



Análise numérica do ensaio end-loaded split (ELS) para caracterização à fratura em modo II de adesivos estruturais

JOÃO MANUEL AMARAL FONTES

julho de 2024

**ANÁLISE NUMÉRICA DO ENSAIO END-LOADED
SPLIT (ELS) PARA CARACTERIZAÇÃO À FRATURA
EM MODO II DE ADESIVOS ESTRUTURAIS**

João Manuel Amaral Fontes

**Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em
Engenharia Mecânica, Área de Especialização em
Construções Mecânicas**

Orientador: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Coorientador: José Joaquim da Mota Machado

Júri:

Presidente:

António Gonçalves Magalhães, Professor Coordenador, ISEP

Vogais:

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Professor Adjunto, ISEP

Filipe José Palhares Chaves, Professor Coordenador, IPCA

Agradecimentos

Ao meu orientador Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Gomes Campilho pelo incentivo e apoio incansável prestado durante todo o processo, e ao meu coorientador, Professor Doutor José Joaquim da Mota Machado pela disponibilidade apresentada e prontidão para ajudar durante a realização desta dissertação.

Aos meus pais, que me apoiaram desde o início e me deram a oportunidade de alcançar esta etapa na minha vida.

Resumo

Ao longo dos anos, o uso de ligações adesivas ganhou maior expressão devido às características competitivas que apresenta em relação às ligações mais comuns, como por exemplo, ligações permanentes, como a soldadura, ou ligações desmontáveis, tais como as ligações aparafusadas. Estas ligações apresentam vários benefícios em relação às ligações tradicionais, como o baixo peso, a capacidade de resistirem a condições climáticas adversas, custos de produção mais baixos e a possibilidade de unir materiais dissimilares. Com este aumento do uso das ligações adesivas, surgiu também a necessidade de prever e avaliar com boa fiabilidade a resistência mecânica para auxílio no desenho e conceção das mesmas. A mecânica da fratura é uma abordagem que apresenta vantagens na obtenção da previsão da resistência das ligações adesivas. Esta é tipicamente aplicada através da análise energética para prever a evolução da fratura, e é baseada na taxa crítica de libertação de energia (G).

Neste trabalho pretende-se fazer uma avaliação numérica do ensaio *End-Loaded Split* (ELS) para a caracterização de adesivos estruturais à fratura em modo II (corte no plano), tendo em conta adesivos com ductilidades diferentes. O trabalho consiste na avaliação numérica e realização das simulações, com o intuito de reproduzir o ensaio e compreender o efeito de vários parâmetros na resposta à fratura dos provetes. É também pretendida a validação da adequabilidade de vários métodos de redução na estimativa da tenacidade à fratura em modo II, pela comparação dos valores previstos numericamente com os valores inseridos nos modelos. Finalmente, é realizada uma análise de sensibilidade relativa aos parâmetros coesivos, para verificar o seu efeito no resultado das previsões.

A comparação entre os diferentes métodos de redução testados permitiu concluir que o método CBBM foi aquele que mais se aproximou dos valores da tenacidade à fratura inseridos nas simulações no *software* Abaqus® para todos os aderentes e adesivos estudados.

Palavras-chave: Ligações adesivas, Adesivos estruturais, Tenacidade à fratura, *End-loaded split*, Método de elementos finitos, Modelos de dano coesivo.

Abstract

Over the years, the use of adhesive joints has become more widespread due to their competitive characteristics compared to more common joints, such as permanent joints like welding, or removable ones like bolted joints. These joints have several benefits over traditional joints, such as low weight, the ability to withstand adverse weather conditions, lower production costs and the possibility of joining dissimilar materials. With this increase in the use of adhesive joints, there has also been a need to reliably predict and evaluate their mechanical strength to aid in their design. Fracture mechanics is an approach that has advantages when it comes to predicting the strength of adhesive joints. It is typically applied through energy analysis to predict fracture evolution, and it is based on the critical strain energy release rate (G).

The aim of this work is to carry out a numerical evaluation of the End-Loaded Split (ELS) test for the fracture characterization of structural adhesives under mode II (in-plane shear), taking into account adhesives with different ductilities. The work consists of numerical evaluation and simulations, with the aim of reproducing the test and understanding the effect of various parameters on the fracture response of the specimens. The aim is also to validate the suitability of various reduction methods to estimate mode II fracture toughness, by comparing the numerically predicted values with those entered into the models. Finally, a sensitivity analysis is carried out on the cohesive parameters to check their effect on the outcome of the predictions. The comparison between the different reduction methods tested led to the conclusion that the CBBM method was the closest to the fracture toughness values entered into the simulations in the Abaqus® software for all the adherends and adhesives studied.

KEYWORDS: Adhesive bonds, Structural adhesives, Fracture toughness, End-loaded split, Finite element method, Cohesive zone models.

Índice

1. Introdução	1
1.1. Contextualização	1
1.2. Objetivos	1
1.3. Metodologia	1
1.4. Estrutura do relatório	2
2. Revisão Bibliográfica	3
2.1. Ligações Adesivas	3
2.1.1. Adesivos estruturais	4
2.1.2. Esforços aplicados a ligações adesivas	5
2.1.3. Tipos de roturas possíveis nas ligações adesivas	7
2.1.4. Configurações de junta	8
2.1.5. Ensaio mecânicos	9
2.1.6. Aplicações	20
2.2. Ensaio de Fratura	21
2.2.1. Fundamentos da mecânica da fratura	22
2.2.2. Abordagens clássicas	22
2.2.3. Integral J	23
2.2.4. Modo I	24
2.2.5. Modo II	26
2.2.6. Modo misto	28
2.2.7. Estado da arte	31
2.3. Ensaio <i>End-Loaded Split</i>	33
2.3.1. Enquadramento do ensaio	33
2.3.2. Métodos de redução	35
2.3.3. Equipamentos e ensaios experimentais	38
2.3.4. Princípios de simulação	45
2.3.5. Modelos de dano coesivo	46
2.3.6. Estado da arte	48
3. Desenvolvimento	53
3.1. Geometria a analisar	53
3.2. Materiais	54
3.2.1. Aderentes	54
3.2.2. Adesivos	55
3.3. Modelação numérica	59
3.3.1. Programa selecionado	59
3.3.2. Método de análise	59

3.3.3. Pré-processamento	60
3.3.4. Métodos de redução selecionados.....	61
3.4. Resultados obtidos	61
3.4.1. Curvas $P-\delta$	62
3.4.2. Curvas R.....	64
3.4.3. Validação dos métodos de redução	66
3.5. Análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos	69
3.5.1. Rigidez	69
3.5.2. Resistências coesivas.....	73
3.5.3. Tenacidade à fratura	76
3.5.4. Combinação de parâmetros	80
4. Conclusão.....	85
4.1. Conclusões finais	85
4.2. Limitações e trabalhos futuros	85

Lista de Figuras

Figura 1-a) Esforço de tração e b) Esforço de corte [4]	5
Figura 2-Distribuição de tensões em esforços de corte ao longo da espessura [4]	6
Figura 3-Representação esquemática do esforço de clivagem [4]	6
Figura 4-Representação esquemática do esforço de arrancamento [4].....	7
Figura 5-Representações esquemáticas de roturas coesivas: a) no adesivo e b) no aderente [5]	7
Figura 6-Representação esquemática de uma rotura adesiva [5]	7
Figura 7-Juntas: a) topo-a-topo; b) com chanfro interior, c) com sobreposição e d) macho-fêmea [5, 7].....	8
Figura 8-Juntas de sobreposição: a) simples, b) de ressalto (ou joggle lap) e c) dupla [5, 7]	8
Figura 9-Cobre juntas: a) simples, b) dupla, c) dupla com recuo, d) dupla com chanfro [5, 7]....	9
Figura 10-Representação esquemática dos provetes de ensaio à tração em bulk segundo a norma ISO 527-2: a) provete longo e b) provete curto [5]	9
Figura 11-Representação esquemática dos provetes de ensaio à compressão em bulk segundo: a) segundo NF T 51-101 e b) ASTM D695 [5].....	10
Figura 12-Representação esquemática dos provetes dos ensaios de compressão em bulk: a) segundo ASTM D695 b) segundo Gali et al. [5]	10
Figura 13-Provete de ensaio Iosipescu [5].....	11
Figura 14-Provete de ensaio Arcan [5]	12
Figura 15-Representação esquemática do ensaio napkin ring [5].....	13
Figura 16-Representação esquemática do provete de ensaio TAST [5]	14
Figura 17-Representação esquemática do ensaio a 180 graus [8]	16
Figura 18-Representação esquemática do ensaio T peel [8]	16
Figura 19-Representação esquemática do ensaio de rolete flutuante (floating roller) [4, 8]....	17
Figura 20-Representação esquemática do ensaio Climbing Drum Test [8]	17
Figura 21-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D1062 [8]	18
Figura 22-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D3433 [8]	18
Figura 23-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D3807 [8]	19
Figura 24-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D5041 [8]	19
Figura 25-Aplicações na indústria aeroespacial: a) ligações adesivas num Saab 340 (a cinzento) [46] e b) ligações adesivas que compõem uma asa de um bombardeiro [8]	20
Figura 26-Uso de adesivos na indústria automóvel, para preenchimento de folgas, e estrutural [46].....	21
Figura 27-Aplicação de adesivo para a criação de embalagens de papel [4].....	21
Figura 28-Descontinuidades nos materiais: a) ponta de uma fratura ou b) cantos reentrantes [50].....	22
Figura 29-Modo I.....	24
Figura 30-Ensaio DCB (Norma ASTM D3433) [9]	25
Figura 31-Ensaio DCB (Norma ISO 25217) [9].....	25
Figura 32-Ensaio TDCB (norma ASTM D 3433) [9].....	26

Figura 33-Ensaio TDCB (norma ISO 25217) [9]	26
Figura 34-Modo II	27
Figura 35-Ensaio ENF [56]	27
Figura 36-Ensaio 4ENF [56]	28
Figura 37-Modo misto (ou modo III) [6]	28
Figura 38-Ensaio Fixed-Ratio Mixed Mode (FRMM) [5]	29
Figura 39-Ensaio Mixed-Mode Bending (MMB) [5]	30
Figura 40-Ensaio Mixed-Mode Flexure (MMF) [5]	30
Figura 41-Ensaio End-Loaded Split (ELS) [9]	34
Figura 42-Curva P- δ característica do ensaio ELS [5]	34
Figura 43-Curva R característica do ensaio ELS [56]	35
Figura 44-Representação esquemática do ensaio de Polyzos [68]	38
Figura 45-Máquina de ensaio de S. Abdel Monsef et al. [69]	39
Figura 46-Ensaio de M. Pérez Galmés et al. [71]	39
Figura 47-Máquina de ensaio de Ghasemnejad et al. [75]	40
Figura 48-Representação esquemática do ensaio de Poursartip et al. [76]	41
Figura 49-Máquina de testes de Ding et al. [77]	41
Figura 50-Máquina de ensaio de Shahverdi et al. [78]	42
Figura 51-Representação esquemática do ensaio de Yasaei et al. [79]	42
Figura 52-Provete de ensaio de Zhang et al. [80]	43
Figura 53-Representação esquemática do provete de ensaio de Kenane [81]	43
Figura 54-Máquina de ensaios de M.A.L. Silva et al. [82]	44
Figura 55-Modelos de dano coesivo: a) abordagem local e b) abordagem contínua	46
Figura 56- Representação de uma lei triangular [90]	47
Figura 57-Exemplos de leis coesivas: a) lei triangular e lei linear-exponencial e b) lei trapezoidal	48
Figura 58-Representação esquemática do provete ELS usado na modelação numérica	53
Figura 59-Curvas σ - ε da liga de alumínio AL6082 T651 [108]	54
Figura 60-Curvas σ - ε do adesivo Araldite® AV138 [110]	56
Figura 61-Curvas σ - ε do adesivo Araldite® 2015 [109]	57
Figura 62-Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [111]	58
Figura 63-Refinamento geral da malha do provete no software	60
Figura 64-Refinamento de malha na zona do punção de carregamento	60
Figura 65-Condições fronteira aplicadas no provete	60
Figura 66-Interações entre elementos no provete	61
Figura 67-Curvas P- δ para adesivo AV138	62
Figura 68-Curvas P- δ para adesivo 2015	63
Figura 69-Curvas P- δ para adesivo 7752	63
Figura 70-Curvas R do provete AV138 CFRP	64
Figura 71-Curvas R do provete AV138 Alumínio	64
Figura 72-Curvas R do provete 2015 CFRP	65
Figura 73-Curvas R do provete 2015 Alumínio	65
Figura 74-Curvas R do provete 7752 CFRP	66

Figura 75-Curvas R do provete 7752 Alumínio	66
Figura 76-Valores calculados para o adesivo AV138	67
Figura 77-Valores calculados para o adesivo 2015.....	68
Figura 78-Valores calculados para o adesivo 7752.....	68
Figura 79-Variação de G para o provete AV138 CFRP	70
Figura 80-Variação de G para o provete AV138 Alumínio	70
Figura 81-Variação de G para o provete 2015 CFRP	71
Figura 82-Variação de G para o provete 2015 Alumínio.....	71
Figura 83-Variação de G para o provete 7752 CFRP	72
Figura 84-Variação de G para o provete 7752 Alumínio.....	72
Figura 85-Variação de τ_s^0 para o provete AV138 CFRP	73
Figura 86-Variação de τ_s^0 para o provete AV138 Alumínio	74
Figura 87-Variação de τ_s^0 para o provete 2015 CFRP	74
Figura 88-Variação de τ_s^0 para o provete 2015 Alumínio	75
Figura 89-Variação de τ_s^0 para o provete 7752 CFRP	75
Figura 90-Variação de τ_s^0 para o provete 7752 Alumínio	76
Figura 91-Variação de G_{IIC} para o provete AV138 CFRP.....	77
Figura 92-Variação de G_{IIC} para o provete AV138 Alumínio	77
Figura 93-Variação de G_{IIC} para o provete 2015 CFRP	78
Figura 94-Variação de G_{IIC} para o provete 2015 Alumínio	78
Figura 95-Variação de G_{IIC} para o provete 7752 CFRP	79
Figura 96-Variação de G_{IIC} para o provete 7752 Alumínio.....	80
Figura 97-Variação de parâmetros para o provete AV138 CFRP	81
Figura 98-Variação de parâmetros para o provete AV138 Alumínio	81
Figura 99-Variação de parâmetros para o provete 2015 CFRP.....	82
Figura 100-Variação de parâmetros para o provete 2015 Alumínio	83
Figura 101-Variação de parâmetros para o provete 7752 CFRP.....	83
Figura 102-Variação de parâmetros para o provete 7752 Alumínio	84

Lista de Tabelas

Tabela 1-Vantagens e desvantagens de uma ligação adesiva [3]	4
Tabela 2-Estado da arte da Mecânica da Fratura	31
Tabela 3-Dimensões dos provetes utilizados no ensaio de Pérez-Galmés et al. [71]	39
Tabela 4-Valores de referência dos trabalhos recolhidos sobre ensaios experimentais ELS	45
Tabela 5-Estado da arte do ensaio ELS	49
Tabela 6-Dimensões do provete utilizado na modelação numérica	53
Tabela 7-Propriedades do alumínio 6082 T651 [108]	54
Tabela 8-Propriedades mecânicas de CFRP	55
Tabela 9-Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [110]	56
Tabela 10-Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [109]	57
Tabela 11-Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 7752 [111]	58
Tabela 12-Propriedades dos adesivos utilizadas na modelação numérica	59
Tabela 13-Métodos de redução seleccionados	61
Tabela 14-Valores de G_{IIC} obtidos pelos métodos de redução seleccionados	67
Tabela 15-Percentagens de erro em relação aos valores arbitrados	69

Acrónimos e Símbolos

Lista de Acrónimos

2D	Bidimensional
3D	Tridimensional
4ENF	<i>4 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>
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Theory</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CBTE	<i>Corrected Beam Theory with Effective Crack Length</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Polymer
CZM	<i>Cohesive Zone Model</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
DIN	<i>German Institute for Standardization</i>
ECM	<i>Equivalent Crack Method</i>
ELS	<i>End-Loaded Split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
ESIS	<i>European Society for Structural Integrity</i>
EUA	Estados Unidos da América
FPZ	<i>Fracture Process Zone</i>
FRMM	<i>Fixed-Ratio Mixed Mode</i>
GFRP	<i>Glass Fibre Reinforced Polymer</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
LEFM	<i>Linear Elastic Fracture Mechanics</i>
MEF	Método de Elementos Finitos
MMB	<i>Mixed-Mode Bending</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>

MP	<i>Mandrel Peel (Test)</i>
NF	Norma Francesa
P.Porto	Politécnico do Porto
PEEK	<i>Polyether Ether Ketone</i>
PTFE	<i>Polytetrafluorethylene</i>
SBT	<i>Simple Beam Theory</i>
SEM	<i>Scanning Electron Microscopy</i>
SERR	<i>Strain Energy Release Rate</i>
SIF	<i>Stress Intensity Factor</i>
SLB	<i>Single Leg Bending</i>
TAST	<i>Thick Adherend Shear Test</i>
TDCB	<i>Tapered Double Cantilever Beam</i>
VCCT	<i>Virtual Crack Closure Technique</i>

Lista de Símbolos

h	Altura do substrato	mm
A	Área de fratura	m ²
P	Carga aplicada	N
σ_R	Carga aplicada remotamente	N
$P_{m\acute{a}x}$	Carga máxima aplicada	N
$P_{m\acute{i}n}$	Carga mínima aplicada	N
ν	Coefficiente de Poisson	-
a	Comprimento de fenda	mm
a_e	Comprimento de fenda equivalente	mm
a_0	Comprimento de fenda inicial do provete	mm
a_m	Comprimento de fenda medido	mm
l_1	Comprimento do bloco de carga	mm
L_{ef}	Comprimento efetivo do provete	mm
L	Comprimento total do provete	mm
Γ	Contorno	-
ε_f	Deformação de rotura à tração	-
γ_f	Deformação de rotura ao corte	-

ε_{45°	Deformação lida por extensómetro a 45°	-
ε_{-45°	Deformação lida por extensómetro a -45°	-
W	Densidade de energia de deformação	J/mm ³
δ	Deslocamento	mm
δ_s^f	Deslocamento de fratura em corte	mm
δ_m^f	Deslocamento de fratura em modo misto	mm
δ_m^n	Deslocamento de fratura em tração	mm
δ_s^0	Deslocamento de pico em corte	mm
δ_m^0	Deslocamento de pico em modo misto	mm
δ_n^0	Deslocamento de pico em tração	mm
Δv	Deslocamento nodal	mm
U	Energia potencial elástica	J
$d_{aderente}$	Espessura do aderente	mm
$d_{adesivo}$	Espessura do adesivo	mm
t	Espessura do adesivo	mm
h_a	Espessura do adesivo	mm
$d_{transdutor}$	Espessura do transdutor	mm
h_j	Espessura total da junta	mm
N_2	Fator de correção	-
F_2	Fator de correção	-
χ	Fator de correção de comprimento	-
Δ_l	Fator de correção do comprimento de fenda	-
Δ_{II}	Fator de correção do comprimento de fenda	-
F	Fator de correção para grandes comprimentos	-
m	Fator de geometria	-
C_c	Flexibilidade crítica do provete	mm/N
C_{0c}	Flexibilidade crítica inicial do provete	mm/N
C	Flexibilidade do provete	mm/N
c_0	Flexibilidade inicial do provete	mm/N
F_y	Força aplicada no nó	N
b	Largura do provete	mm
B	Largura do provete	mm

τ	Módulo de corte	MPa
G_{13}	Módulo de elasticidade ao corte	MPa
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal	MPa
E_3	Módulo de elasticidade transversal	MPa
G_{xy}	Módulo de elasticidade transversal	MPa
E	Módulo de Young	MPa
Δa	Tamanho do incremento do comprimento de fratura	mm
J	Taxa de libertação de energia (Integral J)	N/mm
G	Tenacidade à fratura	N/mm
G_{Ia}	Tenacidade à fratura aparente em modo I	N/mm
G_C	Tenacidade à fratura crítica	N/mm
G_I	Tenacidade à fratura em modo I	N/mm
G_{II}	Tenacidade à fratura em modo II	N/mm
G_{IC}	Tenacidade crítica à fratura em modo I	N/mm
G_{IIC}	Tenacidade crítica à fratura em modo II	N/mm
τ_y	Tensão de cedência ao corte	MPa
t_s^0	Tensão de pico em corte	MPa
t_m^0	Tensão de pico em modo misto	MPa
t_n^0	Tensão de pico em tração	MPa
σ_f	Tensão de rotura à tração	MPa
τ_f	Tensão de rotura ao corte	MPa
$R_{p0,2}$	Tensão limite de proporcionalidade à tração	MPa
$R_{p0,2 \text{ corte}}$	Tensão limite de proporcionalidade ao corte	MPa
σ	Tensor de tensões	-
W	Trabalho externo	J
n	Vetor unitário	-

1. Introdução

1.1. Contextualização

Ao longo dos anos, o uso de ligações adesivas ganhou maior expressão devido às características competitivas que apresenta em relação às ligações mais comuns, como por exemplo, ligações permanentes, como a soldadura, ou ligações desmontáveis, tais como as ligações aparafusadas. Estas ligações apresentam vários benefícios em relação às ligações tradicionais, como o baixo peso, a capacidade de resistirem a condições climáticas adversas, custos de produção mais baixos e a possibilidade de unir materiais dissimilares. Com este aumento do uso das ligações adesivas, surgiu também a necessidade de prever e avaliar com boa fiabilidade a resistência mecânica para auxílio no desenho e conceção das mesmas. A mecânica da fratura é uma abordagem que apresenta vantagens na obtenção da previsão da resistência das ligações adesivas. Esta é tipicamente aplicada através da análise energética para prever a evolução da fratura, e é baseada na taxa crítica de libertação de energia (G).

1.2. Objetivos

Neste trabalho pretende-se fazer uma avaliação numérica do ensaio *End-Loaded Split* (ELS) para a caracterização de adesivos estruturais à fratura em modo II (corte no plano), tendo em conta adesivos com ductilidades diferentes. O trabalho consiste na avaliação numérica e realização das simulações, com o intuito de reproduzir um ensaio e compreender o efeito de vários parâmetros na resposta à fratura dos provetes. É também pretendida também a validação da adequabilidade de vários métodos de redução na estimativa da tenacidade à fratura em modo II, pela comparação dos valores previstos numericamente com os valores inseridos nos modelos. Finalmente, é realizada uma análise de sensibilidade relativa aos parâmetros coesivos, para verificar o seu efeito no resultado das previsões.

1.3. Metodologia

Este trabalho foi desenvolvido recorrendo à seguinte metodologia:

- Análise do tema proposto, contextualização do projeto e definição das atividades necessárias para a identificação dos objetivos do trabalho;

Introdução

- Realização de uma pesquisa bibliográfica para recolher as referências adequadas para compreender os conceitos teóricos e técnicos a ser utilizados no projeto;

- Implementação dos conceitos teóricos e técnicos no trabalho prático, para alcançar as soluções finais, o modelo numérico no *software* Abaqus e validação dos métodos de redução no cálculo da tenacidade à fratura em modo II

- Avaliação dos resultados obtidos e comparação com os objetivos definidos inicialmente, e sugestão para melhorias futuras do projeto

1.4. Estrutura do relatório

Este relatório encontra-se dividido em quatro capítulos, o primeiro, relativo à Introdução, o segundo, relativo à Revisão Bibliográfica, o terceiro, relativo ao desenvolvimento do trabalho numérico realizado, e o quarto, dedicado às Conclusões do relatório.

A Introdução dedica-se a fazer uma breve apresentação do relatório e do que vai ser abordado no mesmo. Nela é feita uma contextualização de tema em estudo no mundo atual, são apresentados os objetivos que se pretendem atingir com o trabalho, a metodologia usada no trabalho, quais foram os recursos utilizados para obtenção das informações, e por fim, a estrutura do relatório.

Quanto à Revisão Bibliográfica, é realizada a seleção e análise dos trabalhos publicados recentemente relacionados com o tema em estudo, com ênfase nas ligações adesivas, nos tipos de adesivos usados, nos esforços que podem atuar nas ligações adesivas, no tipo de roturas que se podem observar nas juntas, nas configurações de junta, nos ensaios mecânicos, nas aplicações das ligações, nos ensaios de fratura, fundamentos da mecânica da fratura e modos de falha.

No terceiro capítulo, é exposta toda a implementação dos conceitos obtidos e descritos na Revisão Bibliográfica na criação do modelo numérico no *software* Abaqus® e todos os passos executados para a simulação do ensaio ELS e cálculo da tenacidade à fratura em modo II.

Por fim, no quarto capítulo, abordam-se as Conclusões retiradas do relatório e possíveis sugestões para trabalhos futuros.

2. Revisão Bibliográfica

Neste capítulo foi realizado um levantamento de todos os artigos necessários à resolução deste trabalho, em especial os artigos mais recentes e os de maior relevo no que concerne aos ensaios ELS. Salienta-se a escassez de trabalhos que aprofundem os conhecimentos nesta área. Este estudo tem como objetivo fazer uma avaliação do resultado de análises numéricas de resultados obtidos por simulações em software, comparando com resultados obtidos experimentalmente. Obtendo uma boa aproximação entre os resultados numéricos e os experimentais, pode-se validar as simulações em software como um bom método de previsão dos resultados de uma junta num ensaio ELS.

No Subcapítulo 2.1, procedeu-se a uma introdução às ligações adesivas, a sua definição, a sua constituição e como são obtidas, que tipos de adesivos existem, e as suas famílias. Em seguida, faz-se um resumo de todos esforços que podem ser aplicados a ligações adesivas, e quais as roturas possíveis numa ligação. Faz-se também um levantamento das configurações de junta, dos ensaios mecânicos usados nas juntas para obtenção das suas propriedades mecânicas e das aplicações das ligações adesivas no mundo atual.

O Subcapítulo 2.2, centra-se na fratura das ligações adesivas, com início nos fundamentos da mecânica da fratura e nas abordagens clássicas à mecânica da fratura para a interpretação dos resultados dos ensaios à fratura. Foca-se noutro método utilizado importante para o estudo da mecânica da fratura, o integral J. Mais ainda, foca-se nos modos de falha, o modo I, II e modo misto, e foi feito um estado da arte relativo aos mais recentes desenvolvimentos dos ensaios à fratura.

Por fim, o Subcapítulo 2.3 é dedicado ao ensaio ELS: o enquadramento do ensaio, o seu âmbito de aplicação, os métodos de redução mais utilizados para a obtenção das propriedades nos ensaios, e equipamentos usados em ensaios por outros autores. Para além disso, faz-se também uma abordagem aos princípios de simulação do ensaio no *software* Abaqus®, aos modelos de dano coesivo e a um estado da arte das obras mais recentes envolvendo ensaios ELS.

2.1. Ligações Adesivas

Para melhor contextualização, pode-se estudar por partes as matérias envolvidas no trabalho, começando pelas ligações adesivas e em que consistem. As ligações adesivas consistem numa ligação entre duas ou mais membros estruturais da ligação, denominadas aderentes ou substratos, que podem ou não ser de materiais distintos, através de uma substância,

denominada adesivo, que adere à superfície das peças a colar, solidifica e as une. O adesivo pode ser definido como um material polimérico que pode ser aplicado a uma superfície de outros materiais, uni-los, e oferecer resistência à sua separação [1, 2].

O uso de ligações adesivas traz as suas vantagens na escolha do tipo de materiais a usar num projeto, sendo um dos principais a sua utilização em ligações onde a maior parte do esforço é de corte, onde apresentam melhores propriedades, substituindo outras ligações convencionais, como as aparafusadas, que respondem melhor a esforços de tensão [2].

Para além desta, existem outras vantagens, e também desvantagens, algumas delas mencionadas na Tabela 1.

Tabela 1-Vantagens e desvantagens de uma ligação adesiva [3]

Vantagens	Desvantagens
Distribuição de tensões uniforme e consequentemente menor concentração de tensões	Se a área de contacto for pequena, o adesivo encontra-se sujeito a maior concentração de tensões
Melhor tempo de vida da ligação adesiva em serviço em relação a outros tipos de ligação	Os adesivos podem ter limitações no que toca a temperaturas de serviço e a humidades altas
A preparação de algumas ligações adesivas pode ser bastante simples, dependente apenas de preparação superficial	A preparação de algumas ligações adesivas pode necessitar de equipamentos mais complexos, como prensas hidráulicas, fornos e autoclaves
As ligações adesivas tendem a ser mais leves em relação a outras alternativas, uma vantagem quando se pretende reduzir o peso	Alguns adesivos estruturais, usados para condições de serviço específicas e a preparação de junta podem ter custos um pouco elevados
Ao serem mais leves, evitam o uso de outras ligações em conjunto, diminuindo o custo final da ligação	
As ligações adesivas podem permitir a união de materiais dissimilares	

2.1.1. Adesivos estruturais

Tendo em conta que estas ligações podem ser usadas para as mais variadas aplicações, cada uma com especificações distintas, tem de se adequar o adesivo utilizado às solicitações, cada uma com especificações a que as juntas estão sujeitas. Sendo assim, podem-se dividir os adesivos nas seguintes categorias: adesivos não-estruturais e adesivos estruturais. O fator que os distingue é a resistência ao corte que possuem. Ao contrário dos adesivos não-estruturais, os estruturais são adesivos baseados em composições monoméricas que sofrem polimerização,

ou cura, que oferecem capacidade de suportar esforços elevados, geralmente tensões de corte superiores a 6,9 MPa, para além de apresentar elevado módulo de elasticidade e tensão de cedência, e são capazes de manter essas propriedades ao longo do tempo útil de vida da ligação [4]. São usados quando as cargas são elevadas e a integridade da junta é mantida maioritariamente pelo adesivo [2, 5]. Dentro dos adesivos estruturais, existem também várias famílias, nomeadamente os epóxicos, os poliuretanos, os acrílicos, os cianocrilatos e os silicones, que são compostos de elementos diferentes, e conseqüentemente, com propriedades ligeiramente diferentes [6].

2.1.2. Esforços aplicados a ligações adesivas

Para além da sua classificação, outro aspeto importante a ter conta na escolha adequada do adesivo para garantir o bom desempenho da junta adesiva, é a identificação do tipo de esforços a que a ligação se encontra sujeita. Numa ligação adesiva consideram-se que podem estar presentes vários tipos de esforços: esforços de corte, tração, compressão, arrancamento e clivagem. Podem estar presentes apenas um esforço ou combinações de vários [7]. Os esforços de tração e de corte (Figura 1) ocorrem quando são aplicados esforços perpendiculares ao plano da junta adesiva. Os efeitos destes podem ser aumentados se as forças não forem distribuídas uniformemente ao longo da área de contacto da junta [7].

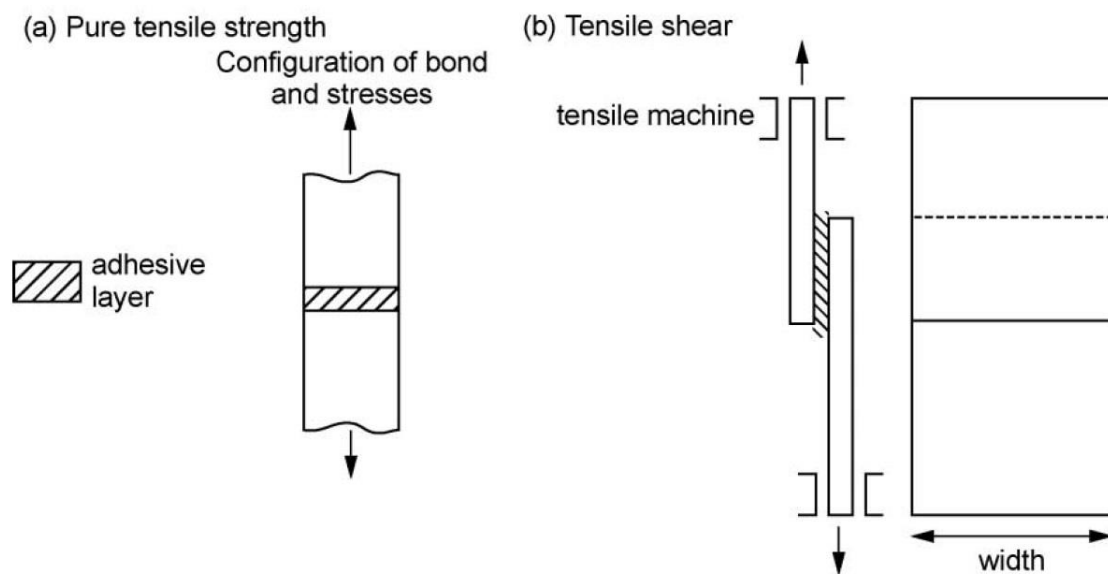


Figura 1-a) Esforço de tração e b) Esforço de corte [4]

Os esforços de corte são resultantes de forças que ocorrem no plano do adesivo, que geram deslizamento paralelo dos substratos. A vasta maioria dos adesivos apresenta boa resistência ao corte, tendo em conta que as tensões se distribuem por uma área e espessura maiores. O adesivo regista uma tensão de corte máxima nas extremidades da junta, como se pode ver na Figura 2 [4].

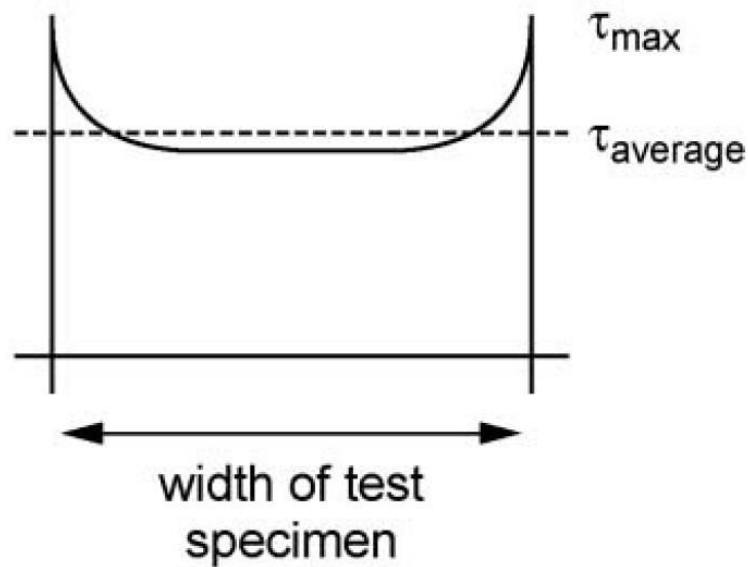


Figura 2-Distribuição de tensões em esforços de corte ao longo da espessura [4]

Nos esforços de compressão, o mecanismo de propagação é semelhante aos dos esforços de tração, mas ocorrem no sentido contrário [7]. São os esforços onde as probabilidades de ocorrer falha da junta são menores. Geralmente assume-se que adesivo segue o modelo de *Von Mises*, e as suas propriedades para a tração e compressão são iguais [5].

Os esforços de clivagem ocorrem quando não há uniformidade na distribuição das tensões, uma região no centro do provete onde se verifica um esforço de compressão e na extremidade onde atua a força ocorre um esforço de tensão, como se pode verificar na Figura 3, existindo em particular, concentração de tensões numa das linhas de limite de junta. Por sua vez, a área resistente limita-se a esta linha, que é diminuta, logo é dos esforços mais suscetíveis de quebrar uma ligação adesiva [4].

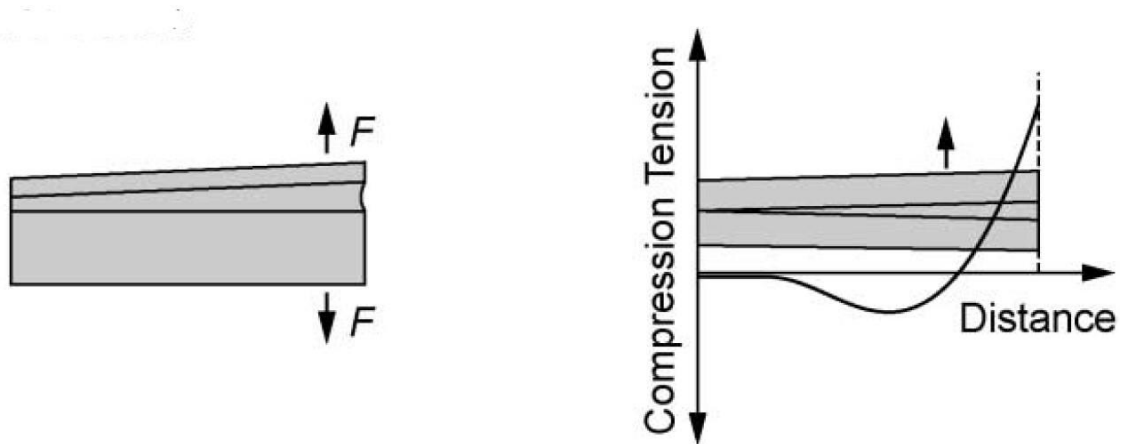


Figura 3-Representação esquemática do esforço de clivagem [4]

Quanto aos esforços de arrancamento (Figura 4), estes dão-se nas extremidades da área de contacto, assim como na clivagem, em provetes com um substrato mais rígido e outro mais flexível, onde ocorre o carregamento da junta [4].

