A espessura do filme de adesivo influencia a deformação total registada. A deformação aumenta com t_a . Nesta perspetiva, torna-se recomendável estabelecer a variação da deformação de fluência por unidade de espessura [1].

2.3.2.7 Ensaios de durabilidade

A exposição às condições ambientais diminui a capacidade de resistência das juntas adesivas. O efeito da temperatura, da humidade relativa, de soluções aquosas, ultravioletas ou do contacto com outro tipo de condições agressivas reduz a durabilidade, ou seja, a capacidade de manutenção em serviço em condições normais,

por um período de tempo compatível com o previsto no projeto. Os ensaios de durabilidade permitem avaliar o desempenho da junta e o efeito de várias preparações de superfície ou influência dos substratos [1].

Existem vários ensaios de durabilidade, que estão divididos em dois grupos. Num dos grupos é realizada a avaliação das condições ambientais isoladamente, enquanto no outro avalia-se o efeito combinado das condições de carregamento e das condições ambientais.

Ensaio de cunha (*wedge test*)

O ensaio de cunha (*wedge test*) (Figura 25) é o método mais eficaz para avaliar a adesão da ligação, é simples e económico. Está normalizado pela norma ASTM D3762 e é um método sensível à qualidade de preparação de superfície e à durabilidade do adesivo às condições ambientais [1].

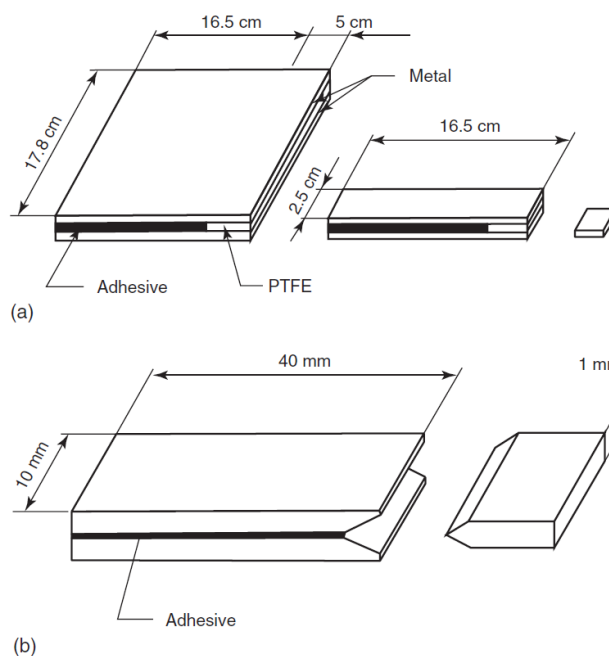


Figura 25 Esquema do *wedge test* a) dimensões segundo a ASTM D3762 b) *wedge test* reduzido [25]

O comprimento da fratura está diretamente relacionado com a energia da fratura. O ensaio de cunha fornece informações não apenas sobre a qualidade da junta mas também acerca da sua durabilidade, sendo um dos objetivos do ensaios caracterizar o tipo de fratura [25].

Durabilidade de junta de sobreposição simples em tensão

Para os ensaios para caracterização do efeito das condições ambientais e das condições de carregamento este é um dos ensaios mais comuns, cujo procedimento está descrito na norma ASTM D2919, com um dispositivo semelhante ao da Figura 26.

É introduzido um esforço de tração através das molas, devendo a força aplicada ter a precisão de cerca de 1%. Os dispositivos são colocados nas condições ambientais desejadas e realizadas observações periódicas dos provetes. Como registo, é considerado o tempo total para a rotura [1].

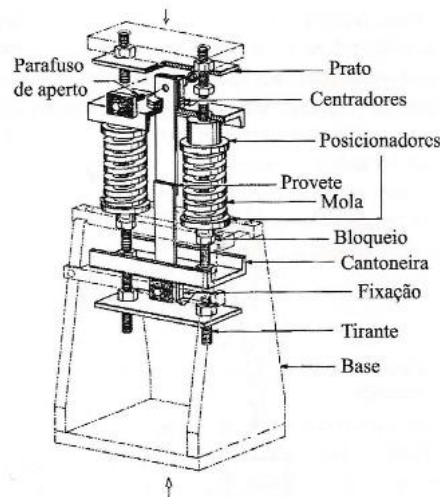


Figura 26 Dispositivo para ensaio de durabilidade em junta de sobreposição simples [1]

Durabilidade por arrancamento (junta em T)

A norma ASTM D2918 refere um método para medir a durabilidade de juntas adesivas em ensaios de arrancamento, sendo comum usar juntas com a forma de T. Este ensaio pode ser preparado para exposição ambiental exterior, em câmara com atmosfera controlada ou imersão do provete em banhos com temperatura controlada (Figura 27) [1].

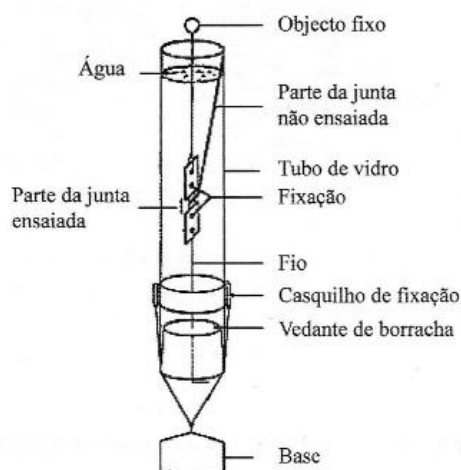


Figura 27 Dispositivo de ensaio da durabilidade em juntas T por arrancamento quando se pretende medir a durabilidade em condições de imersão ou de controlo de humidade relativa [1]

2.4 Ensaios de caracterização à fratura

A mecânica da fratura e os Modelos de Dano Coesivo (MDC) têm demonstrado grandes potencialidades na avaliação da resistência mecânica em juntas adesivas, sendo por isso cada vez mais objeto de estudo de vários investigadores [1].

A tenacidade à fratura de um material caracteriza a sua resistência ao crescimento de uma fenda, ou seja, a quantidade de energia que o material pode absorver até ao momento da rotura. Com os ensaios de tenacidade à fratura podem-se determinar a tensão crítica de fratura de um dado material na presença de um dado defeito e determinar o defeito crítico suportado por um dado material que está sujeito a um determinado carregamento [26].

Entre os principais impulsionadores da mecânica da fratura estão Inglis [27] e Griffith [28]. Estes investigadores desenvolveram a mecânica da fratura linear elástica onde a tenacidade à fratura é dada pelo fator de intensidade de tensão (K), ou pela taxa de libertação de energia da deformação (G). Estes conceitos só são válidos para um grupo de materiais onde a propagação da fenda se encontra na região elástica, e podem ser usados para caracterizar a fratura frágil. Contudo, a grande maioria dos materiais encontra-se no domínio da Mecânica da Fratura Elasto-Plástica, que apresentam uma alta ductilidade. Nestas circunstâncias, pode ser utilizado o integral- J para caracterizar a tenacidade à fratura [29].

Sob carregamentos monotónicos, as fendas propagam-se quando K ou G atingem os valores críticos, (K_c) e (G_c), conhecidos por tenacidade crítica à fratura e taxa de crítica de libertação de energia de deformação, respetivamente. O valor do comprimento de fenda (a) é medido em ensaios normalizados que se encontram divididos em 3 modos elementares (Figura 28):

- Modo I;
- Modo II;
- Modo III.

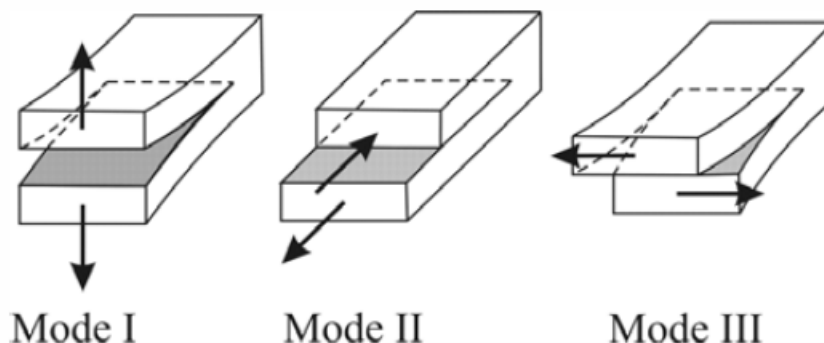


Figura 28 Modos de rotura [30]

2.4.1 Modo I

Neste modo o ensaio mais utilizado é o *Double-Cantilever Beam* (DCB), que consiste numa junta com aderentes retangulares ligados ao longo do seu comprimento, incorporando uma região sem adesivo. Esta pode ser realizada com uma película de filme PTFE e é designada de pré-fenda (a_0) (Figura 29) [1, 31].

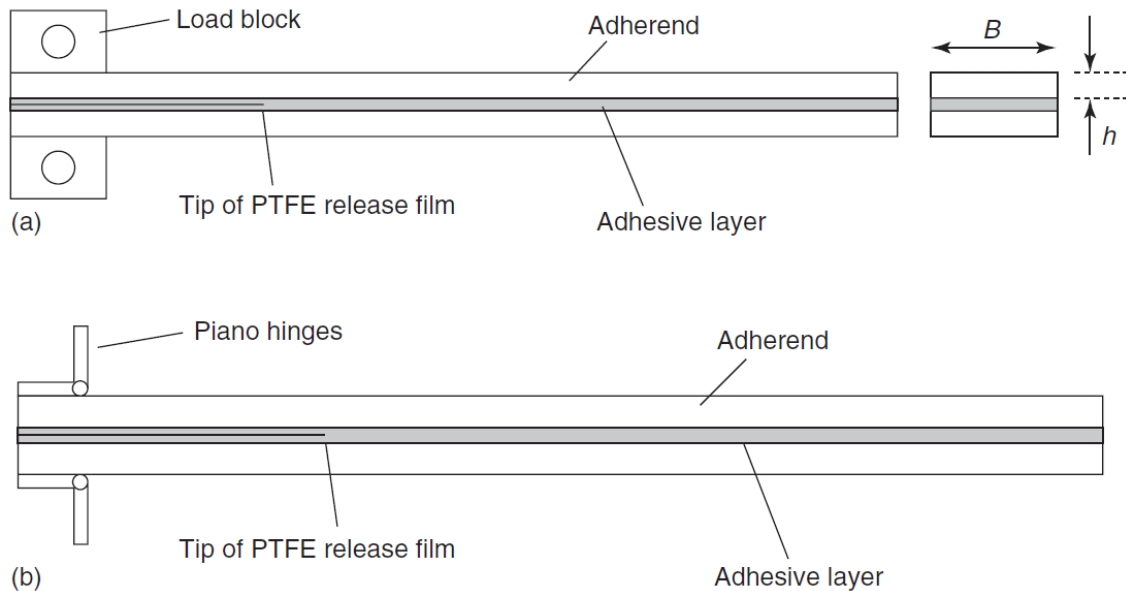


Figura 29 Provete ensaio DCB a) Com blocos de carga b) Com dobradiças [31]

Este ensaio é normalizado pela norma ASTM D3433, e é utilizado para obter a taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{IC}), sendo necessária a medição de a [31].

A propagação da fenda tem lugar desde a_0 até à outra extremidade do adesivo, sendo o seu crescimento induzido através de forças com direção perpendicular ao provete. A velocidade da solitação está normalmente compreendida entre 0,5 e 3 mm/min [1].

Quando os substratos usados forem metálicos, a sua espessura é importante de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, de forma a que não haja influência nos resultados. A espessura mínima (h) é dada pela expressão

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{b\sigma_y}}, \quad (1)$$

em que h representa a espessura mínima do substrato, T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda, b , corresponde à largura do substrato e σ_y representa a tensão de cedência do material do substrato [31].

Outro ensaio utilizado para caracterização da fratura à tração é o ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) (Figura 30) para a determinação de G_{IC} , que apresenta como vantagem, em relação ao método anterior, o facto de não ser necessária a medição dos valores da fenda para o método de tratamento de dados convencional. Este é um aspeto relevante, pois estes valores estão sempre sujeitos a erros de leitura com alguma influência no resultado final, sendo normalmente obtidos através de registos fotográficos da face lateral do provete, que permitem a determinação de a [1, 31].

A norma ASTM D3433 recomenda que os substratos possuam 241,3 mm de comprimento e largura de 25,4 mm. A altura do provete é a necessária para que a taxa de variação da flexibilidade, C , com o comprimento de fenda (dC/da) seja constante ao longo da propagação da fenda. A altura do substrato, h , varia de acordo com a seguinte equação:

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

em que m é o declive, a corresponde ao comprimento de fenda e h corresponde à altura do substrato [31].

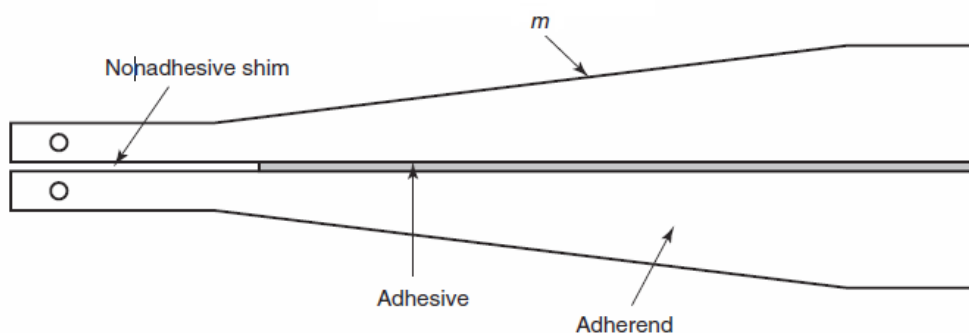


Figura 30 Provete de ensaio TDCB [31]

2.4.2 Modo II

Um dos objetivos dos ensaios de caracterização a fratura segundo o modo II é obter a taxa crítica de libertação de energia de deformação ao corte (G_{IIc}). Estes ensaios seguem a norma japonesa JIS 7086 e a norma europeia AECMA prEN6036, que foram adaptadas dos ensaios de materiais compósitos. No entanto, os testes de modo II mais populares ainda apresentam algumas complicações [32].

O ensaio *End-Notched Flexure* (ENF) (Figura 31) consiste basicamente numa viga apoiada, carregada ao meio do seu comprimento. Este é o ensaio mais generalizado para a obtenção de G_{IIC} . No entanto, a propagação da fenda neste tipo de ensaio pode ser instável. Segundo Yoshihara [33], para que a propagação seja estável é necessário que a_0 seja pelo menos igual a 70% de metade do vão. Com a aplicação da carga a fenda tende a fechar, o que dificulta a visualização da mesma e obtenção dos valores de medição da fenda [32].

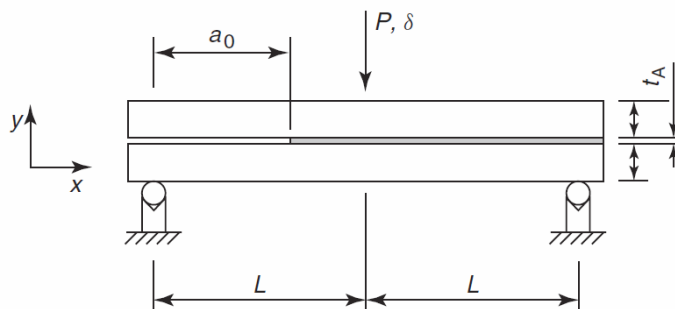


Figura 31 Representação esquemática do ensaio ENF [32]

Outro ensaio muito idêntico ao anterior é o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF), diferenciando-se no número de apoios de carregamento (Figura 32). Os dois cilindros de carregamento permitem que a placa gire livremente, o que resulta na aplicação de uma carga idêntica em ambos os cilindros de carregamento. A propagação da fenda é estável, no entanto este ensaio está associado a atrito considerável na região da pré-fenda [32].

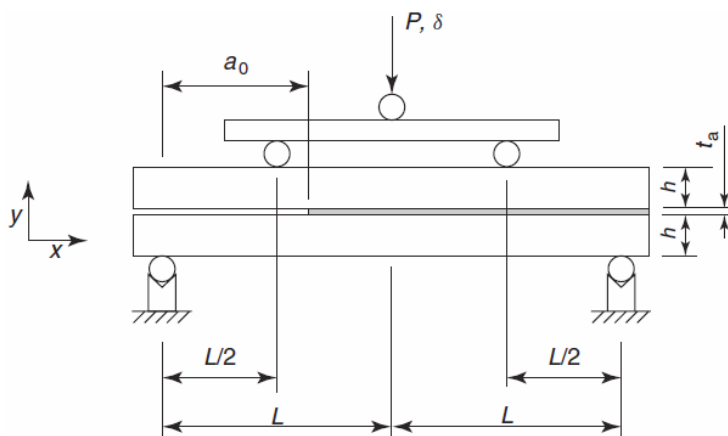


Figura 32 Esquema ensaio 4 ENF [32]

O ensaio *End-Loaded Split* (ELS) caracteriza o comportamento à fratura de juntas adesivas quando estas se encontram sob uma carga de modo II. Este ensaio apresenta algumas dificuldades na obtenção de G_{IIC} relacionadas com a existência de grandes

deslocamentos e é muito sensível às condições de aperto [34, 35]. Tem a particularidade de a extremidade oposta ao carregamento ser encastrada, como se pode ver na Figura 33.