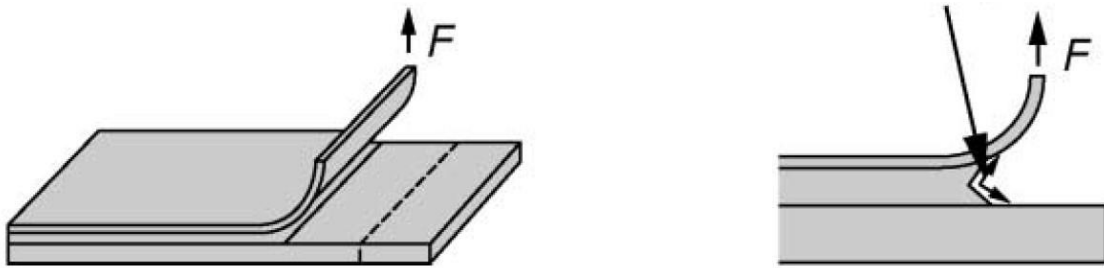


Figura 4-Representação esquemática do esforço de arrancamento [4]

2.1.3. Tipos de roturas possíveis nas ligações adesivas

Outro aspeto de destaque é o tipo de rotura que causa a falha da junta adesiva. Esta análise da rotura pode ajudar a perceber se houve má preparação da junta, ou se esta foi mal concebida, por exemplo, a escolha incorreta do elemento adesivo. A rotura pode acontecer de várias maneiras, pode ser:

- Uma rotura coesiva: ocorre completamente no interior da camada de adesivo, o que geralmente implica que a ligação entre o adesivo escolhido e os substratos foi bem realizada e as propriedades de cada material foram maximizadas [8] (Figura 5a);

- Uma rotura adesiva: ocorre na interface entre o aderente e o adesivo, devido a interações entre o campo de tensões na camada de adesivo e variações espaciais nas propriedades de fratura, ou devido a condições ambientais que causem a degradação da interface (Figura 6) [1, 8];

- Uma rotura mista: ocorre quando se verificam rotura adesiva e coesiva em simultâneo, e que pode ser resultado de uma preparação deficiente da junta na ligação dos substratos;

- Uma rotura pelo aderente: a junta permanece ligada, mas ocorre uma rotura no aderente, o que significa que houve uma boa escolha de adesivo, e também pode ser considerada de rotura coesiva (Figura 5b) [5].

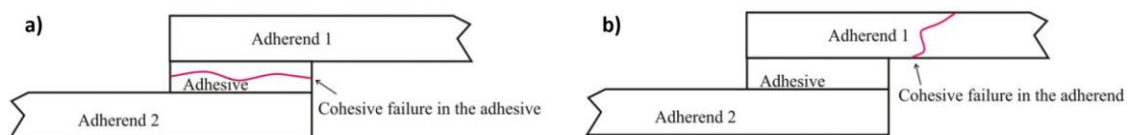


Figura 5-Representações esquemáticas de roturas coesivas: a) no adesivo e b) no aderente [5]

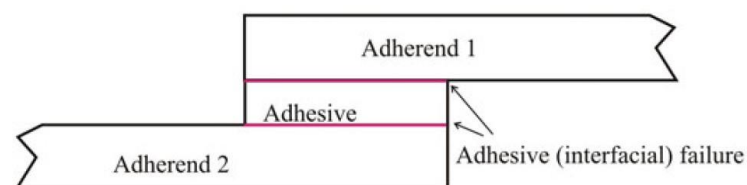


Figura 6-Representação esquemática de uma rotura adesiva [5]

2.1.4. Configurações de junta

Para uma junta adesiva em serviço, o caso ideal onde a sua vida seria otimizada, ocorreria se estivesse sujeita apenas a esforços de corte, e se a área resistente fosse o maior possível, são as condições para as quais oferece mais resistência, o que nem sempre é possível de ser alcançado, tendo em conta as restrições de espaço que podem ocorrer e em serviço as juntas poderão ser sujeitas as mais esforços para além do corte [5]. Para combater e minimizar estes problemas, os substratos podem ser colados de maneiras diferentes para maximizar estes dois parâmetros. Os substratos das juntas adesivas podem ser colados topo-a-topo, como ilustrado na Figura 7a. Este caso é o mais simples de ser produzido, no entanto não é eficaz, visto que não resistem a esforços de clivagem provocados por momentos fletores. Esta configuração pode ser melhorada, reduzindo os esforços de clivagem, ao criar uma das configurações restantes da Figura 7, uma junta com chanfro interior (Figura 7b), uma junta com sobreposição (Figura 7c) ou uma junta macho-fêmea (Figura 7d) [5, 7].

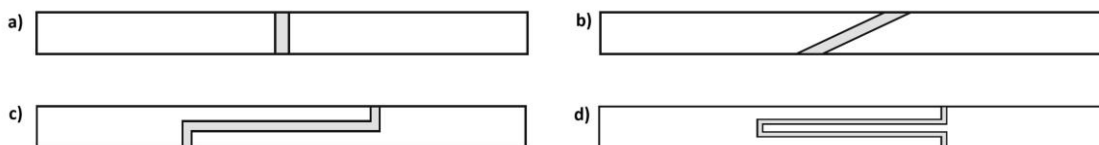


Figura 7-Juntas: a) topo-a-topo; b) com chanfro interior, c) com sobreposição e d) macho-fêmea [5, 7]

Outra configuração muito habitual, pela sua simplicidade e facilidade de construção é a junta de sobreposição simples (Figura 8a). No entanto, apesar de estarem maioritariamente sujeitas a solicitações de corte, estes não são colineares, o que levam ao aparecimento de esforços de arrancamento [5, 7]. Para aliviar estes esforços, foram desenvolvidas outras configurações de juntas de sobreposição, como a junta de ressalto (Figura 8b), que alinha novamente os esforços, e a junta de sobreposição dupla (Figura 8c), que diminui o momento fletor na junta, no entanto, acabam por se criar esforços de arrancamento internos, no substrato central [5, 7].

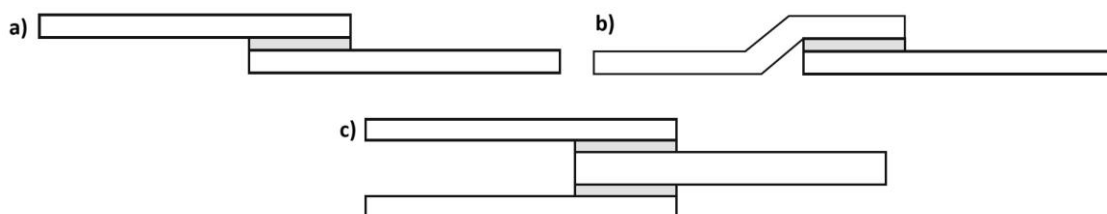


Figura 8-Juntas de sobreposição: a) simples, b) de ressalto (ou joggle lap) e c) dupla [5, 7]

Para além das configurações representadas acima, existem outras com uma placa extra adicionado como elemento de ligação entre os substratos, que as torna um pouco mais difíceis de produzir. Estas são designadas por cobre-juntas, estão ilustradas na Figura 9, e são juntas bastante usadas em reparações de estruturas aeronáuticas, segundo Kaye e Heller [9]. Na Figura 9a, está representada uma cobre-junta simples, que também é sujeita a esforços de arrancamento, visto que os esforços não são colineares. Para as cobre-juntas duplas, ilustradas na Figura 9b, as duas placas reduzem os momentos fletores e eliminam os esforços de arrancamento. Por fim, existem também outros exemplos de cobre-juntas duplas, com recuo

(Figura 9c), e com chanfro (Figura 9d), que são eficientes, mas de produção bastante complexa [5, 7].

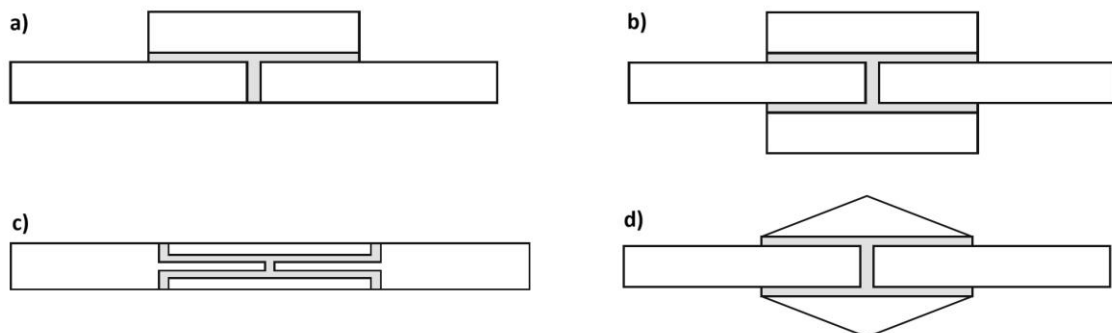


Figura 9-Cobre juntas: a) simples, b) dupla, c) dupla com recuo, d) dupla com chanfro [5, 7]

2.1.5. Ensaio mecânicos

Para seleção e validação de materiais, tanto os aderentes como os adesivos, bem como de geometrias de juntas adesivas, deve-se proceder a ensaios mecânicos para avaliar se as propriedades mínimas necessárias para o seu desempenho foram atingidas. Para tal, executam-se ensaios adequados para cada tipo de solicitação. Os esforços de tração podem ser testados em ensaios de adesivos em *bulk*, de acordo com a norma ISO 527-2 [10] com a forma de “osso de cão” (*dog-bone-shape*), em duas versões, uma comprida, mais adequada para adesivos rígidos (Figura 10a), e uma mais curta, para adesivos mais flexíveis (Figura 10b) [5].

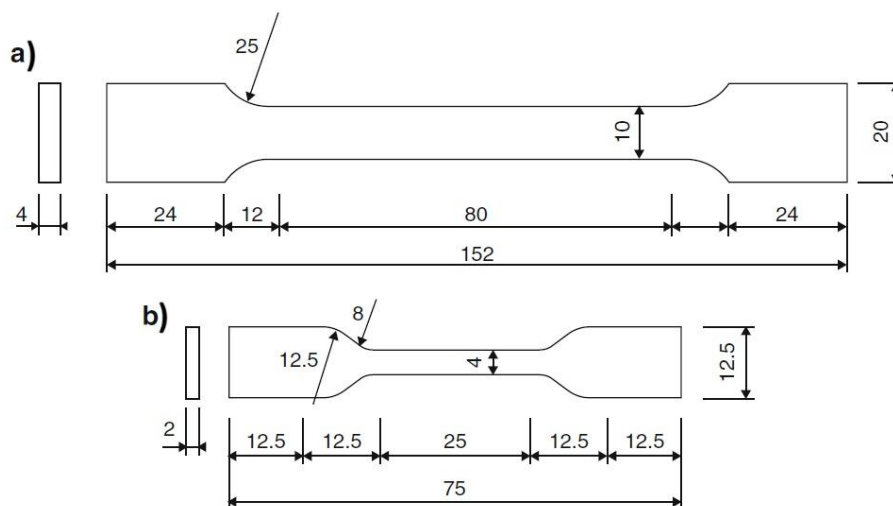


Figura 10-Representação esquemática dos provetes de ensaio à tração em *bulk* segundo a norma ISO 527-2: a) provete longo e b) provete curto [5]

Quanto aos esforços de compressão, podem ser realizados ensaios para adesivos em *bulk*, geralmente em provetes de forma paralelepípedica, de base retangular ou quadrada, segundo a norma francesa NF-T 51-101 [11] (Figura 11a), que recomenda uma base quadrada, ou segundo as normas ASTM D695 [12] (Figura 11b) ou ISO 604 [13], que usam uma base retangular [5]. A norma ISO 604 propõe provetes com dimensões $50 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ para obtenção do módulo de Young e outro com dimensões $10 \times 10 \times 4 \text{ mm}^3$ para obtenção da resistência. No

entanto, a norma ASTM D695 [14] também preconiza a realização do ensaio para provetes cilíndricos (Figura 12a). Gali *et al.* [15] também conseguiu realizar o ensaio com adesivos tubulares (Figura 12b), e obteve resultados satisfatórios para as propriedades [5]. As dimensões dos provetes para as restantes normas encontram-se também representadas na Figura 11 e Figura 12. No que diz respeito ao carregamento nestes ensaios, este é alcançado com recurso a duas placas em cada extremidade dos provetes, e a compressão ocorre a um ritmo uniforme. Por fim, a força máxima e o deslocamento são registados para a obtenção da curva tensão-deformação.

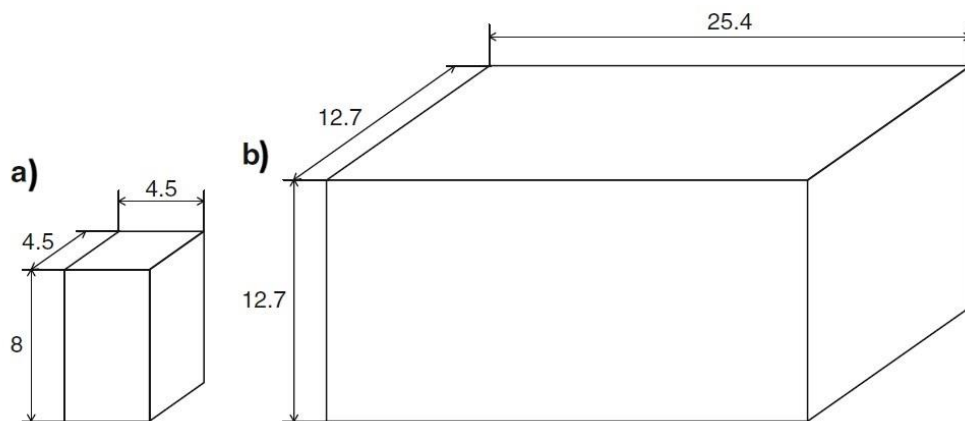


Figura 11-Representação esquemática dos provetes de ensaio à compressão em bulk segundo: a) segundo NF T 51-101 e b) ASTM D695 [5]

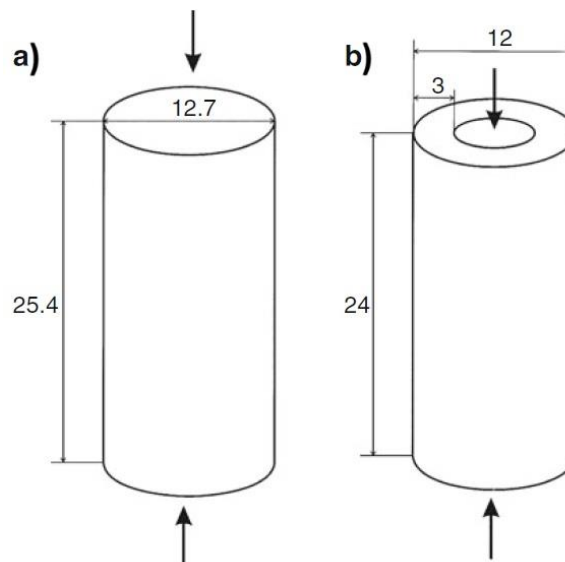


Figura 12-Representação esquemática dos provetes dos ensaios de compressão em bulk: a) segundo ASTM D695 b) segundo Gali et al. [5]

Para avaliar a resistência ao corte, podem ser usados vários ensaios, entre eles os ensaios de junta de sobreposição simples (ou *Single Lap Joint*, SLJ), de *Iosipescu*, *Notched Plate Shear Method* (ou *Arcan*), *napkin-ring test*, ou o ensaio *Thick-Adherent Shear Test* (TAST). Estes permitem obter a tensão de corte τ e o módulo de corte do adesivo. Os ensaios SLJ são dos ensaios mais simples de serem produzidos, possuem a geometria mais comum de aplicações

práticas, e podem ser realizados segundo as normas ASTM D1002 [16] e ISO 4587 [17]. O provete, representado na figura, é constituído por dois substratos de metal unidos. Este pode ser realizado em qualquer máquina de ensaios.

Os ensaios *Arcan* e *Iosipescu* são em tudo muito semelhantes, entre eles mudam apenas o tipo de carregamento e a geometria dos provetes [5]. O ensaio *Iosipescu* [18] (Figura 13) segue a norma ASTM D 5379 [19] para laminados compósitos, com desenvolvimentos alcançados por Adams e Walrath [20].

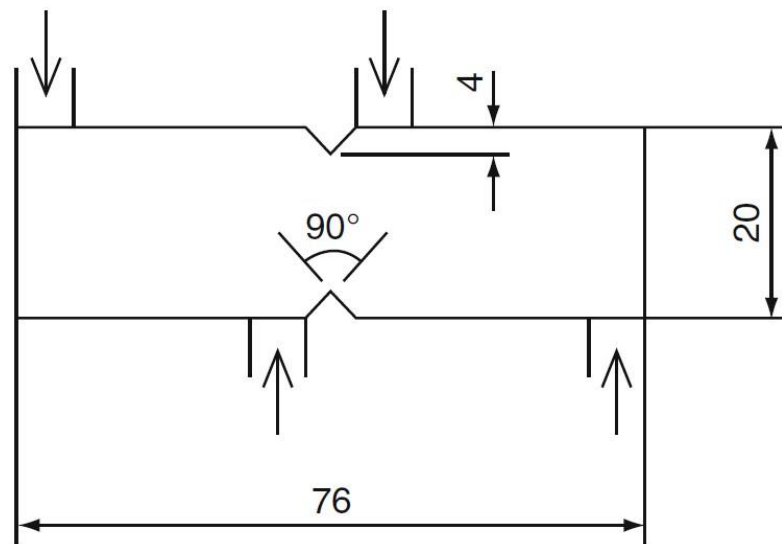


Figura 13-Provete de ensaio Iosipescu [5]

Os provetes usados neste ensaio são retangulares e apresentam um entalhe duplo em “V” no centro. A nível de dimensões, o provete tem aproximadamente 76 mm de largura, 20 mm de altura, e pelo menos 4 mm de espessura. Para espessuras inferiores do provete pode ocorrer flexão ao longo do eixo longitudinal, pelo que este ensaio não é indicado para adesivos muito flexíveis, como poliuretanos [5, 21]. O carregamento dá-se em 4 pontos, o que cria uma área onde ocorre corte uniforme, já que os momentos de flexão nas pontas dos provetes anulam-se [5]. O posicionamento do provete no dispositivo é garantido através das cunhas da máquina [21]. Existe concentração de tensões nas raízes dos entalhes, mas o cálculo do esforço de corte através da força e da área transversal ao corte resulta numa boa aproximação. Esta concentração de tensões nas raízes cria também outra desvantagem do ensaio, visto que para adesivos frágeis, pode ser suficiente para causar falhas prematuras e não ser possível obter a curva tensão-deformação completa [5]. A tensão de corte pode ser calculada através da Equação 1

$$\tau = \frac{P}{th} \quad \text{Eq. (1)}$$

onde P corresponde à carga aplicada, t à espessura do adesivo e h à distância entre entalhes. Por sua vez, o módulo ao corte pode ser obtido através da Equação 2

$$G = \frac{P}{th(\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})} \quad \text{Eq. (2)}$$

em que ε_{45} e ε_{-45} são as deformações lidas por extensómetros montados a 45° e a -45° respetivamente na zona dos entalhes. Recomenda-se o uso de métodos de medição sem contacto, como por exemplo, correlação digital, tendo em conta que o uso de extensómetros mecânicos altera o comportamento do adesivo [5]. A partir destes dados torna-se possível desenhar a curva tensão-deformação do adesivo [5]. Para este ensaio é necessária uma maquinaçã cuidada dos entalhes. Para além disso, este ensaio possui outras limitações, visto que é propenso a desalinhamentos, que por sua vez geram deformações de tensão e de flexão do provete [21]. No ensaio *Arcan* (Figura 14), também conhecido como borboleta devido à geometria do provete, desenvolvido por Voloshin e Arcan [22], os provetes têm dois entalhes em “V” a 90° em faces opostas, com raio de curvatura de 1,5 mm para minimizar a concentração de tensões nas raízes. Para além disso, cada extremidade do provete apresenta um furo, que permitem a distribuição uniforme do esforço de corte entre os entalhes. A distribuição do esforço de corte elimina o problema da instabilidade nas arestas do provete, presente no ensaio *Iosipescu*, e permite analisar provetes de menor espessura [5].

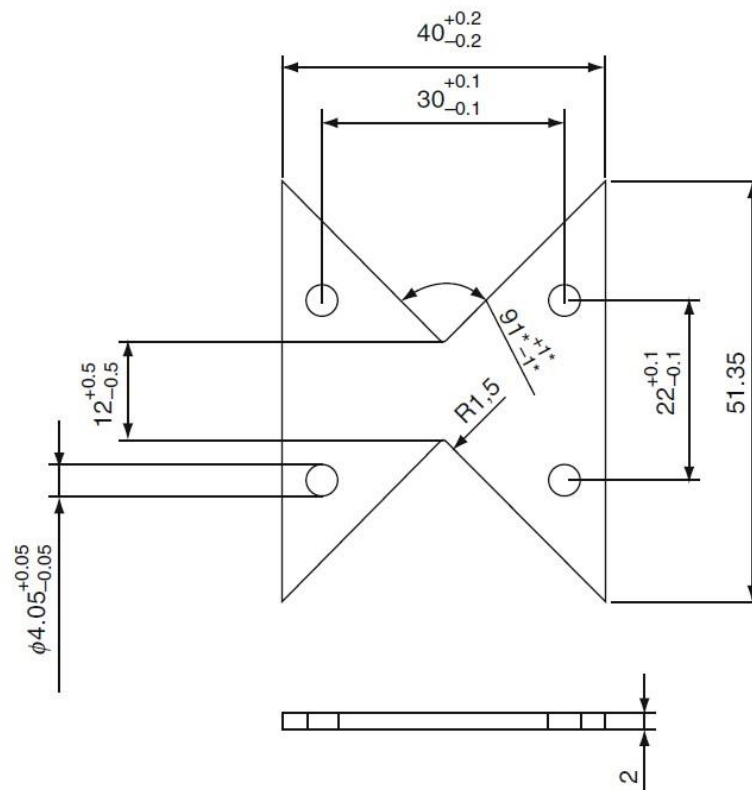


Figura 14-Provete de ensaio Arcan [5]

Neste teste, a tensão é obtida dividindo a carga a atuar pela área entre os dois entalhes, e o deslocamento é obtido com recurso a extensómetros colados ao provete com orientações de $+45^\circ$ e -45° em relação ao eixo de carregamento ou com métodos sem contacto [23]. Arcan *et al.* [24] propuseram um dispositivo de fixação com capacidade de produzir estados de deformação biaxial. Sendo um dispositivo compacto, permitiu também obter propriedades de

corte em todas as direções e pode ser usado para aplicar forças axiais e de corte [5]. Tanto para o ensaio *Arcan* como para o ensaio *Iosipescu*, existe o risco de ocorrência de falha prematura do provete, especialmente se este for feito de um material frágil, devido à concentração de tensões perto dos entalhes, o que causa a incapacidade da obtenção da curva tensão-deformação [5, 25]. Os ensaios referidos são usados para adesivos em *bulk*, mas podem também ser usados para testar juntas adesivas, de maneira bastante semelhante. Nestes casos o deslocamento do adesivo pode ser medido por métodos sem contacto ou por extensómetros [5, 25]. Torna-se necessário aplicar uma correção nos dispositivos que medem os deslocamentos, para isolar e obter apenas o deslocamento do adesivo, e para obter o valor de tensão no centro do provete, pode ser necessário o uso de uma análise de elementos finitos, tendo em conta que a distribuição de tensões não é uniforme ao longo do provete. Estes ensaios aplicados a juntas foram abordados por vários autores, desde Grabovac e Morris [26] e Wycherley *et al.* [27], que se focaram na adaptação do ensaio *Iosipescu* a juntas, e Weissberg e Arcan [28] e Cognard *et al.* [29], no ensaio *Arcan*.

O ensaio *napkin-ring*, representado na Figura 15, é um ensaio de junta topo-a-topo em torsão, avalia as propriedades ao corte nas juntas topo-a-topo tubulares, e está descrito nas normas ASTM E 229 [30], ISO 11003-1 [31] e DIN 54451 [32]. As propriedades obtidas no ensaio são semelhantes, tendo em conta que a tensão ao corte é proporcional ao raio dos substratos tubulares [5]. O maior desafio deste ensaio é a dificuldade de o produzir: em casos em que o adesivo tem baixa viscosidade, é mais difícil este manter-se em posição durante o fabrico dos provetes. Para um cálculo mais preciso das propriedades recomenda-se a remoção dos *fillets* interiores e exteriores. No entanto, é impossível remover o interior, vista a impossibilidade de acesso (Figura 15).

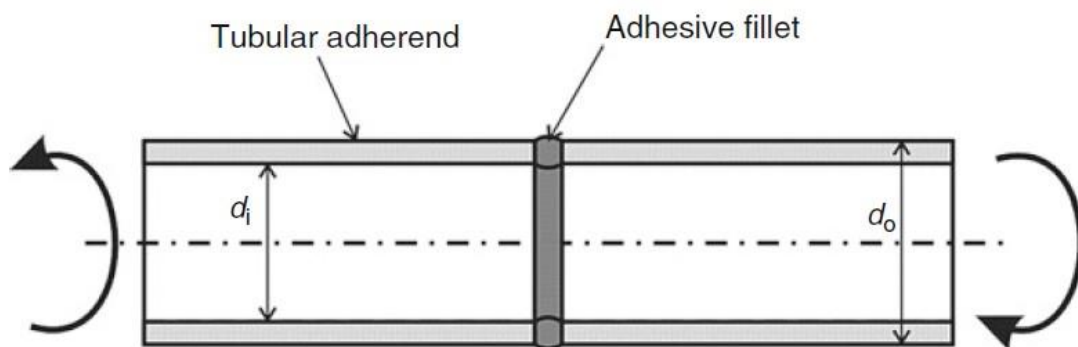


Figura 15-Representação esquemática do ensaio *napkin ring* [5]

O último ensaio ao corte é o ensaio TAST (Figura 16). Este é um ensaio vantajoso, visto que é fácil de fazer e realizar.

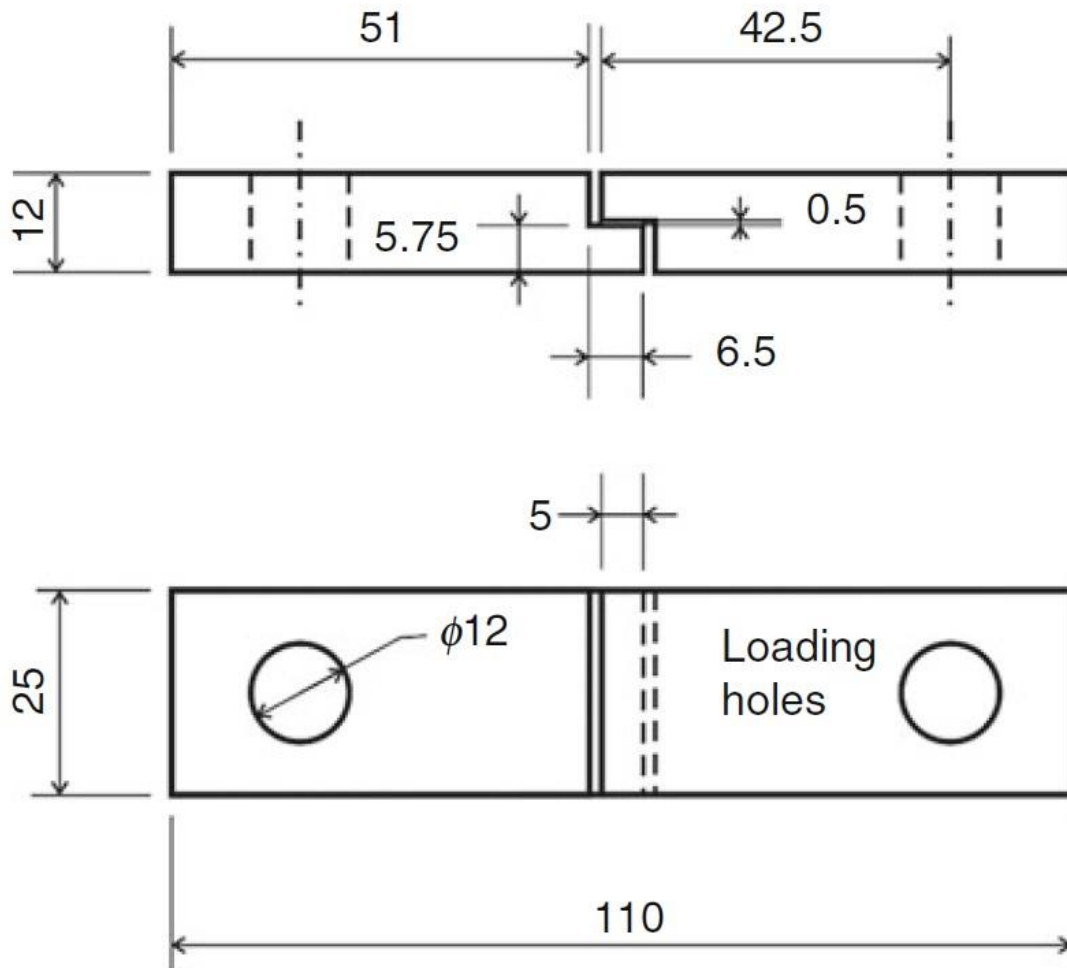


Figura 16-Representação esquemática do provete de ensaio TAST [5]

Este ensaio é passível de ser realizado de duas formas: pela norma usada nos EUA (ASTM D 3983), desenvolvida por Krieger [33], e pela norma europeia ISO 11003-2, desenvolvida por Althof e Neumann [34]. O único aspeto que as diferencia diz respeito à geometria e dimensões dos provetes. Os provetes usados na forma europeia têm metade do tamanho dos da americana. Em ambas as normas são usados extensómetros para medir deslocamentos muito pequenos ao longo da linha de adesão porém, os extensómetros medem tanto o deslocamento do adesivo, como o dos aderentes, e torna-se necessário aplicar uma correção ao valor obtido para os deslocamentos. Para a norma ISO, a correção deduz-se a partir de uma medição de um provete constituído apenas pelo substrato que serve como um “dummy”. A tensão de corte ao longo da linha central do provete prevê-se constante, no entanto, a distribuição da tensão de corte no provete inteiro não é uniforme, portanto é necessário assumir que os substratos estão sujeitos apenas a corte puro e obter a correção através das Equações 3, 4 e 5, desenvolvida por Vaughn [35]

$$d_{adesivo} = d_{transdutor} - 2 \times d_{aderendo} \quad \text{Eq. (3)}$$

$$2 \times d_{aderendo} = \frac{2 \times t_{aderendo} \times P}{G_{aderendo} \times l \times w} \quad \text{Eq. (4)}$$

$$2 \times t_{aderendo} = 3,8 \text{ mm} - t_{adesivo} \quad \text{Eq. (5)}$$

onde d representa a espessura, P representa a carga aplicada, G o módulo de elasticidade, w a espessura da junta (25 mm) e l o comprimento da sobreposição de junta (5 mm). Ainda assim, esta correção ignora a tensão axial a que o aderente também está sujeito. Apesar de se considerar como uma correção aceitável para adesivos com alguma espessura, a melhor correção pode ser obtida através de uma análise de elementos finitos [5]. Outros métodos aconselhados para obtenção dos valores do ensaio são os métodos óticos, como a correlação digital de imagem, utilizado por Pinto *et al.* [23], visto que permite obter diretamente o deslocamento dos adesivos sem causar interferência no comportamento da junta [5]. Como os restantes ensaios, o TAST também apresenta inconvenientes. Durante o ensaio ocorrem concentração de tensões, em particular nas arestas da área de sobreposição perto das interfaces, e que podem adulterar os resultados do ensaio. Lilleheden [36] e Cognard *et al.* [37] propuseram o uso de substratos com formas especiais para aliviar as concentrações, embora o seu fabrico eleve bastante os custos de maquinagem. Outra possibilidade seria o uso de fillets nas juntas para permitir determinar o valor máximo da curva tensão-deformação e evitar falhas prematuras da junta durante o ensaio [5]. Quanto à produção da junta, a norma ISO aconselha que as juntas sejam maquinadas de duas placas unidas por adesivo, o que traz desvantagens, sendo que o corte da região de fronteira da camada adesiva, que tem um elevada concentrações pode levar á falha prematura da junta. A norma aconselha também uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min. Recomenda-se que a maquinagem dos substratos para obtenção das medidas corretas, presentes na Figura 16, seja realizada em primeiro lugar antes da sua colagem [5, 35]. Para garantir um alinhamento e posicionamento correto das juntas e para controlar a sobreposição e o *fillet*, utiliza-se um calço de aço no adesivo antes da colagem dos substratos no *gabarit* desenhado especificamente para o ensaio [5].

No que concerne ao arrancamento, usam-se normalmente os ensaios de junta tipo “T” (T-peel), ensaios a 180°, rolete flutuante (*Floating Roller Peel Test*), e *Climbing Drum Test*, sendo estes três últimos destinados especificamente para ligações substrato rígido e substrato flexível. O ensaio de arrancamento a 180° é executado segundo a norma ASTM D903 [38], onde um dos substratos é flexível o suficiente para permitir uma dobra e conseqüente ângulo de arrancamento de 180° e é carregado em cada extremidade do provete, como se pode visualizar na Figura 17. O ensaio T-peel pode ser realizado segundo a norma ASTM D1876 [39] e o provete encontra-se ilustrado na Figura 18.

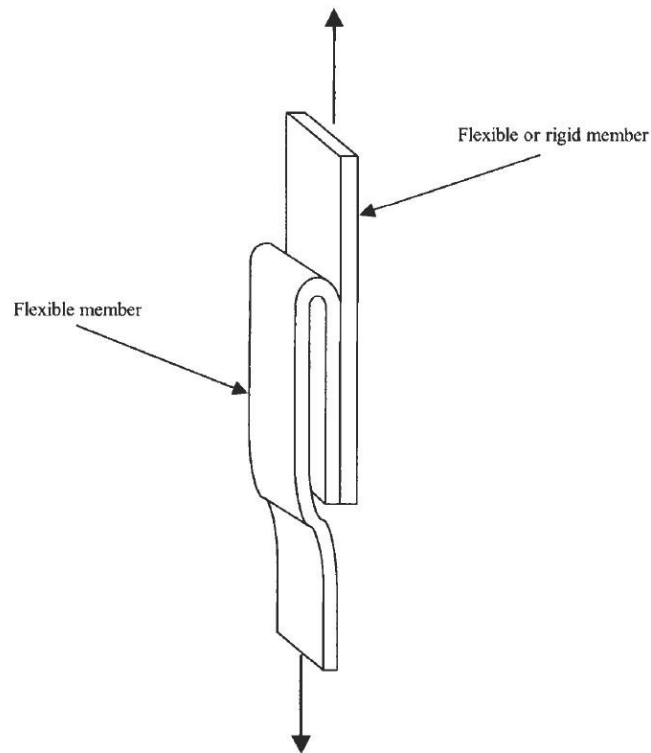


Figura 17-Representação esquemática do ensaio a 180 graus [8]

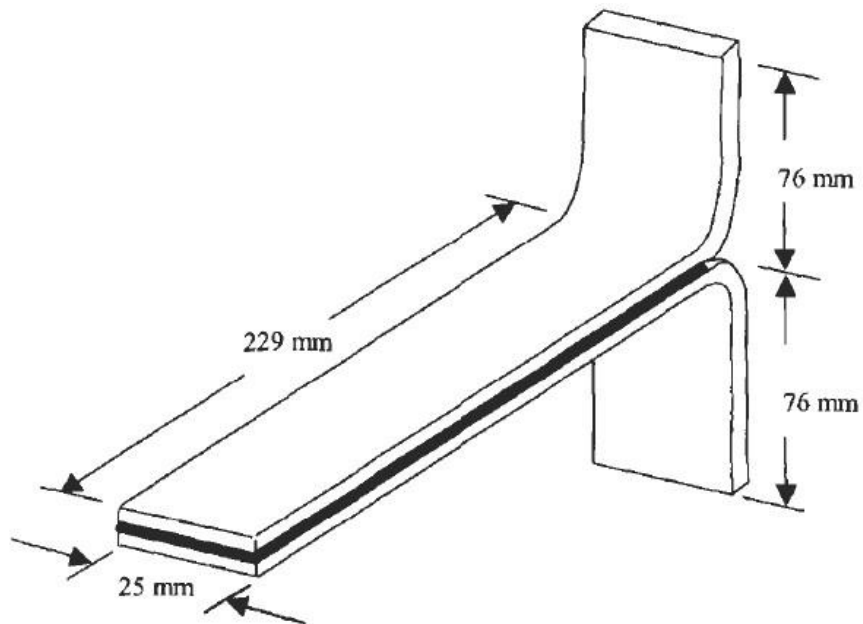


Figura 18-Representação esquemática do ensaio T peel [8]

O ensaio de rolete flutuante (Figura 19) pode ser descrito pela norma ASTM D3167 [40], e avalia o arrancamento em provetes com um substrato rígido e outro mais flexível, este último enrolado num cilindro com 25 mm de diâmetro, enquanto é sujeito a um esforço de tensão. Por sua vez o substrato rígido desloca-se horizontalmente ao longo do suporte durante o ensaio. Estas condições permitem manter um ângulo de arrancamento constante na duração do ensaio [8]. Por fim, existe também o *Climbing Drum Test*, representado na Figura 20, e que

está descrito na norma ASTM D1781 [41]. Este ensaio pode ser usado para juntas adesivas com um substrato mais flexível e outro mais rígido e para estruturas em *sandwich*. Consiste num rolo com flanges nas extremidades, que se encontram ligadas a duas fitas que por sua vez se encontram ligadas ao mecanismo de carregamento da máquina de ensaio. Um dos substratos é ligado ao rolo, que sobe aquando do carregamento, que faz com que o rolo suba e crie o esforço de arrancamento no provete [8].

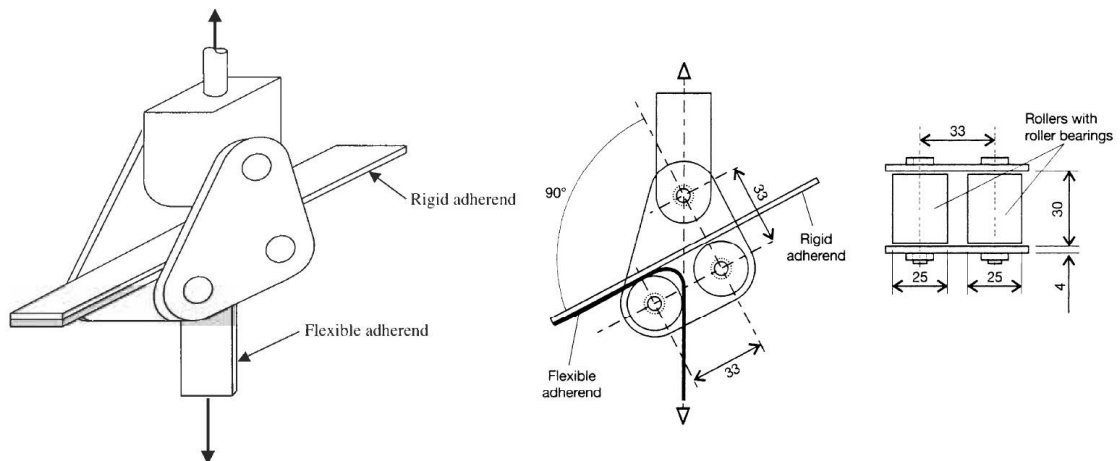


Figura 19-Representação esquemática do ensaio de rolete flutuante (floating roller) [4, 8]

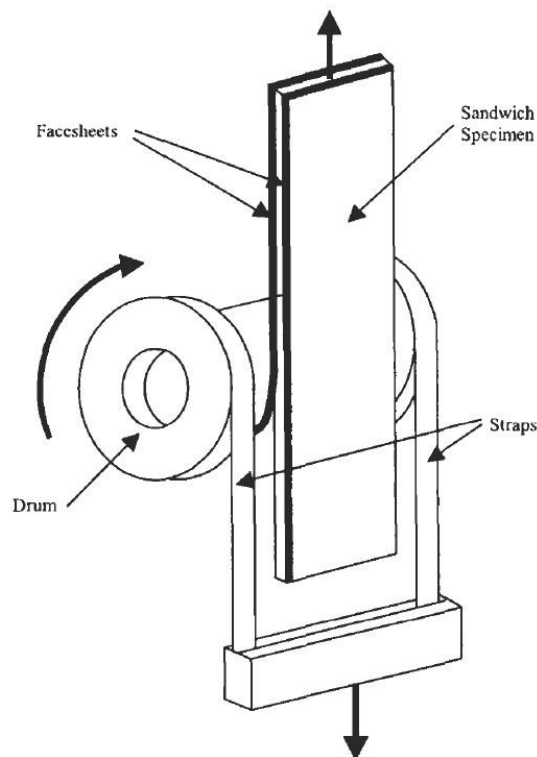


Figura 20-Representação esquemática do ensaio Climbing Drum Test [8]

Em relação ao esforço de clivagem, podem ser realizados vários ensaios para a sua caracterização, sendo que para todos eles, os provetes são compostos por substratos rígidos, com ângulo de arrancamento de 0°. Os ensaios são realizados de acordo com as normas ASTM D1062 [42], ASTM D3433 [43], ASTM D3807 [44] e ASTM D5041 [45]. Para todos estes ensaios

obtem-se a força máxima necessária por espessura para causar a falha da junta. O ensaio ASTM D1062 usa a configuração representada na Figura 21, é constituído por dois substratos de metal com forma igual e o carregamento é efetuado nos furos de 4,5 mm de diâmetro, criados nos substratos, que cria uma combinação de esforços de tensão e de flexão. O ensaio ASTM D3433 é constituído por um provete constituído por dois substratos retangulares longos e esguios, colados apenas numa porção do seu comprimento, deixando uma extremidade não colada, onde se efetua o carregamento, através de furos nos substratos, como se pode observar na Figura 22 [8].

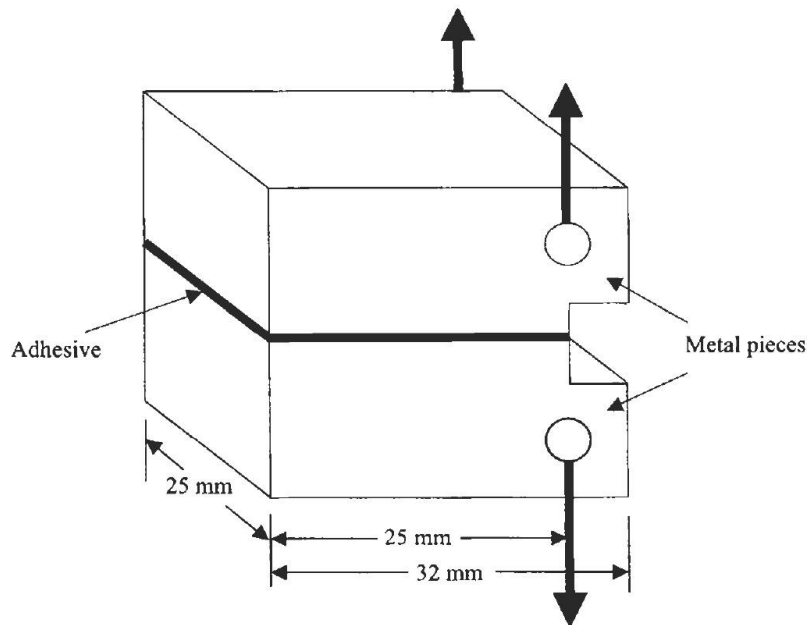


Figura 21-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D1062 [8]

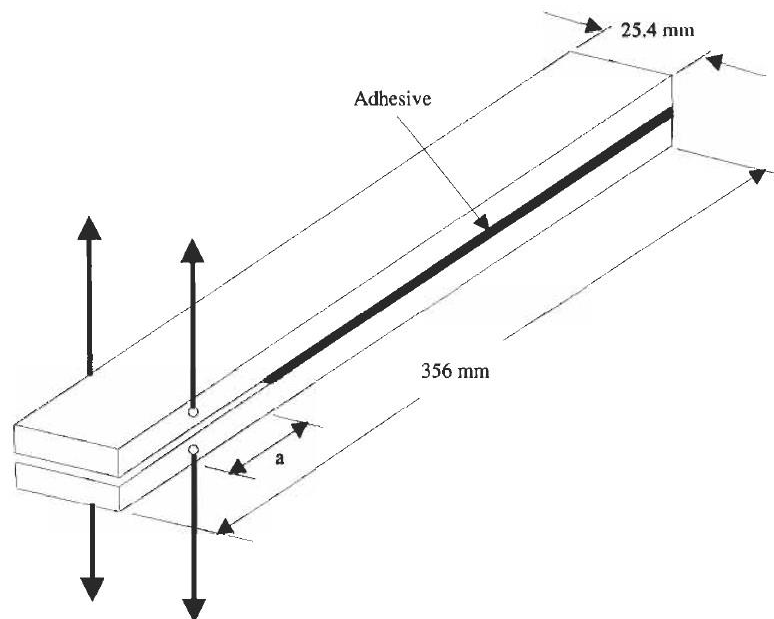


Figura 22-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D3433 [8]

O ensaio ASTM D3807 utiliza um provete mais comprido do género de uma viga, assim como que para a norma ASTM D3433, composto por dois substratos retangulares esguios colados ao longo de parte do seu comprimento, e os substratos são semirrígidos, para permitirem flexão considerável antes de atingir a falha. O carregamento do provete realiza-se através de dois fios enrolados nas pontas livres dos substratos, como se encontra representado na Figura 23. Para a norma ASTM D5041, os provetes são formados por duas placas coladas em parte do seu comprimento e é forçada uma cunha na extremidade livre para replicar o esforço de clivagem (Figura 24) [8].

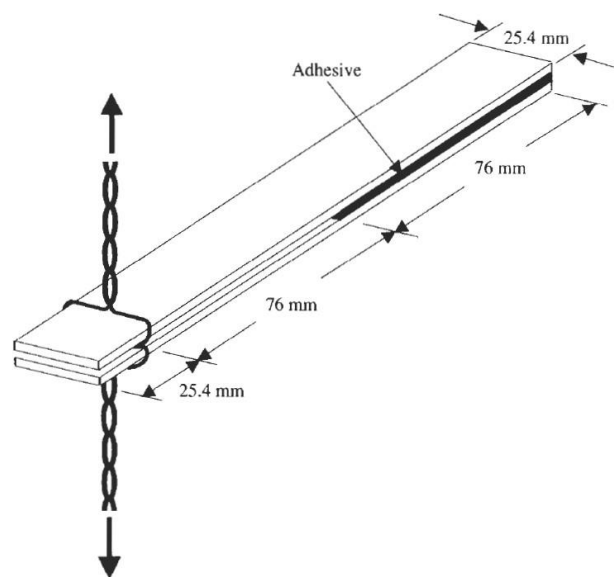


Figura 23-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D3807 [8]

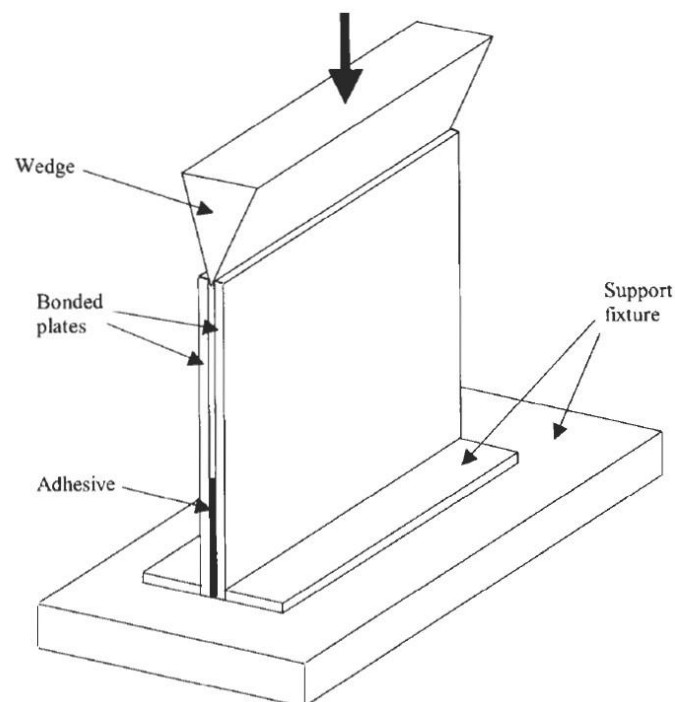


Figura 24-Representação esquemática do ensaio de clivagem ASTM D5041 [8]

2.1.6. Aplicações

O uso de juntas adesivas não é recente e o seu uso a nível industrial pode ser traçado até ao século XVIII, quando foi patenteado o primeiro adesivo no Reino Unido, em 1754. Posteriormente muitas outras patentes de adesivos foram criadas, sobretudo de origem animal e vegetal. Nesta altura, os adesivos eram utilizados maioritariamente para colar madeiras ou produtos de papel [2]. No início do século XX, a indústria da produção de adesivos evoluiu, através do controlo da qualidade e otimização dos processos de obtenção dos mesmos, permitindo a criação de adesivos mais eficazes. Passaram também a ser publicados nesta altura trabalhos com todos os conhecimentos relacionados com os adesivos e sua produção, e passaram a ser implementados testes de qualidade [2]. Foi também nesta época que sucedeu uma nova revolução nos adesivos, na medida em que foram desenvolvidos os adesivos sintéticos, começando pelo desenvolvimento do fenol-formaldeído, até ao epóxido e poliimididas, entre outros. Estes novos adesivos trouxeram um vasto leque de propriedades mecânicas distintas entre eles, versatilidade e facilidade de aplicação, cimentando a globalização do seu uso na indústria. Na atualidade, depois deste crescimento e amadurecimento, as juntas adesivas estão presentes numa diversidade muito grande de indústrias, desde a indústria aeroespacial, onde podem ser usados como como ligações estruturais capazes de transferir esforços entre membros da estrutura ou como elementos que protegem da corrosão (Figura 25), à indústria naval, onde são usados como substitutos de outros métodos de ligação, como por exemplo, entre o casco e o convés de navios ou entre anteparas e o casco ou convés, à indústria automóvel, primeiro usado para a colagem dos vidros e para-brisas e como selante, e atualmente para conceder mais rigidez à estrutura dos carros (Figura 26) e à indústria do calçado, na ligação entre o forro e a sola dos sapatos e outros. Encontram-se também presentes na indústria da eletrónica, para estabelecer a ligação de vários materiais dissimilares, na indústria de mobiliário, papel e embalagem (Figura 27) [4, 6, 8, 46-48].

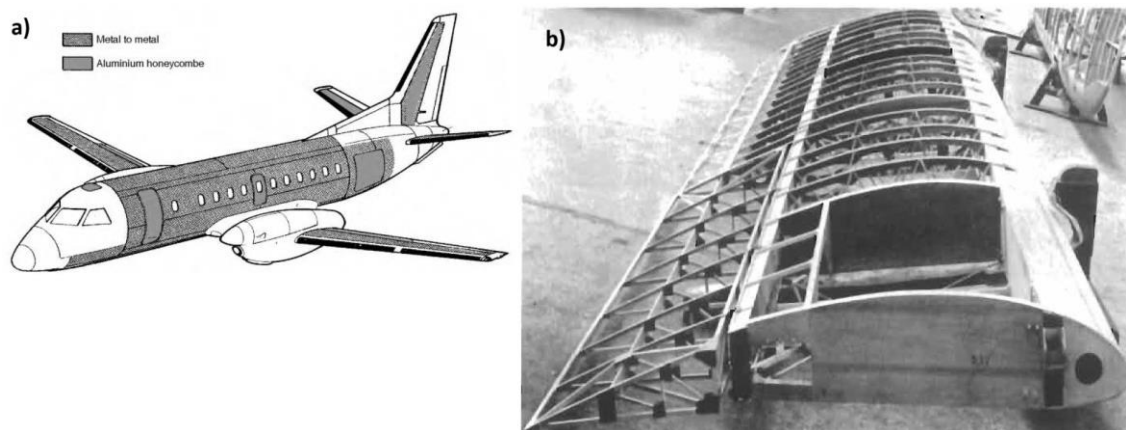


Figura 25-Aplicações na indústria aeroespacial: a) ligações adesivas num Saab 340 (a cinzento) [46] e b) ligações adesivas que compõem uma asa de um bombardeiro [8]

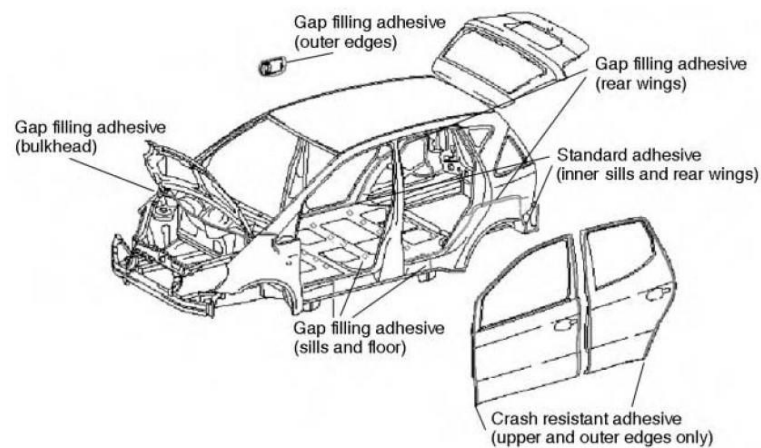


Figura 26-Uso de adesivos na indústria automóvel, para preenchimento de folgas, e estrutural [46]

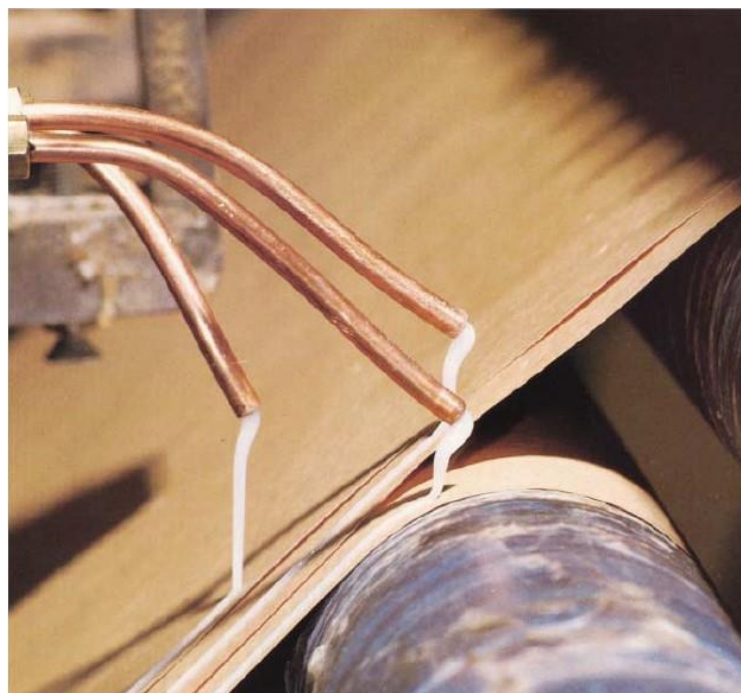


Figura 27-Aplicação de adesivo para a criação de embalagens de papel [4]

2.2. Ensaios de Fratura

Neste subcapítulo é feita uma abordagem dos conceitos da mecânica da fratura, dos seus fundamentos e objetivo e das abordagens clássicas à mecânica da fratura. Realiza-se também uma análise mais detalhada como método para obtenção da tenacidade à fratura, do integral J, os modos pelos quais pode ocorrer uma fratura, nomeadamente o modo I, II e misto (ou III). Por fim, foi feito um resumo dos artigos mais recentes dedicados ao tema, e expostos no estado da arte.

2.2.1. Fundamentos da mecânica da fratura

A mecânica da fratura é uma ferramenta essencial para perceber o funcionamento dos mecanismos de fratura e prevenção de falhas em estruturas e componentes [6]. Estas fraturas acontecem em juntas adesivas quando uma falha ou delaminação ocorrem [49]. Foi desenvolvida para colmatar as insuficiências de outros métodos de análise do design de estruturas, como a mecânica dos meios contínuos, que não é capaz de prever uma solução para pontos estruturais onde se verifiquem valores infinitos de tensões, visto que considera um material como um elemento contínuo, isento de defeitos. Estes pontos ocorrem em discontinuidades, como defeitos que possam existir num material ou em dois materiais com cantos reentrantes (Figura 28) [50].

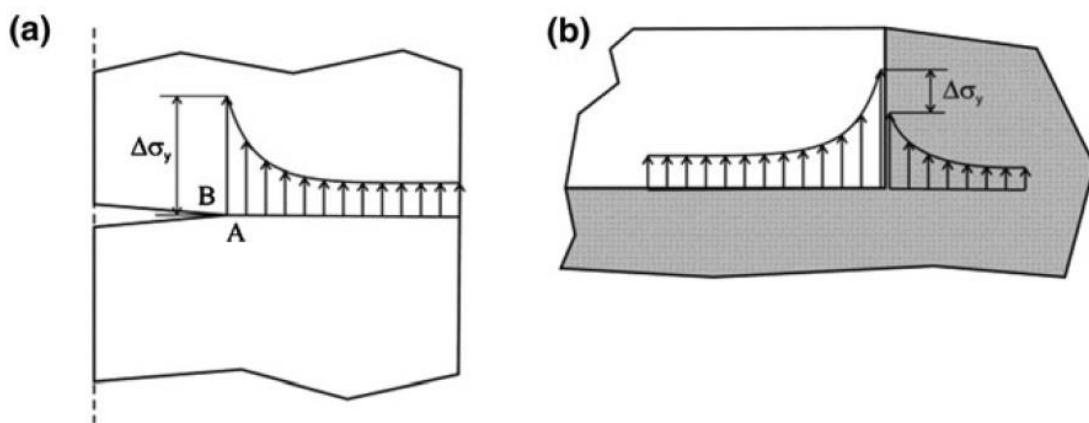


Figura 28-Descontinuidades nos materiais: a) ponta de uma fratura ou b) cantos reentrantes [50]

A mecânica da fratura avalia as fraturas ocorridas nos materiais provenientes das discontinuidades acima referidas e a sua severidade, o tipo de fratura que pode ocorrer e procura quantificar as forças responsáveis pelas fraturas e fazer a sua comparação com a resistência dos materiais ao seu crescimento (K_c) [6, 8, 51].

2.2.2. Abordagens clássicas

Existem várias abordagens de prever a vida de uma ligação adesiva, e neste subcapítulo, são referenciados os métodos mais clássicos. Um dos métodos clássicos da mecânica da fratura é o *Strain Energy Release Rate* (SERR). Foi desenvolvido inicialmente por Griffith, que postula que uma fratura crítica ocorre quando o mecanismo de fratura ou taxa de libertação de energia (SERR ou G), aplicado atinge o valor crítico de SERR para a fratura se propagar (G_c). O SERR representa a quantidade de energia aplicada por unidade de área imposta pelas condições de carregamento capaz de propagar uma fenda no material, e pode ser expresso pela Equação 6

$$G = \frac{\partial(W - U)}{\partial A} \quad \text{Eq. (6)}$$

onde W representa o trabalho externo aplicado, U a energia potencial elástica e A a área de fratura. A fratura ocorre quando G atinge o valor da fratura de energia crítica, G_c . Para um caso geral em que a carga e o deslocamento são lineares, o SERR pode ser definido pela Equação 7

$$G = \frac{1}{2} P^2 \frac{dC}{dA} \quad \text{Eq. (7)}$$

onde P representa a carga aplicada, C representa a flexibilidade do provete e A a área de fratura [6]. Deste método, Irwin [52] desenvolveu outro, a que designou de *Stress Intensity Factor*, ou SIF. Este é definido pela Equação 8

$$K = Y \sigma_R \sqrt{\pi a} \quad \text{Eq. (8)}$$

onde K representa o SIF, Y representa uma constante adimensional que depende da geometria e da distribuição das cargas, σ_R a carga aplicada remotamente e a o comprimento de fenda, e que a propagação da fratura ocorre quando o fator de intensidade K atinge o fator crítico K_C , que pode ser definido pela Equação 9

$$K_C = \sigma_u \sqrt{\pi a} \quad \text{Eq. (9)}$$

onde σ_u representa a resistência à fratura do material. Irwin provou também a relação intrínseca entre o SERR e o K , em que [54]

$$G = \frac{K^2}{E} \quad \text{Eq. (10)}$$

Outro método clássico de caracterização dos parâmetros de fraturas é o *Virtual Crack Closure Technique* (VCCT), desenvolvido por Rybicki e Kanninen [53]. Para este método, G é determinado através do cálculo da energia por unidade de área necessária para fechar um incremento pequeno de comprimento de fratura. Em modo II, o VCCT pode ser formulado pela Equação 11

$$G_{II} = \frac{1}{2b \cdot \Delta a} F_y \cdot \Delta v \quad \text{Eq. (11)}$$

onde b representa a largura do provete, Δa indica o tamanho do incremento do comprimento de fratura, F_y a força aplicada no nó intacto e Δv o deslocamento nodal [8].

2.2.3. Integral J

O integral J é um método energético, aplicável a problemas de fratura inelástica, que permite obter um parâmetro de fratura independente do caminho de fratura, através do cálculo da energia necessária para ultrapassar a resistência de um material. Este método foi desenvolvido por Rice (1968) [8], e foi criado com o objetivo de resolver o problema de caracterização de concentração de tensões à volta de entalhes e de fendas, em particular, para materiais elásticos com comportamento não linear [8, 54, 55]. O integral J pode ser obtido pela Equação 12

$$J = \int_{\Gamma} \left(W \cdot dy - T \cdot \frac{du}{dx} ds \right) \quad \text{Eq. (12)}$$

onde W representa a densidade de energia de deformação, $T = n \cdot \sigma$ e representa um vetor de tração, n é um vetor unitário perpendicular ao contorno, σ é o tensor de tensões e ds representa um incremento à volta do contorno Γ [8].

2.2.4. Modo I

O modo I (Figura 29) é o modo em que a fratura ocorre em tração, e é o método mais crítico de propagação de fenda, visto que as juntas adesivas têm fraca resistência ao arrancamento.

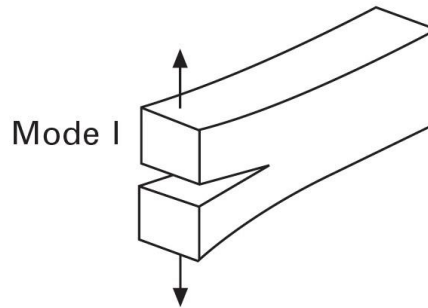


Figura 29-Modo I

Para avaliação da ligação à fratura em modo I, podem ser realizados dois ensaios: os ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) (Figura 30 e Figura 31) e os ensaios *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB) (Figura 32 e Figura 33). Estes testes são usados para a determinação da taxa de libertação de energia em modo I (G_{Ic}). Os ensaios DCB e TDCB podem ser realizados por duas normas, para um ciclo de repetição de iniciação de fratura e repouso com recurso à norma ASTM D3433 [43] ou para uma iniciação e propagação quasi-estática, através da norma ISO 25217 [56]. Os ensaios consistem em 2 substratos (*cantilevers*) retangulares, unidos por uma camada fina de adesivo, ao longo de todo o seu comprimento e com uma inserção de uma película de PTFE na sua extremidade, aquando da colagem dos substratos, e com exceção de uma zona numa das extremidades do provete, onde se encontra uma região sem adesivo para a norma ASTM D 3433. As cargas são aplicadas nos ensaios através dos furos na extremidade não colada do provete ou com recurso a blocos de carga ou *piano hinged* (Figura 31).

Pela norma ASTM D3433 (Figura 30) os substratos têm 356 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e 12,7 mm de altura. A largura b , a altura e a espessura do adesivo são medidas em duas posições, a 125 mm e a 227 mm do fim do pino. O ensaio termina quando o operador deteta o começo do crescimento da fratura. Do ensaio retiram-se as cargas máxima ($P_{máx}$) e mínima ($P_{mín}$) e o comprimento de fratura a , que são usados para a determinação das taxas de libertação máxima (G_{Ic}) e mínima (G_{Ia}). As taxas de libertação são calculadas através das Equações 13 e 14

$$G_{Ic} = \frac{[4P_{máx}^2][3a^2 + h^2]}{EB^2h^3} \quad \text{Eq. (13)}$$

$$G_{Ia} = \frac{[4P_{mín}^2][3a^2 + h^2]}{EB^2h^3} \quad \text{Eq. (14)}$$

onde E representa o módulo de Young do substrato, B a largura do provete, h a altura do substrato e a o comprimento de fratura.

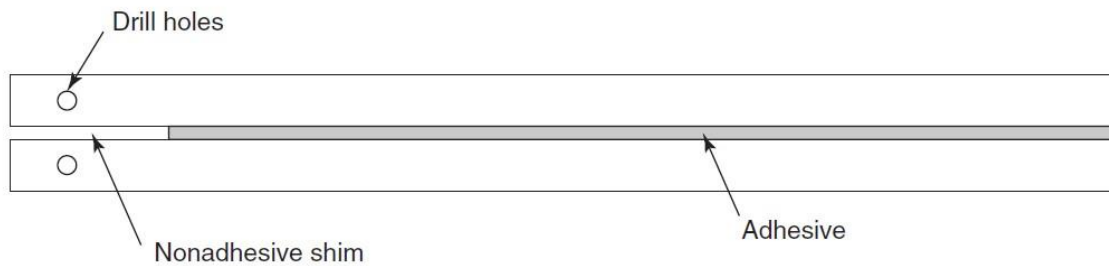


Figura 30-Ensaio DCB (Norma ASTM D3433) [9]

Seguindo a norma ISO 25217, a altura h dos substratos é medida antes da colagem, em três pontos, a 30 mm de cada extremidade do provete e no centro, e em seguida calcula-se o seu valor médio. A espessura total da junta h_j determina-se depois de colados os substratos, medido novamente nos mesmos pontos do provete. A espessura do adesivo h_a pode ser determinada através da Equação 15

$$h_a = h_j - 2h \quad \text{Eq. (15)}$$

A espessura B da junta é medida também nos mesmos pontos em que são medidas as alturas depois da remoção do excesso de adesivo. Para esta norma tanto os furos no substrato como os blocos de carga ou as *piano hinges* podem ser usados para efetuar o carregamento no provete. Por esta norma o ensaio é realizado a deslocamento constante, até se verificar um crescimento de fratura ligeiramente à frente da película de PTFE, que corresponde ao período de pré-fratura. Em seguida o provete é descarregado e carregado novamente a deslocamento constante até a fratura se propagar até 60 mm da ponta da pré-fratura.

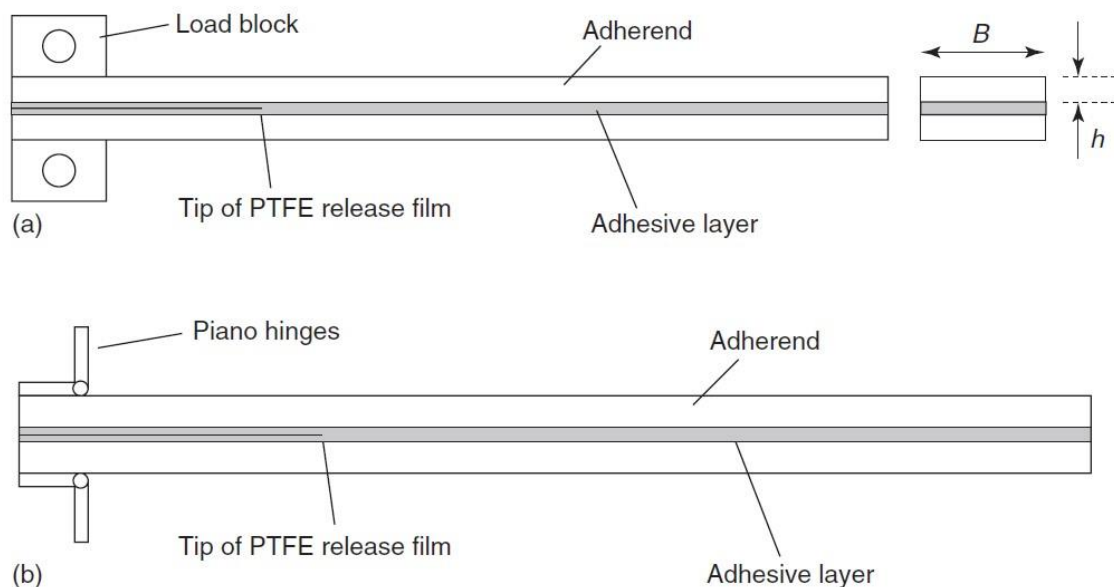


Figura 31-Ensaio DCB (Norma ISO 25217) [9]

Os ensaios TDCB são realizados de maneira que a relação entre flexibilidade C , e o comprimento de fenda a à medida que a aumenta, se mantenha, ou seja, que dC/dA seja constante. Para estes ensaios, o carregamento efetua-se nos furos do provete na sua extremidade livre. Este ensaios podem ser realizados também pelas normas ASTM D3433 [43] e ISO 25217 [56].

Quanto à norma ASTM D 3433 (Figura 32), esta especifica as dimensões dos substratos a usar, e os parâmetros a seguir são os mesmos que para os ensaios DCB. As juntas são preparadas de maneira a obter um fator de geometria m , que pode ser calculado pela Equação 16

$$m = \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \quad \text{Eq. (16)}$$

e daqui podem se calcular G_{Ic} e G_{Ia} através das Equações 17 e 18

$$G_{Ic} = \frac{4P_{max}^2 m}{EB^2} \quad \text{Eq. (17)}$$

$$G_{Ia} = \frac{4P_{min}^2 m}{EB^2} \quad \text{Eq. (18)}$$

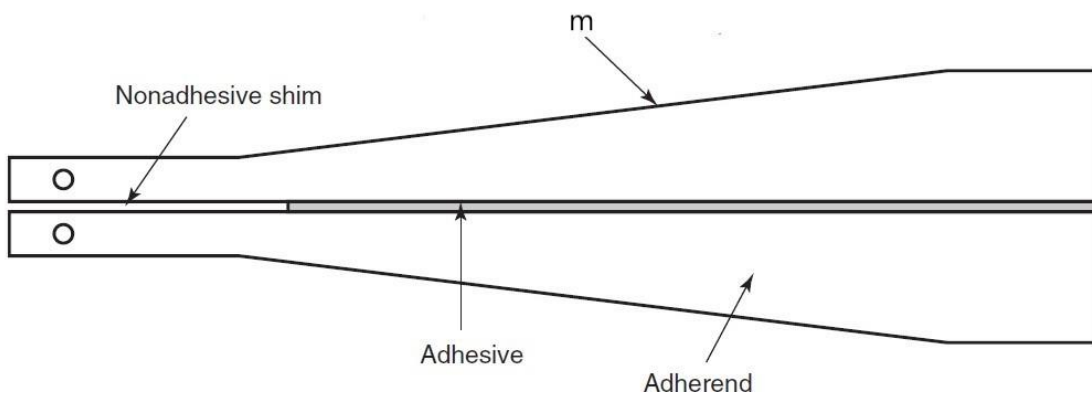


Figura 32-Ensaio TDCB (norma ASTM D 3433) [9]

Assim como para o ensaio DCB, a norma ISO 25217 [57] não impõe dimensões do provete para o ensaio TDCB (Figura 33), apenas aconselha a uma variação de m de $\pm 3\%$.

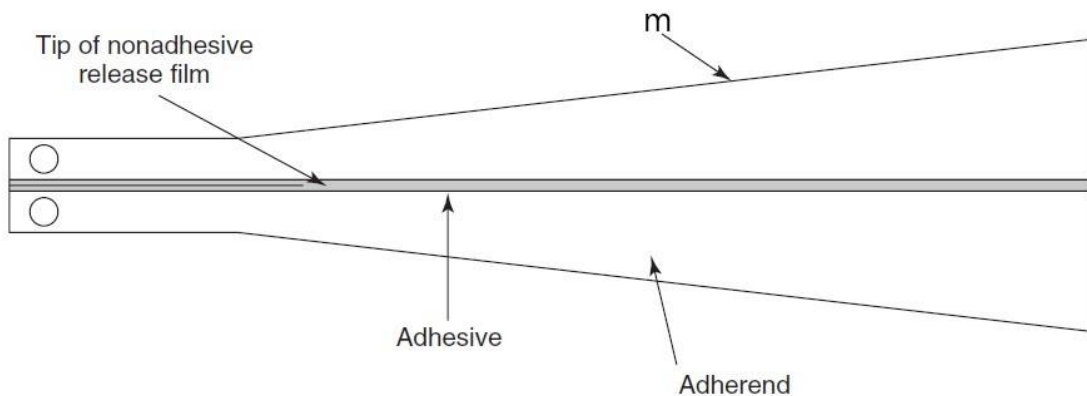


Figura 33-Ensaio TDCB (norma ISO 25217) [9]

2.2.5. Modo II

A fratura em modo II, ou fratura em corte, ocorre em sollicitações de corte puro. Propaga-se de forma mais imprevisível, frequentemente segue um mecanismo de microfatura. Para além disso, os provetes não abrem, portanto torna-se mais complicada a medição da fenda nos ensaios (Figura 34).

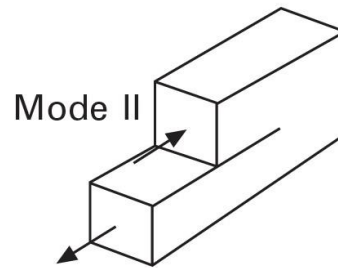


Figura 34-Modo II

Para determinar a fratura em modo II, usam-se outros dois ensaios diferentes: os ensaios *End-Loaded Split* (ELS), que vai ser abordado em detalhe no Subcapítulo 2.3, e os ensaios *End-Notched Flexure* (ENF) e *Four Point End-Notched Flexure* (4ENF), com o objetivo de determinar a resistência crítica à fratura em modo II G_{IIc} [56].

Os ensaios ENF podem ser realizados segundo as normas JIS 7086 [56] e AECMA prEN 6034 [56], que foram adaptadas para juntas adesivas. Consiste numa junta simplesmente apoiada nas extremidades, carregada a meio vão, com uma pré-fratura numa das extremidades, como se pode observar na Figura 35. O ensaio 4ENF é bastante semelhante ao ENF, apenas varia o mecanismo de carga do ensaio, neste ensaio passa a ser efetuado por dois cilindros de carregamento, demonstrados na Figura 36, unidos a um prato que pode rodar livremente para permitir uma aplicação uniforme da carga e propagação da fratura a um deslocamento constante, que origina um crescimento estável da fratura. Ambos os ensaios padecem de complicações, devido a uma maior complexidade da configuração dos ensaios, torna-se mais complicada a visualização do crescimento da fratura já que esta não abre enquanto cresce, e os métodos de redução usados para determinação são dependentes do comprimento de fratura.