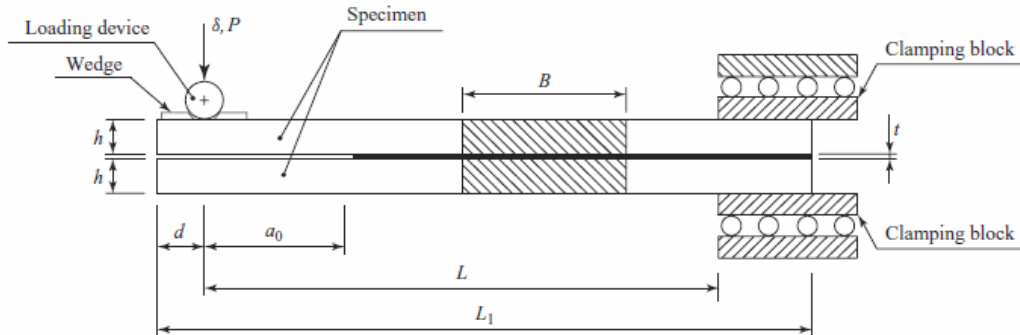


Figura 33 Esquema de ensaio ELS [35]

2.4.3 Modo misto I+II

No Modo Misto I+II as juntas adesivas são submetidas ao efeito combinado de tensões normais e de corte. Existe uma série de ensaios a contemplar o efeito da combinação dos modos falados anteriormente (modo I e II), seguindo abaixo exemplos dos ensaios mais utilizados.

Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)

Este ensaio (Figura 34) surgiu através do ensaio DCB. Os substratos podem ser fabricados com espessuras diferentes entre eles e os seus materiais também podem ser distintos.

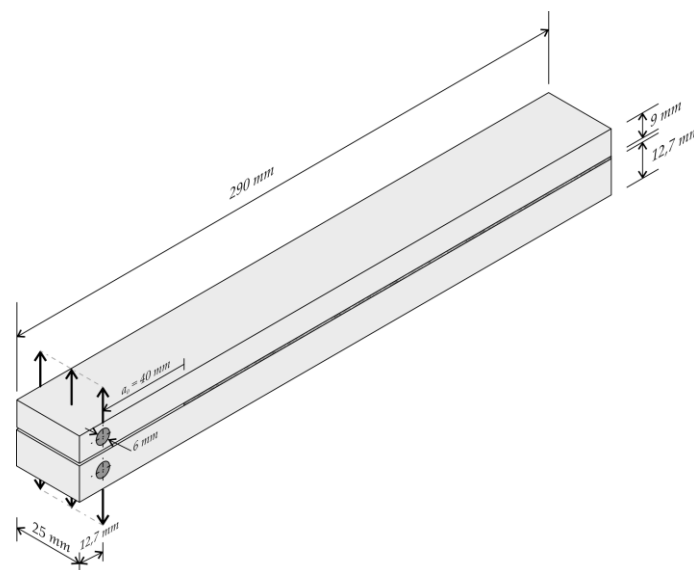


Figura 34 Geometria do ensaio ADCB (dimensões em mm) [36]

A assimetria dos substratos assegura que ocorra fratura do tipo misto. O ensaio apresenta como principal desvantagem a utilização de substratos com diferentes espessuras ou rigidez [37].

Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam (ATDCB)

Os provetes utilizados neste ensaio são similares aos provetes utilizados nos ensaios DCB e TDCB, usando uma configuração mista em que um dos substratos possui secção constante e o outro possui a configuração típica de um substrato TDCB (Figura 35). Aqui, tal como no ensaio TDCB, o valor de m é obtido pela equação (2) [36].

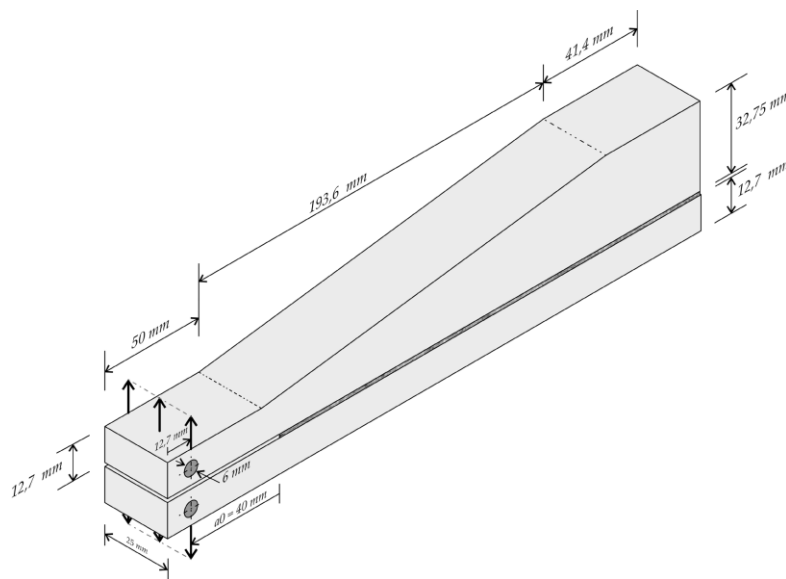


Figura 35 Geometria ensaio ATDCB (dimensões em mm) [36]

Mixed-Mode Bending (MMB)

O ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB) (Figura 36) já se encontra normalizado pela norma ASTM D 6671, no caso da caracterização à fratura interlaminar de compósitos em modo misto [1].

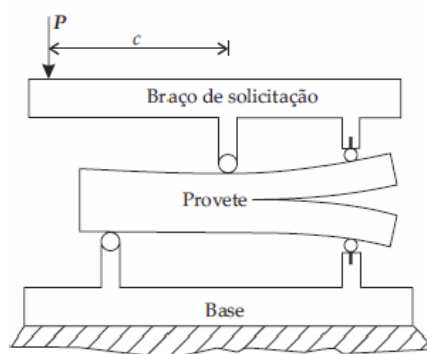


Figura 36 Representação esquemática do ensaio MMB [1]

Este ensaio consiste na combinação do ensaio DCB (modo I) com o ensaio ENF (modo II), ou seja, é um ensaio ENF com uma solicitação em modo de abertura da fenda. Com este ensaio tem-se a possibilidade de testar diferentes rácios de modo misto sem ser necessário alterar a geometria dos provetes, bastando para tal variar o comprimento (c) [38, 39]. Verifica-se que em maior parte das ocasiões a propagação da fenda é estável, embora a iniciação seja instável. No entanto o rácio do ensaio mantém-se praticamente constante durante a propagação da fenda [38].

Mixed-Mode Flexure (MMF) ou Single-Leg Bending (SLB)

Desenvolvido a partir do ensaio de ENF, neste ensaio apenas um dos substratos é que vai apoiar nos cilindros de suporte, pois um dos substratos é mais curto na extremidade mais próxima de a_0 (Figura 37). Esta diferença vai provocar modo de abertura (modo I) e um modo de corte (modo II). Foi proposto por Yoon e Hong [40], e é um método bastante expedito para a obtenção dos resultados, e que se tem revelado bastante preciso [36].

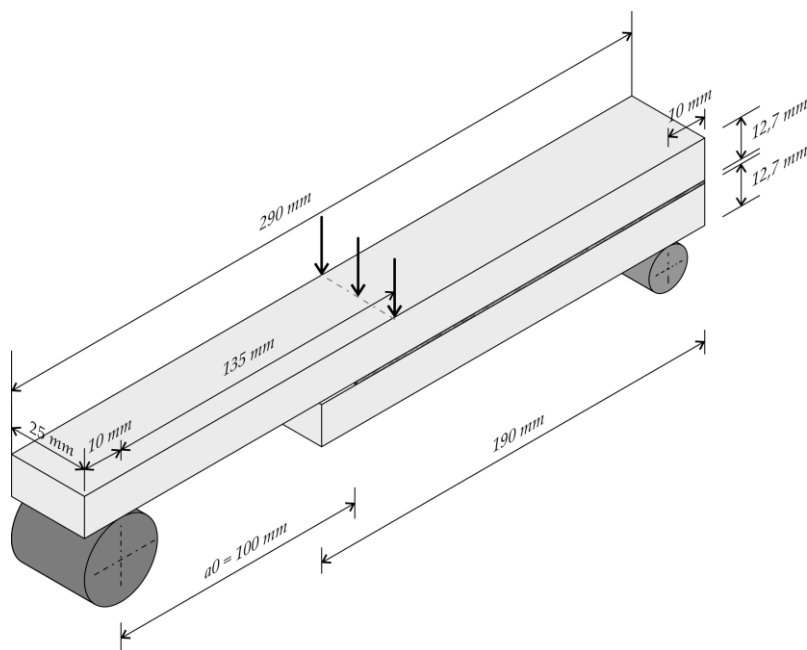


Figura 37 Representação esquemática do ensaio SLB (dimensões em mm) [36]

2.5 Determinação de G_{IIC} pelo ensaio ENF

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;
- O método do integral-J.

2.5.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Existem 3 métodos para medir G_{IIC} que requerem a medição de a , são eles o *Compliance Calibration Method* (CCM), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Direct Beam Theory* (DBT).

Estes métodos requerem uma cuidadosa análise de a , principalmente em adesivos dúcteis em que, devido à existência de uma Zona de Processo de Fratura (ZPF), onde ocorrem fenômenos como plasticidade e iniciação de micro fendas, é particularmente difícil localizar a extremidade da fenda. Assim, para uma correta leitura da localização da fenda é aconselhado o auxílio de um equipamento de visualização, pois o ensaio ENF é realizado sem separação dos aderentes, o que torna esta tarefa ainda mais difícil [41].

Os métodos mais precisos são os métodos CCM e CBT, enquanto o método DBT não efetua nenhuma correção para explicar as deformações de corte. Deste modo, o valor de G_{IIC} varia um pouco em comparação com os métodos anteriores.

Para a obtenção de G_{IIC} usualmente utiliza-se o método CCM, obtido através da equação de Irwin-Kies [42]

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2b} \times \frac{dC}{da}, \quad (3)$$

onde $C=\delta/P$ é a flexibilidade do provete durante a propagação da fenda. As curvas $C=f(a)$ são ajustadas através de polinômios cúbicos $C=C_3a^3 + C_2a^2 + C_1a + C_0$. No entanto, por vezes ocorrem problemas na obtenção da curva- R , devido ao ajuste de dC/da [43]. Assim, G_{IIC} é obtido pela equação (4),

$$G_{IIC} = \frac{3P^2C_1a^2}{2b}. \quad (4)$$

O método DBT com base na teoria das vigas direta, considera os efeitos de corte dos aderentes. No entanto, não efetua correção do comprimento de fenda, ao contrário do CBT [44]. A expressão de cálculo (5) permite obter o G_{IIC} pelo método DBT,

$$G_{IIC} = \frac{9P\delta a^2}{2b(2L^3 + 3a^3)}. \quad (5)$$

Por último tem-se o método CBT, onde G_{IIC} pode ser calculado pela seguinte expressão [45]

$$G_{IIC} = \frac{9(a + 0,42\Delta_1)^2 P^2}{16b^2 E_x h^3}, \quad (6)$$

onde E_x representa o módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes na direção xx e Δ_I é a correção do comprimento da fenda em função da deformação de corte, segundo a seguinte equação [46]

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E_x}{11G_{xy}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}. \quad (7)$$

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, para obter

$$\Gamma = 1,18 \sqrt{\frac{E_x E_y}{G_{xy}}}. \quad (8)$$

2.5.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

Para estimar o valor de G_{IIC} pelo método de fenda equivalente é utilizado o *Compliance Based Beam Method* (CBBM), baseado no conceito de fenda equivalente (a_{eq}) e que estima G_{IIC} apenas com a informação das curvas $P-\delta$ [46].

Este método possui vantagens relativamente aos métodos que requerem o comprimento da fenda (CCM, DBT e CBT), pois o comprimento da fenda é sustentado no valor de a_{eq} , e deste modo não existem as dificuldades na visualização da propagação da fenda e da correta localização da frente da fenda. Os métodos CCM, DBT e CBT não consideram os efeitos da extensão da ZPF no valor de a [46].

A teoria das vigas de Timoshenko e o conceito de a_{eq} (Figura 38) são a base deste método (CBBM), que depende do valor da flexibilidade $C=P/\delta$ durante o ensaio. A ZPF (Figura 38) desenvolve-se imediatamente à frente da fenda devido à nucleação de micro fissuras através do adesivo e devido à sua plastificação, o que dificulta desta maneira a localização correta da frente de fenda [43, 46].

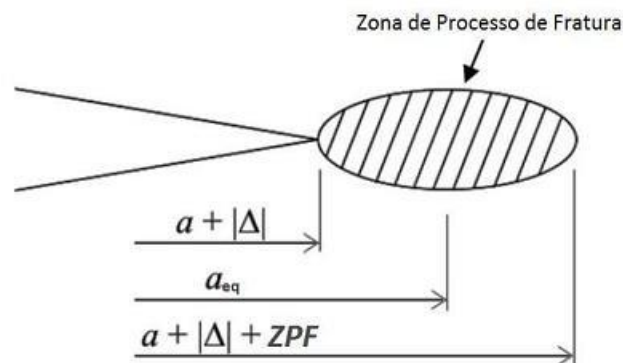


Figura 38 Representação esquemática da ZPF e do conceito de a_{eq} [43]

A ZPF depende do tipo de adesivo utilizado, sendo que os adesivos mais dúcteis possuem uma zona de maior dimensão que varia com a ductilidade do adesivo. Outros fatores que afetam esta zona são a tenacidade medida do adesivo e a energia nele dissipada. A fenda equivalente obtém-se pela seguinte equação:

$$a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF}, \quad (9)$$

onde o parâmetro Δ é um fator de correção de a_0 que pode ser determinado experimentalmente ou numericamente utilizando diferentes comprimentos de fenda iniciais, e depende também do efeito ZPF. Assim define-se uma regressão linear $C^{1/3}=f(a)$ e definir Δ pela interseção da reta de ajuste com o eixo das abcissas (Figura 39).

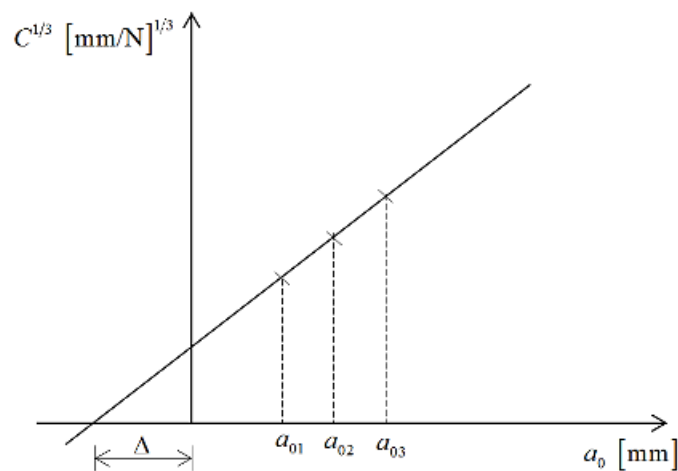


Figura 39 Representação esquemática da obtenção do fator de correção do comprimento de fenda [30]

Durante a propagação da fenda, a flexibilidade experimental incorporara não só o comprimento de fenda real (a), como também o efeito da ZPF. Pelo Teorema de Castigliano pode escrever-se a equação para obter o valor de C :

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

O módulo de flexão pode ser calculado pela expressão anterior a partir da flexibilidade inicial C_0 e o comprimento de fenda inicial a_0

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8bh^3 C_{0corr}}, \quad (11)$$

onde a flexibilidade inicial corrigida (C_{0corr}) é dada por

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G_{xy}bh} \quad (12)$$

Durante a propagação da fenda, é considerada uma correção ao comprimento de fenda real na expressão (10) para ter em conta a ZPF. Substituindo E_f da equação (11) e a_{eq} no lugar de E_x e a , respetivamente, na expressão (10), tem-se que

$$a_{eq} = a + \Delta a_{ZPF} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3}, \quad (13)$$

onde C_{corr} é a flexibilidade corrigida e é dada pela expressão (12) substituindo C_0 por C . O valor de G_{IIC} pode ser obtido a partir da expressão Irwin-Kies (14), onde o módulo de elasticidade equivalente é um valor calculado que depende de C_0 e de a_0 , evitando assim a influência da variabilidade dos substratos nos resultados

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16b^2 E_f h^3} \quad (14)$$

Deste modo, G_{IIC} é obtido através do patamar da curva- R em função da fenda equivalente. Este método depende da medição de P e δ durante o ensaio experimental, superando deste modo a limitação associada à monitorização de a , uma vez que a fenda é um parâmetro calculado em vez de medido.

A contabilização da ZPF é importante uma vez que a sua presença afeta o comportamento de fratura, sendo ainda mais importante quanto mais dúctil for o adesivo. A parte inicial da curva- R possui uma fase ascendente, que 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} [46].

2.5.3 Métodos baseados no Integral- J

O método baseado no integral- J foi proposto inicialmente por Rice, e tem um tratamento essencialmente mecânico, apoiado numa forte base matemática, desconsiderando aspetos micro estruturais da fratura [47].

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 homogéneo, de material elástico linear ou não, submetido a um campo de deformações bidimensionais onde todas as tensões dependem das coordenadas cartesianas x e y . Este método é apropriado para cargas monótonicas, como ocorre nos ensaios DCB e ENF, é simples de usar, rápido em obter uma solução em termos computacionais e apresenta resultados precisos [48].

Andersson e Stigh [49] obtiveram as relações tração-deformação resultantes de deformação em corte puro. 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 [47])

$$J = \int_C \left(U dy - T \times \frac{du}{dx} dc \right), \quad (15)$$

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 (J), T é o vetor de tração, e u é o campo de deformação.

Num trabalho baseado no pressuposto da existência de uma lei coesiva [50], foi concluído que, para as camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas, refletindo as propriedades do adesivo, podendo o integral- J 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_{IIc} pelo método do integral- J (Zhu et al. [29]). O valor do integral- J é dado por:

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

onde P_u representa a carga por unidade de largura, a o comprimento de fenda, h a espessura dos aderentes, E o módulo de Young dos aderentes e δ_s o deslocamento entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda. O primeiro termo corresponde à solução da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MEFE) 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.