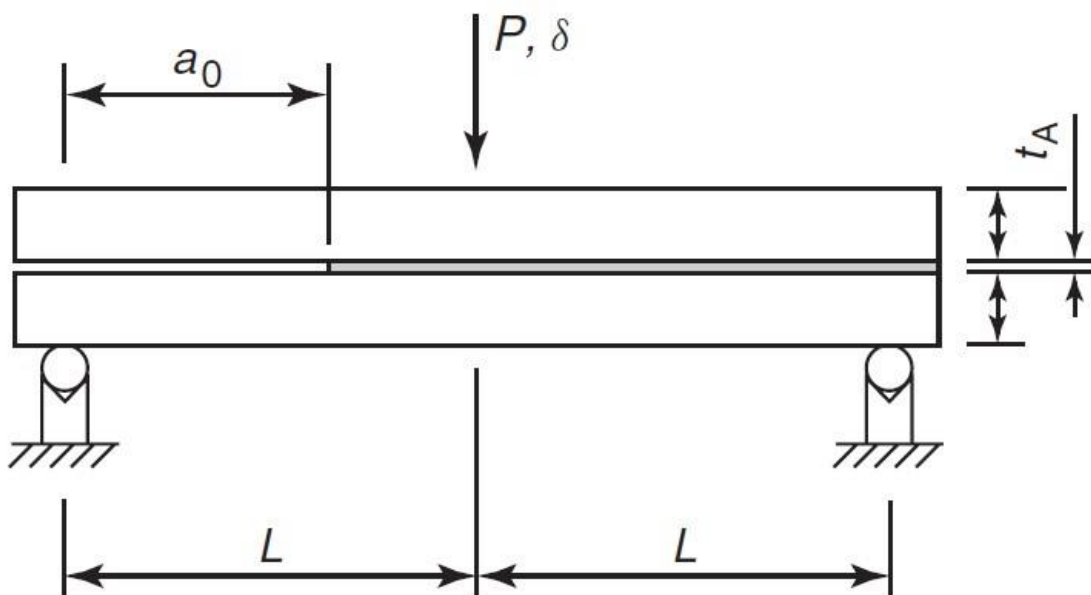


Figura 35-Ensaio ENF [56]

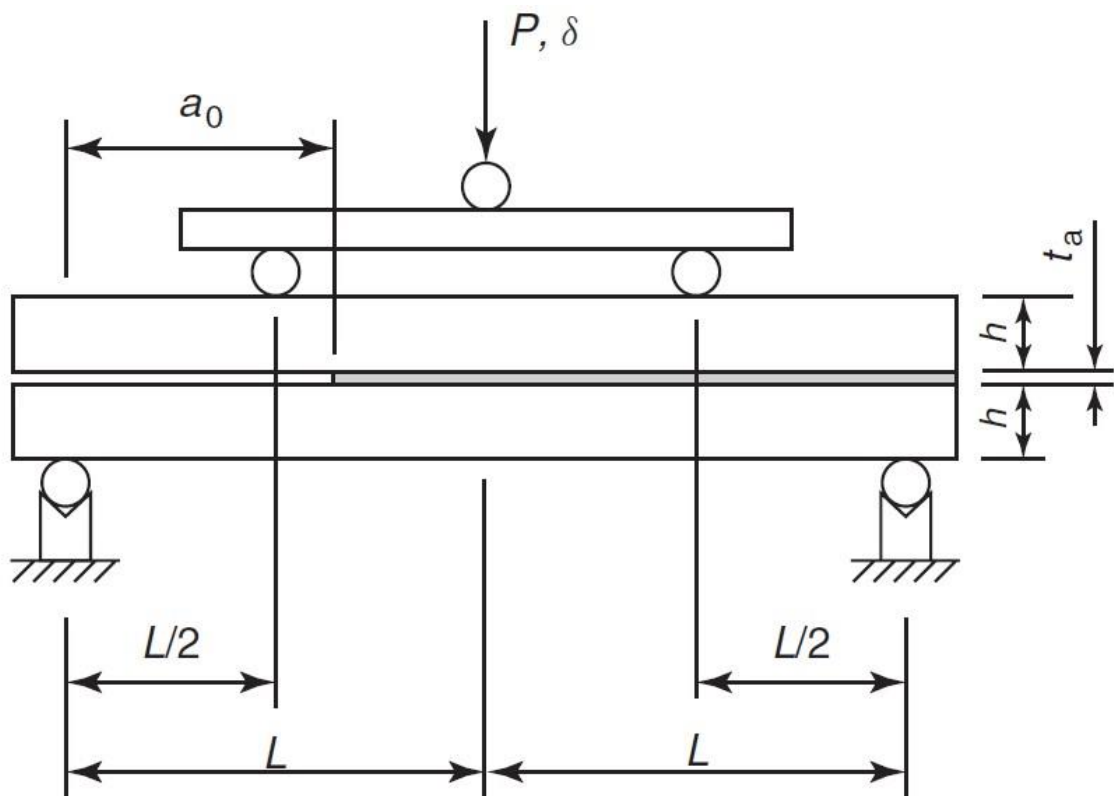


Figura 36-Ensaio 4ENF [56]

2.2.6. Modo misto

O modo misto ocorre quando se verificam nas juntas adesivas uma mistura dos dois modos anteriores, uma combinação dos modos I e II (Figura 37). É o modo de fratura que mais se observa nas juntas, visto que as juntas adesivas estão sujeitas a uma mistura dos esforços em modo I e modo II [51].

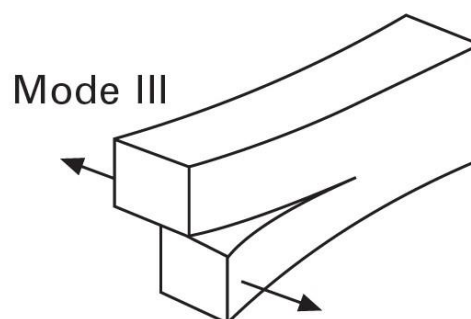


Figura 37-Modo misto (ou modo III) [6]

Para analisar estas juntas podem se efetuar vários ensaios, nomeadamente: ensaios *Fixed-Ratio Mixed Mode* (FRMM) ou também denominado de *Asymmetric Double Cantilever Beam* (ADCB), ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB), ensaios *Mixed-Mode Bending* (MMB), ensaios *Mixed-Mode Flexure* (MMF) conhecidos também como ensaios *Single Leg Bend* (SLB) [5]. O ensaio FRMM (Figura 38) é bastante comum, por exibir bastantes semelhanças com o ensaio ELS, visto que os equipamentos de ensaio são idênticos, as condições de fronteira são iguais, apenas varia

o carregamento, para o FRMM aplica-se uma carga apenas no substrato superior, que permite uma deformação livre do substrato inferior. O carregamento pode ser realizado através de furos nos substratos, se estes forem espessos para permitirem a furação, ou com recurso a células de carga, como está representado na Figura 38. Os provetes devem ser montados numa plataforma que permita o movimento de translação lateral para evitar forças axiais elevadas nos substratos e que podem danificar a estrutura de carregamento.

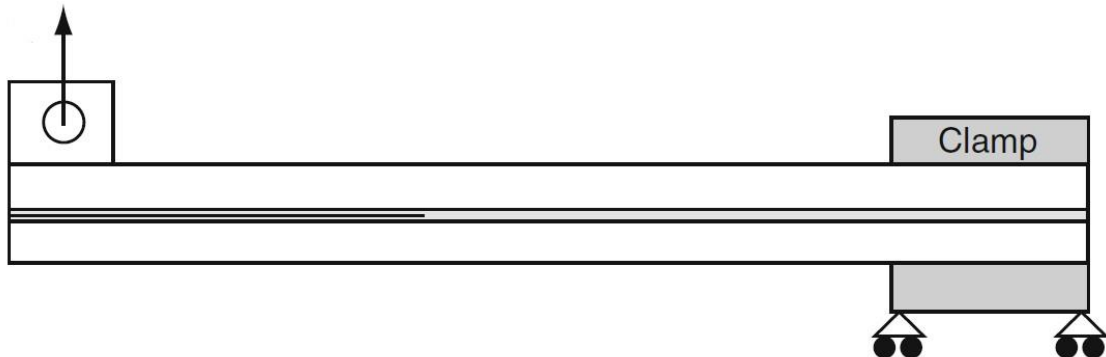


Figura 38-Ensaio Fixed-Ratio Mixed Mode (FRMM) [5]

Torna-se um pouco mais fácil de observar a ponta da fratura neste ensaio em relação aos ensaios ELS e ENF devido a uma maior peso do carregamento em modo I no carregamento total [56]. Pelo método de redução CBT, as componentes do SERR para cada modo de fratura podem ser calculadas pelas Equações 19 e 20:

$$G_I = \frac{3FP^2(a + \chi_I h)^2}{b^2 h^3 E} \quad \text{Eq. (19)}$$

$$G_{II} = \frac{9FP^2(a + \chi_{II} h)^2}{4b^2 h^3 E} \quad \text{Eq. (20)}$$

onde a representa o comprimento de fratura observado, h representa a espessura de um substrato, b a largura da junta adesiva, E o módulo de Young dos substratos, P a carga aplicada, X um valor de correção de comprimento de fratura efetivo e F corresponde a um fator de correção que só se torna necessário para grandes deformações [56, 58].

O ensaio MMB, representado na Figura 39, foi desenvolvido por Reeder e Crews, e pode ser considerado como uma sobreposição dos ensaios DCB (modo I) e ENF (modo II) [21]. Permite alteração a contribuição de cada modo de fratura. Pode ser realizado segundo a norma ASTM 2004b [5]. Aplicando a Teoria de Vigas aos dois ensaios obtém-se:

$$G_{Ic} = \frac{12a^2 P^2}{B^2 h^3 E_1} \left(\frac{3c - L}{4L} \right)^2 \quad \text{Eq. (21)}$$

$$G_{IIc} = \frac{9a^2 P^2}{16B^2 h^3 E_1} \left(\frac{c + L}{L} \right)^2 \quad \text{Eq. (22)}$$

E com estes obtém-se o rácio da Equação 23

$$\frac{G_I}{G_{II}} = \frac{4}{3} \left(\frac{3c - L}{c + L} \right)^2 \quad \text{Eq. (23)}$$

Que é dependente de c , mas independente de a [21].

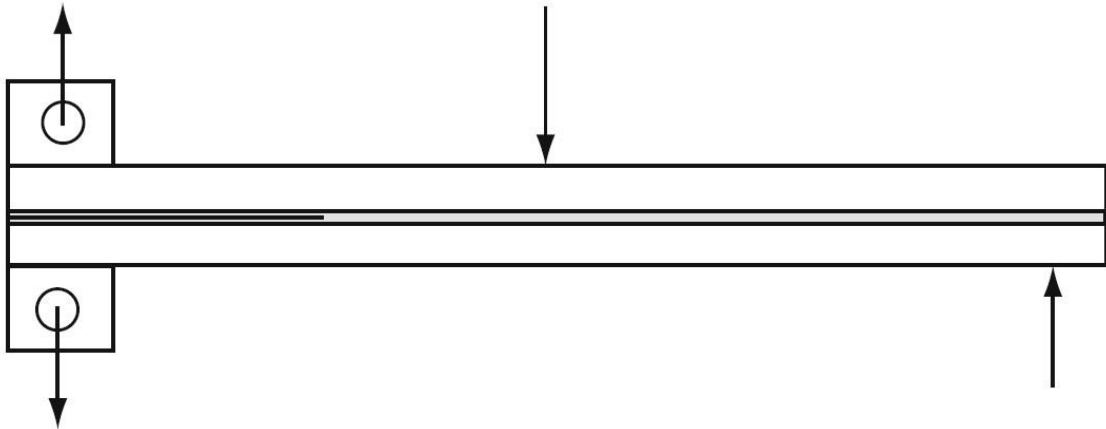


Figura 39-Ensaio Mixed-Mode Bending (MMB) [5]

O ensaio MMF (Figura 40) pode ser considerado como uma versão do ensaio FRMM [56]. O provete é sujeito a uma flexão em três pontos, com a carga P aplicada a meio do provete. O provete é simplesmente apoiado nas extremidades, porém uma delas apenas suporta um substrato, visto que os substratos têm tamanhos diferentes. Isto origina que o provete só seja carregado no substrato superior. Devido ao tipo de apoios usados no ensaio, pode ocorrer escorregamento do provete, que pode reduzir a sua flexibilidade e pode introduzir incertezas nos resultados [56]. As componentes do SERR para cada modo de fratura podem ser calculadas pelas expressões

$$G_I = \frac{3P^2(a + \chi_I h)^2}{4b^2 h^3 E} \quad \text{Eq. (24)}$$

$$G_{II} = \frac{9P^2(a + \chi_{II} h)^2}{16b^2 h^3 E} \quad \text{Eq. (25)}$$

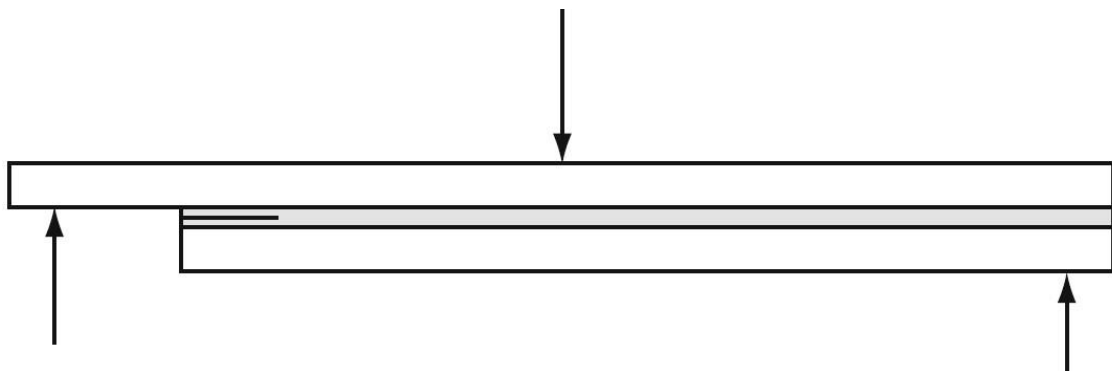


Figura 40-Ensaio Mixed-Mode Flexure (MMF) [5]

2.2.7. Estado da arte

Na Tabela 2, encontram-se expostos alguns dos mais recentes estudos ligados aos ensaios de fratura.

Tabela 2-Estado da arte da Mecânica da Fratura

Referência Bibliográfica	Descrição
<p>Cohesive-zone based fracture mechanics model of an edge delamination in bimaterial beam under mixed-mode bending test [59]</p>	<p>Este trabalho foca-se numa análise de um ensaio MMB num provete bi-camada constituído por uma união de dois materiais dissimilares. O ensaio foi modelado como uma viga de Timoshenko, com duas molas à tensão e ao corte, e os parâmetros taxa de deformação de energia e ângulo de fase são estimados através das respostas das molas. Foi feita uma comparação entre exemplos numéricos de provetes bi-camada de materiais isotrópicos e ortotrópicos e de dimensões simétricas e assimétricas e entre modelos baseados em análises de elementos finitos, com zona de interface coesiva e com adesão completa. Os autores obtiveram boa correlação de valores da taxa de libertação de energia para todos os modelos, porém obtiveram valores díspares para os valores de ângulo de fase. Concluiu-se que é recomendável a caracterização da adesão interfacial e da resposta à fadiga através dos parâmetros da mecânica da fratura obtidos da solução analítica do ensaio MMB.</p>
<p>Investigations of joint strength & fracture parameter of adhesive joint: A review [60]</p>	<p>O trabalho mencionado visa investigar várias estratégias de melhorar a resistência de uma junta adesiva, ao mesmo tempo diminuindo a concentração de tensões. Para esta investigação foram exploradas alternativas no desenho e geometria, condições de carga e arranjo do material dos provetes numa junta. Foram também aplicados diferentes métodos experimentais para a obtenção dos parâmetros relevantes dos ensaios. Do trabalho concluiu-se que as geometrias de junta afetam a sua resistência, a criação de entalhes nos substratos pode levar a um aumento da resistência de uma junta de sobreposição simples e que a mecânica da fratura tem um papel importante na previsão da vida de uma junta graças à análise dos parâmetros de fratura.</p>

Analytical corrections for double-cantilever beam tests [61]	Os autores deste estudo têm como objetivo apresentar correções analíticas para os métodos de redução baseados em teorias de vigas usados na determinação dos valores de taxa de libertação de energia, através da combinação das mesmas teorias: um método com condição de fronteira implementada no começo da fratura, e um modelo elástico para modelar a interface não fraturada do ensaio DCB. Do trabalho, os autores conseguiram obter as correções analíticas aos métodos.
Comparative evaluation of different fracture tests for the tensile fracture toughness of a ductile adhesive [62]	Este trabalho tem como objetivo fazer uma comparação entre os ensaios de modo I, nomeadamente entre os ensaios DCB e TDCB para avaliação de qual será o método capaz de obter a melhor estimativa de valores de resistência à fratura das juntas adesivas. Para tal, os autores produziram provetes para os dois ensaios com três adesivos com ductilidades diferentes e utilizaram métodos de redução que não envolvem a monitorização do comprimento de fratura, nomeadamente, o CCM, o CBT e o CBBM para o ensaio DCB, e o SBT, o CCM e o CBT para o ensaio TDCB. Dos ensaios, os autores concluíram que os métodos de redução utilizados no ensaio TDCB são mais conservativos do que os usados no ensaio DCB para adesivos dúcteis.
Effect of adhesive thickness on butt adhesive joints under torsional loads [63]	O trabalho foca-se na caracterização de juntas adesivas topo a topo compostas por um adesivo à base de epóxido, e verificação do efeito de várias espessuras de adesivo nas propriedades mecânicas nas mesmas. Os autores realizaram os ensaios de torção em máquinas universais de ensaios e os ensaios de tensão numa máquina universal <i>Instron 3367</i> , com provetes com três espessuras diferentes de adesivo (0,2, 0,5 e 1 mm) e submeteram os provetes a esforços de torção e tensão. Por fim concluiu-se que a variação da espessura da camada de adesivo utilizada numa junta topo a topo solicitada à torção, traz alterações à resistência ao corte e à rigidez do adesivo.

Theory of dynamic mode-II delamination in end-notched flexure tests [64]	Este trabalho aplica o efeito da vibração na derivação dos valores do deslocamento e do SERR do ensaio ENF. Os autores desenvolveram um modelo de viga Euler-Bernoulli, acompanhado de uma condição de deflexão para simular o contacto, e para investigar a contribuição dinâmica de cada modo de vibração, definiram um fator dinâmico e um fator espacial, sendo o último função do comprimento de delaminação e do comprimento total do provete ENF. Os autores concluíram que a contribuição de cada modo de vibração depende do fator espacial e que certos modos são dominantes, dependendo do rácio delaminação-comprimento. Concluiu-se também que para um determinado fator espacial, pode existir um modo de vibração que não contribua para a taxa de libertação de energia. Este trabalho permite guiar o desenho de estruturas mitigando os efeitos de vibração na delaminação.
---	---

2.3. Ensaio *End-Loaded Split*

Este subcapítulo foca-se em particular no estudo do ensaio *End-Loaded Split* (ELS) e na sua funcionalidade. Faz-se uma descrição do seu funcionamento, normas a ter em conta na sua realização para obtenção de resultados adequados, geometria dos provetes e suas dimensões. Refere-se também que tipo de materiais são sujeitos a este ensaio, as variáveis que se obtém na sua realização, e como as aplicar à modelação numérica. Por fim, são mencionados os métodos de redução do ensaio, os equipamentos usados no ensaio, e vários ensaios experimentais, e o estado atual da arte.

2.3.1. Enquadramento do ensaio

O ensaio ELS permite obter as variáveis carga aplicada P e deslocamento δ consoante o comprimento da fenda a , que podem ser usadas para a avaliação da resistência ao crescimento de uma fratura de uma ligação adesiva em modo II (G_{II}). O provete de um ensaio ELS, representado na Figura 41, é composto por dois aderentes de forma retangular unidos por um adesivo ao longo do seu comprimento, excetuando uma porção de uma das suas extremidades, que se encontra sujeita a um carregamento prévio, e que por sua vez origina uma fenda inicial [56]. Para além disso, a extremidade sujeita à força é livre, enquanto a extremidade oposta está fixa na máquina de ensaio. A carga aplicada cria um esforço de corte puro no adesivo na zona da fratura inicial, causando a propagação da fratura ao longo do adesivo antes da presença de grandes deslocamentos. Quanto às dimensões dos provetes, estas são dependentes do tipo de material dos aderentes e dos adesivos. O ensaio pode ser realizado numa máquina convencional e universal de testes à tração. É necessário que a máquina inclua uma guia linear

que permita deslocamento horizontal das garras durante o ensaio durante o carregamento, para evitar o desenvolvimento de tensões ao longo da direção horizontal. Foram concebidos métodos de redução, mencionados mais à frente no Subcapítulo 2.3.2., que ultrapassam este possível erro [56]. No que toca ao carregamento, este deve ser efetuado a baixas velocidades, entre 1 e 5 mm/min, e as variáveis devem ser registadas a uma frequência de 5 Hz. O ensaio termina quando a fenda se tiver propagado até à outra extremidade do provete que se encontra presa pela máquina. É considerado por Blackman *et al.* [65] um ensaio onde é possível atingir uma propagação mais estável da fratura, e pelo mesmo motivo, Wang *et al.* [66] consideram o ensaio mais indicado para obter a curva R [56]. O gráfico da curva carga-deslocamento (P - δ) resultante do ensaio e a curva R resultante da aplicação dos métodos de redução, que permite obter um valor de G_{II} , devem apresentar uma aparência semelhante aos das Figura 42 e Figura 43, respetivamente [56].

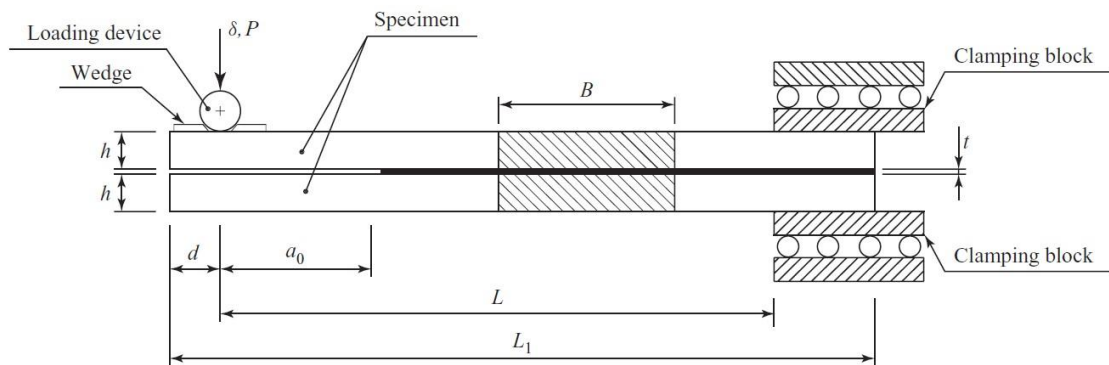


Figura 41-Ensaio End-Loaded Split (ELS) [9]

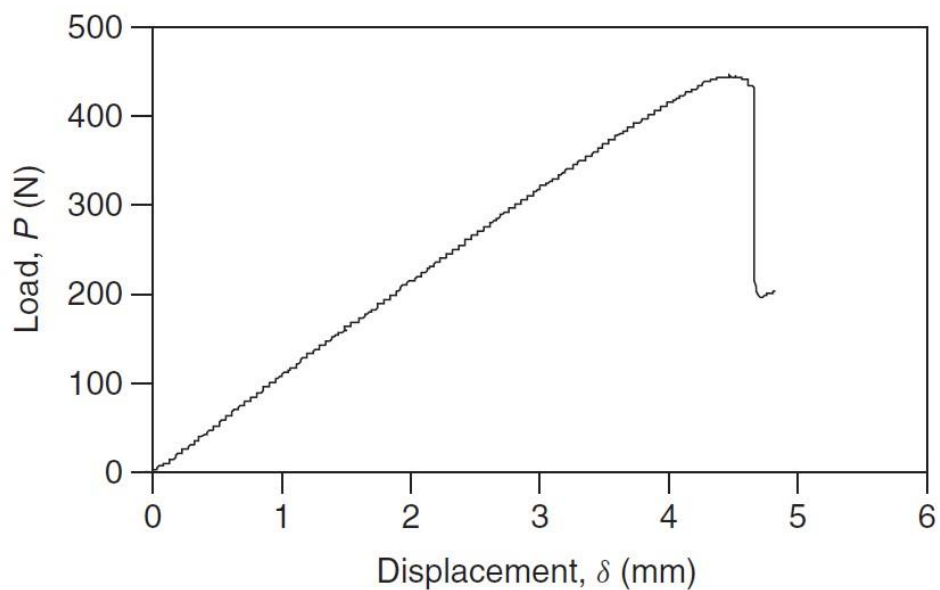


Figura 42-Curva P - δ característica do ensaio ELS [5]

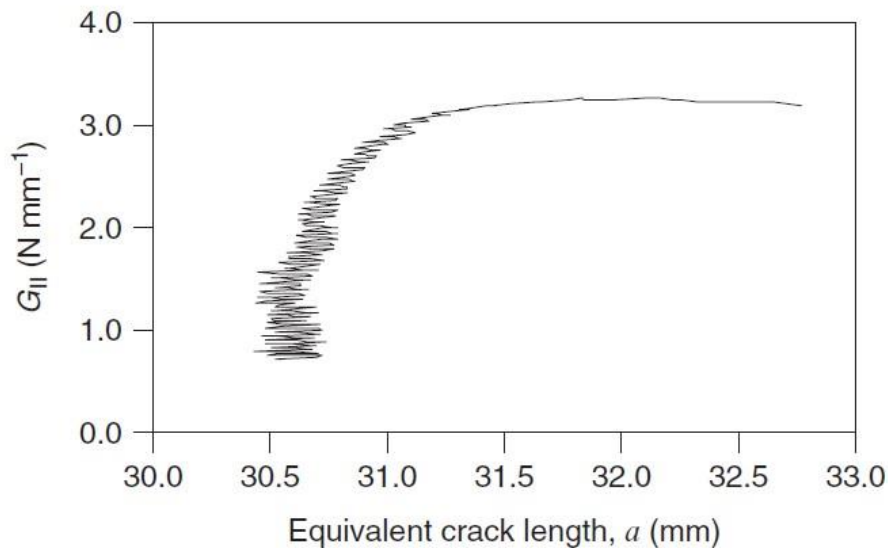


Figura 43-Curva R característica do ensaio ELS [56]

2.3.2. Métodos de redução

Apesar da dificuldade de medição de deslocamentos, fruto da variabilidade das condições de fixação dos provetes para o ensaio ELS, existem alguns métodos de redução usados para a obtenção da energia libertada G_{II} , fruto da evolução dos primeiros métodos de cálculo de G desenvolvidos por Irwin [56]. Os primeiros métodos a serem analisados serão o *Compliance Calibration Method* (CCM), o *Simple Beam Theory* (SBT) e o *Corrected Beam Theory* (CBT), também bastante comuns no cálculo de G_{IIC} para o ensaio ENF, e que dependem da medição do comprimento de fratura durante a sua propagação. O primeiro a ser abordado é o CCM. Este método é dependente da calibração da flexibilidade C durante a propagação da fenda. Pelo método CCM, a taxa de libertação de energia pode ser obtida através da equação de Irwin-Kies [56]:

$$G_{II} = \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad \text{Eq. (26)}$$

Onde p representa a carga, B representa a espessura do provete, a o comprimento da fenda e C representa a flexibilidade do provete ($C = \delta/P$). Para executar esta calibração usa-se um polinómio de terceiro para um cálculo mais preciso da relação dC/dA .

Como alternativa ao CCM, pode se calcular a energia através do *Simple Beam Theory* (SBT). Neste método, o cálculo de G_{IIC} é dado pela expressão

$$G_{IIC} = \frac{9p^2 a_m^2}{4b^2 h^3 E_1} \quad \text{Eq. (27)}$$

onde a_m corresponde ao comprimento de fenda medido no ensaio. Outro método alternativo é o CBT, que assim como CCM, depende da monitorização da evolução da fratura. Para este método, G_{II} obtém-se seguindo a Equação 28:

$$G_{II} = \frac{9p^2(a + |\Delta_{II}|)^2}{4B^2h^3E_1} \quad \text{Eq. (28)}$$

sendo que E_1 representa o módulo de elasticidade longitudinal, a representa o comprimento da fratura, B a espessura do provete, h a espessura de adesivo e Δ_{II} a correção de comprimento de fratura, que tem em conta efeitos de rotação de viga e de corte $\Delta_{II}=0,49\Delta_I$, e onde

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]} \quad \text{Eq. (29)}$$

sendo

$$\Gamma = 1,18 \frac{\sqrt{E_1 E_3}}{G_{13}} \quad \text{Eq. (30)}$$

em que E_3 representa o módulo elástico transversal, e G_{13} o módulo elástico ao corte. Para mitigar estes possíveis erros dos métodos anteriores, provenientes da dificuldade da medição do comprimento da fratura, usa-se um terceiro método, o *Equivalent Crack Method* (ECM). Este método baseia-se na flexibilidade do provete, no conceito da fratura equivalente e da teoria de vigas, e é um método de cálculo de comprimento de fenda equivalente. Considerando a teoria de vigas de Timoshenko, estabelece-se a relação

$$C - \frac{3a^3}{2Bh^3E_1} = \frac{L^3}{2Bh^3E_1} + \frac{3L}{5BhG_{13}} \quad \text{Eq. (31)}$$

onde C representa a flexibilidade, e L representa o comprimento total do provete. No entanto, esta equação não prevê as variabilidades existentes num ensaio ELS causadas pelas condições de fixação dos provetes. Porém, este pode ser incluído na equação considerando um comprimento efetivo do espécime L_{ef} , que é o valor teórico que satisfaz a Equação 31 que pode ser estimado com recurso às condições iniciais do ensaio (a_0 e C_0) e obtém-se a Equação 32:

$$C_0 - \frac{3a_0^3}{2Bh^3E_1} = \frac{L_{ef}^3}{2Bh^3E_1} + \frac{3L_{ef}}{5BhG_{13}} \quad \text{Eq. (32)}$$

Através da combinação das Equações 31 e 32, resulta a equação de comprimento de fenda equivalente durante a propagação

$$a_e = \left[(C - C_0) \frac{2Bh^3E_1}{3} + a_0^3 \right]^{1/3} \quad \text{Eq. (33)}$$

e que não depende de L_{ef} . A taxa de libertação de energia G_{II} por sua vez pode ser obtida combinando as Equações 32 e 33

$$G_{II} = \frac{9p^2 a_e^2}{4B^2 h^3 E_1} \quad \text{Eq. (34)}$$

Com isto, torna-se possível a obtenção da curva R , como função de a_e , e obtenção da energia crítica de fratura G_{IIc} , que é o valor máximo registado na curva. Este método passa a depender apenas dos valores da carga e do deslocamento obtidos experimentalmente e o problema da dificuldade de monitorização do comprimento de fenda é ultrapassado. Para além disso, este

método tem em consideração a evolução da zona de processo de fratura (*Process Fracture Zone* ou FPZ). A FPZ não deve ser ignorada, particularmente para adesivos dúcteis, visto que esta tem influência no comportamento da fratura. Mais ainda, este método ignora o erro associado com o aumento da energia causada pela técnica da inserção do filme de Teflon® como iniciador da fratura inicial, após esse aumento os valores máximos obtidos na curva R podem ser considerados corretos para o cálculo de G_{II} . Outros métodos também de comprimento de fenda equivalente são o *Corrected Beam Theory with Effective crack length* (CBTE) e o *Compliance-Based Beam Theory* (CBBM) [56].

Para o método CBTE, o cálculo do comprimento de fenda equivalente pode ser obtido pela Equação 35

$$a_e = \sqrt[3]{\frac{2E_1 B h^3 C_c}{3} - \frac{L^3}{3}} \quad \text{Eq. (35)}$$

onde

$$C_c = \frac{C}{N_2} - \frac{3L}{5G_{13} B h} \quad \text{Eq. (36)}$$

Seguindo as recomendações dos autores, pode se efetuar uma simplificação no cálculo do fator de correção N_2 , igualando-o a 1, que se pode obter resultados bastante satisfatórios, com percentagem de erro muito baixa (< 1%). Por fim, o cálculo de G_{II} é obtido pela Equação 37

$$G_{II} = \frac{9p^2 a_e^2}{4B^2 E_1 h^3} F_2 \quad \text{Eq. (37)}$$

onde F_2 corresponde a outro fator de correção, que pode ser calculado através da Equação 38

$$F_2 = 1 - \Theta_1 \left(\frac{\delta}{L}\right)^2 - \Theta_2 \left(\frac{\delta l_1}{L}\right)^2 \quad \text{Eq. (38)}$$

e onde l_1 é uma das dimensões do bloco de carregamento. Como neste trabalho não são tidas em conta as dimensões do bloco nas simulações, só o termo Θ_1 é considerado. Logo a expressão simplificada para o cálculo do fator de correção passa a ser

$$F_2 = 1 - \Theta_1 \left(\frac{\delta}{L}\right)^2 \quad \text{Eq. (39)}$$

Por sua vez, o termo Θ_1 pode ser obtido pela expressão

$$\Theta_1 = \frac{3}{20} \left[\frac{15 + 50(a/L)^2 + 63(a/L)^4}{[1 + 3(a/L)^3]^2} \right] \quad \text{Eq. (40)}$$

No CBBM, a rigidez inicial C_0 e o comprimento inicial de fenda a_0 são usados na Equação 41 para obter um módulo de elasticidade longitudinal aparente E_{Ia}

$$E_{Ia} = \frac{3a_0^3 + L^3}{8Bh^3 C_{0c}} \quad \text{Eq. (41)}$$

e G_{II} obtém-se pela Equação 42

$$G_{II} = \frac{9pC_{0c}}{2B(3a_0^3 + L^3)} \left[\frac{C}{C_{0c}} a_0^3 + \frac{L^3}{3} \left(\frac{C_c}{C_{0c}} - 1 \right) \right]^{2/3} F_2 \quad \text{Eq. (42)}$$

Este método contorna alguns parâmetros que não são considerados noutros métodos, tais como a concentração de tensões na ponta da fenda e o possível contacto entre as lâminas do provete [56, 67].

2.3.3. Equipamentos e ensaios experimentais

Neste subcapítulo foi efetuado um levantamento de vários trabalhos experimentais usados como referência para a realização deste.

O artigo de Polyzos *et al.* [68] foi realizado com o objetivo de eliminar irregularidades artificiais nos valores iniciais. Para o efeito foi usada uma máquina *Instron* 5885 onde foi aplicada uma carga de 500 N (Figura 44). Os ensaios foram efetuados a uma velocidade de 0,5 mm/min. Os provetes utilizados nos ensaios apresentam uma largura de 20 mm, o substrato tem uma espessura h de 2,1 mm e um comprimento inicial de fenda de 53,8 mm. Em todos os provetes as pré-fendas foram criadas com recurso a películas de PTFE, com o objetivo de garantir a medição correta da resistência inicial à fratura e eliminar efeitos artificiais na fronteira da película. Os provetes foram sujeitos ao carregamento até se ter registado uma fenda de 5 mm de comprimento, medido desde a ponta da película de PTFE.

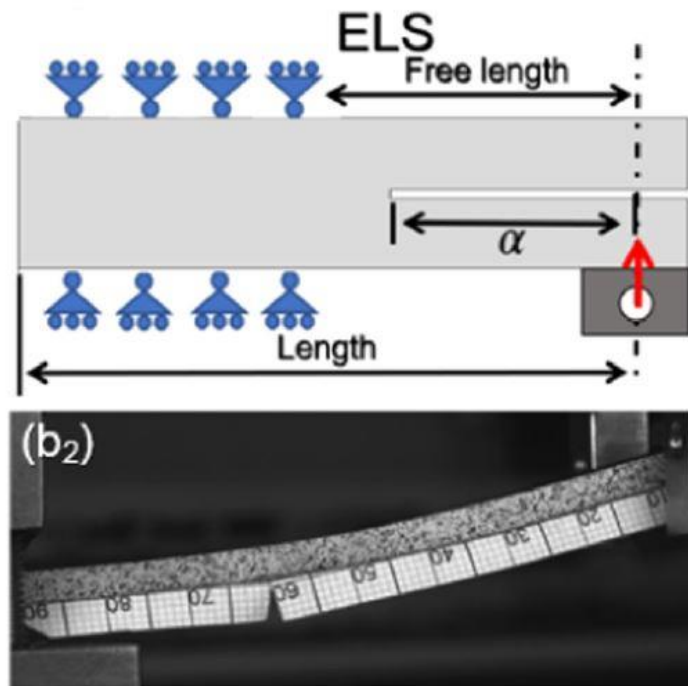


Figura 44-Representação esquemática do ensaio de Polyzos [68]

Quanto ao ensaio de Abdel Monsef *et al.* [69], os provetes utilizados têm 210 mm de comprimento L , 25 mm de largura e 4,8 mm de espessura. A pré-fenda foi obtida através da inserção de uma película de PTFE de 60 mm, e de uma carga em modo I, com recurso a um

equipamento ilustrado na Figura 45, desenhada de acordo com a norma ISO 25217 [57]. O ensaio ELS foi realizado seguindo a norma ISO 15114 [70].

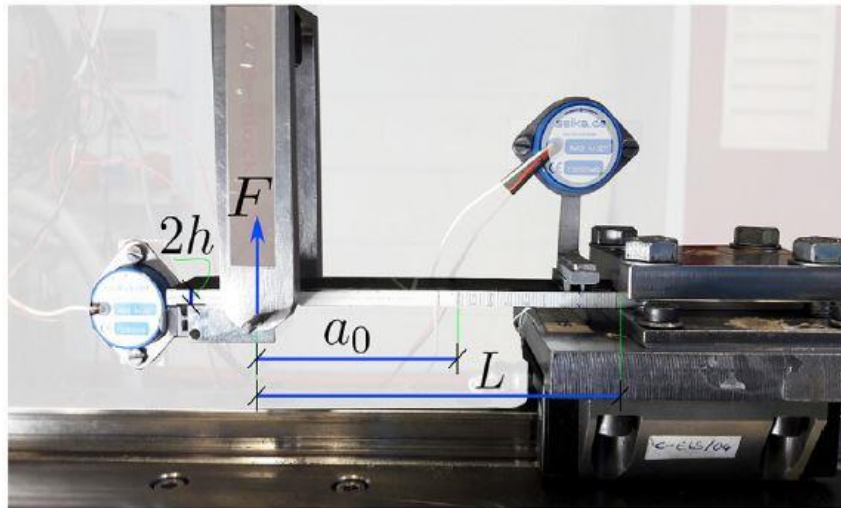


Figura 45-Máquina de ensaio de S. Abdel Monsef et al. [69]

No ensaio de M. Pérez-Galmés *et al.* [71], os autores tinham como objetivo definir métodos de redução fiáveis, capazes de produzir resultados semelhantes para todos os ensaios em modo II, nomeadamente os ensaios ENF, ELS, 4ENF e MMB. O ensaio ELS foi realizado numa máquina de ensaio universal, de acordo com a norma ISO 15114 [70], e representado na Figura 46. A máquina prende o provete numa extremidade, mas permite o seu deslocamento no eixo horizontal. A carga é aplicada verticalmente num bloco colado na face inferior da extremidade livre do provete. Possui também dois inclinómetros para medição dos ângulos de rotação, um aplicado na face superior do provete na secção $S-S'$ e o outro no bloco responsável pelo carregamento. O comprimento de fenda final foi obtido com recurso a um microscópio ótico.

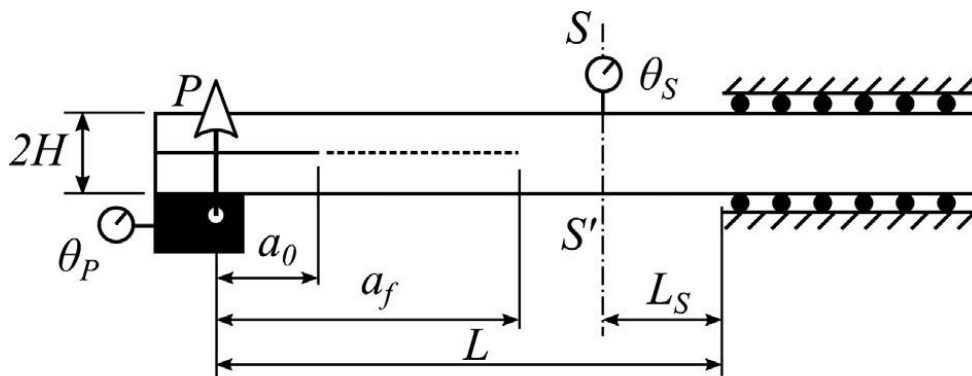


Figura 46-Ensaio de M. Pérez Galmés et al. [71]

Os provetes ensaiados (Figura 46) apresentam as dimensões definidas pelas variáveis que tem os valores listados na Tabela 3:

Tabela 3-Dimensões dos provetes utilizados no ensaio de Pérez-Galmés et al. [71]

a_0 (mm)	a_f (mm)	L_S (mm)	L (mm)	$2H$ (mm)
55	95	10	100	4,8

Sacchetti *et al.* [72] realizaram um ensaio numa máquina universal de teste *Instron 8500*, com uma célula de carga *HBM 500 N*, e com um sistema automatizado de câmara para acompanhar a evolução da fenda durante os testes. A câmara mediu o comprimento da delaminação através do seu deslocamento horizontal, eliminando a necessidade da aplicação de um fator de correção para grandes deslocamentos. No entanto, a câmara não conseguiu medir o comprimento de fenda, visto que foi difícil detetar o ponto de iniciação da fenda com precisão.

Quanto ao ensaio de Blackman *et al.* [73], os autores procuravam com o trabalho alcançar um método de teste para o modo II que reduza os erros na medição do comprimento efetivo da fenda, através da sua eliminação. Os autores seguiram a norma de ensaio ASTM D790 [74] para a obtenção dos resultados experimentais, com um rácio de comprimento de aperto para espessura $2H$ não inferior a 32:1. Para além disso, utilizaram um método de carregamento distinto do ensaio ELS, carregando o provete na face inferior e estabelecendo um comprimento livre de 100 mm. Ghasemnejad *et al.* [75] seguiram a norma *ESIS* para a produção do provete, com 20 mm de largura, comprimento total de 160 mm e uma espessura variável, entre os 5 e os 6 mm, com o objetivo de evitar grandes deslocamentos, deformação plástica e dano entre camadas. A pré-fenda foi obtida através da inserção de um filme de Teflon® a 60 mm da extremidade livre do provete. O carregamento foi exercido no provete a uma taxa constante de 2 mm/min até ao valor máximo de $Max/5\%$. O comprimento de fenda inicial foi determinado visualmente, e a monitorização da evolução do seu comprimento foi feito com recurso a um microscópio móvel que acompanha o seu crescimento. O ensaio encontra-se representado na Figura 47.



Figura 47-Máquina de ensaio de Ghasemnejad *et al.* [75]

Para o trabalho de Poursartip *et al.* [76] (Figura 48) foi criada uma máquina específica para o carregamento, mas que não permite a medição exata das cargas aplicadas, visto que a máquina se provou muito sensível à rotação dos provetes depois da aplicação das cargas. Para além desse impedimento, também não foi fácil obter a relação entre o deslocamento do provete e a carga aplicada. A máquina utilizada não permitiu aos autores obter os valores de G_{II} pretendidos para caracterizar os ensaios.

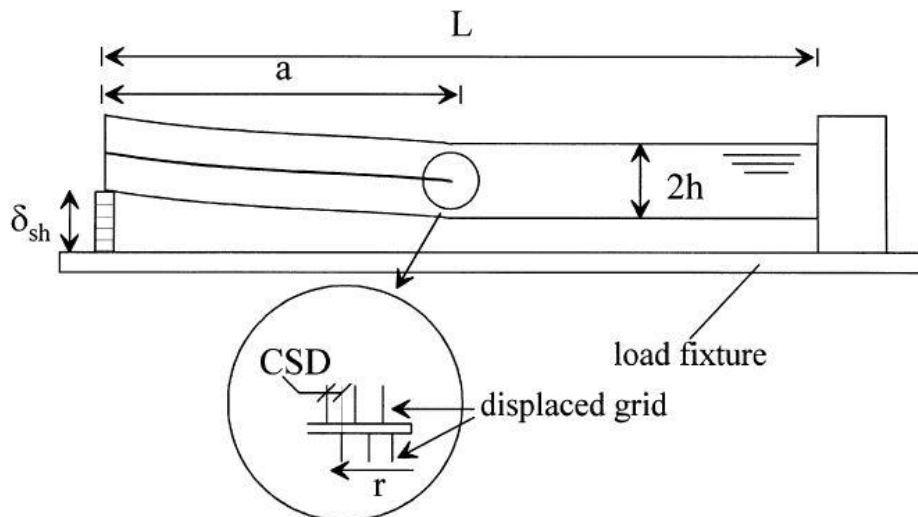


Figura 48-Representação esquemática do ensaio de Poursartip et al. [76]

Ding *et al.* [77] realizaram o seu ensaio numa máquina hidráulica calibrada MTS858. Foi usada uma chave dinamométrica para efetuar o aperto do provete na máquina, e foi aplicado um binário de 5 Nm. O carregamento do provete foi efetuado através de um bloco, encostado à extremidade livre do provete, a uma taxa de 0,5 mm/min até a fenda se estender a uma distância inferior a 10 mm da extremidade presa, daí o teste para e o descarregamento ocorre a uma taxa de 5 mm/min. O comprimento livre do provete definido neste trabalho foi de 85 mm. O levantamento dos valores da carga e do deslocamento foram obtidos com recurso a sensores e o crescimento da fenda foi visualizado através de um microscópio.

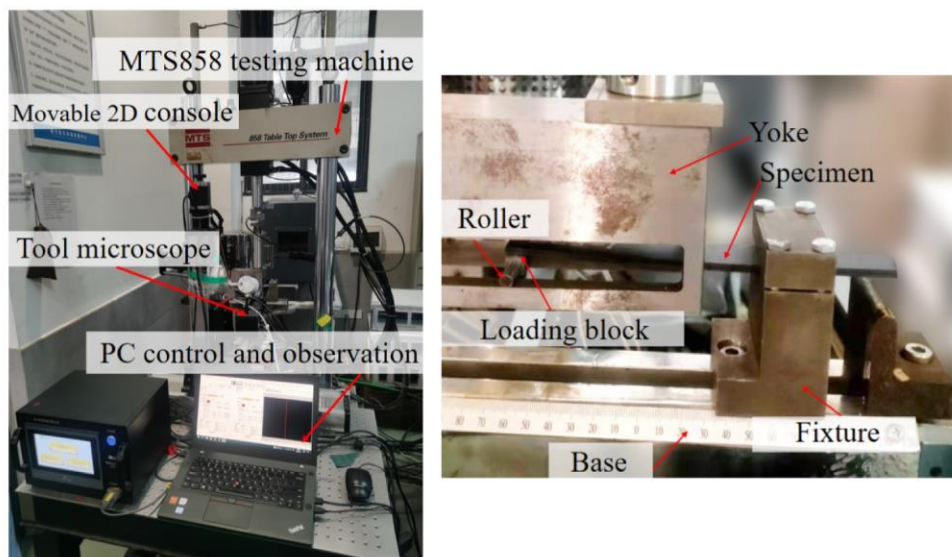


Figura 49-Máquina de testes de Ding et al. [77]

Shahverdi *et al.* [78] realizou o trabalho com o objetivo da caracterização à fratura em modo II, para provetes longos, de comprimento total de 400 mm, com uma pré-fenda de 140 mm, medida desde a linha de carregamento. O comprimento livre do provete é de 300 mm. Para preparar o ensaio, os autores instalaram e alinharam o provete na máquina, e usaram uma

rampa de carregamento para obter a pré-fenda nos mesmos. A máquina usada no trabalho encontra-se ilustrada na Figura 50.

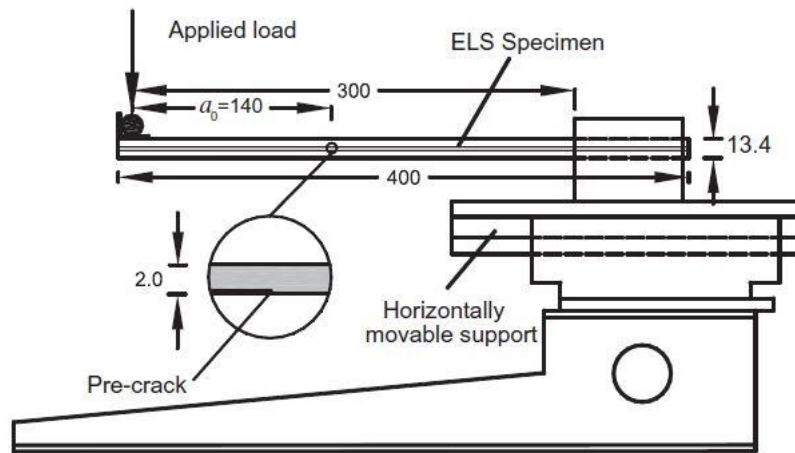


Figura 50-Máquina de ensaio de Shahverdi et al. [78]

O trabalho de Yasaei *et al.* [79], representado na Figura 51, tinha como objetivo a determinação da resistência à fratura em modo II de compósitos unidirecionais, seguindo a norma *ESIS*. Para tal, foi aplicada uma carga a uma taxa constante de 2 mm/min, através de uma dobradiça colada na ponta livre do provete e de prender a outra extremidade para obter um comprimento livre de 110 mm. A pré-fenda do provete tem 65 mm. Foi gerada uma fratura em modo II, para criar uma pré-fenda com recurso a um filme de PTFE inserido no plano médio do laminado, apertando o provete 5 mm à frente do filme e carregando o provete até obter o comprimento de pré-fenda de 65 mm. Esta pré-fenda foi realizada com o intuito de evitar a obtenção de valores extremamente elevados e irrealistas de G_{IIc} , derivados de zonas junto do filme de PTFE onde poderiam existir concentração de resina. Para evitar uma iniciação instável de fenda, o aperto do provete foi realizado de tal forma a que o rácio entre o comprimento inicial de fenda e o comprimento livre do provete seja 0,59, valor derivado da lei de vigas.

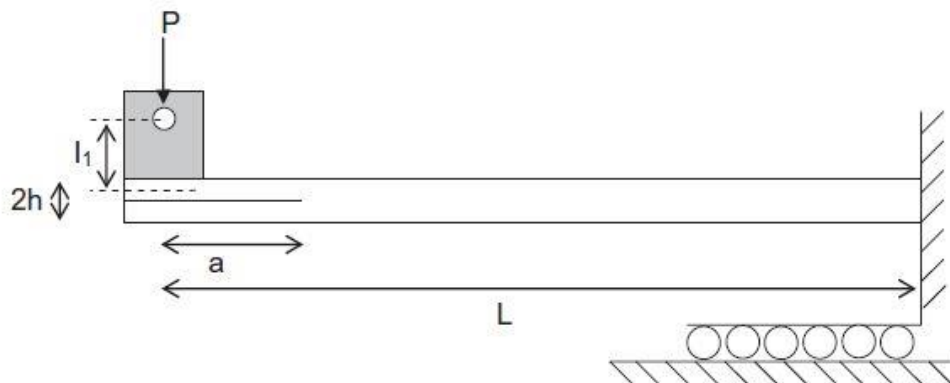


Figura 51-Representação esquemática do ensaio de Yasaei et al. [79]

Zhang *et al.* [80] utilizaram provetes com uma das extremidades presa a 150 mm, mas com possibilidade de movimento horizontal durante o carregamento. O carregamento foi alcançado através de um bloco de 40 mm colado à extremidade livre do provete, com uma camada de 0,5

mm de espessura de adesivo. Foi aplicada uma carga a uma taxa de carregamento de 1 mm/min. O comprimento livre do provete é de 230 mm e a pré-fenda tem um comprimento de 140 mm. A pré-fenda foi obtida durante a produção do provete, através da inserção de uma película de Teflon entre os laminados e a camada de adesivo. Durante o ensaio foram registadas a carga, o deslocamento e o comprimento de fenda. A monitorização da evolução da fenda foi avaliada de duas maneiras: observação visual, através da marcação de linhas verticais a cada 5 mm na superfície lateral do provete, e de um extensómetro de vídeo. O provete depois de terminado o ensaio encontra-se representado na Figura 52.

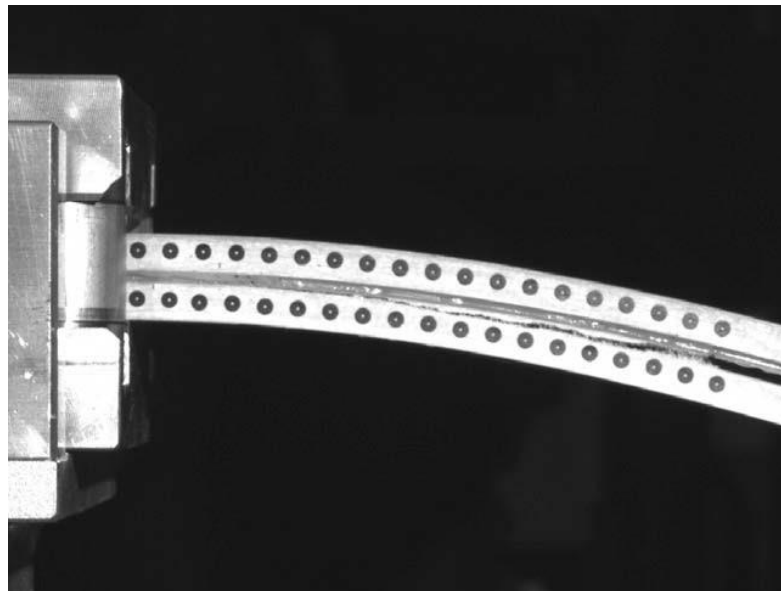


Figura 52-Provete de ensaio de Zhang et al. [80]

O ensaio de Kenane [81], representado na Figura 53, foi conduzido para duas situações distintas: para uma análise estática, e para uma análise à fadiga. Foram realizados ensaios numa máquina *Instron*, onde os provetes foram sujeitos a uma taxa de deslocamento constante de 2 mm/min. Os valores da carga e do deslocamento foram obtidos e registados com a ajuda de um computador. Para a análise à fadiga, o autor utilizou uma máquina de ensaios servo-hidráulica *Instron 1341*, e efetuou o carregamento dos provetes com uma célula de carregamento de 1 KN. Foram registados durante os ensaios os valores mínimos e máximos da taxa de libertação de energia G_{min} e G_{max} respetivamente e a taxa de crescimento de delaminação da/dN .

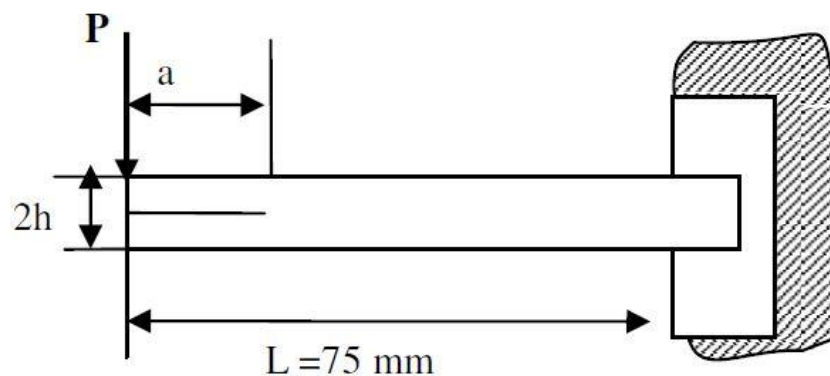


Figura 53-Representação esquemática do provete de ensaio de Kenane [81]

Os ensaios de Silva *et al.* [82] foram conduzidos numa máquina de testes universal *Instron* 1125, guiada por parafusos, com um sistema de guias horizontais específico para permitir a translação dos provetes na extremidade clampeada. O conjunto máquina e provete encontra-se ilustrado na Figura 54. Os testes foram realizados a um deslocamento controlado constante de 5 mm/min. Foram registados ao longo dos ensaios a carga aplicada e o deslocamento. O crescimento da fratura foi monitorizado com recurso a um microscópio eletrónico (SEM).

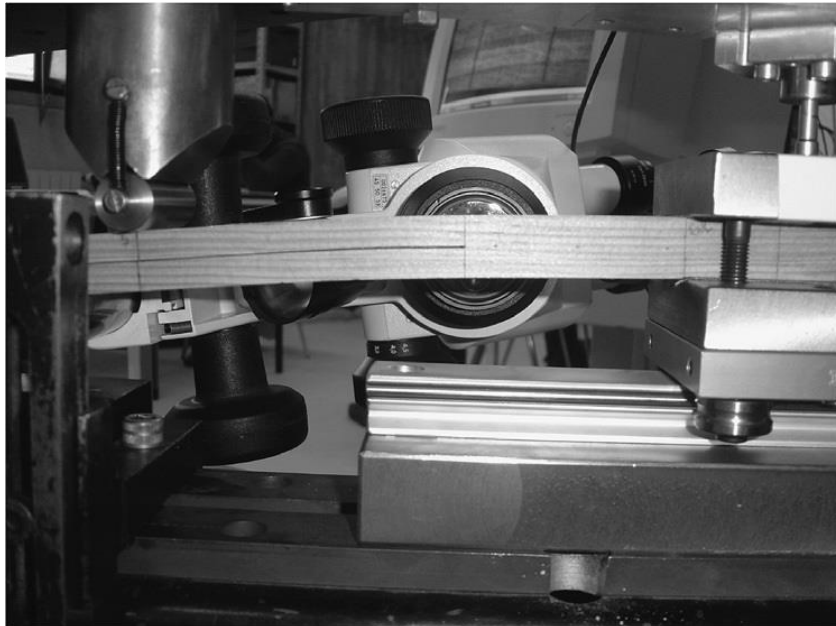


Figura 54-Máquina de ensaios de M.A.L. Silva *et al.* [82]

Grouve *et al.* [83] realizou os ensaios neste trabalho segundo a norma *ESIS TC4*, com recurso a uma máquina de testes universal *Instron*, que possui um transdutor de deslocamentos. A máquina fixa uma das extremidades do provete com recurso a dois parafusos, mas que permitem que o provete se desloque na direção horizontal. O comprimento do provete fixo a é de 60 mm e o comprimento livre L é de 100 mm, permitindo obter um rácio a/L nunca inferior a 0,55. O carregamento é efetuado na extremidade livre do provete, através de uma célula de carga de 1000 N. A evolução do comprimento da fenda foi monitorizada através de uma câmara com lente capaz de 20x zoom, com a sua posição ajustada manualmente ao longo do ensaio.

No ensaio de Wu *et al.* [84], o mecanismo de carregamento é uma versão ligeiramente modificada da máquina do trabalho anterior do autor [85]. O deslocamento da lamina superior do compósito foi controlada a uma taxa de 1 $\mu\text{m/s}$, de acordo com o sensor de deslocamento do atuador responsável pelo carregamento.

Por fim, na Tabela 4, estão listados os valores mais importantes retirados de cada trabalho.

Tabela 4-Valores de referência dos trabalhos recolhidos sobre ensaios experimentais ELS

Referência Artigo	L [mm]	L_0 [mm]	H [mm]	B [mm]	a_0 [mm]
[68]	100	-	-	-	-
[69]	100	210	-	25	55
[71]	100	210	-	25	55
[73]	100	190	>4 (2h)	20	-
[75]	-	160	5-6 (2h)	20	60
[76]	66,8	-	1,7	20	-
[77]	85	-	-	-	-

2.3.4. Princípios de simulação

Para melhor compreensão da realização das simulações, foram levantadas informações relevantes de outros autores com matérias de simulações de ensaios ELS.

O modelo de elementos finitos de Ding *et al.* [86] consiste em três partes, o braço superior, o braço inferior, e o adesivo a meio. Para os braços, o autor usou elementos coesivos sólidos de três dimensões e de oito nós com integral reduzido (C3D8R). Para uma camada fina de adesivo, usou elementos coesivos tridimensionais de oito nós (COH3D8), com uma espessura 10 μm . O tamanho da malha da camada coesiva é de 1 mm, para garantir a captura precisa do campo de tensões. As superfícies dos braços estão ligadas às superfícies da camada coesiva. Quanto ao carregamento, foi usado um ponto de referência, com restrições cinemáticas entre o mesmo e a fronteira mais à esquerda do braço superior. Quanto às condições de fronteira, foi criada uma condição de deslocamento de 10 mm, aplicados no sentido descendente no ponto de referência para simular o carregamento vertical, e uma condição de encastre na extremidade direita do provete. Zhang *et al.* [80] usou elementos finitos a três dimensões no software ANSYS® para modelar o ensaio ELS. O laminado de GFRP foi modelado como um sólido de camadas, tendo em conta o roving, manta e do mesmo para permitir uma propagação de fenda dentro dos aderendos. Foram usados elementos do tipo SOLID45, com um tamanho de mesh de 5 mm para o crescimento de fenda para ambos os tipos de junta do trabalho. Para as superfícies de fenda dos aderendos, foram usados elementos (CONTA174) e (TARGE170) para evitar a penetração mútua dos mesmos. O modelo completo do ensaio tem 5520 elementos.

O ensaio de Silva *et al.* [82] foi realizado no software Abaqus®, usando 35250 elementos tridimensionais de oito nós e 4890 elementos finitos na interface. O modelo numérico tem 1211 elementos de duas dimensões isoparamétricos de oito nós em estado plano de tensão e 130 elementos finitos de seis nós ao longo do comprimento de fenda. Na zona inicial da fenda foram usados para permitir o deslocamento relativo das superfícies da fenda e foram negligenciados

os efeitos do atrito e para prevenir a interpenetração dos braços. Quanto a condições de fronteira, foi imposto um contacto entre o atuador, considerado como um corpo rígido e o provete.

Rizov [87] realizou um modelo tridimensional de elementos finitos no software ANSYS®. Usou um total de 4920 elementos finitos do tipo SOLID45 para a *mesh*, de 8 nós, com 3 graus de liberdade por nó: translação nas direções x, y e z.

2.3.5. Modelos de dano coesivo

Os modelos de dano coesivo (*Cohesive Zone Models* ou CZM) têm como origem os estudos de Barenblatt [88] e de Dugdale [89] que criaram um conceito de uma zona coesiva, capaz de descrever o efeito de cargas estáticas e o dano provocado por estas numa determinada fenda e podem ser divididos por abordagens locais ou contínuas. É um método utilizado nas últimas décadas, como complemento às análises de elementos finitos (FEM), que permitem a simulação da evolução do dano entre materiais contínuos ou interfaces entre materiais distintos [90], simulam a evolução de tensões e conseqüente amolecimento ou degradação do material até à falha [91]. Este modelo procura estabelecer uma ligação entre os tipos de modelos usados para o design de estruturas, os modelos baseados na resistência e os modelos de fratura [6]. Para os modelos locais, o dano fica confinado a uma linha ou superfície e permitem simular uma falha interfacial entre materiais, como por exemplo, para a ligação entre um adesivo e um substrato [92], uma fratura interlaminar de um compósito [93] ou a interface entre fases sólidas de um material (Figura 55a) [94]. Para uma modelação contínua, o dano é modelado ao longo de uma região finita através de elementos finitos sólidos para simular uma falha em *bulk* [95] ou ao longo de uma ligação adesiva para modelar uma fratura coesiva da ligação (Figura 55b) [50, 96].

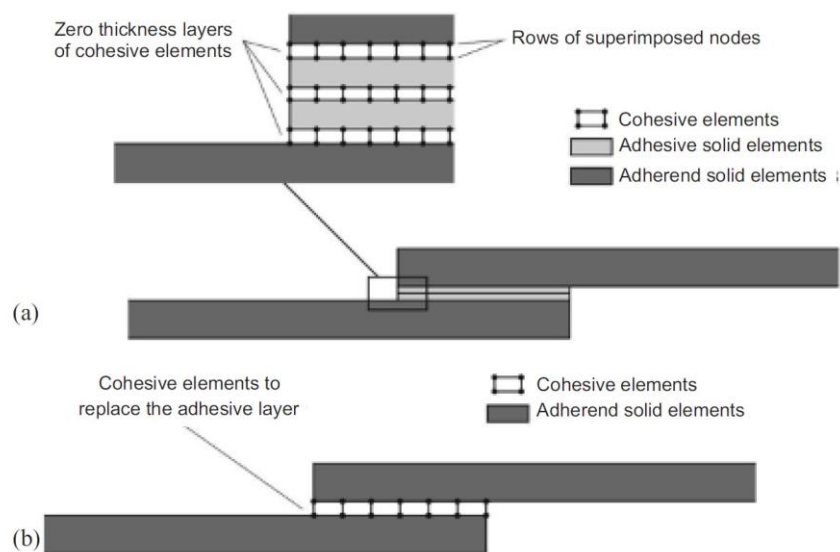


Figura 55-Modelos de dano coesivo: a) abordagem local e b) abordagem contínua

Estes modelos combinam um critério de resistência através de uma resistência coesiva (δ), e um critério energético através da energia de fratura, num modelo único para incluir todos os aspetos de falha num material, criando leis numéricas de tração-separação, ou leis coesivas,

capazes de modelar interfaces e regiões finitas onde se verifica dano de forma mais precisa do que o MEF, através de formas diferentes, de acordo com o tipo de material ou interface [90]. Estas leis coesivas podem assumir as formas triangulares, representadas na Figura 56, as lineares-parabólicas, as polinomiais, as exponenciais e as trapezoidais, sendo as leis triangulares e trapezoidais as mais comuns e utilizadas. Estas leis são estabelecidas nos trajetos de rotura e são atribuídos os SERR para os modos de fratura (G_I e G_{II}) e as tenacidades à fratura para tensão e corte também (G_{IC} e G_{IIC} , respetivamente). São também necessárias as resistências coesivas para cada modo de fratura (t_n^0 e t_s^0), que são parâmetros associados à iniciação do dano, ou término do comportamento elástico. Estes últimos quatro são parâmetros são parâmetros coesivos, e podem ser determinados para uso nos CZM com recurso a métodos de identificação de propriedades e dos métodos direto e inverso, através dos ensaios DCB, ENF ou *Single Lap Joint* (SLJ) [73, 90, 97-100]. Os métodos de identificação consistem no cálculo separado de cada um destes parâmetros através de ensaios adequados e o método inverso utiliza iterações de FEM com recurso a dados experimentais, como as curvas $P-\delta$ [90].

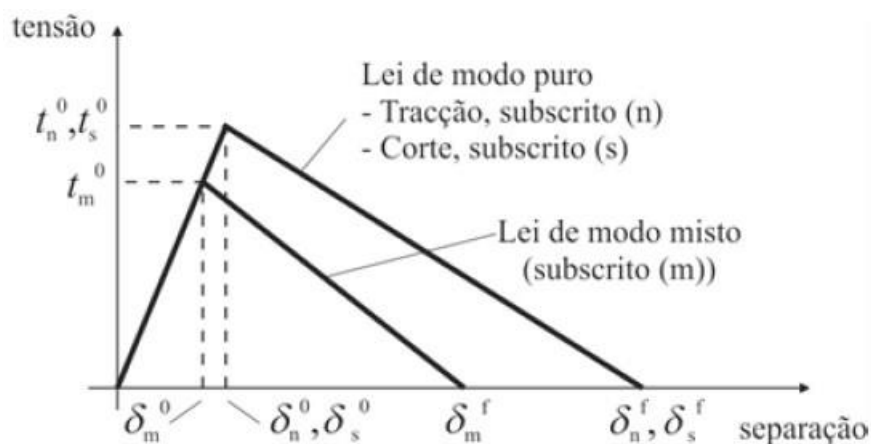


Figura 56- Representação de uma lei triangular [90]

Analisando a Figura 56, observam-se duas curvas, a maior representa a lei triangular para modo puro (I ou II), e a mais pequena a lei triangular para o modo misto. Quanto aos subscritos n e s , correspondem ao esforço de tração e corte, respetivamente, e m o misto de esforços. Desta informação pode-se atribuir significado às variáveis presentes na figura: t_n^0 , t_s^0 e t_m^0 correspondem às tensões de pico para cada esforço. As restantes concernem o deslocamento do provete: δ_n^0 , δ_s^0 e δ_m^0 representam os deslocamentos para o pico de tensão registados no ensaio e δ_n^f , δ_s^f e δ_m^f representam os valores do deslocamento aquando da falha. Este método apresenta várias vantagens relativamente aos restantes, é um método independente de malha, se existir um número suficiente de nós em amolecimento durante a falha [101, 102], permite combinar várias possibilidades de fratura e não se torna necessário o conhecimento o ponto de iniciação da fratura, visto que a fratura ocorre para qualquer elemento quando o critério de iniciação de dano é atingido, porém também apresenta uma limitação: os CZM necessitam que existam elementos coesivos nos planos onde há maior probabilidade de ocorrência de dano. Para além da lei triangular, exemplificada na Figura 56, e desenvolvida por Alfano e Crisfield [103] (Figura 57a), existem também leis com forma linear-parabólica [104], polinomial [105], linear-exponencial [94] e trapezoidal [106] (Figura 57b). A escolha correta da lei é importante

para prever uma forma muito semelhante à curva $P-\delta$, que é suscetível à rigidez do substrato, para substratos mais rígidos aconselha-se o uso de leis triangulares e trapezoidais para [90].

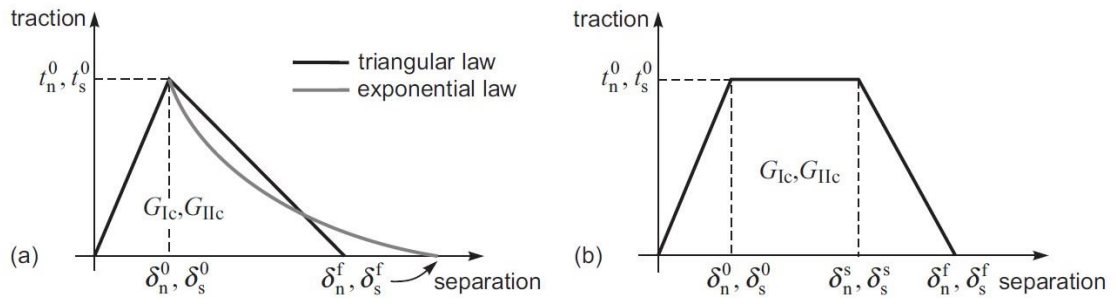


Figura 57-Exemplos de leis coesivas: a) lei triangular e lei linear-exponencial e b) lei trapezoidal

A relação entre as tensões e deformações antes da ocorrência de dano podem ser definidas pela matriz K_{COH} , através dos elementos coesivos. A matriz é definida por:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = K_{COH} \varepsilon \quad \text{Eq. (43)}$$

Os parâmetros de rigidez da ligação adesiva estão presentes na matriz, cuja definição depende da formulação utilizada. Para uma formulação local, para fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores muito elevados, com o objetivo de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença de elementos coesivos. Para formular camadas finas contínuas, em particular para ligações adesivas, obtém-se uma boa aproximação dos parâmetros de rigidez tendo em conta a expressão:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad \text{Eq. (44)}$$

onde E e G correspondem ao módulo de elasticidade longitudinal e elasticidade transversal respetivamente. Com estes parâmetros a deformação da camada de adesivo fica definida de maneira fiável. Para o modo misto, o início do dano pode ser descrito por vários critérios, nomeadamente o critério quadrático de tensões, expresso pela equação

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left(\frac{t_s}{t_s^0} \right)^2 = 1 \quad \text{Eq. (45)}$$

Para esta expressão $\langle \cdot \rangle$ representam os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não provoca qualquer dano. Este é um critério bastante preciso. Depois de atingida a carga máxima em modo misto (t_m^0) baseado na equação (nº acima), o material começa o amaciamento e começa a perder rigidez. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f) é dada por um critério linear energético, em função de G_{Ic} e de G_{IIc} .

2.3.6. Estado da arte

Este subcapítulo dedica-se a um levantamento de artigo de relevo mais recentes acerca dos ensaios ELS. Na Tabela 5 encontram-se listados os artigos considerados mais relevantes.

Tabela 5-Estado da arte do ensaio ELS

Referência Bibliográfica	Descrição
<p>A semi-analytical method for the determination of fracture toughness and bridging law in ELS test [77]</p>	<p>Este estudo propõe a aplicação de um método semi-analítico para a determinação da resistência à fratura em ensaios ELS e a <i>bridging law</i>. Para testar o método, foram realizados ensaios ELS, segundo a norma ISO 15114, em provetes de CFRP e de GFRP, para obtenção de valores experimentais, e que posteriormente foram comparados com os valores previstos no método semi-analítico. Os autores criaram também um modelo numérico, baseado num modelo coesivo tri-linear, que integra a <i>bridging law</i>. Tanto os valores obtidos numericamente, como os previstos através do método semi-analítico, são semelhantes aos valores obtidos experimentalmente. Foi concluído que o método proposto ultrapassa o problema de monitorização da evolução do comprimento de fratura e do deslocamento na ponta da pré-fenda, e que tem em conta os fatores de correção usados para grandes deslocamentos.</p>
<p>Delamination analysis of 3D-printed nylon reinforced with continuous carbon fibers [68]</p>	<p>Este artigo tem como foco a análise dos testes à delaminação através da aplicação de teorias desenvolvidas para compósitos convencionais em materiais impressos em 3D. Para tal, os autores testaram provetes impressos a 3D, em ensaios DCB e ELS. Em seguida, aplicaram métodos analíticos e numéricos para avaliar a resistência à fratura e simular o comportamento dos provetes durante os ensaios. A incerteza dos dados obtidos nos ensaios foi mitigada através do método de projeção pseudo-espectral. Desta análise resultou uma semelhança entre os resultados experimentais e os obtidos através da combinação de métodos lineares e de projeção.</p>
<p>Fracture and fatigue study of unidirectional glass/epoxy laminate under different mode of loading [107]</p>	<p>Procederam a ensaios experimentais DCB, ELS e MMB para medição da evolução da delaminação à fadiga em laminados de fibras de vidro unidirecionais e de epóxico. Foram determinadas as constantes da equação de Paris para cada rácio modal G_{II}/G_T, e a taxa de libertação limite de fadiga ΔG_{Tth}. Recorreram a técnicas de microscopia de eletrões para auxiliar a determinação dos mecanismos da delaminação à fadiga e definir as diferenças entre os vários modos de fratura.</p>

<p>Interlaminar fracture toughness of 5HS Carbon/PEEK laminates. A comparison between DCB, ELS and mandrel peel tests [72]</p>	<p>Este trabalho tem como objetivo avaliar a aplicabilidade do Mandrel Peel test (MP) na quantificação da resistência à fratura interlaminar de cinco compósitos de tecido de carbono/poli-éter-éter cetona (PEEK). Foram realizados os ensaios experimentais DCB, ELS e MP para comparação dos resultados. Mediram também a resistência à fratura em ambas as direções, paralela e perpendicular à direção da fibra na interface do tecido. Realizaram também uma análise fratógráica das fendas obtidas nos provetes ensaiados. Dos ensaios observou-se propagação estável de fenda no ensaio ELS, porém para os ensaios DCB e MP, a propagação foi instável. Observou-se também que para o MP, o mandrel conseguiu travar a instabilidade da propagação, e criou novos valores de reiniciação de fenda por unidade de comprimento. Concluiu-se que o mandrel peel test pode ser uma alternativa plausível ao ensaio DCB para compósitos de tecido.</p>
<p>Mixed-mode fatigue failure criteria for adhesively bonded pultruded GFRP joints [78]</p>	<p>Este estudo debruça-se sobre a investigação experimental do comportamento de juntas de GFRP pultrudidas sobre o efeito de cargas cíclicas. Foram estudados três tipos de provetes através de três ensaios: o ensaio DCB, o ensaio ELS e o ensaio MMB. Os autores registaram e determinaram o comprimento de fenda através de um método de flexibilidade dinâmica para o ensaio DCB, e com um extensómetro de vídeo para os restantes ensaios. Estes ensaios foram realizados a amplitude de deslocamento constante. Para todos os ensaios realizados, verificaram-se diferenças significativas entre os valores das taxas de libertação de energia (SERR) a deformações quasi-estáticas, e os valores de fadiga limite correspondentes. Os autores desenvolveram um modelo de previsão da vida dos provetes para simular uma curva de crescimento de fenda para cada modo. Por fim, com todos estes dados, desenvolveram um novo critério de previsão de fratura, para prever o comportamento à fratura de várias juntas compostas pelos mesmos adesivos e aderendos.</p>

Mode II interfacial toughening through discontinuous interleaves for damage suppression and control [79]	<p>Este trabalho tem como objetivo avaliar a capacidade de absorção de energia, a taxas de deformação baixas em laminados de fibra de vidro-epóxico com a aplicação de materiais distintos entre camadas. Para esta avaliação, realizaram-se ensaios ELS para descrever a propagação de fendas interlaminares em laminados de GFRP com fibras de filme termoplástico, fibras de aramida, fita pré-impregnada de fibra e filme de termoendurecível adicionados entre camadas, em frente ao caminho da fenda, no plano médio dos provetes sujeitos a ensaios. Foi também utilizada a frtografia para analisar a evolução da fenda nos provetes. Destes ensaios observaram-se que a resistência do laminado, e supressão do crescimento da fenda. Por fim concluiu-se que os materiais adicionados ao laminado conferem alterações das propriedades locais do laminado global, nomeadamente um aumento da resistência à fratura do mesmo, e aumento da sua capacidade de absorção de energia.</p>
Mode II wood fracture characterization using the ELS test [82]	<p>Este trabalho debruça-se na descrição de estudos experimentais e numéricos na aplicação do ensaio ELS para a caracterização à fratura em modo II de madeira, em particular num método novo de redução, baseado na flexibilidade e no método da fratura equivalente. Para testar a validade do método de redução, os autores realizaram uma análise de elementos finitos, e de um modelo de dano coesivo, que permite a simulação da iniciação da fenda e seu crescimento. O novo método proposto foi validado pela similaridade dos valores obtidos em ambas as análises. Concluiu-se que o novo método proposto apresentava três vantagens em relação à metodologia clássica: não necessitava de medição da fenda durante a sua propagação, tinha em conta a rotação na extremidade sujeita ao aperto e inclui o efeito da FPZ na ponta da fenda.</p>

<p>On determining mixed-mode traction-separation relations for interfaces [85]</p>	<p>Este estudo tem como objetivo validar a utilização de um método para determinar as relações tração-separação, tendo por base uma combinação de medições globais e locais de ensaios, incluindo o a curva força-deslocamento, comprimento de fenda, deslocamento da pré-fenda e curvas de resistência à fratura. Para tal, efetuaram ensaios ELS para um interface silício-epóxido, e com a espessura do epóxido usada como controlo do ângulo de fase. Foi usado também interferometria infravermelha para medir os deslocamentos da abertura da fenda, e correlação de imagem para medição das componentes normais e de corte dos deslocamentos da pré-fenda. Para a obtenção das curvas de resistência, os autores usaram um valor do integral J, baseado num modelo <i>beam-on-elastic</i>, que referencia a curva força-deslocamento, e para a análise de elementos finitos, recorreram a um modelo de dano coesivo, e com as propriedades interfaciais usadas retiradas do ensaio experimental. Foram previstas fraturas para ângulos de fase entre -42° e 0°.</p>
<p>The influence of mode II test configuration on the cohesive law of bonded joints [69]</p>	<p>Os autores têm como objetivo deste trabalho avaliar o efeito dos ensaios em modo II na lei coesiva das juntas adesivas. Para tal, inverteram o processo, extraíndo a lei coesiva de curvas força-deslocamento obtidas experimentalmente, através de um procedimento analítico para representar a <i>Fracture Process Zone</i> (FPZ) dos ensaios ENF e ELS. Desta análise, concluiu-se que o as leis coesivas são independentes do tipo de ensaio. Concluiu-se também que os valores da resistência à fratura obtidos na integração da lei coesiva são semelhantes aos do integral J.</p>
<p>Towards a consensus on mode II adhesive fracture testing: Experimental study [71]</p>	<p>O trabalho propõe a definição de metodologias de teste e métodos de redução para obtenção de resultados semelhantes aos testes ENF, ELS, 4ENF e MMB. Os autores recorreram a uma bateria de ensaios experimentais mencionados acima, e implementaram o integral J para o ensaio 4ENF. Em seguida, compararam os resultados do integral com os métodos baseados na <i>Linear Elastic Fracture Mechanics</i> (LEFM). Os resultados obtidos por ambos os métodos foram bastante semelhantes. Do trabalho, os autores concluíram que o ensaio ELS é o mais adequado para a obter a resistência de uma junta adesiva à fratura.</p>

3. Desenvolvimento

Este capítulo tem como objetivo descrever a fase experimental do trabalho, nele encontra-se o provete desenhado e a sua geometria, os materiais aplicados, tanto para os adesivos como para os aderentes, a modelação numérica do ensaio ELS e o programa escolhido para a simulação. Dedicam-se também subcapítulos ao método de análise do ensaio, o pré-processamento, os modelos de dano coesivo e os métodos de redução escolhidos. Em seguida faz-se um registo dos resultados obtidos, faz-se um levantamento das curvas $P-\delta$ e das curvas R para proceder à validação dos métodos de redução e comparação com outros ensaios e uma análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos. Por fim é realizado um levantamento da rigidez da junta, das resistências coesivas e das tenacidades à fratura e combinação de parâmetros e retiram-se conclusões dos efeitos das suas variações nos ensaios.