Pela avaliação do integral- J ao longo de um caminho exterior à zona de processo de fratura, pode-se escrever:

$$G_{II} = \int_0^{\delta_{sc}} \tau(\delta_s) d\delta_s, \quad (17)$$

onde δ_s e δ_{sc} são, respetivamente, o deslocamento atual em corte na ponta da fenda e o deslocamento de rotura ao corte na ponta da fenda. Pela diferenciação da expressão anterior obtém-se:

$$\tau(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (18)$$

O procedimento do ensaio consiste em medir a relação de P , a e δ_s . A expressão obtida mostra que é possível alcançar a relação entre τ e δ_s , ou seja, a lei coesiva em corte do adesivo, por diferenciação da curva de G_{II} em função do valor medido durante o ensaio de δ_s . O comportamento analisado em ensaio consiste numa curva crescente de $G_{II}=f(\delta_s)$ até um patamar, que ocorre aquando do início da propagação da fenda e corresponde a $G_{II}=G_{IIc}$, e cuja diferenciação resulta diretamente na lei coesiva experimental para a camada de adesivo.

Marzi et al. [51] consideraram o ensaio Arcan para obter a lei coesiva ao corte de juntas adesiva para evitar os efeitos de compressão e fricção nas faces da fenda que se observam no ensaio ENF. Tais efeitos podem comprometer a validade das leis coesivas obtidas.

2.6 Influência da espessura de adesivo no comportamento das juntas

O estudo de t_a no comportamento da junta é muito importante, sendo esta característica incorporada no projeto de uma junta adesiva, já que influencia bastante o comportamento da junta. Para obter melhor desempenho das juntas os seus valores de espessuras deverão variar entre 0,1 mm e 0,5 mm. Contudo, alguns fabricantes recomendam espessuras de 0,1 mm a 0,2 mm para obtenção de máxima resistência da junta [52].

2.6.1 Juntas adesivas em modo I

A influência de t_a caracterizada pelo modo I é das mais investigadas, com recurso ao ensaio DCB devido a sua simplicidade e precisão. De seguida apresentam-se alguns exemplos do estudo de t_a e do seu comportamento. O efeito de t_a em juntas de sobreposição simples está bem documentado na literatura. A maioria dos resultados são para adesivos estruturais típicos e mostram que a resistência da junta diminui à medida que t_a aumenta [53].

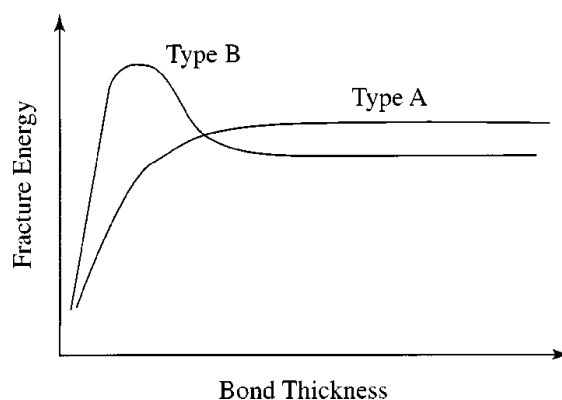


Figura 40 Variação da energia de fratura com a espessura do adesivo, para dois tipos de adesivo [54]

Segundo alguns autores, à medida que a espessura da ligação diminui, a energia da fratura também diminui monotonicamente (tipo A; Figura 40) ou aumenta com o valor de pico e em seguida, diminui rapidamente (tipo B; Figura 40) [54]. Segundo Adams e Peppiatt [55], para adesivos epóxicos a carga máxima da junta centra-se num valor t_a na faixa de 0,1-0,2 mm. No entanto, modelos analíticos como os de Volkersen [56] ou Goland e Reissner [57] preveem o contrário. Existem muitas teorias que tentam explicar esse fato e esse assunto ainda é controverso.

Adams e Peppiatt [55] alegaram que um aumento de t_a aumenta as probabilidades de existência de imperfeições internas nas juntas (vazios e microfissuras), o que levará a uma rotura prematura das mesmas. Crocombe [58] mostra, considerando a plasticidade do adesivo, que as juntas mais espessas têm menor resistência. Por outro lado, Bascom et al. [59, 60] investigam, com recurso a ensaios TDCB, provetes com adesivo de resina epóxida modificado com borracha, e descobriram que a energia da fratura é maximizada quando t_a é igual ao diâmetro da zona plástica formada à frente da fenda.

Em ensaios de juntas de sobreposição simples com adesivo epóxico para a indústria automóvel, notou-se uma redução da resistência da junta com o aumento de t_a [61]. A redução de resistência foi atribuída aos problemas de flexão nas juntas com maior espessura devido ao aumento do deslocamento da carga. Quando são usados compósitos, uma diminuição no t_a aumenta a tensão nas extremidades dos substratos, podendo levar a que ocorra delaminação. Portanto, os benefícios de usar um reduzido valor de t_a podem ser reduzidos.

Diferentes estudos relataram a dependência de G_{IC} em ligações adesivas com o valor de t_a [54]. Estudos realizados com recursos a ensaios DCB em ligações adesivas com adesivo epóxico mostram que normalmente G_{IC} aumenta com t_a até um valor de pico. Depois, G_{IC} diminui com t_a para um valor constante, correspondente a G_{IC} do adesivo maciço. Este tipo de resultado também foi comprovado por Duan et al. [62] e Biel [63], que chegaram a valores maiores de G_{IC} perto do valor ótimo de t_a do que com provetes maciços. Isto deve-se ao diferente estado de deformação prescrita na proximidade da fenda, que afeta o valor de G_{IC} .

Em estudos onde analisaram o efeito de t_a no comportamento mecânico de um adesivo de poliuretano estrutural, concluiu-se que G_{IC} depende da espessura da camada adesiva e que este parâmetro aumenta quase linearmente até $t_a=1$ mm, enquanto de 1 a 2 mm aumenta em apenas em aproximadamente 20%. A espessura de 2 mm pode não corresponder ao valor máximo de G_{IC} , contudo as juntas adesivas com espessuras superior a 2 mm são difíceis de fabricar e também são de menor interesse para aplicações práticas [64].

2.6.2 Juntas adesivas em modo II

Para prever com precisão a rotura das juntas adesivas, é necessário primeiro caracterizar a resistência à fratura em modo I e modo II. A maior parte do trabalho publicado na literatura centra-se no estudo do G_{IC} . Esta discrepância é notória fundamentalmente devido a problemas associados aos ensaios de modo II [65]. De seguida apresentam-se exemplos de estudos que mostram o comportamento das juntas adesivas ao corte com a influência de t_a .

Estudos relacionados com G_{IIC} como o de Hiroaki et al. [66] avaliaram os valores de G_{IIC} de compósitos reforçados em fibra de carbono usando aderentes com duas espessuras diferentes, concluindo que G_{IIC} aumentou linearmente com o aumento da espessura dos aderentes.

Stevnovic et al. [67] investigaram a influência das condições de fabrico da pré-fenda no comportamento de materiais compósitos unidireccionais em modo II. Foram utilizados dois conjuntos diferentes de provetes: um conjunto com uma pré-fenda realizada manualmente e outro com uma pré-fenda induzida por fadiga. Observou-se que não houve influência da condição pré-fenda nos valores de G_{IIC} obtidos.

Sela et al. [68] investigaram, utilizando aderentes em CFRP e dois tipos de adesivo, a influência de t_a (entre 0,04 e 1,1 mm) na *Interlaminar Fracture Toughness* (IFT). O estudo foi realizado para modo I e modo II, sendo que no modo II IFT aumentou para maior t_a , embora tenha sido observado que a IFT diminuiu para maiores camadas adesivas superiores a 0,7 mm. Outra conclusão foi que, para valores baixos de t_a , o efeito da tenacidade foi mais notório e diminuiu para valores de t_a mais elevados [65].

da Silva et al. [69] estudaram G_{IIC} em função da espessura do adesivo (0,2, 0,5 e 1 mm), com um adesivo frágil e outro dúctil. Para o adesivo frágil, independentemente de t_a , o valor de G_{IIC} não varia. O adesivo dúctil exibiu um aumento de G_{IIC} com o aumento de t_a . Este comportamento pode ser explicado pela plasticidade do adesivo na extremidade da fenda. Embora a ZPF para o adesivo frágil seja considerada irrelevante, no caso de adesivo dúctil é altamente significativa e interfere com a propagação de fendas ao longo da camada adesiva.

Carlberger e Stigh [70] estudaram a forma das leis coesivas em função da espessura do adesivo, modelando um adesivo estrutural em ensaios de modo I e modo II. A principal conclusão foi que G_{IC} e G_{IIC} são mais facilmente influenciados por t_a do que a resistência coesiva máxima à tração (t_n^0) e resistência coesiva máxima ao corte (t_s^0). Observou-se um aumento de G_{IIC} com o aumento de t_a . Para ambos os tipos de carregamento, verificou-se uma diminuição insignificante das resistências coesivas com o aumento de t_a .

2.6.3 Juntas adesivas em modo misto I+II

A maioria das juntas adesivas utilizadas raramente se encontram apenas em modo I ou modo II. Assim, é crucial a compreensão do efeito da espessura do adesivo na resistência à fratura da junta adesiva em regime misto, embora a maioria dos estudos seja realizada de forma independente. Relativamente a esse facto, regista-se a dispersão dos dados encontrados na literatura comparativamente ao Modo I e Modo II [71].

Os ensaios de juntas adesivas em modo misto com o objetivo de estudar a influência da espessura do adesivo no comportamento das mesmas utilizam os ensaios *mixed-mode mending* (MMB), *cracked-lap-shear* (CLS) e *compact mixed-mode* (CMM) [72].

Benzeggagh e Kenane [73] utilizaram um critério semi-empírico para o regime de modo misto, e consideraram para o estudo de modo I o provete DCB e para modo II o provete ELS. Ducept et al. [74] investigaram com recurso ao ensaio MMB a delaminação num compósito fibra de vidro/adesivo epóxico, sendo que para modo II utilizaram o ensaio ENF. Analisando a energia de fratura em modo misto, os autores [73, 74] observaram que as energias de fratura são maiores para juntas adesivas comparativamente com provetes de um único material, pois ocorre delaminação entre camadas.

Os ensaios de modo misto são caracterizados pela relação G_I/G_{II} . Os ensaios podem ser realizados com diferentes proporções. O ensaio de modo misto MMF possui uma proporção $G_I/G_{II}=1,33$, obtida a partir da análise linear da fenda [75], sendo esta razão válida quando os aderentes possuem a mesma espessura e se varia apenas a espessura do adesivo.

Schmueser [76], obteve um aumento da taxa de energia de fratura em juntas submetidas a esforços de corte pelo modo misto com o aumento de t_a . A rotura neste estudo foi rotura interlaminar. Azari et al. [71] analisaram, segundo ensaio de modo misto ADCB, o comportamento quasi-estático e à fadiga de um adesivo epóxico com valores da t_a entre 0,13 e 0,79 mm, pois são valores típicos de juntas utilizadas na indústria automóvel. Observou-se um efeito muito pequeno da t_a no limiar de fadiga, o que pode simplificar o projeto das juntas adesivas para o carregamento à fadiga. A taxa de liberação de energia de deformação crítica para fratura quase estática aumentou linearmente com o aumento de t_a .

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

Neste capítulo são descritos os métodos experimentais, tais como os materiais utilizados no fabrico dos provetes, bem como o procedimento utilizado na produção dos provetes, ensaios e na obtenção de G_{IIC} pelos vários métodos.

Posteriormente, é feito o tratamento dos dados, comparando os diferentes métodos de obtenção de G_{IIC} , bem como análise entre diferentes t_a utilizadas.

3.1 Trabalho experimental

3.1.1 Materiais utilizados

No trabalho prático foram utilizados substratos de CFRP, material cada vez mais utilizado em diversas áreas de engenharia, nomeadamente em estruturas que requerem elevada resistência, rigidez e leveza [77]. Quanto ao adesivo foi utilizado um adesivo dúctil que permite uma melhor distribuição de tensões pela junta adesiva.

3.1.1.1 Substratos

O material compósito utilizado é uma matriz de resina epóxida reforçada com fibra de carbono. A fibra de carbono confere ao compósito uma resistência e rigidez elevadas. O CFRP usado foi obtido a partir de pré-impregnado da SEAL® Texipreg HS 160 RM, para o fabrico das placas com uma sequência de empilhamento de $[0]_{20}$. As propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP, obtidas previamente [48], estão descritas na (Tabela 1).

Tabela 1 Propriedades elásticas ortotrópicas do CFRP (1 – direção das fibras; 2 – direção perpendicular a 1 no plano da camada; 3 – direção normal à camada) [48]

Propriedades	Valores
E_1 [MPa]	109000
E_2 [MPa]	8819
E_3 [MPa]	8819
ν_{12}	0,342
ν_{13}	0,342
ν_{23}	0,38
G_{12} [MPa]	4315
G_{13} [MPa]	4315
G_{23} [MPa]	3200

3.1.1.2 Adesivo Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 define-se como um adesivo epóxico estrutural de duas partes, apresentando-se na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa contração e uma alta resistência ao corte e clivagem, exibindo uma ductilidade moderada. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentração, tipicamente nas extremidades das juntas, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos substratos [48].

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies a ligar. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona, isopropanol (para plásticos) ou outros agentes desengordurantes, a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. Apresentam-se as curvas σ - ϵ (Figura 41) segundo a norma ISO 527-2:2012 para provetes maciços para este adesivo, obtidas experimentalmente na referência [48]. Na Tabela 2 estão apresentadas as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo.

É bastante utilizado na ligação de substratos metálicos e compósitos. Possui um tempo de manuseamento, após mistura dos seus componentes, de 30 a 40 minutos a uma temperatura de 25°C e um tempo de cura, para alcançar 10 MPa de resistência ao corte, de 6 horas a 23°C ou 35 minutos a 60°C, segundo informação da ficha técnica do adesivo.

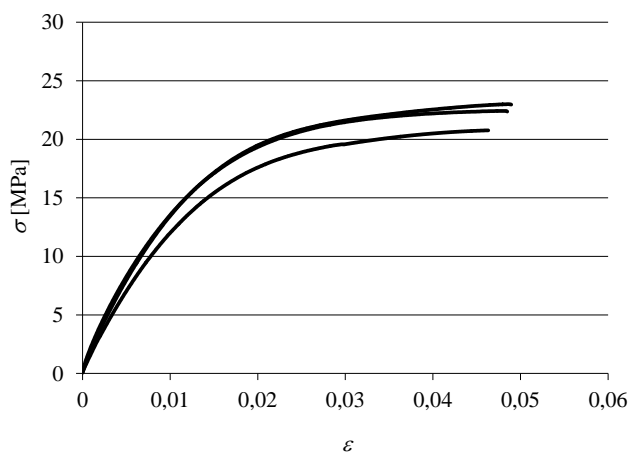


Figura 41 Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [48]

Tabela 2 Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [48]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de <i>Young</i> , E [GPa]	1,85±0,21
Coefficiente de <i>Poisson</i> , ν^a	0,33
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	12,63±0,61
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	4,77±0,15
Módulo de elasticidade transversal, G [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	43,9±3,4
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	0,43±0,02
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	4,70±0,34

^a valor do fabricante

3.1.2 Geometria das juntas

Os provetes para os ensaios ENF foram produzidos seguindo a geometria indicada na (Figura 42). Foram fabricadas 5 séries de 8 provetes com o mesmo adesivo, mas com espessuras diferentes (0,1, 0,2, 0,5, 1 e 2 mm).

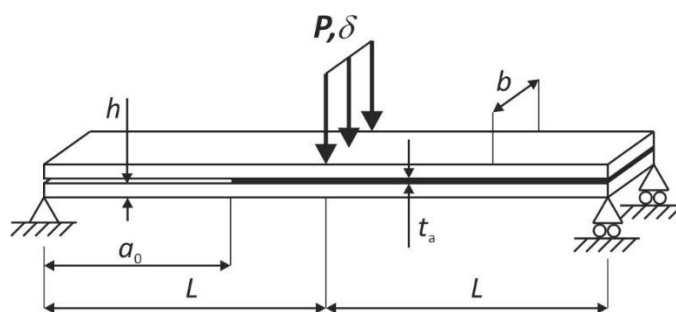


Figura 42 Geometria de um provete ENF

Na Figura 42 estão assinaladas as dimensões características do provete para ensaio ENF, que são definidas da seguinte forma:

- a_0 - Comprimento de pré-fenda inicial (mm);
- L - Distância entre punção de carga e rolete de apoio (mm);
- h - Espessura de substrato (mm);

- t_a - Espessura da camada de adesivo (mm);
- P - Carregamento (N);
- δ - Deslocamento (mm);
- b - Largura do substrato (mm).

Os provetes foram produzidos com as seguintes dimensões: $L=100$ mm, $b=15$ mm e $h=3$ mm, sendo que a valor da pré-fenda respectivo a cada provete segue na Tabela 3.

Tabela 3 Identificação dos provetes de ensaio e respectivas dimensões (mm)

t_a (mm)	Identificação provete	Pré-fenda a_0 (mm)
0,1	P01 1	68,38
0,1	P01 2	34,85
0,1	P01 3	36,25
0,1	P01 4	40,56
0,1	P01 5	43,95
0,1	P01 6	38,97
0,1	P01 7	47,02
0,1	P01 8	46,64
0,2	P02 1	38,03
0,2	P02 2	33,65
0,2	P02 3	44,81
0,2	P02 4	35,37
0,2	P02 5	34,99
0,2	P02 6	38,56
0,2	P02 7	41,27
0,2	P02 8	39,15
0,5	P05 1	46,64
0,5	P05 2	45,83
0,5	P05 3	38,00
0,5	P02 4	39,32
0,5	P05 5	42,60
0,5	P05 6	48,45
0,5	P05 7	48,33
0,5	P05 8	54,32
1,0	P10 1	35,83
1,0	P10 2	34,28
1,0	P10 3	40,13
1,0	P10 4	40,42
1,0	P10 5	46,20
1,0	P10 6	36,24
1,0	P10 7	38,10
1,0	P10 8	37,59
2,0	P20 1	44,30
2,0	P20 2	39,37
2,0	P20 3	44,24
2,0	P20 4	40,27
2,0	P20 5	---
2,0	P20 6	37,65
2,0	P20 7	37,82
2,0	P20 8	37,15

3.1.3 Processo de fabrico

O trabalho experimental iniciou-se pela produção do compósito para os substratos. Este foram fabricados a partir de um pré-impregnado CFRP unidirecional (SEAL® Texipreg HS 160 RM, Legnano, Itália) com espessura de 0,15 mm, empilhados manualmente utilizando 20 camadas unidireccionais, seguido de uma cura em uma prensa de pratos quentes. A espessura final de cada placa de compósito é de cerca de 3 mm. Após a obtenção das placas de CFRP procede-se ao corte das mesmas segundo as dimensões dos substratos, sendo que para tal se recorreu a uma máquina de corte com disco de diamante.