3.1. Geometria a analisar

Para a realização dos ensaios ELS no modelo simulado, tendo como referência os valores experimentais de outros trabalhos estudados no Subcapítulo 2.3.3 e listados na Tabela 4, desenhou-se um provete de base com as dimensões ilustradas na Figura 58 e listadas na Tabela 6.

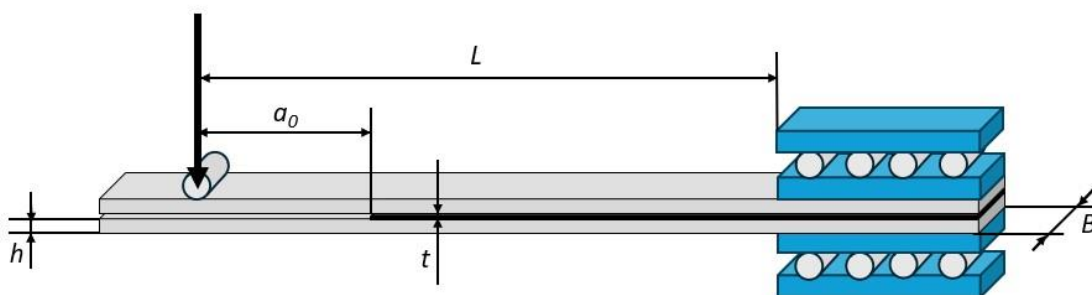


Figura 58-Representação esquemática do provete ELS usado na modelação numérica

Tabela 6-Dimensões do provete utilizado na modelação numérica

L [mm]	a_0 [mm]	h [mm]	t [mm]	B [mm]
131	36	3	0,2	25

3.2. Materiais

Este subcapítulo dedica-se aos materiais escolhidos para a criação dos modelos numéricos das juntas adesivas no *software* Abaqus®, nomeadamente os materiais escolhidos como aderentes e os escolhidos para adesivos e uma vista detalhada das suas propriedades mecânicas necessárias para a interpretação dos modelos. Foram escolhidos materiais distintos tanto para adesivos como para aderentes, para obter uma base de dados maior para comparação e validação com valores experimentais.

3.2.1. Aderentes

Para este trabalho foram escolhidos dois aderentes distintos, a liga de alumínio AL6082 T651 e o CFRP SEAL®Texipreg HS 160 RM. Ambos os materiais têm uma gama de aplicações muito vasta, como por exemplo, nas indústrias automóvel e aeronáutica. A liga de alumínio escolhida contém vários elementos de liga, entre eles o magnésio e o silício, considerados os principais. Trata-se de uma liga da série 6000. Esta é caracterizada por ser uma liga com tensão de rotura elevada obtida, e foi escolhida por ser um material bastante comum em aplicações estruturais a nível europeu. Tem como características principais a boa soldabilidade e excelente resistência à corrosão. As curvas σ - ε e as propriedades mecânicas da liga de alumínio encontram-se respetivamente na Figura 59 e na Tabela 7.

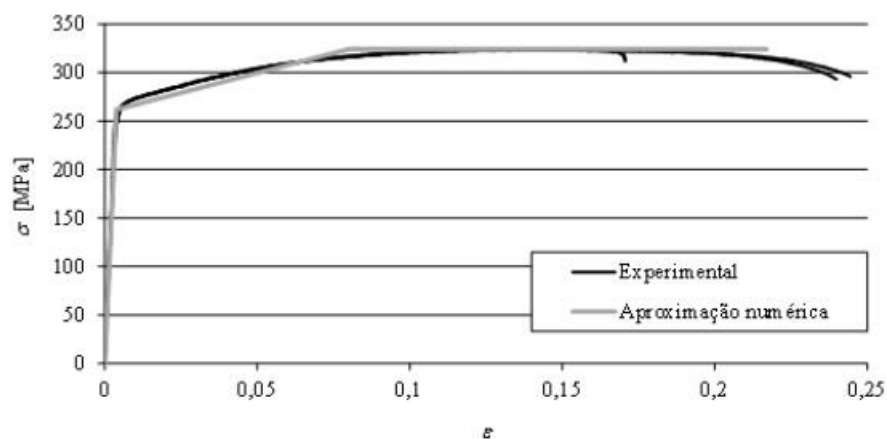


Figura 59-Curvas σ - ε da liga de alumínio AL6082 T651 [108]

Tabela 7-Propriedades do alumínio 6082 T651 [108]

Propriedades	Valor
Módulo de Young, E [GPa]	$70,07 \pm 0,83$
Coefficiente de Poisson, ν	0,3
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	$324 \pm 0,16$
Tensão limite de proporcionalidade, $R_{p0,2}$ [MPa]	261,7
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	$21,7 \pm 4,24$

O CFRP é constituído por uma matriz de resina epóxida com fibra de carbono, na forma de pré-impregnado unidirecional, com camadas de 0,15 mm de espessura. Foram 20 camadas para a obtenção dos substratos com 3 mm de espessura. As propriedades mecânicas do CFRP em todas as direções encontram-se listadas na Tabela 8.

Tabela 8-Propriedades mecânicas de CFRP

Propriedades	Valor
Módulo de Young, E_{11} [GPa]	109
Módulo de Young, E_{22} [GPa]	8,819
Módulo de Young, E_{33} [GPa]	8,819
Coefficiente de Poisson, ν_{12}	0,342
Coefficiente de Poisson, ν_{13}	0,342
Coefficiente de Poisson, ν_{23}	0,380
Módulo de corte, G_{12} [GPa]	4,315
Módulo de corte, G_{13} [GPa]	4,315
Módulo de corte, G_{23} [GPa]	3,200

3.2.2. Adesivos

Foram escolhidos três adesivos diferentes para a realização deste trabalho, já estudados em trabalhos anteriores: o adesivo epóxido Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

Os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 são ambos adesivos da mesma família, a dos epóxidos, no entanto apresentam propriedades mecânicas distintas. O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo termoendurecível, composto por duas partes, a resina (ou componente A) e o endurecedor HV 998 (ou componente B). Os componentes devem ser misturados a uma razão de 10 g de resina para 4 g de endurecedor. O processo de cura do adesivo dá-se à temperatura ambiente, com poucas perdas voláteis e baixa emissão de gases. Este apresenta elevada resistência ao corte e à tração, elevada resistência química e a altas temperaturas (até aos 120 °C), e é capaz de ligar materiais de famílias diferentes. Trata-se de um adesivo frágil, pelo que é de especial relevância a sua correta aplicação, pois este é sensível a defeitos de fabricação, e que pode levar a desvios nas características medidas entre os aderentes. Na Figura 60 estão representadas as curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo, obtidas experimentalmente, e na Tabela 9 encontram-se as propriedades mecânicas mais relevantes para este trabalho [109].

Desenvolvimento

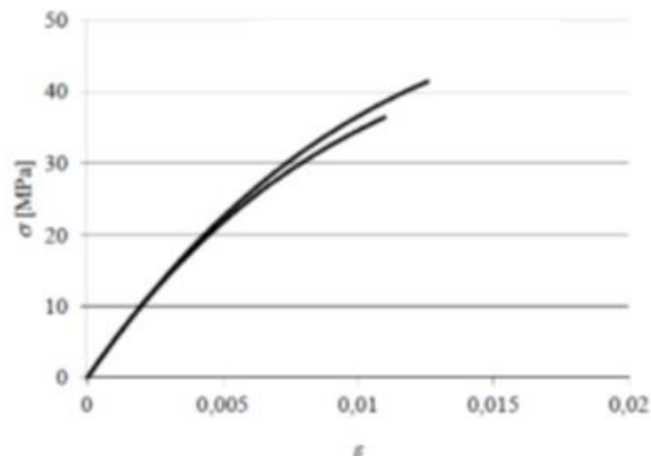


Figura 60-Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® AV138 [110]

Tabela 9-Propriedades do adesivo Araldite® AV138 [110]

Propriedades	Valor
Módulo de Young (E) [GPa]	$4,89 \pm 0,81$
Coefficiente de Poisson (ν)	$0,35^b$
Módulo de elasticidade transversal (G_{xy}) [GPa]	$1,56 \pm 0,01$
Tensão de rotura à tração (σ_f) [MPa]	$39,45 \pm 3,18$
Tensão limite de proporcionalidade à tração ($R_{p0,2}$) [MPa]	$36,49 \pm 2,47$
Deformação de rotura à tração (ϵ_f) [%]	$1,21 \pm 0,10$
Tensão limite de proporcionalidade ao corte ($R_{p0,2 \text{ corte}}$) [MPa]	$25,10 \pm 0,33$
Tensão de rotura ao corte (τ_f) [MPa]	$30,20 \pm 0,40$
Deformação de rotura ao corte (γ_f) [%]	$7,80 \pm 0,7$
Tenacidade à tração (G_{IC}) [N/mm]	$0,20^a$
Tenacidade ao corte, (G_{IIC}) [N/mm]	$0,38^a$

^a-valores estimados na referência [110]

^b valor do fabricante

Por sua vez, o adesivo Araldite® 2015 também é um adesivo epóxico bi-componente, com relação mássica de 1 g de resina para 1 g de endurecedor, e o seu processo de cura dá-se à temperatura ambiente. Este adesivo é mais dúctil do que o AV138, mas apresenta uma resistência à tração e ao corte inferiores. A ductilidade deste adesivo traz vantagens, porque permite a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensões, comuns nas extremidades da zona de ligação. Na Figura 61 estão as curvas σ - ϵ de provetes de Araldite®

2015, e as propriedades mecânicas e de fratura de maior relevo para o trabalho encontram-se na Tabela 10.

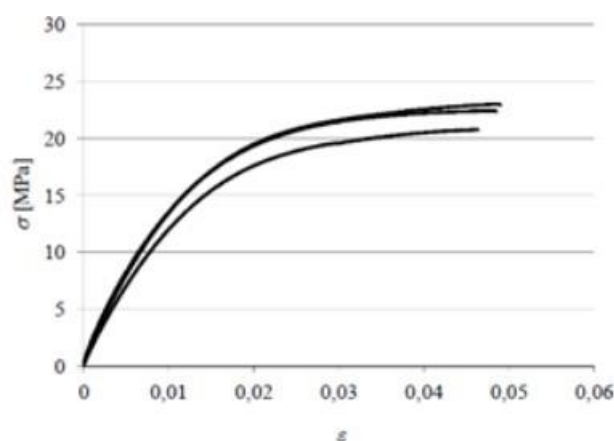


Figura 61-Curvas σ - ϵ do adesivo Araldite® 2015 [109]

Tabela 10-Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [109]

Propriedades	Valor
Módulo de Young (E) [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson (ν)	$0,33^b$
Módulo de elasticidade transversal (G_{xy}) [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de rotura à tração (σ_f) [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Tensão limite de proporcionalidade à tração ($R_{p0,2}$) [MPa]	$12,63 \pm 2,47$
Deformação de rotura à tração (ϵ_f) [%]	$4,77 \pm 0,15$
Tensão limite de proporcionalidade ao corte ($R_{p0,2 \text{ corte}}$) [MPa]	$14,60 \pm 1,3$
Tensão de rotura ao corte (τ_f) [MPa]	$17,90 \pm 1,8$
Deformação de rotura ao corte (γ_f) [%]	$43,9 \pm 3,4$
Tenacidade à tração (G_{IC}) [N/mm]	$0,43 \pm 0,02^a$
Tenacidade ao corte, (G_{IIC}) [N/mm]	$4,70 \pm 0,34^a$

^a-valores estimados na referência [109]

^b-valor do fabricante

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo estrutural da família dos poliuretanos, o que o torna ainda mais dúctil do que o Araldite® 2015, tixotrópico, composto por dois componentes, o componente A (resina polioliol) e o componente B (endurecedor FRW L60 de base isocianato), numa relação mássica de 5 g para 1 g, respetivamente. O seu processo de cura dá-se à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e de perdas voláteis. No entanto, este é o

Desenvolvimento

adesivo que apresenta menor resistência à tração e ao corte. Por outro lado, este apresenta boa resistência a altas temperaturas e ao envelhecimento, elevada tenacidade, resistência ao impacto e resistência à exposição química. Como tal, este encontra aplicação na ligação de materiais de famílias distintas, como metais, madeiras e cerâmicos. As curvas σ - ε e as propriedades mecânicas e de fratura do adesivo encontram-se na Figura 62 e Tabela 11, respetivamente.

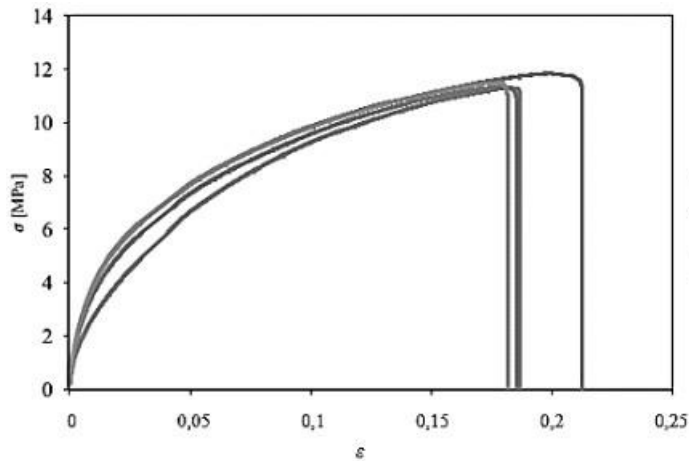


Figura 62-Curvas σ - ε do adesivo SikaForce® 7752 [111]

Tabela 11-Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 7752 [111]

Propriedades	Valor
Módulo de Young (E) [GPa]	$493,81 \pm 89,6$
Coefficiente de Poisson (ν)	$0,33^a$
Módulo de elasticidade transversal (G_{xy}) [GPa]	$187,75 \pm 16,4$
Tensão de rotura à tração (σ_f) [MPa]	$11,49 \pm 0,3$
Tensão limite de proporcionalidade à tração ($R_{p0,2}$) [MPa]	$3,24 \pm 0,5$
Deformação de rotura à tração (ε_f) [%]	$19,18 \pm 1,4$
Tensão limite de proporcionalidade ao corte ($R_{p0,2 \text{ corte}}$) [MPa]	$5,16 \pm 1,1$
Tensão de rotura ao corte (τ_f) [MPa]	$10,17 \pm 0,6$
Deformação de rotura ao corte (γ_f) [N/mm]	$54,82 \pm 6,4$
Tenacidade à tração (G_{IC}) [N/mm]	$2,36 \pm 0,2$
Tenacidade ao corte, (G_{IIC}) [N/mm]	$5,41 \pm 0,5$

^a-valor do fabricante

As propriedades finais de cada um dos adesivos utilizados para a modelação numérica em *software* encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12-Propriedades dos adesivos utilizadas na modelação numérica

	E (MPa)	G (MPa)	τ_u (MPa)	τ_s (MPa)	G_{IC} (MPa)	G_{IIC} (MPa)
Araldite® AV138	4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38
Araldite® 2015	1850	560	21,63	17,9	0,43	4,7
SikaForce® 7752	493	187	11,49	10,17	2,36	5,41

3.3. Modelação numérica

Este Subcapítulo dedica-se à descrição do programa selecionado para a simulação do ensaio ELS e das suas capacidades, dos parâmetros coesivos usados na simulação, o método de análise escolhido, os métodos de redução utilizados para a obtenção do parâmetro G_{IIC} e discussão dos resultados obtidos.

3.3.1. Programa selecionado

O programa selecionado para a realização deste trabalho foi o Abaqus®. Com este programa é possível usar os modelos de dano coesivo para prever a resistência das ligações adesivas. O programa é uma ferramenta de análise de elementos finitos, capaz de simular problemas reais complexos para uma gama abrangente de indústrias. É dotado de uma biblioteca extensa de tipos de elementos, capazes de modelar estruturas de geometria complexa, e uma biblioteca extensa de materiais, que o torna numa ferramenta poderosa para simular tensões e deformações em materiais isotrópicos e anisotrópicos a temperatura e taxas de deformação distintas [51].

3.3.2. Método de análise

Após análise de todas as abordagens de cálculo da tenacidade à fratura, descritas em detalhe no Subcapítulo 2.2.2, escolheu-se o modelo de dano coesivo como mais apropriado para obtenção da curva $P-\delta$ dos ensaios e consequente cálculo de G_{IIC} . Este trabalho foca-se na lei triangular, onde se torna mais fácil a introdução de parâmetros e fiabilidade dos resultados obtidos na maioria dos casos. O modelo da lei triangular apresenta dois modos, puro e misto. No modo puro, o dano ocorre num conjunto de nós análogos quando as tensões são anuladas nas leis coesivas respetivas. Para o modo misto, usam-se critérios energéticos em conjunto com critérios de tensão a combinar os efeitos de tração e de corte nos modos puros.

3.3.3. Pré-processamento

A análise numérica começa com o desenho de perfil do provete da junta ELS em 2D, recorrendo às ferramentas do *software* em duas dimensões, com os valores definidos na Tabela 6 do Subcapítulo 3.1. Utilizaram-se elementos sólidos, disponíveis no *software* (CPE4), sob estado plano de deformação para as análises com ambos os aderentes, CFRP e alumínio. Para a modelação do adesivo recorreu-se a elementos coesivos de quatro nós (COH2D4). Foi utilizada de elementos coesivos triangulares, descritos no Subcapítulo 2.3.5. A malha foi criada no provete tendo em conta as regiões mais pertinentes ao ensaio, com o objetivo de maximizar a utilização dos recursos computacionais, obtendo os resultados mais precisos no menor tempo possível. Para alcançar isto, aplicou-se um refinamento geral no provete, com elementos de tamanho superior, ilustrado na Figura 63, e na zona de fratura um refinamento de malha, com elementos de dimensão $0,2 \times 0,2 \text{ mm}^2$ para a zona adesiva e um aumento ligeiro e progressivo de tamanho à medida que se afasta do centro para os limites do provete, e outro refinamento na zona da extremidade livre onde se efetua o carregamento para elementos de tamanho, para melhor medir as forças e deslocamentos aplicados ao provete, com dimensões $0,05 \times 0,373 \text{ mm}^2$ ilustrado na Figura 64.



Figura 63-Refinamento geral da malha do provete no software

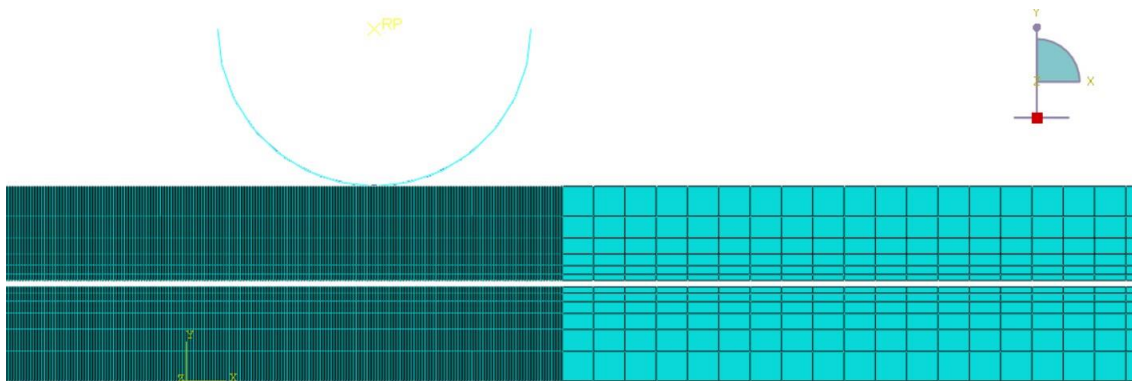


Figura 64-Refinamento de malha na zona do punção de carregamento

Como condições fronteira do ensaio, encastrou-se a extremidade direita do provete, ao restringir o seu movimento horizontal e vertical e a rotação, e simulou-se o carregamento ao aplicar um deslocamento vertical descendente de 100 mm no punção, localizado na extremidade livre do provete. Estas condições estão representadas pelas setas laranjas na Figura 65.



Figura 65-Condições fronteira aplicadas no provete

Depois de estabelecidas as condições fronteira, reproduziram-se os contactos entre os substratos da junta, para que estes deslizem sem atrito e se evite a interpenetração entre si sob a forma de deslizamento finito, na região de pré-fenda do provete, e estabeleceu-se o contacto que simula o carregamento, entre o punção e o provete, também sob a forma de deslizamento finito. Estas interações encontram-se representadas por quadrados amarelos na Figura 66.



Figura 66-Interações entre elementos no provete

3.3.4. Métodos de redução selecionados

Para a obtenção de valores de G_{IIc} foram utilizados os métodos de redução CCM, CBT, ECM, CBTE, CBBM (2008) e CBBM (2007), explicados com detalhe no Subcapítulo 2.3.2 e listados na Tabela 13.

Tabela 13-Métodos de redução selecionados

Método	
CCM	$G_{II} = \frac{p^2}{2B} \frac{dC}{da}$
CBT	$G_{II} = \frac{9p^2(a + \Delta_{II})^2}{4B^2h^3E_1}$
SBT	$G_{II} = \frac{9p^2a_m^2}{4b^2h^3E_1}$
ECM	$G_{II} = \frac{9p^2a_e^2}{4B^2h^3E_1}$
CBTE	$G_{II} = \frac{9p^2a_e^2}{4B^2E_1h^3} F_2$
CBBM (2008)	$G_{II} = \frac{9p^2C_{0c}}{(3a_0^3 + L^3)} \left[\frac{C_c}{C_{0c}} a_0^3 + \frac{L^3}{3} \left(\frac{C_c}{C_{0c}} - 1 \right) \right]^{2/3} F_2$
CBBM (2007)	$G_{II} = \frac{9p^2}{4B^2h^3E_1} \left[(C - C_0) \frac{2Bh^3E_1}{3} + a_0^3 \right]^{2/3}$

3.4. Resultados obtidos

Neste subcapítulo encontram-se os resultados obtidos para as curvas $P-\delta$ por adesivo, as curvas R de cada método de redução em cada provete, e com estes validam-se os métodos de redução utilizados no cálculo de G_{IIc} para cada ensaio.

3.4.1. Curvas $P-\delta$

Depois de efetuadas as simulações no programa Abaqus®, obtiveram-se os gráficos presentes neste Subcapítulo, representativos das curvas $P-\delta$ do ensaio de cada provete, e agrupados por adesivo.

Analisando as curvas da Figura 67 para cada substrato, verifica-se que ambos os provetes sofrem uma rotura frágil, praticamente imediata, ocorrendo primeiro para o CFRP, ao fim de um deslocamento de aproximadamente 8 mm, seguido do alumínio, ao fim de um deslocamento de aproximadamente 9 mm. Esta queda abrupta na força advém das propriedades de fratura do adesivo, nomeadamente o seu comportamento frágil. Pelas inclinações da parte elástica das curvas, verifica-se também uma maior rigidez do provete de CFRP em relação ao de alumínio, visto que o declive da reta de CFRP é superior ao da reta de alumínio. Este dado vai de novo ao encontro do comportamento expectável dos materiais, tendo em conta as propriedades mecânicas detalhadas no Subcapítulo 3.2. Verifica-se também que as propriedades do adesivo não causaram grande influência na força máxima a atuar nos provetes, visto que estas são quase iguais para ambos os casos, no entanto, é o único caso em que a força máxima a atuar no provete de alumínio é superior ao do provete de CFRP.

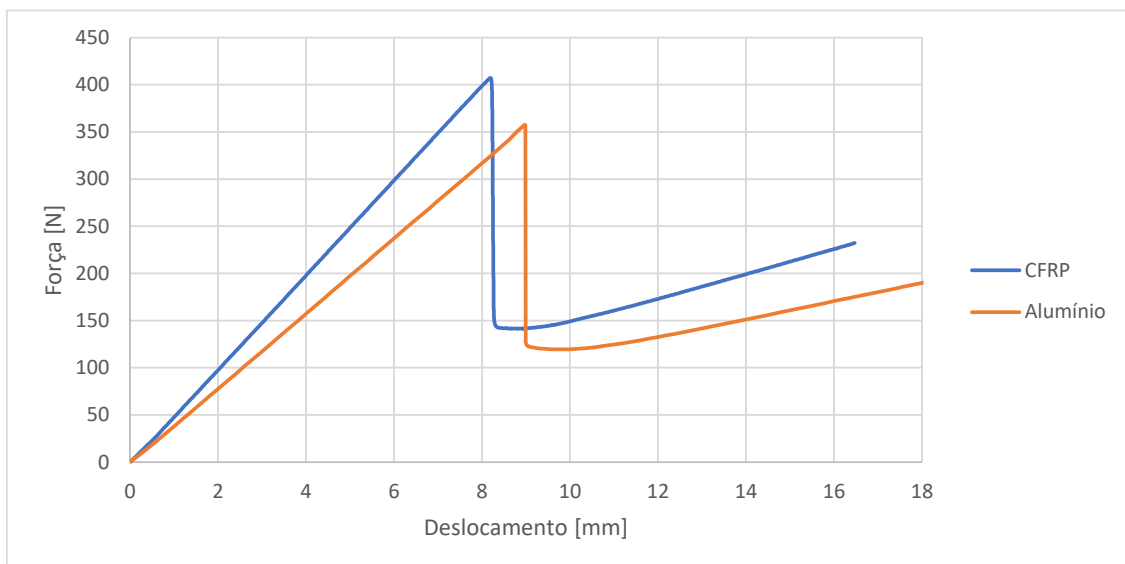


Figura 67-Curvas $P-\delta$ para adesivo AV138

Ao observar as curvas da Figura 68 para cada um dos substratos, verifica-se que ambos os provetes sofrem uma rotura igualmente frágil, apesar de a queda da força após atingido o valor máximo ser um pouco mais suave. Realça-se também que a fratura ocorre novamente primeiro no provete de CFRP, para um deslocamento de 24 mm, seguido do alumínio, apenas ao fim de um deslocamento de aproximadamente 28 mm. Estes dados voltam a ser congruentes com os valores expostos no Subcapítulo 3.2. Novamente pelas inclinações da parte elástica das curvas verifica-se também uma maior rigidez do provete de CFRP em relação ao de alumínio, visto que o declive da reta de CFRP é superior ao da reta de alumínio. Este dado volta a ir de encontro ao comportamento expectado dos materiais, tendo em conta as propriedades mecânicas dos materiais, detalhadas no Subcapítulo 3.2. Verifica-se também que a variação dos valores se

força máxima entre os provetes não é muito acentuada (cerca de 10%), porém é a maior variação registada para os 3 adesivos.

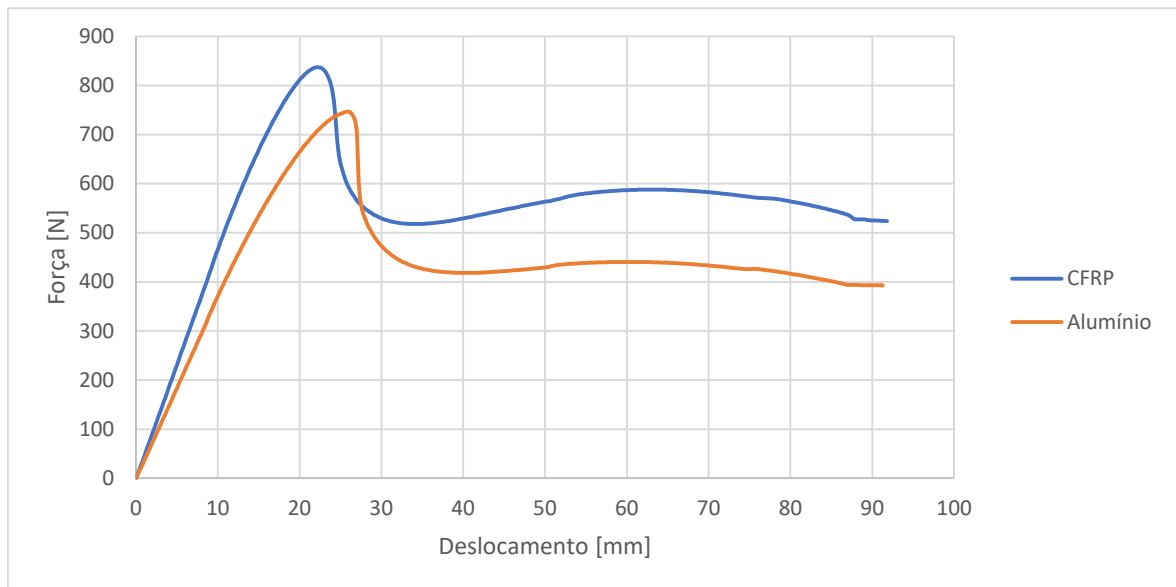


Figura 68-Curvas P- δ para adesivo 2015

Por fim, para os ensaios correspondentes aos provetes constituídos pelo adesivo 7752 (Figura 69), nota-se uma diferença considerável em relação à queda da força após ser atingido o seu pico. Sendo o adesivo mais dúctil dos três utilizados, espera-se ver umas curvas mais suaves após a fratura, o que se verifica nas curvas, uma transição suave após atingido o pico, para um deslocamento de aproximadamente 25 mm em ambos os provetes. Assim como para os restantes adesivos, repara-se também numa maior rigidez para o provete de CFRP em relação do alumínio, visto que o declive da zona elástica da curva é superior. Por fim, volta-se a observar uma variação pequena entre os valores máximos da força em cada caso (menos de 10%).

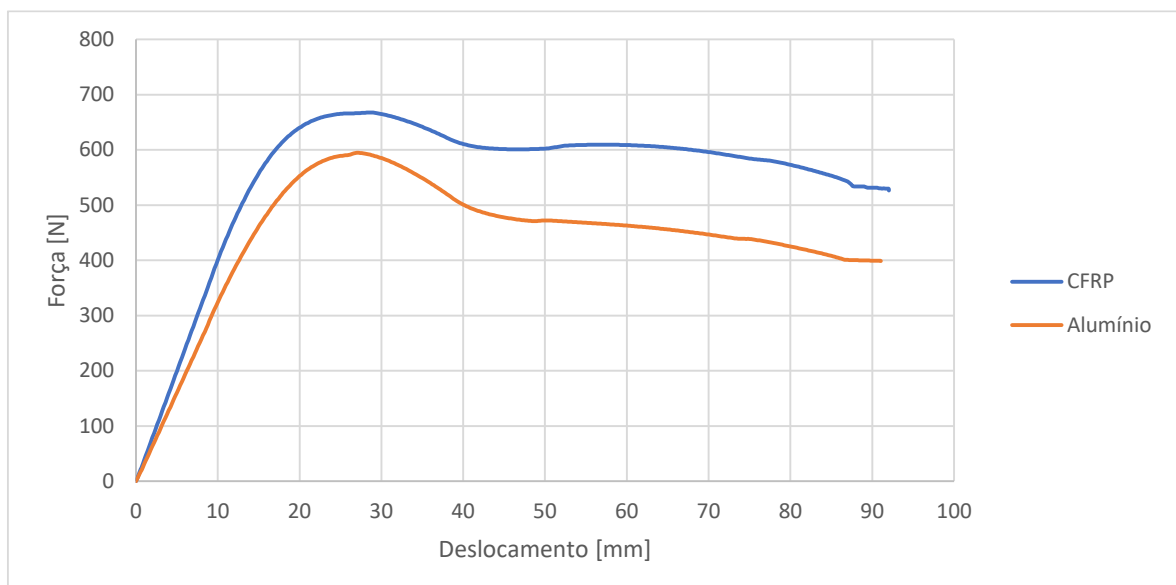


Figura 69-Curvas P- δ para adesivo 7752

3.4.2. Curvas R

Em seguida, obtiveram-se as curvas R para cada método de redução, por cada provete. Analisando a Figura 70 que diz respeito ao provete AV138 CFRP, verificam-se que as curvas referentes aos métodos ECM, CBTE e CBBM encontram-se deslocadas para a direita, que coincide com o facto de serem métodos baseados no comprimento equivalente para o cálculo de G_{IIc} . Verifica-se também para quase todas as curvas um pequeno patamar de convergência para $G_{II}=0,5$.

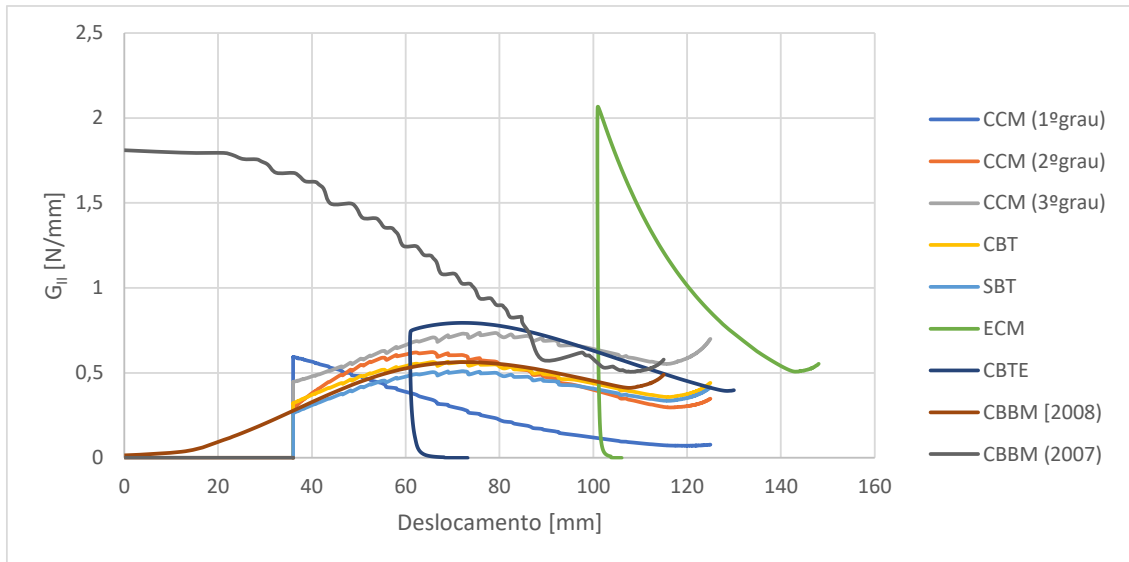


Figura 70-Curvas R do provete AV138 CFRP

Quanto às curvas R do ensaio AV138 Alumínio, representadas na Figura 71, verifica-se novamente o deslocamento para a direita das curvas relativas aos métodos que fazem uso do comprimento equivalente para o cálculo de G_{II} (curvas CBBM, ECM e CBTE). Repara-se também na formação de um patamar em quase todas as curvas para $G_{II}=0,5$.

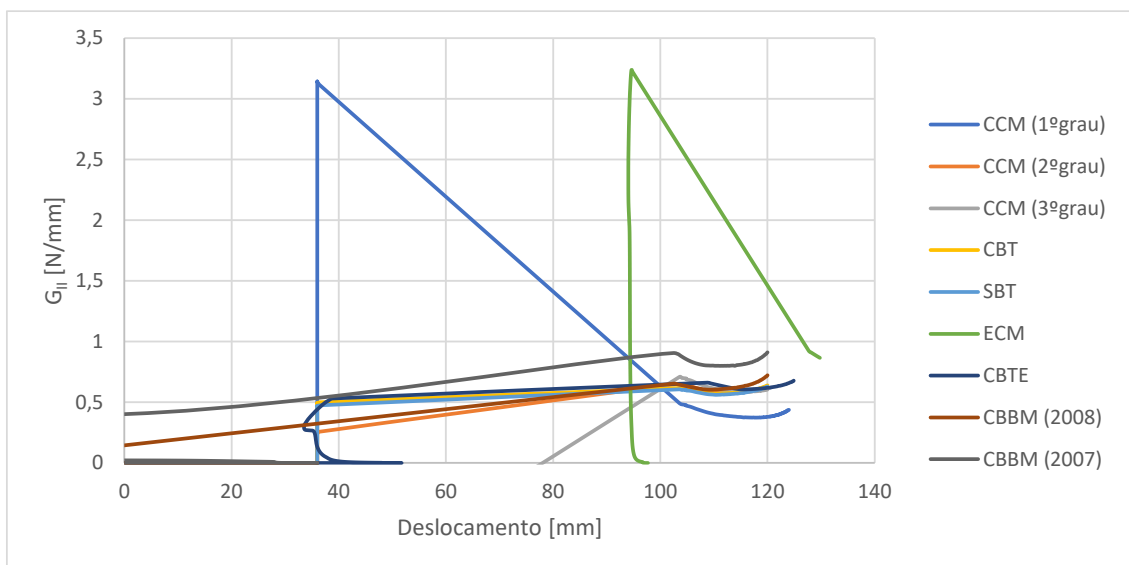


Figura 71-Curvas R do provete AV138 Alumínio

Para o provete 2015 CFRP (Figura 72), observa-se o deslocamento para a direita das curvas relativas aos métodos que fazem uso do comprimento equivalente para o cálculo de G_{II} (curvas CBBM, ECM e CBTE). Repara-se que existe a formação de um pequeno patamar para a curvas CBBM e CBTE.

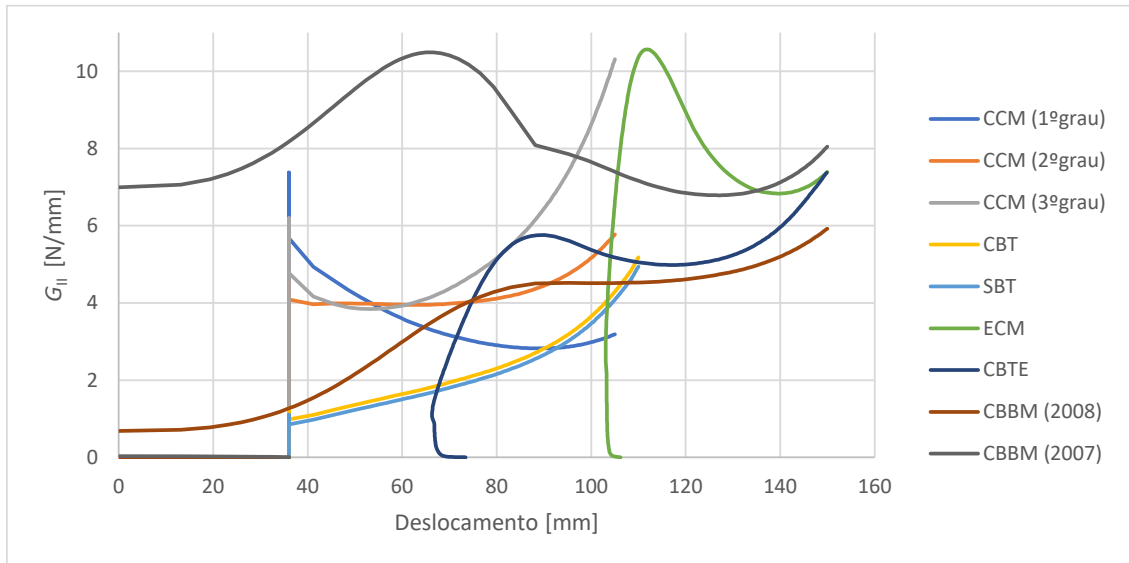


Figura 72-Curvas R do provete 2015 CFRP

Analisando as curvas R do ensaio 2015 Alumínio, representadas na Figura 71, repara-se novamente no deslocamento para a direita das curvas relativas aos métodos CBBM, ECM e CBTE. Observa-se também e um patamar em quase todas as curvas para aproximadamente $G_{II}=4,5$.

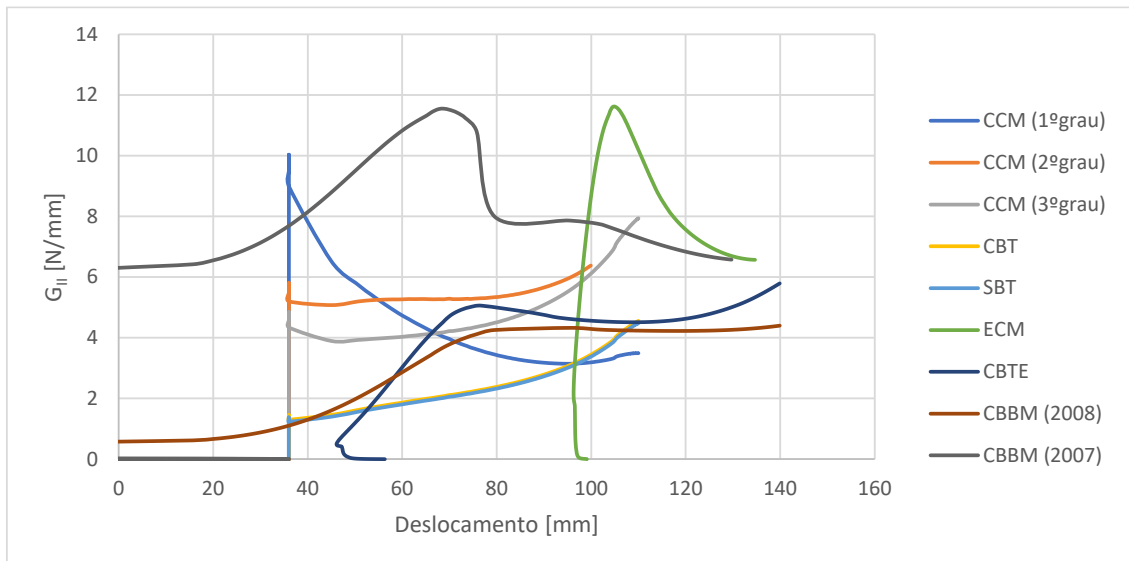


Figura 73-Curvas R do provete 2015 Alumínio

Quanto às curvas R do ensaio 7752 CFRP, ilustradas na Figura 71, repara-se novamente no deslocamento para a direita das curvas relativas a CBBM, ECM e CBTE. Verifica-se um patamar nas curvas dos métodos CBBM (2008) para $G_{II}=4,2$ e para $G_{II}=6$ para CBBM (2007).

Desenvolvimento

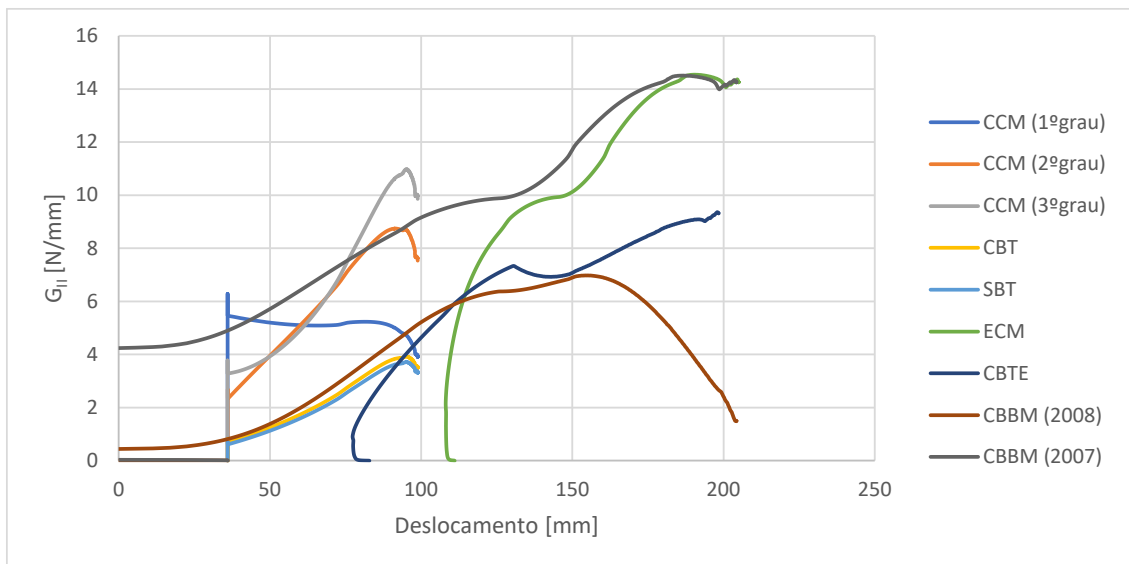


Figura 74-Curvas R do provete 7752 CFRP

Para as curvas R do ensaio 7752 Alumínio (Figura 71), verifica-se o mesmo deslocamento para a direita das curvas relativas aos métodos de redução CBBM, ECM e CBTE. Observa-se um patamar nas curvas CBBM para aproximadamente $G_{II}=4,6$.

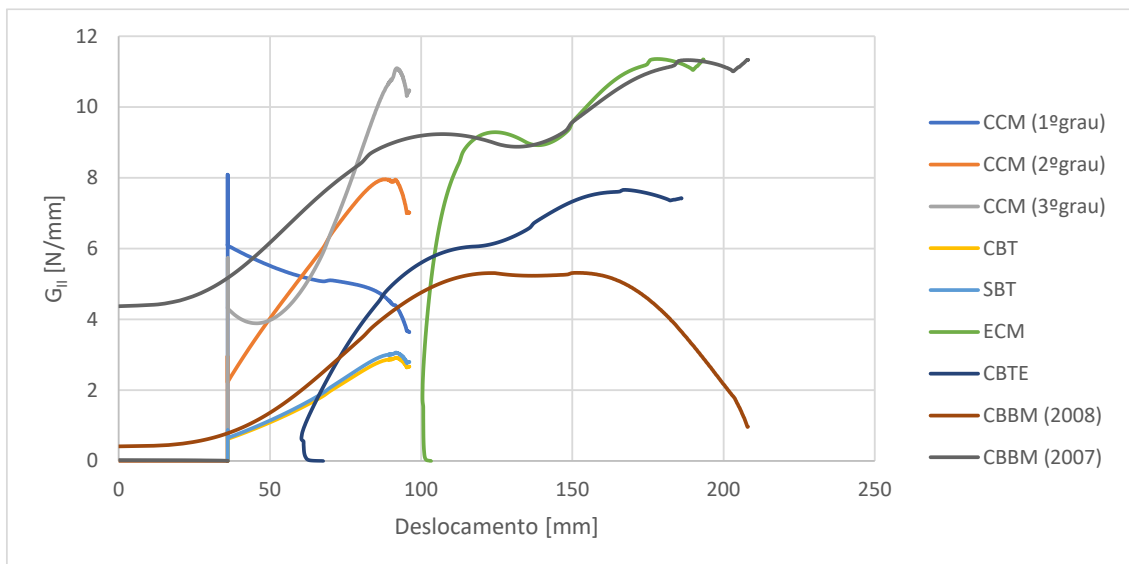


Figura 75-Curvas R do provete 7752 Alumínio

Para todos os casos pode-se verificar um deslocamento das curvas relativas aos métodos de redução CBBM (2007 e 2008), CBTE e ECM, que vão de encontro ao esperado, tendo em conta que são métodos que fazem uso do deslocamento equivalente ao invés do deslocamento medido para o cálculo de G_{II} .

3.4.3. Validação dos métodos de redução

Neste Subcapítulo faz-se a validação dos métodos de redução utilizados, descritos no Subcapítulo 2.3.2. A Tabela 14 apresenta nove diferentes métodos de cálculo utilizados para

obtenção de valores de G_{IIC} para todos os ensaios e os respectivos valores de referência usados nas simulações modeladas no *Abaqus*®. A Figura 76, Figura 77 e Figura 78 mostram uma representação desses valores obtidos em relação aos valores de referência adotados na simulação, representados pelas linhas a vermelho nos gráficos.

Tabela 14-Valores de G_{IIC} obtidos pelos métodos de redução selecionados

Adesivo	Aderente	CCM (1º grau)	CCM (2º grau)	CCM (3º grau)	CBT	SBT	ECM	CBTE	CBBM (2008)	CBBM (2007)	Valores referência
AV138	Alumínio	0,456	0,654	0,615	0,537	0,541	0,468	0,569	0,651	0,464	0,38
	CFRP	0,522	0,440	0,522	0,439	0,399	0,374	0,644	0,438	0,515	
2015	Alumínio	3,762	4,202	3,310	2,759	3,462	5,364	5,132	5,326	5,467	4,7
	CFRP	3,861	3,971	4,051	4,582	4,869	4,310	5,179	4,359	5,781	
7752	Alumínio	5,235	5,629	5,905	2,863	3,029	6,265	6,087	5,224	5,515	5,41
	CFRP	5,171	5,589	5,743	3,811	3,632	6,966	7,072	6,3909	5,410	

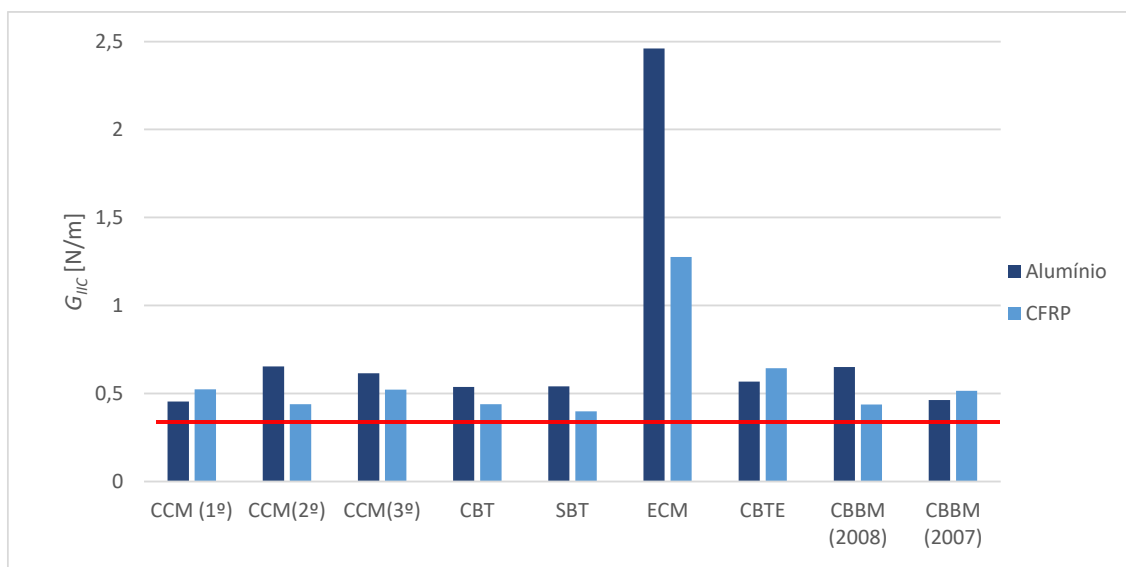


Figura 76-Valores calculados para o adesivo AV138

Desenvolvimento

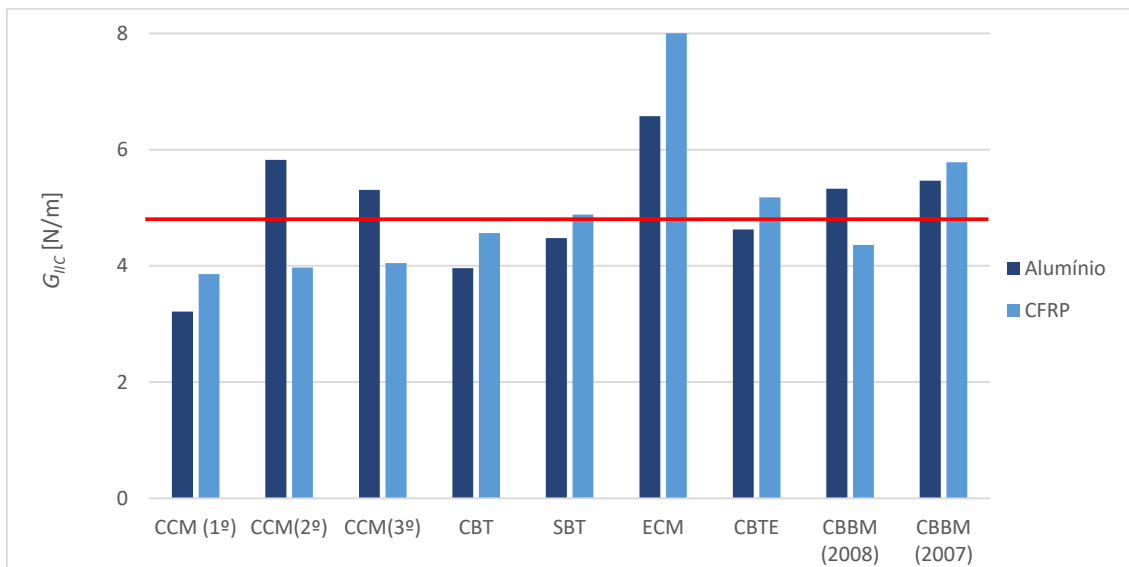


Figura 77-Valores calculados para o adesivo 2015

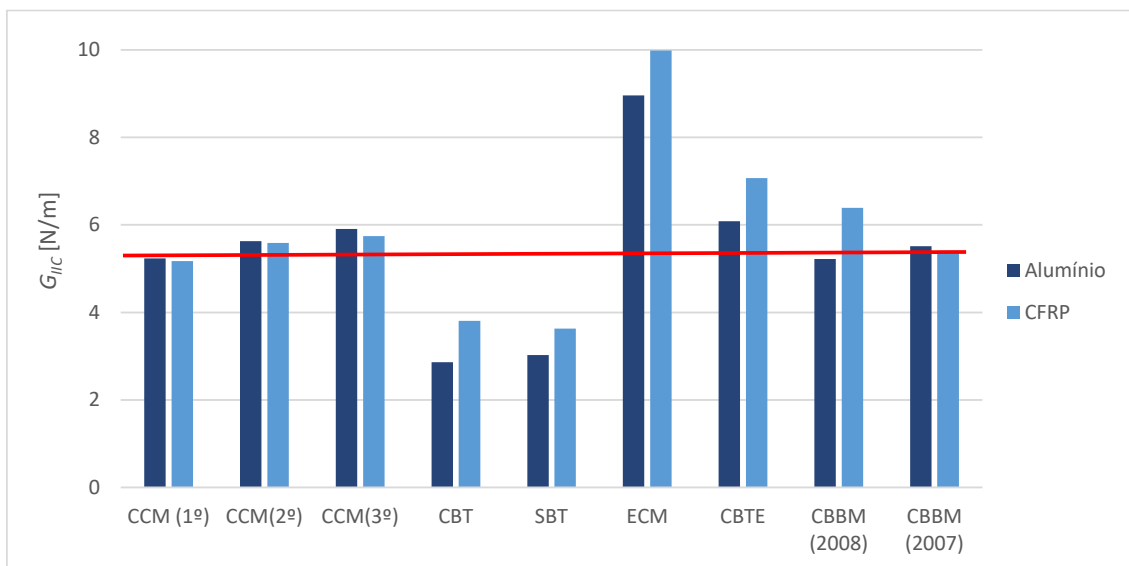


Figura 78-Valores calculados para o adesivo 7752

A Tabela 15 apresenta as percentagens de erro obtidas em cada método de redução, para cada ensaio. Tendo em conta estes valores, foram excluídos todos os métodos de redução, com exceção dos CBBMs. Concluiu-se que o método a ser adotado seria o CBBM (2007), visto que para todos os ensaios as percentagens de erro são relativamente reduzidas. O método CBBM (2008) foi também ponderado, porém a percentagem de erro bastante elevada para o ensaio AV138 Alumínio não podia ser negligenciada.

Tabela 15-Percentagens de erro em relação aos valores arbitrados

Adesivo	Aderente	CCM (1ºgrau)	CCM (2ºgrau)	CCM (3ºgrau)	CBT	SBT	ECM	CBTE	CBBM (2008)	CBBM (2007)
AV138	Alumínio	20%	72%	62%	41%	42%	548%	50%	71%	22%
	CFRP	38%	16%	37%	16%	5%	236%	70%	15%	36%
2015	Alumínio	-32%	24%	13%	-16%	-5%	40%	-2%	13%	16%
	CFRP	-18%	-16%	-14%	-3%	4%	80%	10%	-7%	23%
7752	Alumínio	-3%	4%	9%	-47%	-44%	66%	13%	-3%	2%
	CFRP	-4%	3%	6%	-30%	-33%	85%	31%	18%	0%

3.5. Análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos

Neste subcapítulo realiza-se uma análise de sensibilidade dos parâmetros coesivos, nomeadamente a rigidez (G), a tenacidade à fratura (G_c), e a resistência coesiva (t_s^0). Os valores destas propriedades foram variados individualmente, em -75%, -50%, -25%, 0%, 25%, 50%, 75% e 100%, e em conjunto, para obter novas curvas $P-\delta$ e comparar o seu efeito.

3.5.1. Rigidez

Analisando as curvas do provete AV138 CFRP (Figura 79), percebe-se que variando G causa uma variação na resistência do provete, visto declive das curvas sofre alteração com a variação da propriedade, quanto maior for G , maior é o declive e, por conseguinte, maior é a resistência do provete. Em oposição, quanto menor for G , menor é o declive e menor é a resistência do provete.

Pode-se observar também que apenas para as curvas -75%, -50% e -25% não ocorre uma queda da força exercida no provete, o que leva a concluir que para esses casos, o provete não cedeu e não houve propagação da fratura inicial.

Desenvolvimento

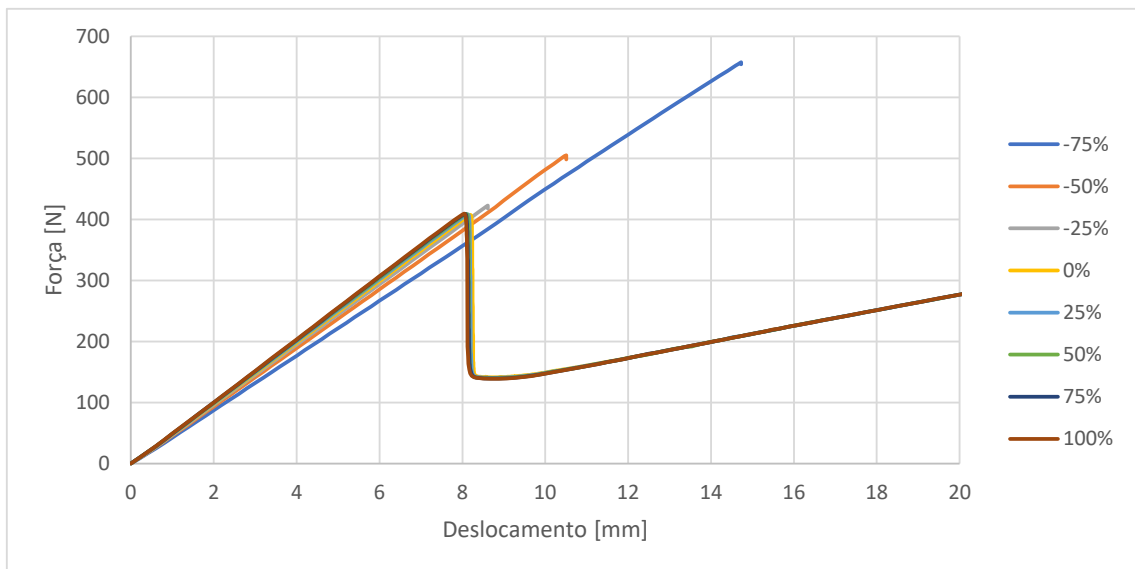


Figura 79-Variação de G para o provete AV138 CFRP

Para o provete AV138 Alumínio (Figura 80), a rigidez do provete mantém-se inalterada para qualquer variação da rigidez do adesivo, tendo em conta que o declive de todas as retas do gráfico permanece igual. Quanto às variações negativas, não foi possível obter as curvas, visto que não foi possível terminar as leis coesivas.

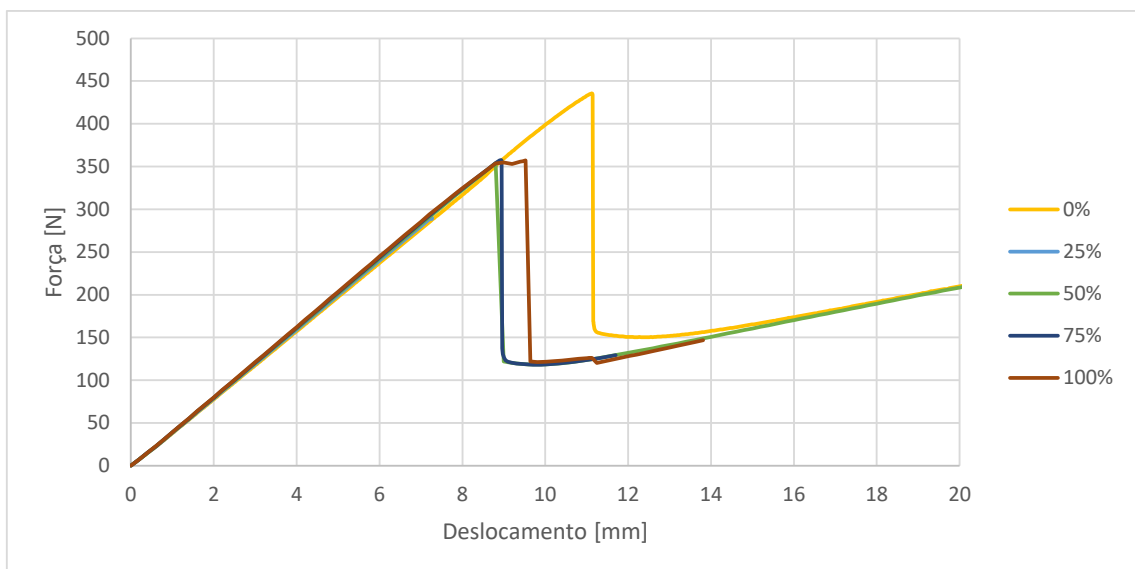


Figura 80-Variação de G para o provete AV138 Alumínio

Quanto ao provete 2015 CFRP, nota-se uma variação do declive das retas depois de variar o valor de G, o que sugere que esta propriedade causa uma variação da resistência do provete, quanto maior for o valor, maior é o declive e a resistência, e por sua vez, quanto menor for o valor, menor é o declive e a resistência do provete. Salienta-se que para uma variação de -75%, o declive da reta sofre uma diminuição significativa em relação às restantes curvas do gráfico. Verifica-se também que não ocorre uma variação muito significativa na força máxima exercida até à cedência do provete e propagação da fratura inicial, mas repara-se num padrão crescente

com o aumento de G e um padrão decrescente com o decréscimo da rigidez. Por fim observa-se que quanto maior é a rigidez, mais cedo ocorre a cedência do provete e mais abrupta é a queda da força exercida.

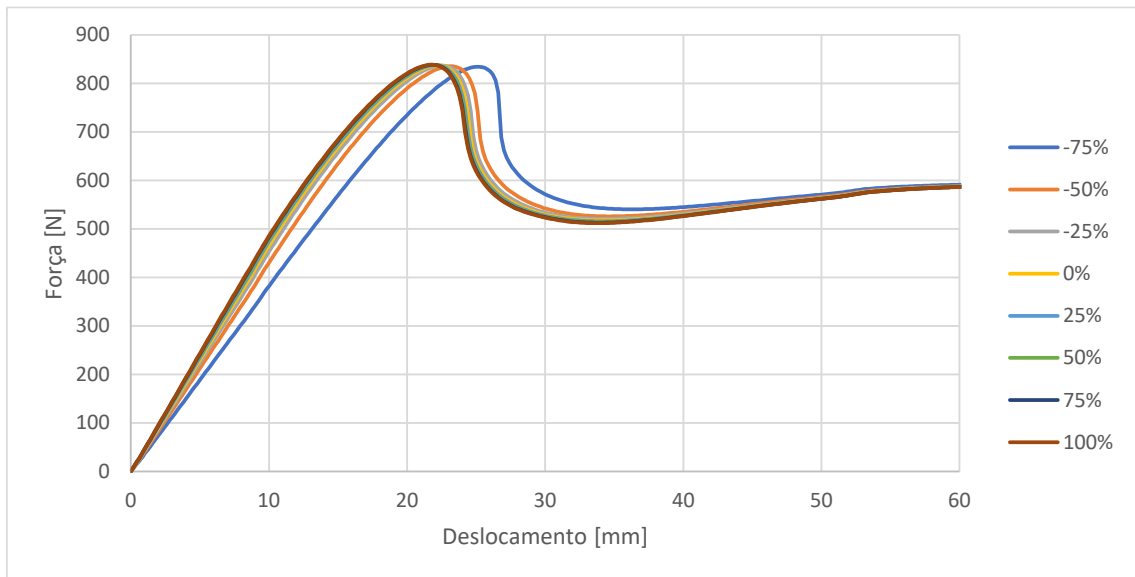


Figura 81-Variação de G para o provete 2015 CFRP

Variando a rigidez do adesivo, nota-se uma variação ligeira na rigidez do provete, mais significativa para -75%. Observando o declive das curvas da figura, conclui-se um aumento da rigidez do provete para um aumento da rigidez do adesivo, e uma diminuição da rigidez do provete para a diminuição da rigidez do adesivo. Verifica-se também uma queda mais abrupta da força aplicada no provete após ter sido atingida a força máxima à medida que se aumenta a rigidez do adesivo. Nota-se também que a cedência e consequente fratura acontece mais cedo à medida que a rigidez aumenta. Não se nota uma grande variação da força máxima exercida com a alteração da rigidez.

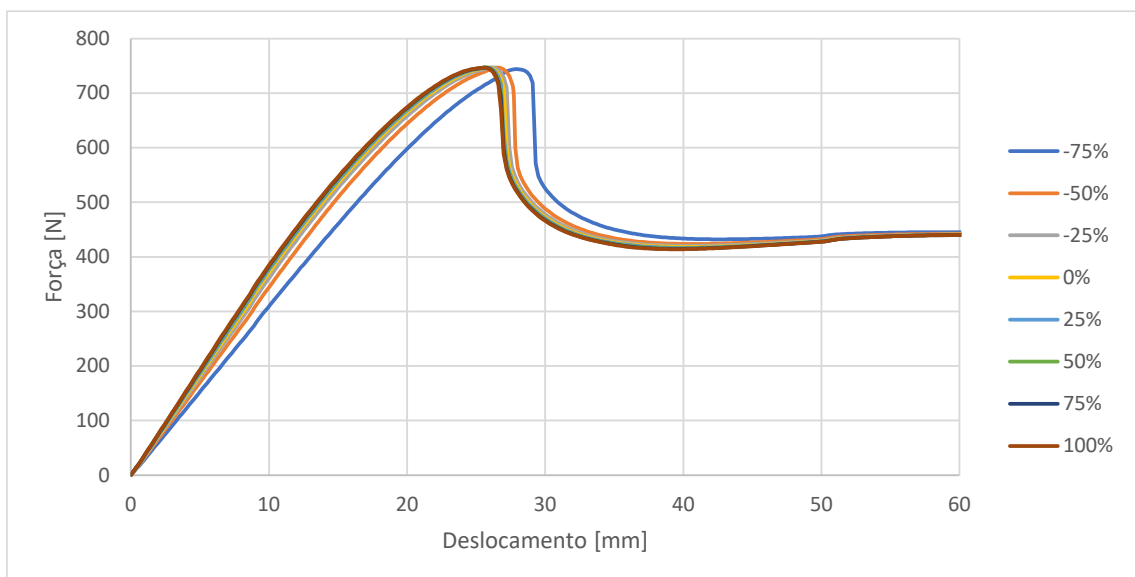


Figura 82-Variação de G para o provete 2015 Alumínio

Desenvolvimento

No que diz respeito ao provete 7752 CFRP, observa-se uma variação do declive das retas à medida que se varia a rigidez G do provete, quanto maior for o valor de G , maior é o declive e por sua vez quanto menor for a rigidez, menor é o declive da reta. Verifica-se que à medida que se aumenta G , mais pequena é a força máxima exercida no provete até este ceder e a fratura inicial se propagar. Verifica-se também que a queda da força da exercida é menos abrupta à medida que se aumenta a rigidez do material.

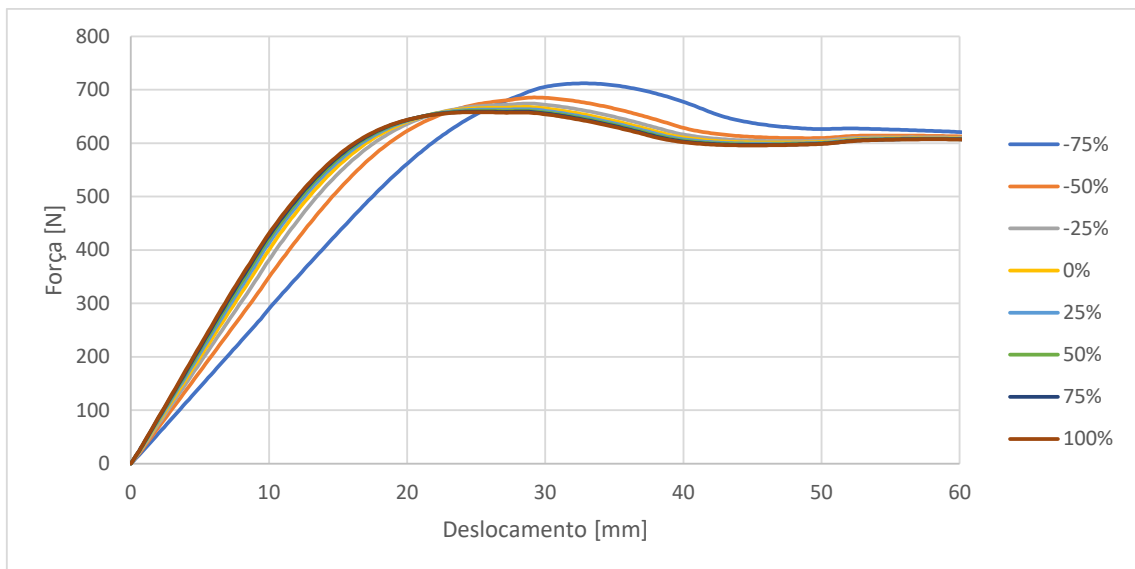


Figura 83-Variação de G para o provete 7752 CFRP

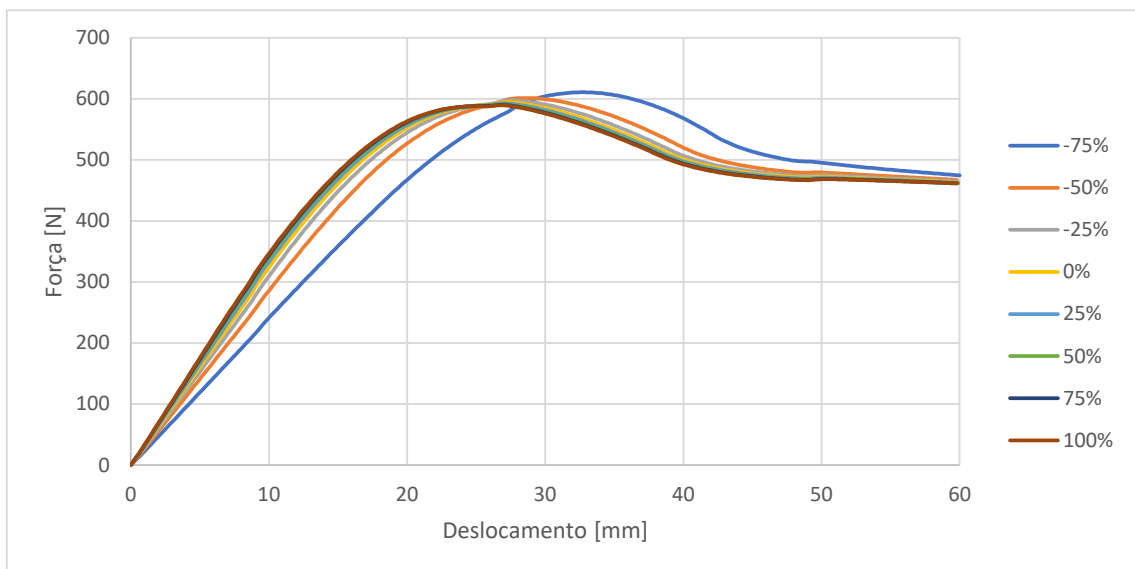


Figura 84-Variação de G para o provete 7752 Alumínio

Pela análise dos gráficos para todos os provetes, verifica-se que aumentando G , a resistência do provete também aumenta, e diminuindo G , a resistência também diminui. Nota-se também um pequeno aumento da força aplicada quando se diminui G , e um pequeno aumento do deslocamento até a curva descer, onde se dá a propagação da fratura.