O pré-impregnado de CFRP é fornecido em rolo e armazenado em arcas congeladores, sendo que para começar o processo de fabrico das placas este ficou a estabilizar à temperatura ambiente. O fabrico das placas seguiu os seguintes passos:

1. Foram marcadas as dimensões da placa a produzir (300×300 mm) no rolo de compósito, sendo cortadas com recurso a um x-ato (Figura 43);



Figura 43 Posicionamento de uma régua para o corte das folhas de carbono-epóxico com auxílio de x-ato

2. De seguida efetuou-se o empilhamento, considerando todas as camadas a 0°. As folhas de carbono-epóxico foram empilhadas manualmente uma de cada vez, em cima da mesa de trabalho. Por cada folha empilhada, a nova folha era aquecida através de uma pistola de calor (Figura 44);
3. O empilhamento foi realizado com recurso a compressão manual. De forma evitar a formação de vazios entre camadas, recorreu-se a um calço rígido para a compressão das folhas (Figura 45). Este processo foi realizado até se empilharem 20 camadas de carbono-epóxico;



Figura 44 Aplicação de calor nas folhas de carbono-epóxico com recurso a pistola de calor

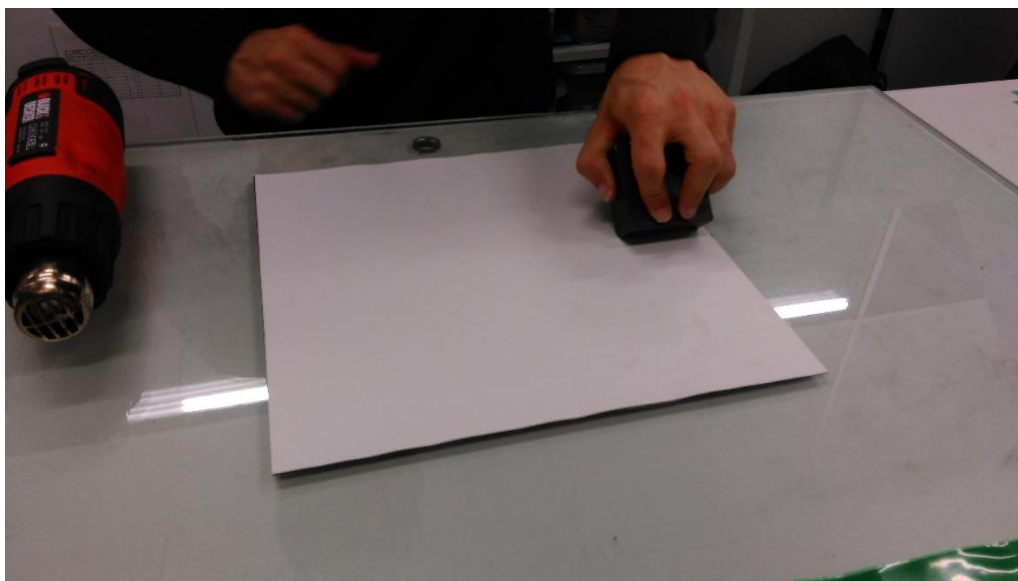


Figura 45 Compressão e eliminação de vazios das folhas de carbono-epóxico

4. Após concluído o empilhamento das secções de carbono-epóxico numa placa foi necessário preparar o molde para posterior cura. Através de uma espátula removeu-se qualquer vestígio de resina agarrado às placas, moldura e espaçador metálicos (Figura 47), utilizados para permitir obter a espessura desejada da placa empilhada durante a cura (dimensões no plano e espessura);

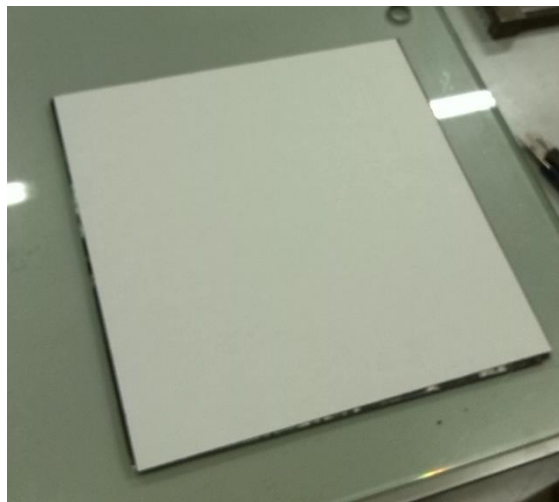


Figura 46 Aspeto final após o empilhamento das camadas de carbono-epóxico

5. Aplicou-se desmoldante às duas placas, à moldura de 3 mm e ao espaçador utilizado por forma a compensar a diferença adicionada das folhas de papel, de cerca de 0,3 mm. Repetiu-se este processo 3 vezes de cada lado, sendo posteriormente posicionada a placa de carbono-epóxico no molde (Figura 47);

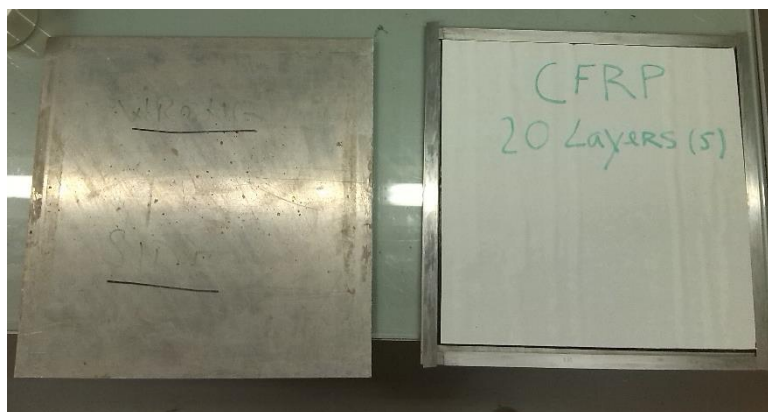


Figura 47 Posicionamento da placa de carbono-epóxico no molde

6. Por forma a se efetuar a cura correta, a placa é submetida a um ciclo térmico utilizando uma prensa de pratos quentes, sendo os parâmetros de controlo a pressão e a temperatura. O ciclo demorou 90 minutos devido ao tempo de estágio de elevação da temperatura até aos 130°C. Após a cura a temperatura teve de baixar para menos de 100°C e ligou-se a água para ajudar no arrefecimento. Durante o processo de cura e arrefecimento as placas foram mantidas a uma pressão de 2 bar.

Através das placas de composto, foram cortados os substratos com as medidas referenciadas na (Tabela 4), 80 unidades para perfazer 40 provetes.

A largura dos substratos foi cuidadosamente controlada e registada em vários pontos dos provetes através de paquímetro, pois a largura é um parâmetro de entrada nas expressões de G_{IIC} elevado ao quadrado, ao contrário de outros parâmetros geométricos como o L .

Tabela 4 Dimensões substratos (mm)

Comprimento dos substratos (mm)	280±0,5
Largura dos substratos (mm)	15±0,1
Espessura dos substratos (mm)	3±0,1

Após a obtenção de todos os substratos com as dimensões selecionadas, iniciou-se a preparação das superfícies.

Na superfície de contacto com o adesivo, foi realizada a abrasão manual com recurso papel de lixa de modo a que aumente a rugosidade e provoque um aumento da adesão entre adesivo/substrato. De seguida, foi realizada a limpeza de todas as superfícies recorrendo a folhas de papel embebidas em acetona, para garantir a remoção total de partículas soltas. Este processo é realizado até que por inspeção visual no papel não se encontre qualquer vestígio de sujidade, ou seja esteja completamente branco. O processo de limpeza é um passo crucial na união adesiva.



Figura 48 Limpeza manual dos aderentes com acetona, após processo de corte

De modo a garantir t_a nos provetes foram produzidos calços com fita calibrada com os respetivos valores de t_a . A estes calços foi aplicado desmoldante por forma a poderem ser retirados dos provetes sem resistência.

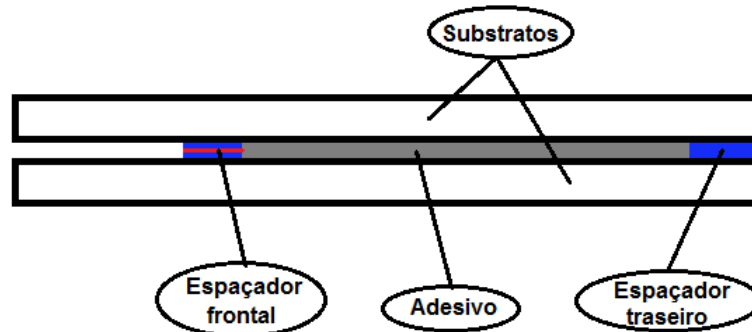


Figura 49 Representação esquemática da localização dos calços calibrados

A produção do calço frontal é distinta da do calço traseiro, enquanto que o traseiro só garante t_a , o calço frontal vai possuir uma lâmina com cerca de 0.1 mm que é colocada com o objetivo de criar a pré-fenda no adesivo e garantir t_a , este método foi proposto por Lee et al. [54].

O fabrico destes calços é realizado com o corte das fitas de aço calibrado, estas são desengorduradas com acetona antes da colagem. Posteriormente é aplicado cianoacrilato numa face da fita, colocando-se a lâmina sobre a fita (calço frontal), aplicando novamente cianoacrilato na face lâmina e colocando-se a fita superior (Figura 50).



Figura 50 Montagem do conjunto par o calço frontal

Durante este processo garantiu-se que extremidade da lâmina fica exposta e em contacto com a camada de adesivo, de modo a garantir a pré-fenda inicial. Para concluir é aplicado desmoldante nos calços realizados, para facilitar a sua remoção após cura do adesivo.

Terminado o processo de preparação das superfícies e calços, o próximo passo a tomar é a aplicação do adesivo sobre o substrato. O adesivo utilizado é aplicado por uma

pistola manual, este adesivo é fornecido em cartucho bi-componente onde possui um bico de mistura, efetuando a mistura dos dois componentes.

A aplicação do adesivo é efetuada tal como se pode observar na Figura 51, ou seja, o adesivo é aplicado em sucessivas linhas à largura do provete em todo o seu comprimento. Junto aos calços a colocação do adesivo é bastante cuidadosa, no calço traseiro tentando evitar que este não se movesse e que o adesivo não se espalhasse sobre o mesmo, pois este calço garante t_a da camada de adesivo. Já no calço frontal devemos garantir que o adesivo se espalhe na parte inferior e superior da lâmina, de modo a que esta quando for retirada provoque a pré-fenda.



Figura 51 Aplicação do adesivo

Em seguida coloca-se o substrato superior (Figura 52), estabelecendo-se o contacto por basculamento de maneira a evitar a formação de porosidades e vazios na camada de adesivo, mantendo uma ligeira pressão de posicionamento sobre o substrato superior para que os excessos de adesivo sejam expelidos pelos bordos dos substratos.



Figura 52 Processo de fixação durante a cura

A colocação de grampos de fixação nos provetes tem como principais objetivos exercer pressão e garantir assim o valor de t_a (Figura 52), assim os provetes passam para o processo de cura que decorreu à temperatura ambiente, ou seja, cerca de 20° C.

Após cura e com o auxílio de um alicate (Figura 53 a)), foram removidos os calços dos provetes e o excesso de adesivo nos bordos dos provetes. Na remoção dos calços devemos ter em atenção para não danificar a junta, pois alguns calços oferecem alguma resistência. O excesso de adesivo foi retirado com o auxílio de uma mó de pedra aplicada numa máquina de furar vertical (Figura 53 b)).

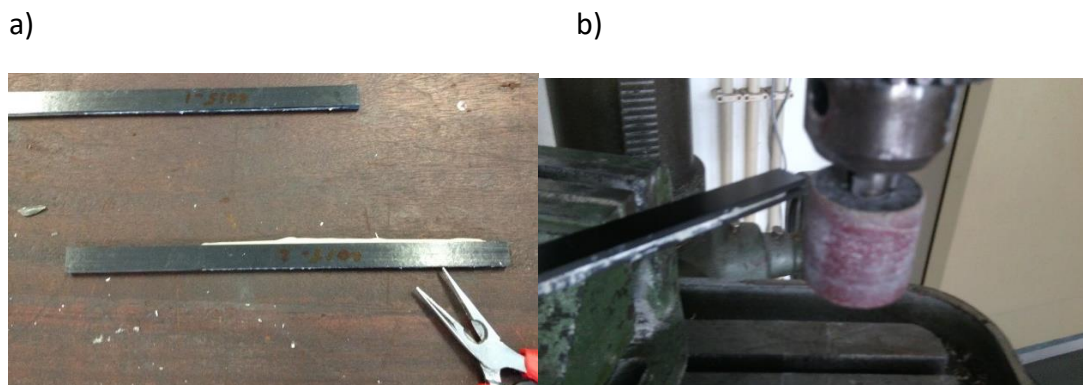


Figura 53 Métodos de remoção do excesso de adesivo dos provetes a) com recurso a alicate b) com recurso a uma mó

Com o objetivo de melhorar a visualização da frente de fenda, posteriormente a limpeza do excesso de adesivo e limpeza dos provetes com acetona procedeu-se a pintura de uma face lateral do provete com tinta corretora e posterior colagem de uma fita com escala para avaliação quantitativa da propagação da fenda (Figura 54).



Figura 54 Pintura e colocação de escalas nos provetes

As lâminas que provocam a pré-fenda possuem um raio de curvatura que não pode ser desprezado. Deste modo, a fenda vai ser propagada manualmente com recurso a uma chave de fendas Philips intercalada entre os substratos, devemos ter atenção para não danificar a junta ao realizar esta operação. 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 a identificação da extremidade de fenda para aplicação de escalas. A propagação manual da fenda não deve exceder 3 a 4 mm.

As escalas (Figura 54) são coladas em cada um dos substratos. Estas devem estar perfeitamente alinhadas e afastadas da linha do adesivo de modo a que a visualização da fenda não possua nenhuma interrupção no decorrer do ensaio.

3.1.4 Ensaio das juntas

Os ensaios foram realizados em condições ambientes de temperatura e humidade e com recurso a uma máquina de ensaios de carregamento contínuo (SHIMADZU AG-X 100). Para estes ensaios de flexão é utilizada uma célula de carga com capacidade de 100 kN, usando velocidade de solitação de 2 mm/min. Assim, são obtidos os valores de força e deslocamento que posteriormente foram usados no tratamento de dados.

Relativamente à preparação do *setup* da máquina, são utilizados os rolos na base de suporte dos provetes, que permitem que o provete possa deformar livremente durante a aplicação da carga. Como se pode observar na Figura 42, os apoios (rolos de suporte) (Figura 55) estão separados pela dimensão $2L$, com o auxílio de uma escala existente no suporte.

O provete é colocado nos apoios devidamente alinhado, este alinhamento é realizado visualmente por comparação com o suporte de apoio e com as marcas realizadas nos provetes com a distância entre apoios (Figura 55). Deste modo, a disposição dos provetes ENF modo II, caracteriza-se pelo facto do provete estar disposto numa posição de viga simplesmente apoiada nos seus extremos, sendo aplicada a carga a meio vão (Figura 55).



Figura 55 Posição do provete para realização do ensaio

A velocidade de ensaio foi apurada consoante a taxa de deformação desejada para os mesmos. Sabendo que a propagação da fenda ocorre a um valor constante de G_{IIC} , são sugeridas pelo menos 20-30 medições para construir a curva- R [78].

A monitorização da fenda é realizada com auxílio de uma câmara digital de alta resolução (Canon EOS 70D), sem zoom e distância focal fixa de aproximadamente 100 mm e com intervalos de 5 s entre fotos.

A foto inicial é capturada ainda antes do ensaio, sendo que as fotos seguintes são capturadas com intervalo acima mencionado 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. Na Figura 56 mostra-se a configuração deformada de um provete no decurso de um ensaio.

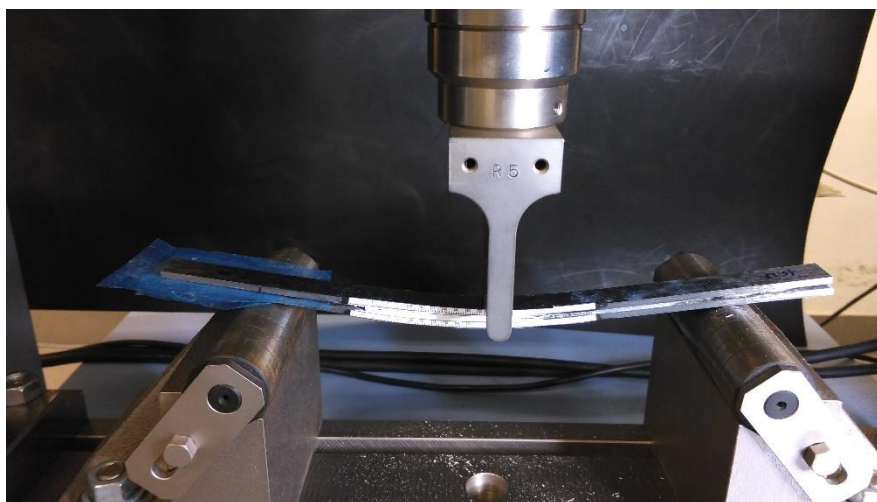


Figura 56 Foto ensaio ENF

Na análise de dados subsequente, o valor de a foi medido manualmente em todas as imagens com alta resolução, uma vez que o tamanho do pixel era de 0,011 mm.

3.1.5 Resultados obtidos

3.1.5.1 Curvas $P-\delta$

Durante a realização dos ensaios ENF foram registados os valores da carga (P) e deslocamento (δ), deste modo obtêm-se as curvas $P-\delta$ para os testes considerados válidos. Desta forma, foi possível correlacionar os dados obtidos de P e δ com o valor de a durante os ensaios através do tempo de ensaio, 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. Alguns dos ensaios não foram validados, devido a uma diferença assinalável nos resultados comparativamente com os provetes com as mesmas características.

Observou-se que, devido à flexibilidade da máquina de ensaios, o comportamento das curvas $P-\delta$ apresentou uma rigidez crescente na região inicial dos ensaios. Este aspeto foi corrigido nas curvas que se seguem, considerando a rigidez dos provetes na zona intermédia da região elástica antes do início da propagação da fenda.

As curvas $P-\delta$ mostraram que o adesivo Araldite® 2015 tem alguma ductilidade, pois as zonas de rotura estas são mais suaves, não tão abruptas como nos adesivos frágeis.

Identifica-se a presença de três fases nas curvas $P-\delta$ para todas as espessuras de adesivo.

- 1ª Fase – Nota-se uma evolução da curva $P-\delta$ de uma forma linear, com um comportamento elástico reversível.
- 2ª Fase – Ocorre um pouco antes do ponto de carga máxima ($P_{máx}$), onde é notória uma perda da linearidade, correspondente à ocorrência de um processo irreversível do adesivo (formação da ZPF). Quando a energia armazenada no provete chega a um valor crítico, G_{IIC} , inicia-se a propagação da fenda.
- 3ª Fase – Após ser atingida $P_{máx}$, entramos nesta fase, em que a carga aplicada diminui progressivamente, correspondendo a uma propagação estável da fenda.

Comparando as curvas $P-\delta$ de cada espessura notou-se um aumento gradual de $P_{máx}$, com o aumento de t_a de 0.1 mm a 1mm, onde para a espessura de 2mm é visível uma estabilização (Figura 57). Além disso, para $t_a \geq 1,0$ mm, encontrou-se uma ligeira redução da rigidez elástica, relacionada com as maiores deformações de corte ocorridas.

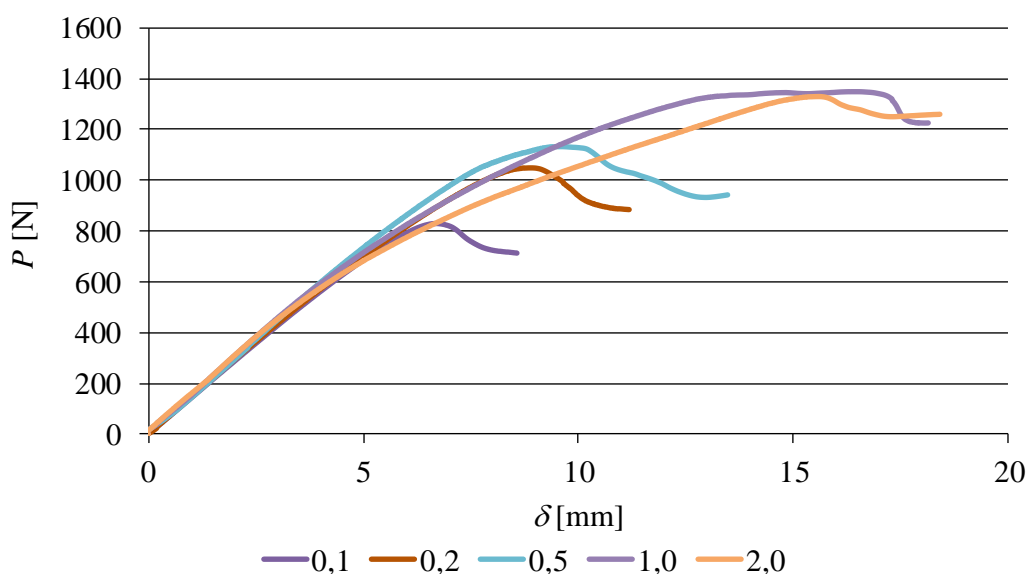


Figura 57 Comparativo curvas $P-\delta$ diferentes espessuras de adesivo

Os testes foram interrompidos antes de atingir o segundo aumento de carga correspondente à fenda que atinge a vizinhança do cilindro central, uma vez que, após esse limite, as medidas da taxa de liberação de energia da deformação por corte não são mais válidas. Existem pequenas flutuações que são explicadas por questões como não-homogeneidade do material, fabricação e outros problemas experimentais.

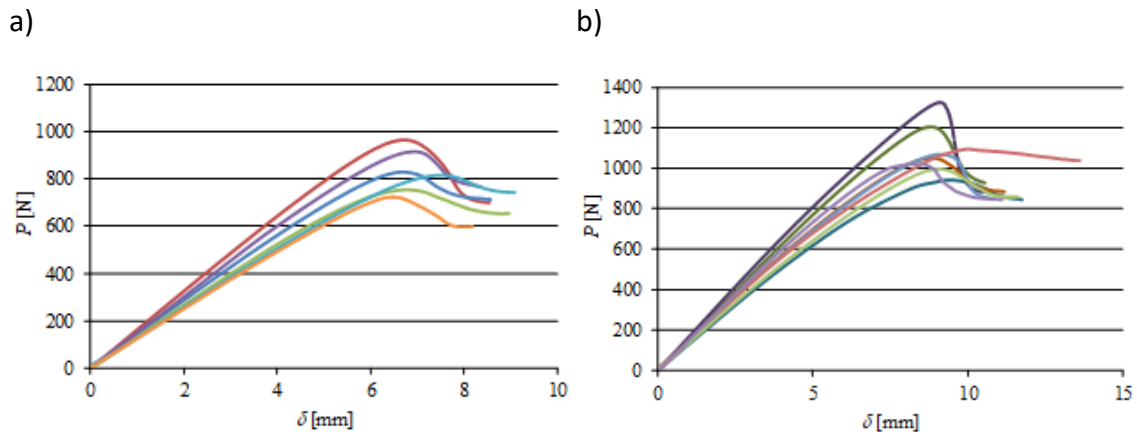


Figura 58 Curvas $P-\delta$ a) espessura de 0,1 mm b) espessura de 0,2 mm

Relativamente aos provetes com $t_a=0,1$ mm (Figura 58 a)), foram desprezados dois provetes. Aqui 3 dos provetes apresentam uma rigidez inicial muito idêntica comparativamente à dos outros provetes, não sendo um problema apenas está relacionado com defeitos decorrentes da fabricação dos provetes. No entanto a zona analisada para a obtenção do G_{IIC} temos em todos eles boa coerência de resultados.

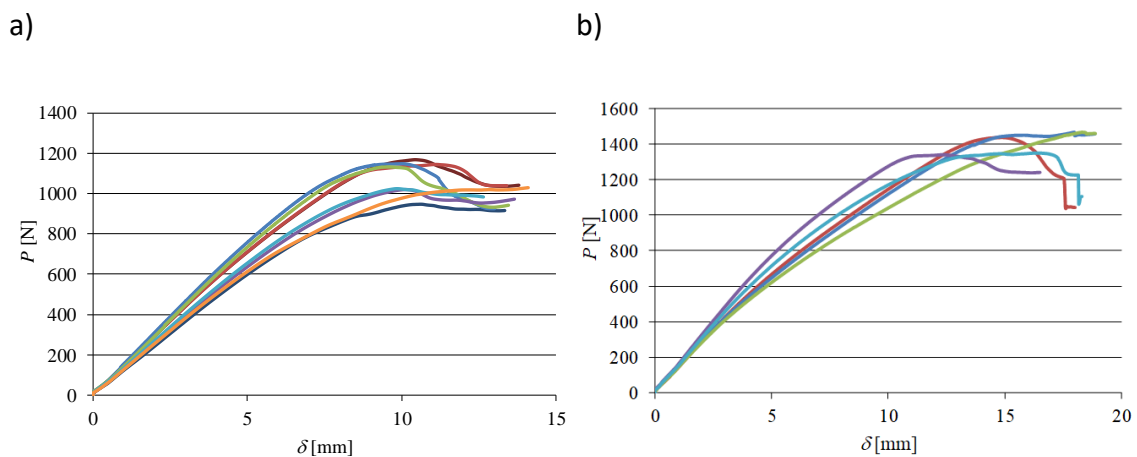


Figura 59 Curvas $P-\delta$ a) espessura de 0,5 mm b) espessura de 1,0 mm

Relativamente aos provetes com $t_a=0,2$ mm (Figura 58 b)), os valores obtidos foram muito idênticos. De notar que devido à existência de um valor do α_0 inferior, podemos observar que dois dos ensaios atingiram uma carga maior. Obtendo para este valor de

t_a um valor de $P_{m\acute{a}x}=1315$ N, sendo que neste provete a propagação da fenda deu-se forma instável.

Comparando estes valores de t_a (Figura 59) é notória que com um t_a maior conseguimos atingir uma maior valor de P . No entanto nos dois valores de t_a os resultados obtidos foram muito coerentes. Para t_a de 1 mm, 3 dos provetes não foram validados, devido a uma diferença assinalável nos resultados comparativamente com os outros provetes da mesma espessura, devido a defeitos no fabrico dos mesmos.

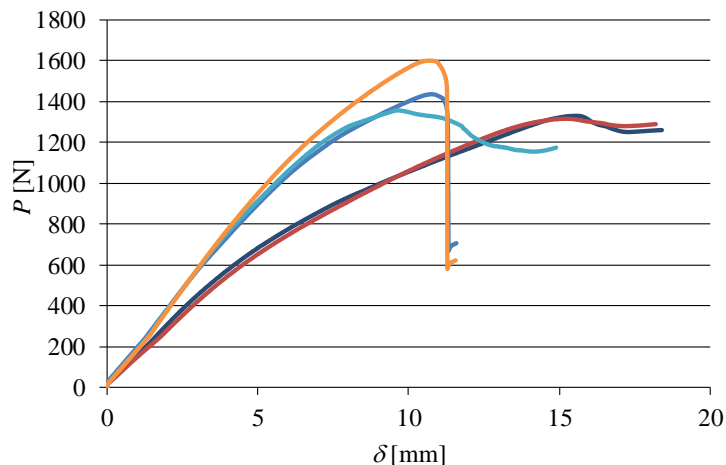


Figura 60 Curvas P - δ espessura de 2,0 mm

Na Figura 60 temos o resultado dos ensaios dos provetes de $t_a=2,0$ mm, onde se desprezaram 3 provetes. Quanto maior o valor t_a , mais difícil é a conceção dos provetes, o que leva a alguma disparidade de resultados. Em dois provetes nota-se claramente que a propagação da fenda ocorreu de forma instável.

A fase inicial dos ensaios temos uma diferença da rigidez inicial, devido aos diferentes valores de a_0 e de problemas no fabrico dos provetes, no entanto em todos os provetes chegamos a valores de G_{IIC} coerentes.

3.1.5.2 Curvas R

As curvas- R relacionam G_{II} com α , sendo que os valores obtidos são tipicamente coerentes com o esperado, isto é, fornecendo uma região com G_{II} aproximado que permitiu a sua medição através da média ao longo da fase de propagação constante [79].

A (Figura 61) compara as curvas- R de um provete de amostra com $t_a=0,1$ mm, o que dá uma visão geral correspondente aos valores alcançados na totalidade dos lotes testados.

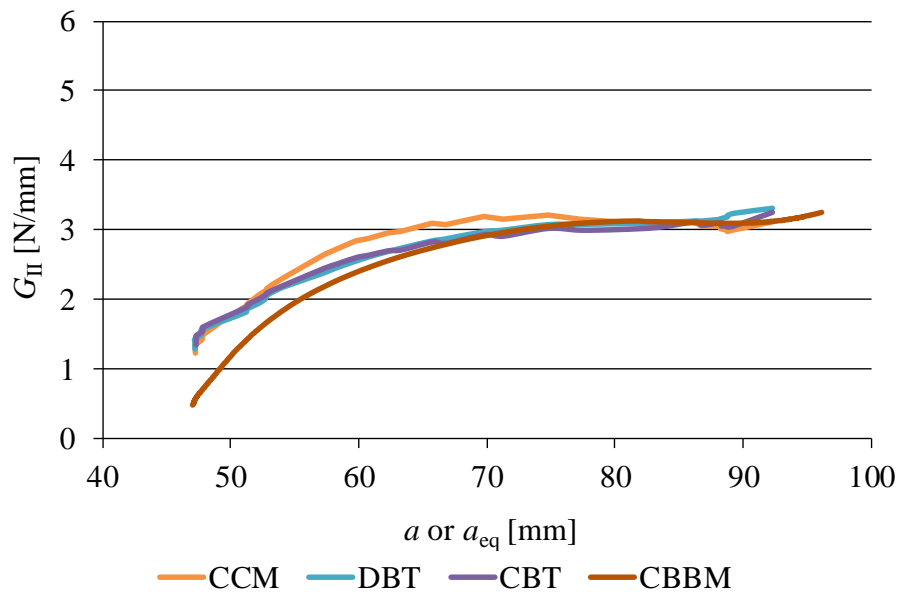


Figura 61 Comparação das curvas-R pelos diferentes métodos de redução de dados para um exemplo de amostra com $t_a=0,1$ mm

Após um determinado período em condições de propagação estável, o G_{IIc} medido começa a aumentar devido aos efeitos de compressão induzidos pelo cilindro de carregamento [80], altura em que as curvas-R foram cortadas (Figura 61), onde também é evidente que a curva CBBM representativa é deslocada para a direita em relação às outras curvas, devido ao fato de serem responsáveis pelos efeitos ZPF, que são significativos para adesivos com algum grau de ductilidade [81].

Para o provete da Figura 61, que apresenta um valor de $a_0=46,25$ mm, observou-se no instante de $P_{máx}$ um valor de a de 54,25 mm (métodos convencionais de redução de dados) e um a_{eq} de 54,01 mm (CBBM). Ambos os valores são superiores a a_0 devido à plasticidade do adesivo, mas a diferença é enfatizada por um a_{eq} , considerando a zona plástica.

Além disso, na Figura 61 nota-se que o G_{II} estabiliza mais à direita em todas as curvas devido ao desenvolvimento da zona plástica perto da frente de fenda. A comparação entre os métodos revelou um bom acordo, exceto para a CBT, que deu valores ligeiramente menores genericamente em todos os ensaios. No caso particular da Figura 61 essa diferença é visível embora relativamente pequena, mas é mais alta com o aumento do valor de t_a (Figura 62).

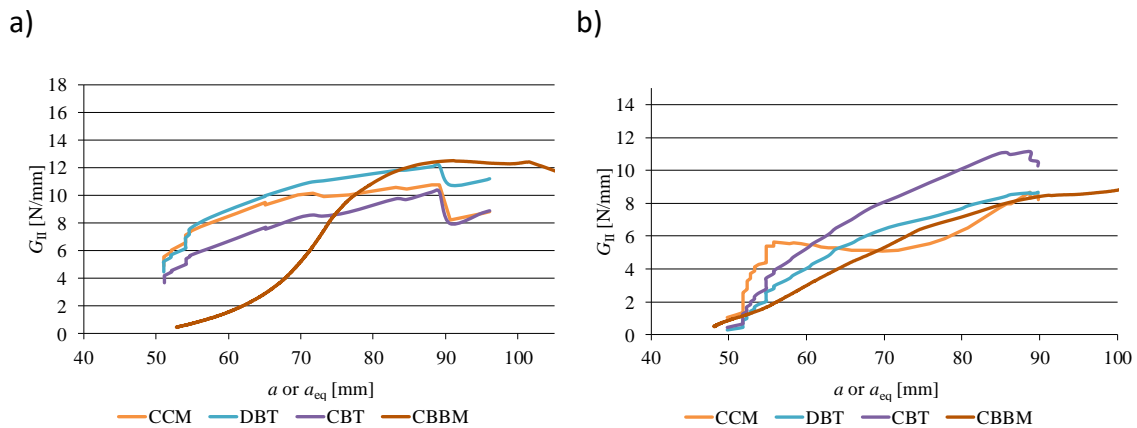


Figura 62 Comparação das curvas-R pelos diferentes métodos de redução de dados a) $t_a=1,0$ mm b) $t_a=2,0$ mm

A Figura 63 apresenta os resultados obtidos para $t_a=0,2$ mm e $t_a=0,5$ mm da comparação dos métodos de redução de dados, onde são visíveis algumas flutuações que foram comentados anteriormente.

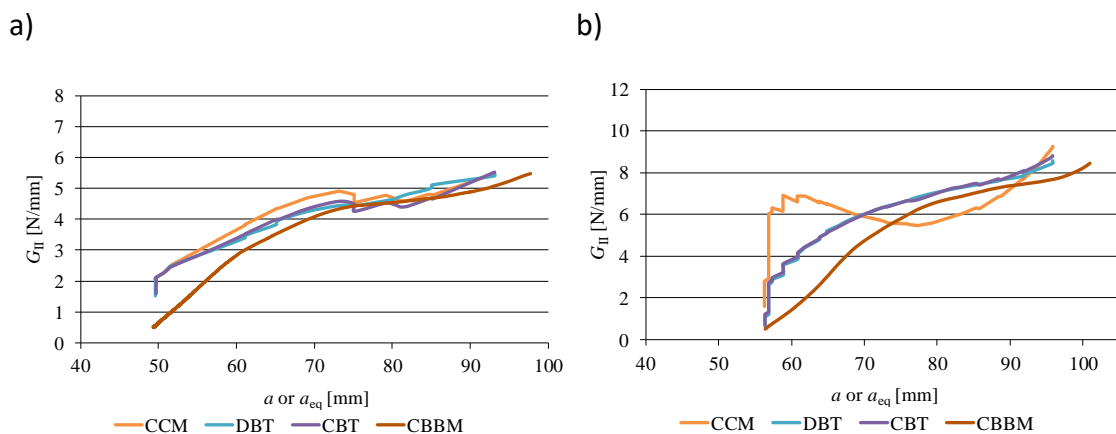


Figura 63 Comparação das curvas-R pelos diferentes métodos de redução de dados a) $t_a=0,2$ mm b) $t_a=0,5$ mm

A Tabela 5 mostra o G_{IIc} (N/mm) obtido para cada provete, indicando método de redução de dados utilizado, média e desvio para cada método e t_a . Deve-se mencionar que alguns provetes (marcados com "-") foram descartados devido a um deslocamento significativo para o comportamento esperado, noutro casos (marcados com "*"), também foram encontradas dificuldades no cálculo de dC/da , impedindo a obtenção de resultados precisos.

Tabela 5 G_{IIC} [N/mm] em função de t_a para todos os métodos de redução de dados

t_a (mm)	Mét.	1	2	3	4	5	6	7	8	Média	Des. Padrão
0,1	CCM	-	-	3,099	2,699	2,363	3,381	*	2,370	2,782	0,403
	DBT	-	-	3,090	2,556	2,457	3,329	3,287	2,669	2,898	0,351
	CBT	-	-	3,036	2,423	2,317	3,034	2,978	2,606	2,732	0,297
	CBBM	-	-	3,036	2,724	2,832	3,181	3,109	2,611	2,925	0,214
0,2	CCM	*	5,030	*	4,796	5,568	4,021	5,106	4,644	4,861	0,474
	DBT	5,282	5,295	5,071	4,800	5,179	4,769	4,941	4,890	5,028	0,196
	CBT	5,482	5,127	4,972	4,049	4,594	4,752	4,518	4,553	4,756	0,409
	CBBM	5,589	5,339	5,009	4,618	4,860	5,508	4,713	4,839	5,059	0,347
0,5	CCM	6,861	6,975	5,715	7,166	6,012	6,748	*	6,341	6,545	0,497
	DBT	6,108	7,703	7,242	7,354	6,927	6,356	6,935	7,559	7,028	0,530
	CBT	6,159	7,488	6,389	7,477	6,798	6,107	6,192	7,217	6,728	0,558
	CBBM	6,595	7,802	7,096	7,855	7,002	6,652	6,552	7,716	7,159	0,522
1,0	CCM	-	-	10,298	12,055	10,867	9,025	9,499	-	10,349	1,064
	DBT	-	-	10,995	10,963	9,115	9,847	8,548	-	9,894	0,977
	CBT	-	-	9,756	10,219	9,138	9,407	8,972	-	9,498	0,447
	CBBM	-	-	10,702	10,336	9,253	10,108	9,837	-	10,047	0,488
2,0	CCM	10,856	-	10,267	8,036	-	-	8,534	8,811	9,301	1,075
	DBT	9,192	-	9,797	7,770	-	-	8,664	10,236	9,128	0,867
	CBT	7,909	-	7,996	8,468	-	-	10,979	7,062	8,483	1,328
	CBBM	10,502	-	10,557	10,501	-	-	10,220	9,942	10,348	0,237

O desvio de G_{IIC} para cada valor de t_a foi aceitável e geralmente inferior a 10% do G_{IIC} médio. Conforme mencionado anteriormente, entre os métodos, o CBT revelou pequenas variações (média máxima sob predição relativamente ao CBBM de 18,0% para $t_a=2,0$ mm). Esse comportamento está relacionado a um deslocamento na curva $C=f(a)$ entre os dados do teste e as simulações pelo método de elementos finitos, mesmo que não modifique o declive da curva. O deslocamento é causado por uma ligeira diferença entre a localização da fenda real e a leitura induzida na camada de tinta corretora utilizada para rastrear a evolução da fenda durante o ensaio [82].

Comparando uma curva R para cada t_a , considerando o CBBM (Figura 64), observamos uma tendência clara, uma tendência crescente na faixa de $0,1 \text{ mm} \leq t_a \leq 1,0 \text{ mm}$ do valor estacionário de G_{II} , o que corresponde à medida G_{IIC} para o respetivo provete. Além disso, a faixa de medição de G_{IIC} diminui para $t_a=1,0$ e $2,0$ mm, devido ao aumento da zona plástica na extremidade da fenda, o que resulta em um comprimento de crescimento de fenda mais curto antes que essa zona seja afetada pelo cilindro de carregamento.

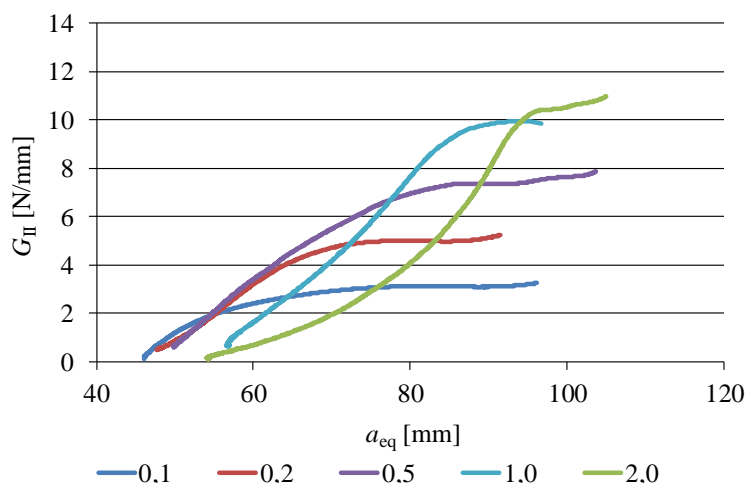


Figura 64 Comparação de curvas R representativas obtidas pelo CBBM para todos os t_a

A Figura 65 mostra a variação dos valores médios de G_{IIC} (N/mm) com t_a e respetivo desvio padrão.

O G_{IIC} para $t_a=0,1$ mm foi de $2,925 \pm 0,214$ N/mm, registando-se um aumento em percentagem sobre este valor de 73,0%, 144,7% e 243,5% até a $t_a=1,0$ mm. Por outro lado, valores de t_a maiores que 1,0 mm não resultaram em aumento de G_{IIC} considerável, na verdade a variação para $t_a=2,0$ mm foi de 253,8%.

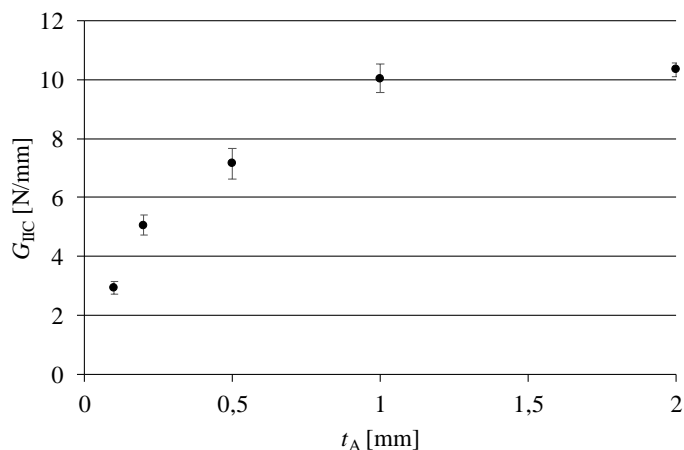


Figura 65 Valores médios e desvio de G_{IIc} em função de t_a pelo método CBBM

3.1.5.3 Análise dos resultados obtidos

Como foi previamente discutido e conforme a Figura 65, G_{IIc} revela uma tendência crescente com a espessura do adesivo, embora exista um valor limite acima do qual este parâmetro estabiliza. Estudos anteriores sobre este assunto revelaram resultados idênticos para o comportamento de camadas adesivas sob carga de tração, ou seja, em relação ao G_{IC} [53, 83], devido ao alargamento da ZPF com o aumento da t_a antes da propagação de fissuras [84], promovendo também a redução dos efeitos restritivos nos aderentes.

Um valor limitante de t_a também existe acima do qual a zona plástica não aumenta mais [53]. O mesmo é aplicável para G_{IIc} , como apresentado em trabalhos anteriores que mostram a dependência de G_{IIc} com t_a .

Sela et al. [68] mostraram o aumento de G_{IIc} interlaminar com aumento de t_a até um certo valor, embora, após esse t_a , tenha sido encontrada uma redução. Já da Silva et al. [69] mostraram o aumento de G_{IIc} em juntas adesivas, aumentando o valor de t_a com um adesivo dúctil.

Por outro lado, sabe-se que G_{IC} e G_{IIc} influenciam bastante a resistência das juntas adesivas e são tão ou mais importantes quanto as resistências à tração e corte do adesivo. Na verdade, um adesivo com maior resistência pode não resultar em maior resistência das juntas. Um adesivo de alta resistência, mas frágil, promove o surgimento de elevados gradientes de tensão nas arestas de sobreposição, mas a região interna da carga fica relativamente descarregada, causando pouca resistência na junta. Por outro lado, os adesivos com alta ductilidade (isto é, com maior G_{IC} e G_{IIc}) são geralmente associados a um módulo e tensão mais baixos [85]. No entanto, as juntas ligadas com este tipo de adesivo permitem que as tensões sejam distribuídas mais uniformemente ao longo da camada adesiva devido ao efeito de plastificação, o que, por sua vez,

promove uma maior resistência da junta adesiva [86]. Os adesivos dúcteis também suportam maior clivagem e tensões de arrancamento, tornando-os melhores para unir superfícies com menor espessura [9].

Esses efeitos foram discutidos no trabalho experimental e numérico de Campilho et al. [48] em juntas adesivas de sobreposição simples com substratos em compósito, ligados por um adesivo frágil (Araldite® AV138) e um adesivo dúctil (Araldite® 2015) e com L_0 entre 10 e 80 mm. A comparação de ambos os adesivos mostrou que, para um L_0 muito curto (10 mm), o Araldite® AV138 é melhor do que o Araldite® 2015, devido a distribuições de tensão de corte quase uniformes. Assim, a resistência do adesivo, em vez da ductilidade, rege o processo de rotura sob estas condições de ligação específicas. Para L_0 maiores, o Araldite® 2015 mostrou resultados de carga máxima à rotura melhores. Nessas condições, grandes gradientes de tensão desenvolvem-se ao longo da linha de ligação e o adesivo com maior ductilidade permitiu que a ligação falhasse após a plastificação iniciando nas arestas de sobreposição e progredindo em direção à sobreposição interna, o que naturalmente aumenta o esforço de corte na rotura e consequentemente $P_{máx}$.

3.2 Trabalho numérico

3.2.1 Condições da análise numérica

A simulação pelo método de elementos finitos (MEF) dos ensaios ENF foi realizada com recurso ao *software* Abaqus®, visando verificar a viabilidade dos MDC na reprodução do comportamento da camada adesiva com diferentes t_a . A lei coesiva mais adequada em cada caso pode então ser aplicada em simulações MDC de juntas adesivas com a finalidade de previsão da resistência das mesmas. Foi realizada uma análise geometricamente não-linear.

A Figura 66 mostra as condições de carga e carga aplicadas, bem como o refinamento de malha utilizado nos modelos. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões (2D), com elementos sólidos de estado plano de deformação de 4 nós para a modelação dos substratos, (CPE4 do Abaqus®), enquanto que para simular a camada adesiva foi usado um elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do Abaqus®).

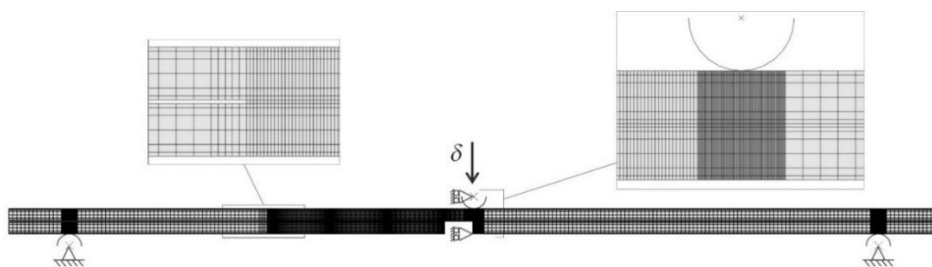


Figura 66 Malha de MEF considerada para os provetes ENF e condições de carga

Na direção do comprimento dos provetes, a camada adesiva e as regiões dos cilindros foram modeladas com uma malha mais refinada, considerando elementos de 0,20 mm e 0,05 mm de comprimento, respectivamente.

Para a malha na proximidade da extremidade da fenda (Figura 67), os elementos coesivos representativos do adesivo possuem dimensões de 0,2 mm. 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.

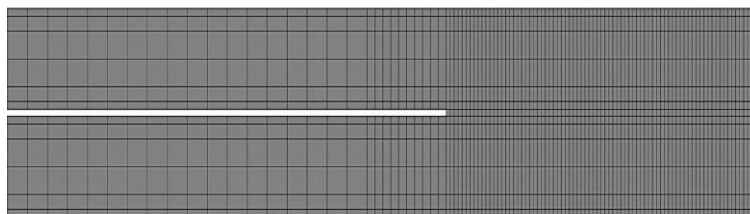


Figura 67 Detalhe do refinamento da malha no MEF na proximidade da extremidade da fenda.

Na direção da espessura, foi utilizada uma gradação do tamanho dos elementos (efeito *bias*) (Figura 67), 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.

Os efeitos de polarização também foram equiparados sempre que necessário, para classificar o tamanho dos elementos para as regiões com maiores gradientes de tensão.

O refinamento da malha na zona de contacto entre o provete e os cilindros de suporte (Figura 68 a)), na qual se utilizaram elementos com 0,05 mm é diferente da zona de contato entre o provete e o cilindro de solicitação (Figura 68 b)), onde se pode observar um refinamento de malha idêntico, mas 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.

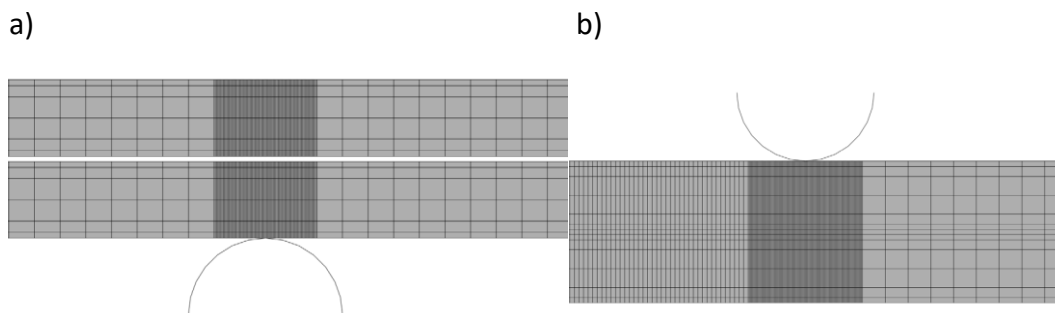


Figura 68 Detalhe da malha MEF a) zona de contacto entre o provete e um dos cilindros de suporte b) zona de contacto entre o provete e o punção de carregamento

As condições de fronteira (Figura 66) consistiram em centrar os cilindros de suporte no plano xy e restringir o cilindro de carregamento na direção horizontal, de forma a representar as condições reais. O provete também foi restringido horizontalmente em um ponto discreto para evitar o movimento rígido do corpo. As condições de contato foram aplicadas sempre que relevante para evitar a interpenetração, ou seja, evitar a penetração entre os cilindros e as respectivas faces de contato dos provetes, e também entre substratos na região inicialmente não ligada. Com essas condições garante-se também o deslizamento sem atrito.

Os modelos numéricos foram construídos considerando os valores experimentais de σ_0 de cada provete, sendo que a curva da secção elástica da lei coesiva foi realizada igual à rigidez adesiva. Para cada provete, foi definida uma lei triangular considerando o valor de G_{IIC} obtido pelo CBBM para o respetivo provete e um valor de teste inicial para t_s^0 (obtido a partir dos dados da Tabela 2). A curva numérica $P-\delta$ foi comparada com a respetiva curva do ensaio experimental, e t_s^0 foi estimado por uma técnica de montagem inversa até que a curva numérica corresponda adequadamente ao comportamento experimental da camada adesiva.

3.2.2 Modelo de dano coesivo triangular

Como anteriormente referido, os MDC baseiam-se numa relação entre tensões e deslocamentos relativos (tração ou corte) que ligam nós homólogos dos elementos coesivos, de forma a simular o comportamento elástico do material até à resistência máxima e subsequentemente degradação das propriedades dos materiais até à rotura [87].

O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva correspondente. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os modos puros de tração e corte [88].

A lei de dano triangular (Figura 69) assume inicialmente um comportamento linear elástico, seguido de degradação linear. O comportamento elástico é definido por uma matriz constitutiva (\mathbf{K}) que contém os parâmetros de rigidez, e relaciona as tensões coesivas de corte (t_s) e tração (t_n) e deslocamentos coesivos ao corte (δ_s) e tração (δ_n) ao longo dos elementos coesivos.

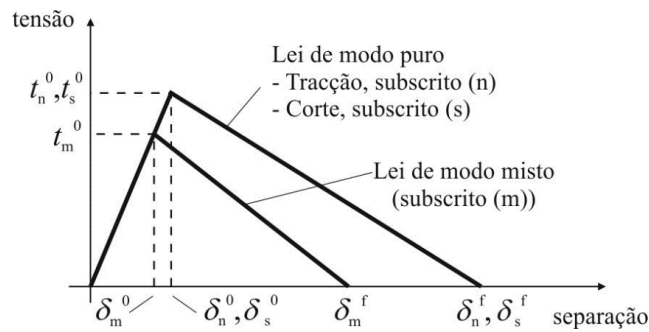


Figura 69 - MDC 2D com lei triangular [89]

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}\boldsymbol{\varepsilon}. \quad (19)$$

Para camadas finas de adesivo, uma aproximação viável é dada por $K_{nn}=E$, $K_{ss}=G$ e $K_{ns}=0$. A iniciação do dano pode ser especificada por diferentes critérios. Neste trabalho, foi considerado o critério quadrático de tensões que se segue para a iniciação do dano, por já ter sido provada a sua fiabilidade [90], sendo dado por

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1. \quad (20)$$

$\langle \rangle$ são os parênteses de Macaulay, que indicam que um estado de tensão puramente compressivo não contribui para a iniciação do dano. Depois de atingida a resistência máxima em modo misto (t_m^0) (Figura 69), através da equação anterior, a rigidez do material é degradada. A separação completa é prevista por um critério linear energético da forma

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (21)$$

3.2.3 Estimativa da lei coesiva em modo II

Todos os ensaios experimentais foram reproduzidos numericamente considerando uma técnica inversa que resultou na aproximação da lei coesiva representativa do comportamento ao corte, de tal forma que esta possa ser posteriormente aplicada para

a previsão da resistência de juntas adesivas. A utilização deste método consistiu na introdução do valor de G_{IIC} obtido pelo método CBBM como parâmetro de entrada da lei coesiva de corte. Poucas iterações foram então realizadas alterando t_s^0 onde o valor representativo do provete em causa é estimado por ajuste das curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas de cada amostra até atingir uma boa representação ao longo de sua extensão.

Assim pelo procedimento de ajuste realizado nos valores de G_{IIC} e t_s^0 verificamos que estes influenciam bastante o perfil das curvas numéricas $P-\delta$. O valor de G_{IIC} , que é inserido nas simulações numéricas, influencia principalmente o valor de $P_{máx}$, enquanto que o aumento de valores de t_s^0 aumenta o valor de $P_{máx}$ e a rigidez da amostra até o pico de carga, levando a uma redução mais abrupta da carga pós-pico.

Os resultados obtidos com este ajustamento são visíveis na Figura 70 a) para um provete com $t_a=0,2$ mm e na Figura 70 b) para um provete com $t_a=2,0$ mm, mostrando assim valores representativos para os extremos das espessuras. Os resultados apresentados demonstram uma boa representação numérica dos dados experimentais em todas as fases das curvas $P-\delta$, durante a elasticidade, na proximidade de $P_{máx}$ e durante o crescimento da fenda. O processo de ajustamento das curvas $P-\delta$ forneceu uma visão clara sobre o efeito de cada parâmetro da lei coesiva nos resultados numéricos.

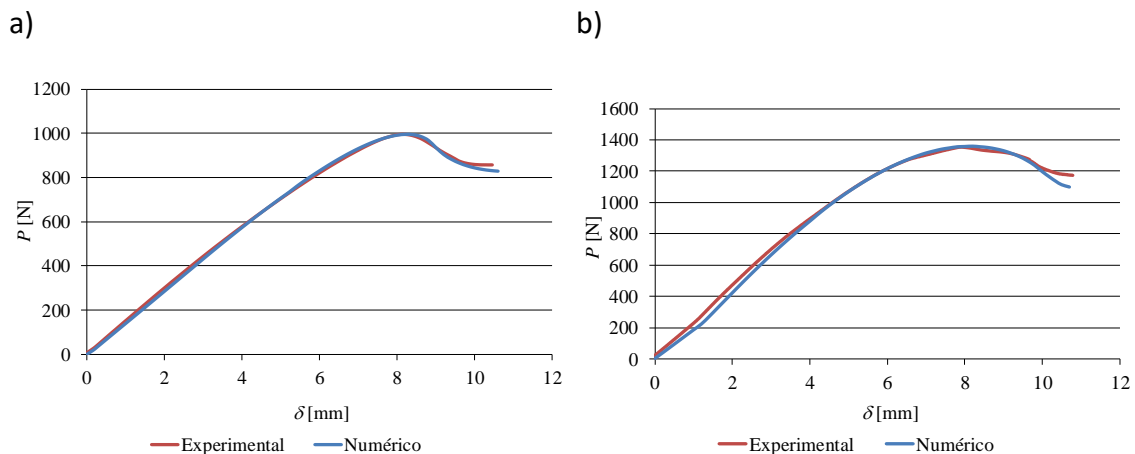


Figura 70 Curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas após o processo de ajuste das curvas a) $t_a=0,2$ mm b) $t_a=2,0$ mm

Assim, a rigidez inicial da lei coesiva altera proporcionalmente a rigidez inicial da curva $P-\delta$. O G_{IIC} desloca a carga máxima e, conseqüentemente, a parte descendente da curva durante o crescimento da fenda, para cima ou para baixo por uma variação idêntica do parâmetro, mas sem modificar a rigidez até a carga máxima. Finalmente, o aumento de t_s^0 aumenta a rigidez até $P_{máx}$, aumenta o valor de $P_{máx}$ e promove uma transição mais abrupta da curva $P-\delta$ junto de $P_{máx}$. Essa tendência é consistente com um trabalho anterior que abordou as leis coesivas de corte para uma única t_a em três adesivos distintos quanto ao nível de ductilidade [82].

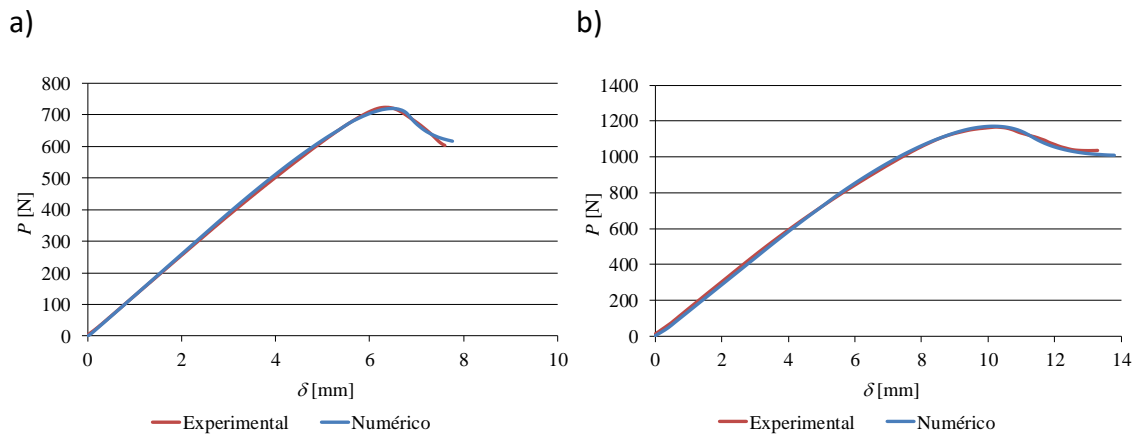


Figura 71 Curvas P - δ experimentais e numéricas após o processo de ajuste das curvas a) $t_a=0,1$ mm b) $t_a=0,5$ mm

A Figura 71 mostra o resultado final de um ajuste entre as curvas P - δ numérica e experimental para os valores de um provete de $t_a=0,1$ mm, $t_a=,5$ mm e a Figura 72 para valores $t_a=1,0$ mm, estes são representativos da generalidade dos ensaios realizados no que respeita à reprodutibilidade conseguida dos resultados experimentais. Como referido anteriormente, na maior parte dos ensaios existe concordância entre os resultados numéricos e experimentais, mesmo no comportamento pós-pico, que corresponde à propagação da fenda, e no qual o ajuste é realizado com especial atenção por ser a zona que corresponde à propagação da fenda durante o ensaio. Verifica-se, de um modo geral, que as curvas P - δ obtidas numericamente reproduzem bastante bem as curvas experimentais de todos os provetes.

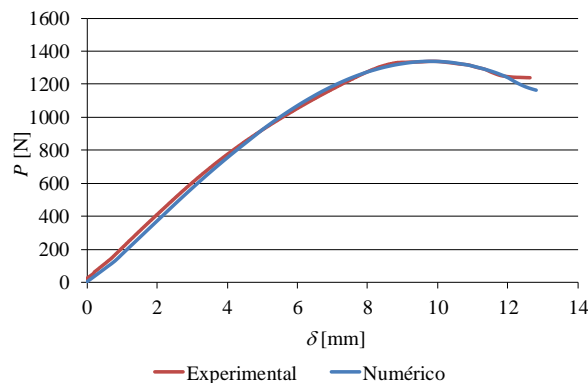


Figura 72 Curvas P - δ experimentais e numéricas após o processo de ajuste das curvas para $t_a=1,0$ mm

Deste modo, cada um dos parâmetros mencionados afeta a curva P - δ de uma maneira diferente, sendo possível dizer que a lei coesiva de corte estimada para cada provete ENF representativa na definição do comportamento da junta adesiva ao corte.

Com este estudo, mostrou-se que o uso de leis coesivas triangulares em adesivos de ductilidade moderada (Araldite® 2015) apresenta resultados precisos, tal como em

estudos anteriores [91] em que juntas de sobreposição simples foram modeladas por MDC e também por uma lei coesiva triangular fornecendo informação precisa sobre a carga suportada pelo adesivo. No entanto, com a aplicação de adesivos de poliuretano com maior ductilidade os resultados não foram satisfatórios. Isso pode ser justificado pela rotura dos elementos coesivos ser governada por princípios energéticos (área sob as leis MDC) e critérios energéticos para o crescimento da fenda. Se o adesivo é excessivamente dúctil, sabe-se que a redução de tensão após o pico de carga que é promovido com MDC triangular leva à falta de precisão nas previsões de resistência da junta [41].

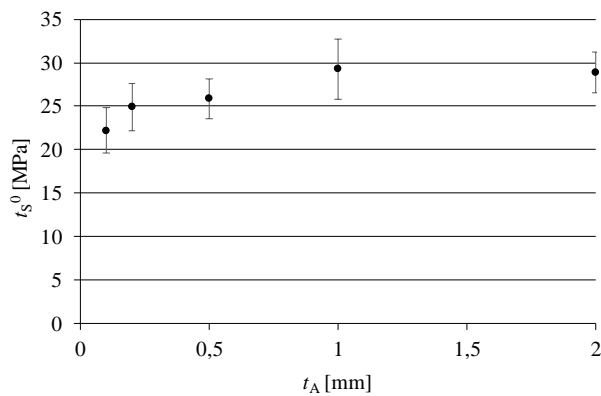


Figura 73 Valores médios e desvio padrão de t_s^0 em função de t_a

A Figura 73 mostra os valores médios e o desvio padrão de t_s^0 em função de t_a após o processo de montagem. Aqui, a tendência não é tão marcada como foi encontrada para G_{IIC} , e o desvio padrão também é maior, mas também é notória uma tendência crescente de t_s^0 com o aumento dos valores de t_a , onde vemos a estabilização ocorrer para t_a acima de 1,0 mm, embora o valor de t_s^0 seja menor bem como a sua variação.

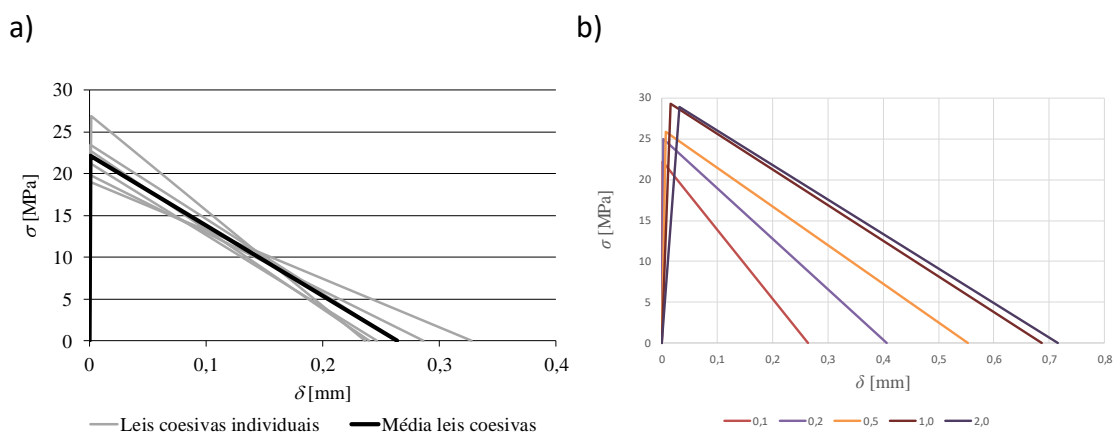


Figura 74 Conjunto de leis coesivas de corte para os provetes ENF a) $t_a=0,1$ mm b) média das leis coesiva para todos os valores de t_a

Na Figura 74 a) temos o exemplo de um conjunto completo de MDC de corte para $t_a=0,1$ mm e também uma média dessas mesmas leis, mostrando o grau de concordância entre os ensaios com o mesmo t_a , embora existam algumas flutuações em t_s^0 (estas flutuações ocorreram de forma idêntica para todos os valores de t_a estudados).

Após a comparação das leis MDC de corte entre os vários valores de t_a (Figura 74 b)), é visível um aumento gradual de ambos t_s^0 e G_{IIC} pode ser encontrado até $t_a=1,0$ mm, enquanto que para valores entre $t_a=2,0$ mm é notória uma estabilização clara da lei MDC de corte.

A Tabela 6 apresenta a média dos resultados obtidos pelas leis coesivas triangulares para cada t_a , sendo que como foi referido anteriormente o valor de G_{IIC} é obtido pelo método CBBM.

Tabela 6 Valores médios obtidos pela lei coesiva triangular

t_a (mm)	G_{IIC} (N/mm)	t_s^0 (MPa)	δ_s^0 (mm)	δ_s^f (mm)
0,1	2,925	22,183	0,0012	0,228
0,2	5,059	24,925	0,00269	0,40597
0,5	7,159	25,875	0,00699	0,55333
1,0	10,047	29,260	0,01582	0,68675
2,0	10,348	28,900	0,03124	0,71615

3.2.4 Considerações numéricas

Estudos anteriores como o de Azevedo et al. [82] abordou numericamente o efeito dos parâmetros coesivos sobre a $P_{máx}$, a forma geral das curvas $P-\delta$ e a precisão dos métodos de redução de dados testados, usando uma geometria ENF semelhante à usada neste trabalho mas com substratos de alumínio e três adesivos com ductilidades diferentes. Considerando os parâmetros coesivos, a rigidez dos adesivos teve o efeito natural de mudar a inclinação das curvas $P-\delta$. G_{IIC} e t_s^0 tiveram um resultado diferente do previsto nas curvas $P-\delta$. As variações desses parâmetros para cada adesivo foram em média entre -25% e +25% para G_{IIC} , e entre -50% e +50% para t_s^0 .

Verificou-se que o aumento ou diminuição do valor G_{IIC} provoca também uma variação principalmente em $P_{máx}$ na curva $P-\delta$ com a respetiva variação de G_{IIC} , enquanto que a rigidez elástica fica quase idêntica. O efeito do G_{IIC} nas curvas $P-\delta$ diminui ligeiramente com o aumento da ductilidade do adesivo. Já o valor de t_s^0 altera a rigidez da curva $P-\delta$

antes de $P_{m\acute{a}x}$, que também tem influência sobre $P_{m\acute{a}x}$. A redu o de t_s^0 provoca uma grande queda de rigidez elástica, acompanhada por uma grande redu o de P . Por outro lado, o aumento de t_s^0 , tem pouca influência na carga máxima uma vez que a curva P - δ   originalmente praticamente linear até $P_{m\acute{a}x}$, no entanto resulta numa curva mais nítida perto de $P_{m\acute{a}x}$. O efeito de t_s^0 aumenta com a ductilidade do adesivo.

Esta análise, que pode ser igualmente abordada para as juntas estudadas no presente trabalho, que também mostra que as leis obtidas encontradas para cada t_a são únicas na caracteriza o da camada coesiva do adesivo das respetivas juntas, o que refora a sua aplicabilidade na caracteriza o da liga o adesiva. Por sua vez, em ensaios de modo I como mostrado por Fernandes e Campilho [92] para provetes DCB, a forma das curvas P - δ   influenciada principalmente pelo G_{IC} .

No trabalho de Azevedo et al. [13], os métodos de redu o de dados considerados (CCM, DBT, CBT e CBBM) foram testados quanto   precisão executando simula es numéricas com valores de referência de G_{IIC} para três adesivos com ductilidades diferentes. Os dados numéricos das curvas P - δ foram então tratados para estimar G_{IIC} para cada método, que foi comparado com os valores de entrada. Os resultados obtidos revelaram que a ductilidade do adesivo influenciou amplamente a precisão.

Nos adesivos frágeis, os resultados foram precisos, exceto para o CBT, cuja estimativa de G_{IIC} inicial difere em quase 20%. Ao aumentar a ductilidade dos adesivos, o desacerto do método CBT aumenta até aproximadamente 35%, enquanto o DBT também perde a precisão com previsões menores para o valor de entrada de G_{IIC} em cerca de 15%. Devido às dificuldades de ajuste polinomial, o CCM também apresentou alguns desvios significativos, embora este método seja considerado para capturar G_{IIC} com precisão devido ao fato de se basear na conformidade experimental dos provetes [93]. O CBBM, que explica a plasticidade dos materiais com o valor calculado de α_{eq} , foi extremamente preciso para toda a gama de adesivos testados (diferença máxima de aproximadamente 2%).

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

A realização deste trabalho teve como principais objetivos avaliar o efeito t_a na estimativa de G_{IIC} de juntas adesivas utilizando o ensaio ENF e compreender a influência de t_a nas leis MDC de corte. O Araldite® 2015 foi o adesivo selecionado para este trabalho. Este é um adesivo epóxico com ductilidade intermédia, como comprovam as curvas $P-\delta$ com zonas de rotura mais suaves, não tão abruptas como nos adesivos frágeis.

O trabalho experimental realizado permitiu definir a variação de G_{IIC} em função de t_a . Foram avaliados quatro métodos de redução de dados de G_{IIC} , onde se deteta uma clara tendência crescente da G_{IIC} com t_a , relacionado com a redução dos efeitos de restrição nos substratos à medida que t_a aumenta. Relativamente às curvas $P-\delta$ de cada espessura notou-se um aumento gradual de $P_{máx}$, com o aumento de t_a de 0,1 mm a 1 mm, onde para t_a de 2 mm é visível uma estabilização. Essa estabilização é devido à plasticidade limitada do adesivo, que não consegue ampliar a zona plástica acima deste valor de t_a . Além disso, para $t_a \geq 1,0$ mm, encontrou-se uma ligeira redução da rigidez elástica, naturalmente relacionada com as maiores deformações de corte ocorridas. Os resultados obtidos foram coerentes e na maior parte dos provetes a propagação da fenda deu-se de forma estável, existindo, no entanto, pequenas flutuações que são explicadas por questões como não-homogeneidade do material, fabricação e outros problemas experimentais.

Nas curvas- R , após um período em condições de propagação estável, o valor de G_{IIC} medido começa a aumentar devido aos efeitos de compressão induzidos pelo cilindro de carregamento. Pelo método CBBM, foi notório um deslocamento das curvas para a direita, devido ao efeito da ZPF. Todos os métodos de redução de G_{IIC} forneceram resultados comparáveis, incluindo o CBBM, que se destaca ao não exigir a medição de α , embora o método CBT tenha atingido valores menores de G_{IIC} relativamente aos restantes (aproximadamente 17%). Pelo método CBBM, o valor de G_{IIC} para $t_a=0,1$ mm foi de $2,925 \pm 0,214$ N/mm, e o aumento em percentagem sobre este valor foi de 73%, 144,7% e 243,5% para valores crescentes de t_a até 1,0 mm. Por outro lado, valores de t_a maiores que 1,0 mm não resultaram num aumento de G_{IIC} considerável, na verdade a variação entre $t_a=0,1$ mm e 2,0 mm foi de 253,8%.

Comparando os vários métodos, observa-se que o CBBM é o mais robusto e fiável, já que evita a medição de α , 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 α , 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 técnica inversa mostrou que é possível obter um conjunto exclusivo de parâmetros coesivos ao corte para caracterizar o ensaio ENF, que resultou numa reprodução do comportamento experimental com um nível razoável de precisão, tornando assim fácil a sua implementação pelo MEF.

As leis MDC de corte obtidas pela aplicação da técnica inversa revelaram um bom acordo dentro de cada t_a testado. Ao aumentar o valor de t_a , t_s^0 também aumentou até $t_a=1,0$ mm e estabilizou acima desse valor. No entanto, a tendência não foi tão suave como a obtida para G_{IIc} , já que a dispersão foi maior (maior desvio padrão). No processo inverso de ajuste, observou-se que a rigidez inicial da lei coesiva altera proporcionalmente a rigidez inicial da curva $P-\delta$. O G_{IIc} desloca $P_{máx}$ sem modificar a rigidez até a carga máxima. O aumento de t_s^0 aumenta a rigidez até a carga máxima, aumenta o valor de $P_{máx}$ e promove uma transição mais abrupta da curva $P-\delta$ perto da carga máxima.

Este trabalho permitiu compreender detalhadamente o comportamento ao corte de uma camada adesiva de Araldite® 2015. Além disso, as leis obtidas, se combinadas com leis equivalentes de tração, podem ser usadas para a previsão de resistência de estruturas ligadas com este adesivo com t_a idêntico.

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

- Realização de ensaios MMF e SLB para averiguação da capacidade de obtenção da lei coesiva em modo misto;
- Comparação do ensaio DCB (Modo I) e ENF (Modo II), com os ensaios realizados no modo misto, para obtenção dos envelopes de fratura;
- Testar outro tipo de leis coesivas.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas adesivas estruturais*. 2007, Porto: Publindústria.
2. Pinto, A.M.G., *Ligações Adesivas Entre Materiais Poliméricos Com e Sem Alteração Superficial dos Substratos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2007, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
3. de Moura, M.F.S.F., A.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais Compósitos Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*, ed. Edição. 2011, Porto: Publindústria. 369.
4. Adams, R.D., J. Comyn, and W.C. Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*. 1997, London: Chapman & Hall.
5. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto Porto.
6. Kruse, T., et al., *BONDING OF CFRP PRIMARY AEROSPACE STRUCTURES - DISCUSSION OF THE CERTIFICATION BOUNDARY CONDITIONS AND RELATED TECHNOLOGY FIELDS ADDRESSING THE NEEDS FOR DEVELOPMENT* in *EUROPEAN CONFERENCE ON COMPOSITE MATERIALS - 16*,. 2014: Seville, Spain.
7. Dilger, K., *Automobiles*, in *Adhesive bonding Science, technology and applications*, R.D. Adams, Editor. 2000, Woodhead Publishing Limited: Cambridge. p. 599.
8. Pinto, A.M.G., et al., *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. *The Journal of Adhesion*, 2009. **85**(6): p. 351-376.
9. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000, Lisbon: McGraw-Hill.
10. Davis, M. and D. Bond, *Principles and practices of adhesive bonded structural joints and repairs*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 1999. **19**(2): p. 91-105.
11. Packham, D.E., *Handbook of Adhesion, 2nd Edition*. 2005, England: John Wiley & Sons.
12. *Chapter 7 - Joint Design A2 - by, Edited*, in *Adhesives Technology Handbook (Second Edition)*, S. Ebnesajjad, Editor. 2009, William Andrew Publishing: Norwich, NY. p. 159-181.
13. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007. **21**(9): p. 855-870.
14. Pocius, A.V., *Adhesion and Adhesives Technology*, in *Adhesion and Adhesives Technology (Third Edition)*. 2012, Hanser. p. I-XVI.

15. Gauthier, M.M., *Sorting Out Structural Adhesives*, in *Advanced Materials & Processes*. 1990: Ohio.
16. Banea, M.D., et al., *Mechanical and thermal characterization of a structural polyurethane adhesive modified with thermally expandable particles*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2014. **54**: p. 191-199.
17. da Silva, L.F.M., *Preparing Bulk Specimens by Hydrostatic Pressure*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
18. da Silva, L.F.M., *Quasi-Static Testing of Bulk Tensile Specimens*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
19. Duncan, B., *Arcan (V-Notched Plate) Test*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
20. da Silva, L.F.M., *Quasi-Static Testing of Bulk Compression on Flat Specimens*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
21. Anderson, G.L., *Quasi-Static Testing of Butt Joints in Tension*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
22. da Silva, L.F.M., *Quasi-Static Testing of Lap Joints*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
23. da Silva, L.F.M., *Preparing Thick Adherend Shear Test Specimens*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
24. da Silva, L.F.M. and R.D. Adams, *Preparing T Joint Specimens*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
25. Cognard, J., *The Wedge Test*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
26. Pereira, A.M.B., *Fractura interlaminar de compósitos de matriz polimérica*, in *Departamento de Engenharia Mecânica da universidade de Aveiro*. 2006, Universidade de Aveiro: Aveiro.
27. Inglis, C.E., *Stresses in Plates Due to the Presence of Cracks and Sharp Corners*. 1913.
28. Griffith, A.A., *The Phenomena of Rupture and Flow in Solids*. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 1921. **221**(582-593): p. 163-198.
29. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar,
. *International Journal of Solids and Structures*, 2009. **46**(1): p. 31-51.
30. Campilho, R.D.S.G., *Repair of Composite and Wood Structures*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2009, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
31. Blackman, B.R.K., *Quasi-Static Fracture Tests: Double Cantilever Beam and Tapered Double Cantilever Beam Testing*, in *Testing Adhesive Joints - Best*

- Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
32. Campilho, R.D.S.G., *End-Notched Flexure*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
33. Yoshihara, H., *Mode II R-curve of wood measured by 4-ENF test*. Engineering Fracture Mechanics, 2004. **71**(13): p. 2065-2077.
34. de Moura, M.F.S.F., et al., *Numerical analysis of the ENF and ELS tests applied to mode II fracture characterization of cortical bone tissue*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010: p. 149-158.
35. de Moura, M.F.S.F. and N.M.M. Dourado, *Mode II Fracture Characterization of Bonded Joints Using the ELS Test*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, L.F.M. da Silva, et al., Editors. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany: England.
36. Silva, L.F.M., V.H.C. Esteves, and F. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. Vol. 42. 2011.
37. Bennati, S., et al., *An enhanced beam model of the Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB) test for composite laminates*, in *ETDCM8- 8th Seminar on Experimental Techniques and Design in Composite Materials 2007*: Italy.
38. Blanco, N., A. Turon, and J. Costa, *An exact solution for the determination of the mode mixture in the mixed-mode bending delamination test*. Composites Science and Technology, 2006. **66**(10): p. 1256-1258.
39. Crews, J.J.H. and R.J. R., *A Mixed-Mode Bending Apparatus for Delamination Testing*. 1998, NASA Langley Technical Report Server.
40. Yoon, Y.H. and C.S. Hong, *Modified end notched flexure specimen for mixed mode interlaminar fracture in laminated composites*. International Journal of Fracture, 1990. **43**.
41. Carvalho, U.T.F. and R.D.S.G. Campilho, *Application of the direct method for cohesive law estimation applied to the strength prediction of double-lap joints*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016. **85**: p. 140-148.
42. Compston, P., et al., *The effect of matrix toughness and loading rate on the mode-II interlaminar fracture toughness of glass-fibre/vinyl-ester composites*. Composites Science and Technology, 2001. **61**(2): p. 321-333.
43. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Composites Science and Technology, 2008. **68**(10): p. 2224-2230.
44. Al-Khudairi, O., et al., *Building Delamination Fracture Envelope under Mode I/Mode II Loading for FRP Composite Materials*, in *Advanced Composite Materials for Automotive Applications*. 2013, John Wiley & Sons Ltd. p. 293-310.
45. Wang, Y. and J.G. Williams, *Corrections for mode II fracture toughness specimens of composites materials*. Composites Science and Technology, 1992. **43**(3): p. 251-256.
46. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**(6): p. 1589-1595.

47. Rice, J., *A Path Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. Vol. 35. 1968. 379-386.
48. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
49. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41**(2): p. 413-434.
50. Stigh, U., et al., *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture, 2010. **165**(2): p. 149-162.
51. Marzi, S., A. Biel, and 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, 2011. **31**(8): p. 840-850.
52. Gleich, D.M., M.J.L. Van Tooren, and A. Beukers, *Analysis and evaluation of bondline thickness effects on failure load in adhesively bonded structures*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2001. **15**(9).
53. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2015. **57**: p. 125-132.
54. Lee, D.-B., et al., *Effect of Bond Thickness on the Fracture Toughness of Adhesive Joints*. Journal of Engineering Materials and Technology, 2004. **126**(1): p. 14-18.
55. Adams, R. and N. A Peppiatt, *Stress Analysis of Adhesive-Bonded Lap Joints*. Vol. 9. 1974. 185-196.
56. Volkersen, O., *Die nietkrafteerteilung in zubeanspruchten nietverbindungen mit konstanten loschonquerschnitten*. Luftfahrtforschung, 1938(15).
57. Goland, M. and E. Reissner, *The stresses in cemented joints*. . 1944.
58. Crocombe, A.D., *Global yielding as a failure criterion for bonded joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1989. **9**(3): p. 145-153.
59. Bascom, W.D. and R.L. Cottingham, *Effect of Temperature on the Adhesive Fracture Behavior of an Elastomer-Epoxy Resin*. The Journal of Adhesion, 1976. **7**(4): p. 333-346.
60. Bascom, W.D., et al., *The fracture of epoxy- and elastomer-modified epoxy polymers in bulk and as adhesives*. Journal of Applied Polymer Science, 1975. **19**(9): p. 2545-2562.
61. Grant, L.D.R., R.D. Adams, and L.F.M. da Silva, *Experimental and numerical analysis of single-lap joints for the automotive industry*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(4): p. 405-413.
62. Duan, K., X. Hu, and F.H. Wittmann, *Boundary effect on concrete fracture and non-constant fracture energy distribution*. Engineering Fracture Mechanics, 2003. **70**(16): p. 2257-2268.
63. Biel, A., *Constitutive behaviour and fracture toughness of an adhesive layer*. 2005: Chalmers tekniska högskola.

64. Banea, M.D., L.F.M. da Silva, and R.D.S.G. Campilho, *The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(5): p. 331-346.
65. Figueiredo, J.C.P., et al., *Shear cohesive laws of adhesive joints as a function of the adhesive thickness*, in *AB2017, 4th International Conference on Structural Adhesive Bonding*. 2017: Porto.
66. Miyagawa, H., C. Sato, and K. Ikegami, *Experimental Determination of Fracture Toughness of CFRP in Mode II by Raman Spectroscopy*. Applied Composite Materials, 2001. **8**(1): p. 25-41.
67. Stevanovic, D., et al., *On crack-initiation conditions for mode I and mode II delamination testing of composite materials*. Composites Science and Technology, 2000. **60**(9): p. 1879-1887.
68. Sela, N., O. Ishai, and L. Banks-Sills, *The effect of adhesive thickness on interlaminar fracture toughness of interleaved CFRP specimens*. Composites, 1989. **20**(3): p. 257-264.
69. da Silva, L.F., et al., *Mode II fracture toughness of a brittle and a ductile adhesive as a function of the adhesive thickness*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(9): p. 891-905.
70. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of Layer Thickness on Cohesive Properties of an Epoxy-Based Adhesive—An Experimental Study*. The Journal of Adhesion, 2010. **86**(8): p. 816-835.
71. Azari, S., M. Papini, and J.K. Spelt, *Effect of adhesive thickness on fatigue and fracture of toughened epoxy joints – Part I: Experiments*. Engineering Fracture Mechanics, 2011. **78**(1): p. 153-162.
72. Khoo, T.T. and H. Kim, *Effect of Bondline Thickness on Mixed-Mode Fracture of Adhesively Bonded Joints*. The Journal of Adhesion, 2011. **87**(10): p. 989-1019.
73. Benzeggagh, M.L. and M. Kenane, *Measurement of mixed-mode delamination fracture toughness of unidirectional glass/epoxy composites with mixed-mode bending apparatus*. Composites Science and Technology, 1996. **56**(4): p. 439-449.
74. Ducept, F., P. Davies, and D. Gamby, *Mixed mode failure criteria for a glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000. **20**(3): p. 233-244.
75. Albertsen, H., et al., *Interlaminar fracture toughness of CFRP influenced by fibre surface treatment: Part 1. Experimental results*. Composites Science and Technology, 1995. **54**(2): p. 133-145.
76. Schmueser, D.W., *A Fracture Mechanics Approach to Characterizing Cyclic Debonding of Varied Thickness Adhesive Joints to Electroprimed Steel Surfaces*. The Journal of Adhesion, 1991. **36**(1): p. 1-23.
77. Mallick, P.K., *Fiber-reinforced composites: materials, manufacturing, and design*. 2007: CRC press.
78. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adherent thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2014. **53**: p. 15-22.
79. Ameli, A., et al., *Fracture R-curve characterization of toughened epoxy adhesives*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(3): p. 521-534.

80. Yoshihara, H., *Mode II initiation fracture toughness analysis for wood obtained by 3-ENF test*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(14): p. 2198-2207.
81. Leitão, A.C.C., R.D.S.G. Campilho, and D.C. Moura, *Shear Characterization of Adhesive Layers by Advanced Optical Techniques*. Experimental Mechanics, 2016. **56**: p. 493-506.
82. Azevedo, J.C.S., et al., *Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 143-154.
83. Kinloch, A.J. and S.J. Shaw, *The Fracture Resistance of a Toughened Epoxy Adhesive*. The Journal of Adhesion, 1981. **12**(1): p. 59-77.
84. Pardoen, T., et al., *Constraint effects in adhesive joint fracture*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2005. **53**(9): p. 1951-1983.
85. Nunes, S.L.S., et al., *Comparative failure assessment of single and double-lap joints with varying adhesive systems*. The Journal of Adhesion, 2016. **92**: p. 610-634.
86. Troughton, M.J., *Handbook of Plastics Joining: a Practical Guide, second ed.* 2008: William Andrew Inc.
87. Ribeiro, T.E.A., et al., *Damage analysis of composite–aluminium adhesively-bonded single-lap joints*. Composite Structures, 2016. **136**: p. 25-33.
88. Moreira, R.D.F. and R.D.S.G. Campilho, *Strength improvement of adhesively-bonded scarf repairs in aluminium structures with external reinforcements*. Engineering Structures, 2015. **101**(Supplement C): p. 99-110.
89. da Silva, L.F.M. and R.D.S.G. Campilho, *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012, Heidelberg: Springer.
90. Gonçalves, J.P.M., M.F.S.F. de Moura, and P.M.S.T. de Castro, *A three-dimensional finite element model for stress analysis of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2002. **22**(5): p. 357-365.
91. Fernandes, T.A.B., et al., *Adhesive selection for single lap bonded joints: Experimentation and advanced techniques for strength prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**(10-11): p. 841-862.
92. Fernandes, R.L. and R.D.S.G. Campilho, *Testing different cohesive law shapes to predict damage growth in bonded joints loaded in pure tension*. The Journal of Adhesion, 2017. **93**(1-2): p. 57-76.
93. Hadavinia, H. and H. Ghasemnejad, *Effects of Mode-I and Mode-II interlaminar fracture toughness on the energy absorption of CFRP twill/weave composite box sections*. Composite Structures, 2009. **89**(2): p. 303-314.