3.5.2. Resistências coesivas

Para o provete AV138 CFRP (Figura 85), a variação da resistência coesiva não causa nenhuma alteração na rigidez do material, visto que o declive das retas se mantém para qualquer valor de t_s^0 . Pode-se, no entanto, visualizar uma alteração da força máxima exercida no provete até este ceder, fruto da variação de t_s^0 : quanto menor for o valor de t_s^0 , menos força o provete aguenta até ceder, e mais cedo ele cede, por sua vez, quanto maior for o seu valor, mais força é necessária para ocorrer a cedência do provete, e mais tarde ela acontece. Percebe-se também pelo gráfico que, para valores de t_s^0 superiores ao original (+25%, +50%, +75% e +100%), não ocorre queda na força exercida no provete, o que implica que este não cedeu e não se verificou a propagação da fratura inicial.

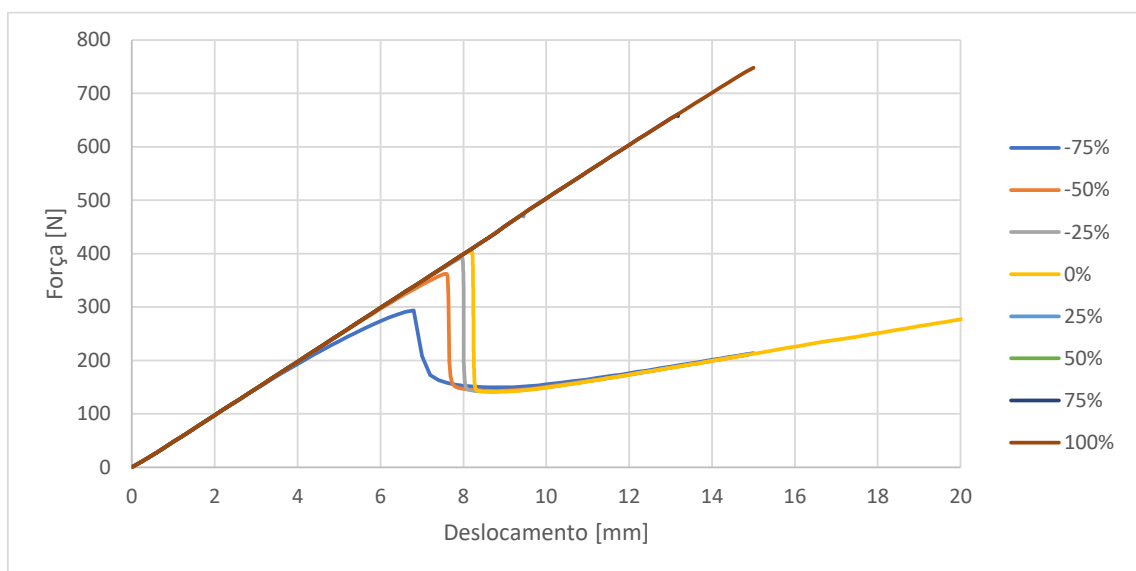


Figura 85-Variação de τ_s^0 para o provete AV138 CFRP

Quanto ao provete AV138 Alumínio, o gráfico obtido mostra um comportamento semelhante ao provete AV138 CFRP. A variação da resistência coesiva não causa alteração na rigidez do provete, porém causa alteração na altura em que ocorre a sua cedência. Quanto mais pequeno for o valor de t_s^0 , mais cedo ocorre a cedência do provete e consequente propagação da fratura, e menos força é necessária exercer para que isso aconteça. Nota-se uma queda mais evidente na resistência do provete para a curva -75%. À medida que se aumenta t_s^0 , nota-se que o provete cede cada vez mais tarde, e para as curvas +25%, +50%, +75% e +100% não se verifica uma queda da força exercida ao longo do tempo, o que sugere que para estes casos o provete não cedeu e não houve propagação da fratura inicial.

Desenvolvimento

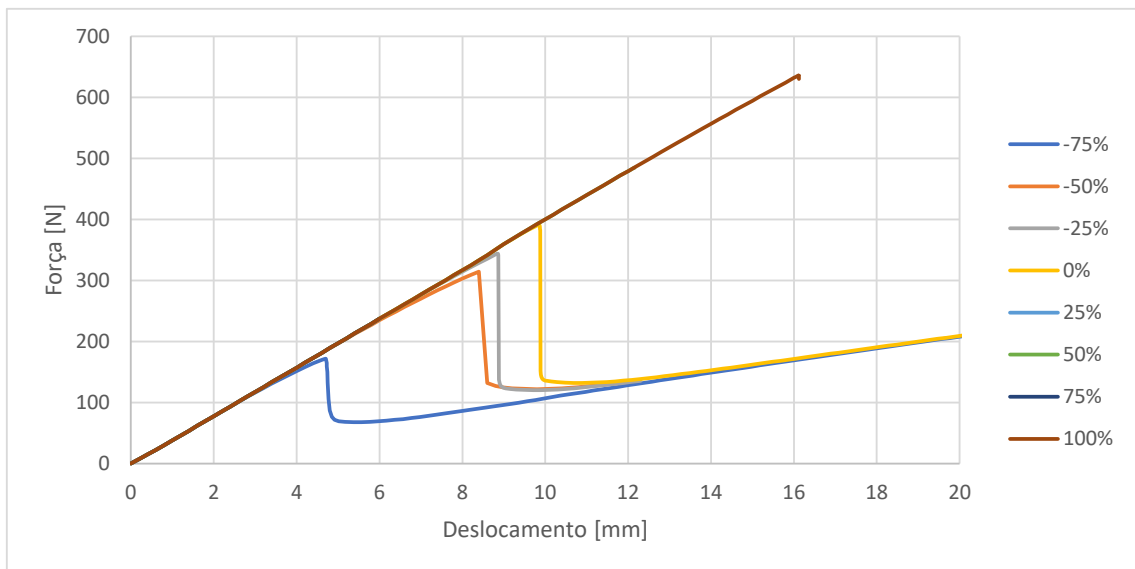


Figura 86-Variação de τ_s^0 para o provete AV138 Alumínio

Ao variar a resistência coesiva do provete 2015 CFRP, mantém-se a rigidez do provete, mas altera-se a força máxima a que este pode ser sujeito até ceder e a fratura inicial se propagar. Aumentando t_s^0 a força máxima necessária para o provete aumenta significativamente. Com a diminuição de t_s^0 , a força máxima também diminui. De salientar que para -75%, o provete nem chega a ceder, tendo em conta que não se verifica uma queda da força ao longo do ensaio.

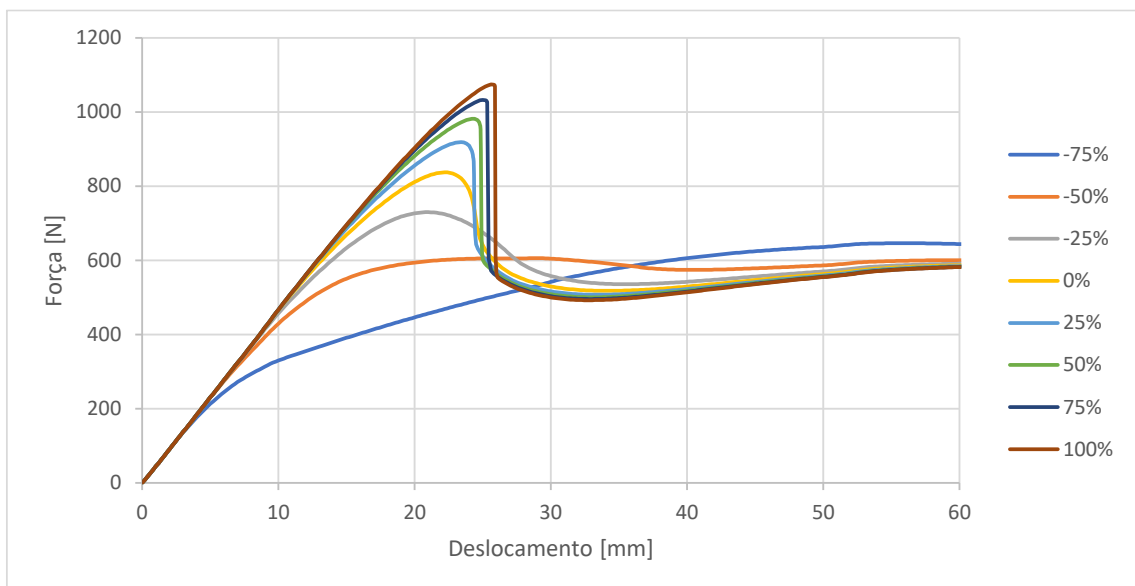


Figura 87-Variação de τ_s^0 para o provete 2015 CFRP

Para o provete 2015 Alumínio, verificam-se os mesmos pontos do provete anterior. A rigidez do provete mantém-se para qualquer de t_s^0 , e a força máxima para iniciar a propagação da fratura aumenta à medida que aumenta a resistência coesiva, e diminuem à medida que esta diminui. Assim como o provete 2015 CFRP, este provete não sofre propagação de fratura para -75%, visto que também não se constata uma queda na força exercida durante o ensaio.

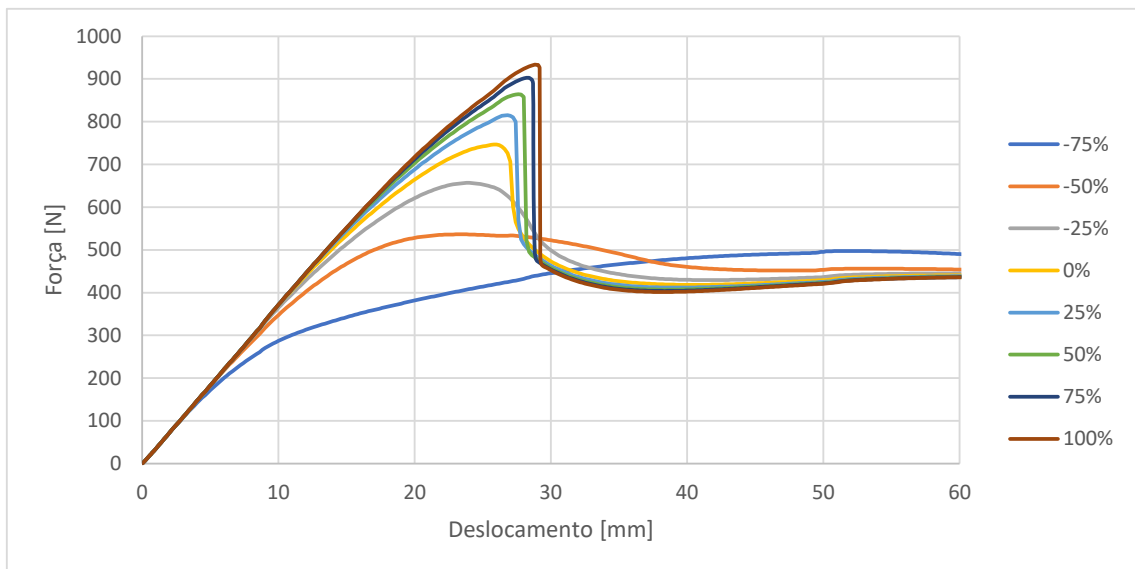


Figura 88-Variação de τ_s^0 para o provete 2015 Alumínio

Quanto ao provete 7752 CFRP, a resistência mantém-se para qualquer valor de t_s^0 . A força máxima necessária para provocar a propagação aumenta com o aumento de t_s^0 , e diminui com a diminuição da resistência coesiva. Para -50% e -75% de t_s^0 , o provete não cede e não ocorre propagação de fratura, pois as curvas correspondentes não apresentam uma queda na força exercida ao longo do ensaio.

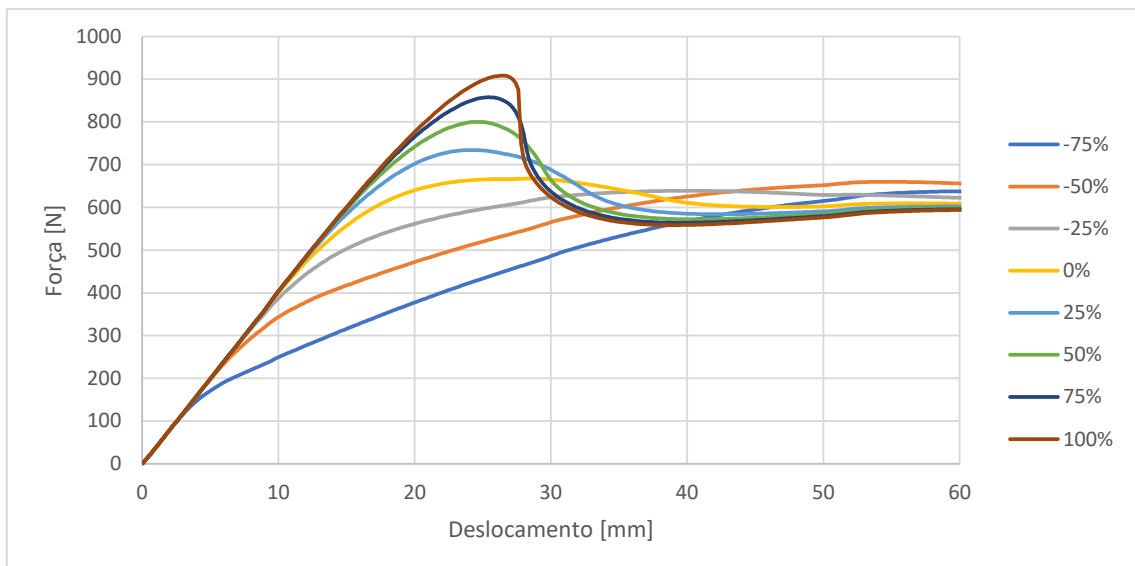


Figura 89-Variação de τ_s^0 para o provete 7752 CFRP

Por fim, para o provete 7752 Alumínio, também não ocorre variação da rigidez com a variação de t_s^0 , tal como os restantes provetes. O provete aguenta uma força maior até ceder e se dar a propagação da fratura, quando se aumenta t_s^0 . Para um valor de t_s^0 inferior, é necessária uma força mais pequena até se dar a propagação da fratura inicial. Salienta-se também que para -50% e -75%, através da análise das curvas respetivas, não ocorre a propagação da fratura, visto que não ocorre um decréscimo na força aplicada ao longo do ensaio.

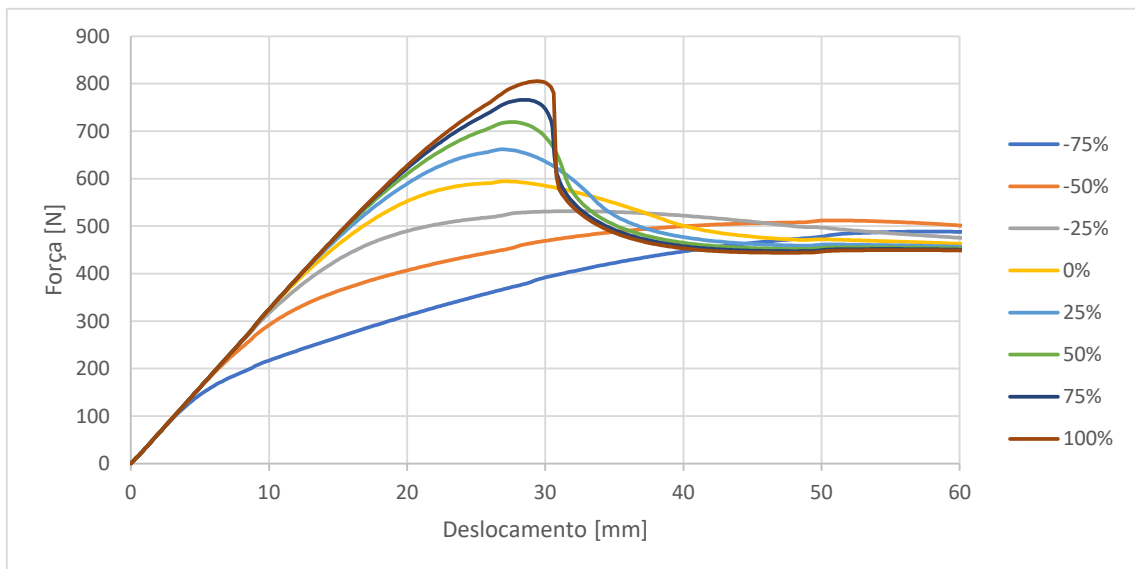


Figura 90-Variação de τ_s^0 para o provete 7752 Alumínio

Através da avaliação de todos os casos para a variação da resistência coesiva, conclui-se que esta propriedade não tem influência na rigidez do provete. Salienta-se que para variações positivas de t_s^0 , não ocorre cedência dos provetes AV138 CFRP e AV138 CFRP, sugerindo que um aumento de t_s^0 leva a um aumento da resistência dos provetes à força exercida no ensaio.

3.5.3. Tenacidade à fratura

Neste subcapítulo estão representadas as curvas $P-\delta$ correspondentes à variação da tenacidade à fratura para todos os provetes.

Analisando a Figura 91, correspondente ao provete AV138 CFRP, verifica-se que o aumento da tenacidade à fratura não tem impacto na rigidez do provete, da mesma forma que se verificou no artigo de Fernandes *et al.* [112], visto que o declive do domínio elástico permanece inalterado até se atingir a força máxima P_{max} . Quanto maior é o aumento da tenacidade, maior é a força máxima no provete até se dar o amaciamento e este ceder e se dar a propagação da fratura, e por consequência a propagação ocorre para deslocamentos cada vez maiores. Tendo em conta de que se trata de um adesivo frágil, a propagação da fratura é abrupta, como se pode verificar na queda acentuada das forças exercidas. Ao diminuir o valor da tenacidade à fratura deste provete, deixa de ser possível obter uma lei coesiva devido à sua inconsistência física e por sua vez, não se consegue obter uma curva $P-\delta$.

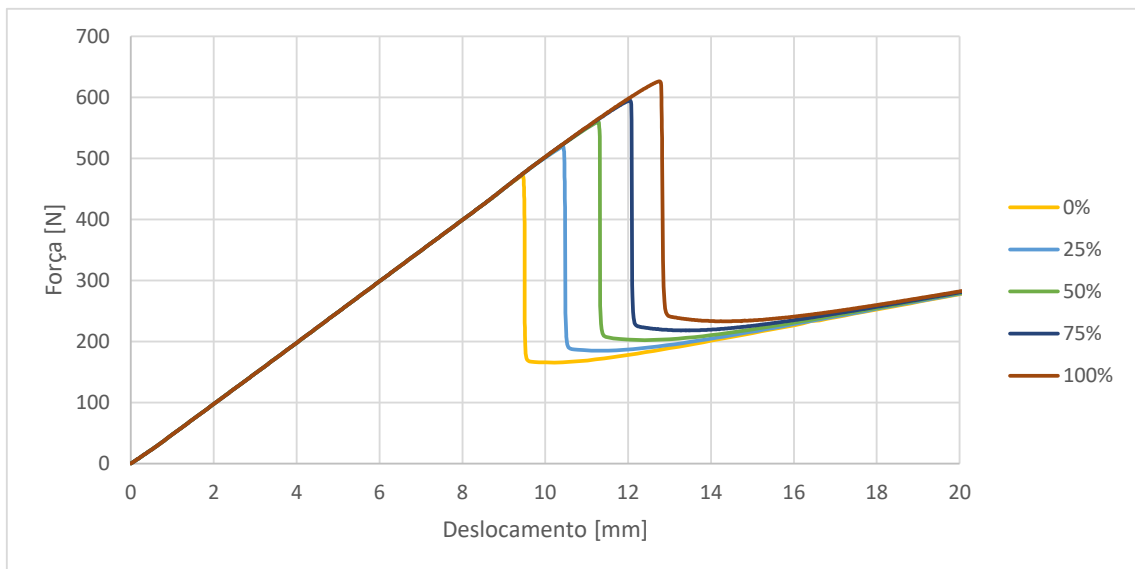


Figura 91-Variação de G_{IIc} para o provete AV138 CFRP

Para o provete AV138 Alumínio (Figura 92), variando G_{IIc} obtém-se uma resposta semelhante ao provete AV138 CFRP, a rigidez do provete permanece igual, tendo em conta o mesmo declive para todas as retas do gráfico, assim como o aumento da força máxima exercida P_{max} até à cedência do provete e consequente propagação de fratura para deslocamentos também maiores. Da mesma forma, diminuindo a tenacidade à fratura, deixa de ser possível obter uma lei coesiva devido à sua inconsistência física e uma curva $P-\delta$. Conclui-se também pela queda abrupta da força, a fratura é frágil.

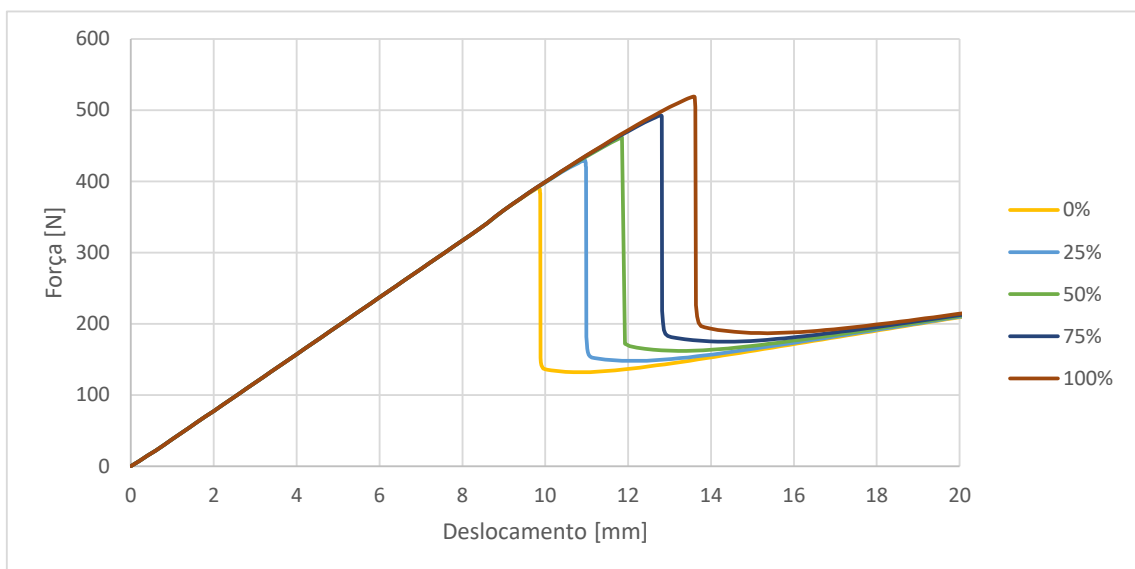


Figura 92-Variação de G_{IIc} para o provete AV138 Alumínio

Para o provete 2015 CFRP (Figura 93), o aumento de G_{IIc} leva ao aumento da força máxima exercida até ao começo da propagação da fratura e a deslocamentos superiores. Verifica-se também que para o aumento da tenacidade à fratura, a queda da força exercida é menos acentuada, e mais acentuada quando G_{IIc} diminui. Observa-se que a variação da tenacidade da

Desenvolvimento

fratura não causa alteração na rigidez do provete, visto que o declive do domínio é igual. Verifica-se também que a que quanto maior for a tenacidade à fratura mais suave é o decréscimo da força, mais dúctil é a fratura.

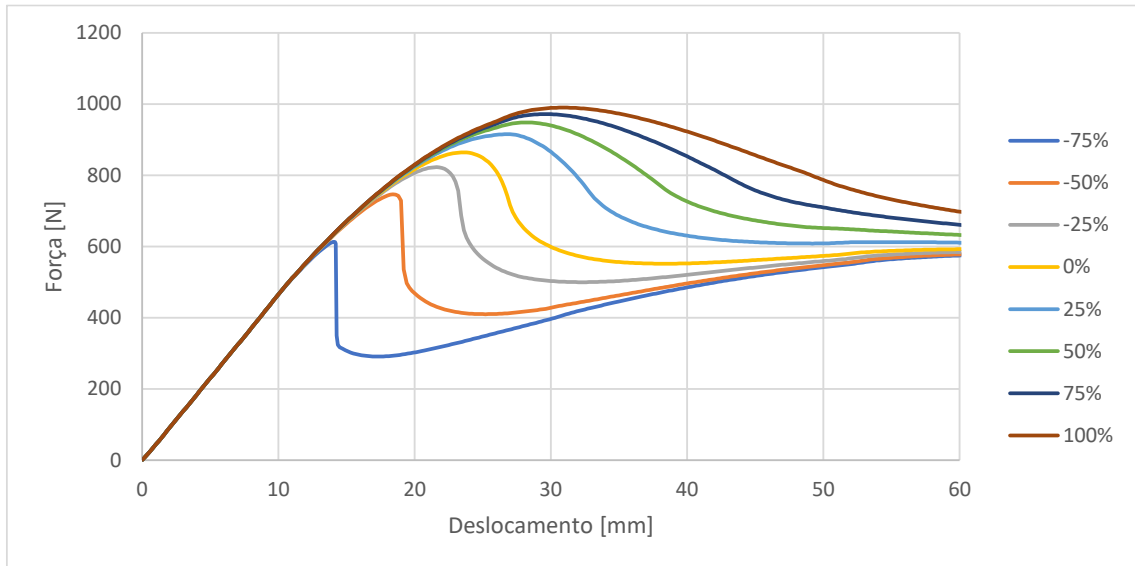


Figura 93-Variação de G_{IIc} para o provete 2015 CFRP

Em relação ao provete 2015 Alumínio (Figura 94), a variação da tenacidade não altera a rigidez do provete, já que o declive inicial se manter igual para qualquer valor. No entanto, à medida que se aumenta G_{IIc} aumenta-se também a força máxima até a propagação da fratura do provete e mais subtil é a sua propagação, tendo em conta que a curva $P-\delta$ é mais suave após atingida a carga máxima. Pelo contrário, à medida que se diminui G_{IIc} , menos força é necessária até à cedência e correspondente propagação da fratura inicial, e mais abrupta é a fratura observando a queda repentina dos valores da força, o que indica que a fratura se propaga mais rapidamente.

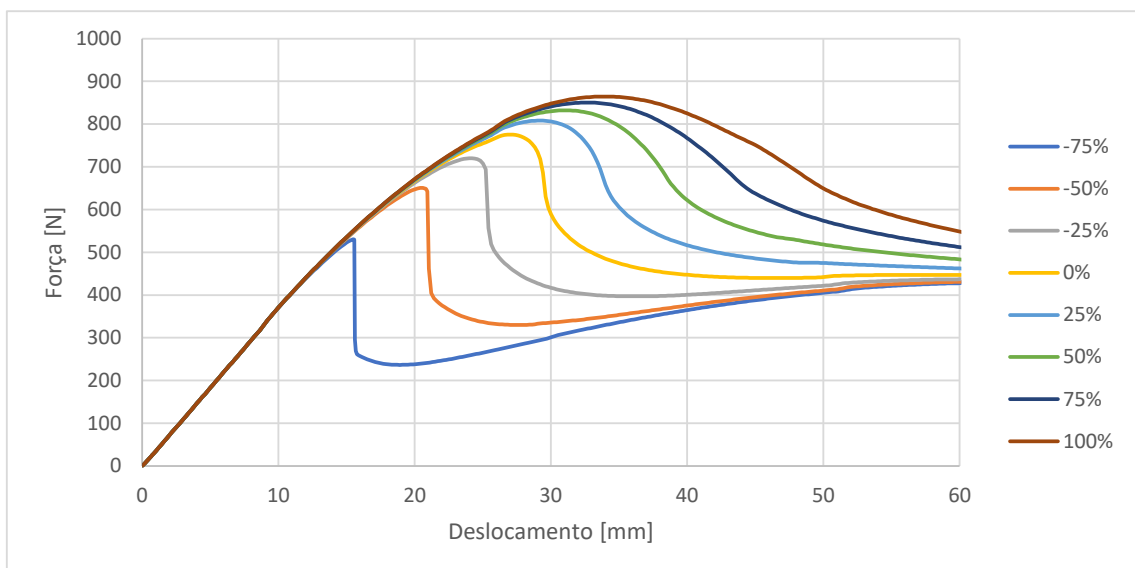


Figura 94-Variação de G_{IIc} para o provete 2015 Alumínio

Quanto ao provete 7752 CFRP, a resistência também se mantém igual para qualquer valor de tenacidade à fratura, como se pode ver pelo mesmo declive das retas. Mais uma vez, a principal mudança ocorre no começo da propagação da fratura. Quanto maior é a tenacidade, maior é a força necessária e maior o deslocamento até a propagação ocorrer, e quanto menor for a tenacidade, mais abrupta é a propagação. Nas curvas (Figura 95) é possível visualizar a sua suavização à medida que G_{IIC} aumenta, que leva a deduzir que para valores mais altos deste parâmetro coesivo, mais dúctil se torna o provete.

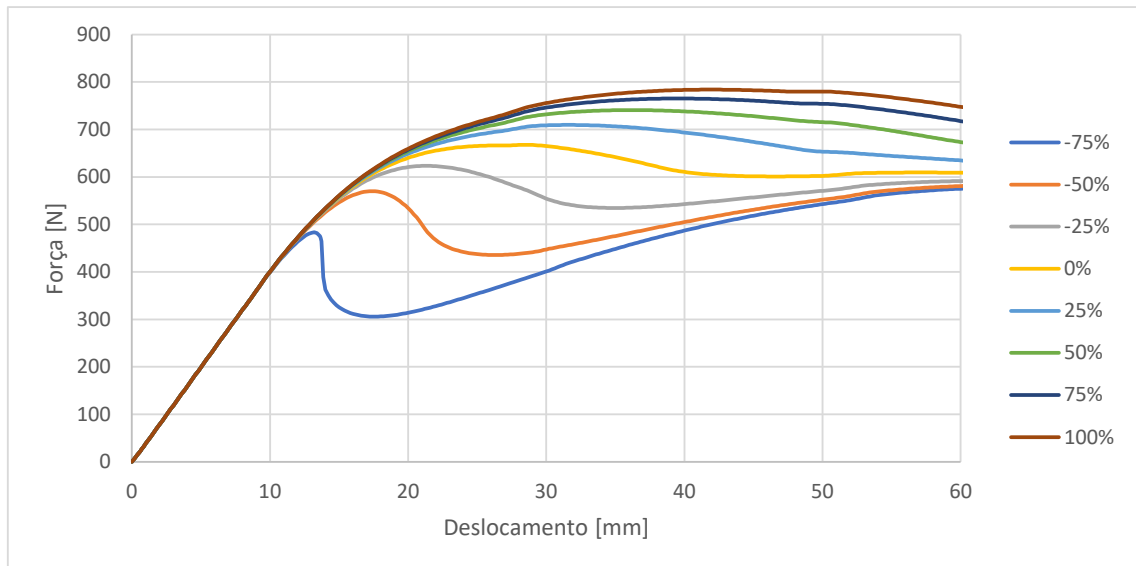


Figura 95-Variação de G_{IIC} para o provete 7752 CFRP

Pela análise de todas as curvas da Figura 96, verifica-se que ao contrário dos restantes provetes a variação de G_{IIC} causa alguma alteração na rigidez do provete 7752 Alumínio, visto que os declives das retas sofrem alteração quando sujeitos à variação da propriedade, no caso de 7752 Alumínio nota-se uma variação ligeira nos declives e uma variação mais acentuada para -75%. Verifica-se também que quanto maior for a tenacidade à fratura, maior é a força máxima no provete e maior o deslocamento até se dar a propagação da fratura. Verifica-se também que para todos os valores a queda da força é suave, ou seja, a fratura é dúctil.

Desenvolvimento

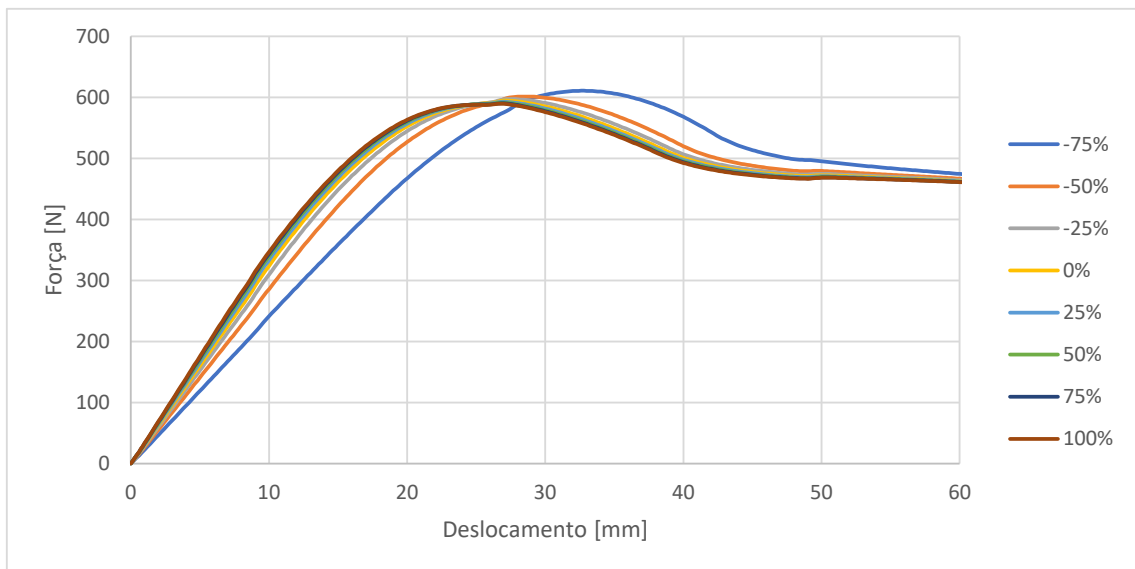


Figura 96-Variação de G_{IIc} para o provete 7752 Alumínio

Por fim, tendo em conta a variação da tenacidade à fratura de todos os ensaios, conclui-se que a variação desta propriedade tende a não causar alteração na rigidez do provete, visto que isso só acontece para o provete 7752 Alumínio. Pode-se concluir também que a variação desta propriedade influencia a força máxima que o provete consegue aguentar até ceder, para todos os casos, um aumento de G_{IIc} culmina num aumento da força máxima e o oposto culmina numa redução da força máxima exercida no provete, e causa um amaciamento do provete à medida que a tenacidade aumenta.

3.5.4. Combinação de parâmetros

Este subcapítulo dedica-se à exposição do efeito da variação da combinação dos três parâmetros coesivos nas curvas $P-\delta$ dos provetes ensaiados.

Para o provete AV138 CFRP (Figura 97), as variações de todos os parâmetros combinados não originam uma variação significativa da rigidez do provete, visto que as retas correspondentes ao domínio elástico têm quase o mesmo declive. À medida que se aumentam todos, é preciso exercer uma força maior para que o provete ceda e a fratura se propague, ou seja, maior é a força de pico com o aumento das propriedades. Por sua vez, quanto menores forem os valores das propriedades combinadas, menos força aguenta o provete até se dar a fratura, e mais cedo ocorre. Verifica-se também que não ocorre alteração no tipo de fratura, esta é sempre frágil, como se espera do adesivo AV138, já que se observa uma queda abrupta da força depois de atingido o pico.

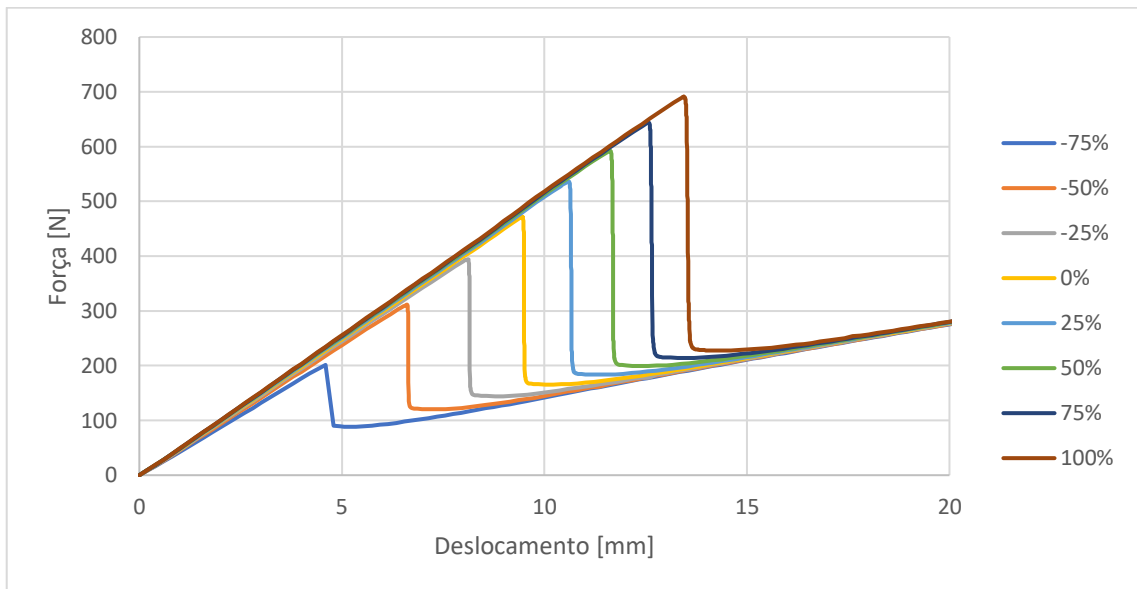


Figura 97-Variação de parâmetros para o provete AV138 CFRP

Analisando a variação das propriedades para o provete AV138 Alumínio (Figura 98), verifica-se que a rigidez não sofre uma alteração significativa, visto que o declive do domínio elástico das curvas permanece quase igual para todas as curvas. Assim como para AV138 CFRP, quanto maior é a variação das propriedades, maior é a força exercida até ao pico e propagação da fratura inicial e mais tarde ela ocorre, e quanto menor for a variação mais cedo cede o provete e menos força é necessária para que ceda. Observa-se também uma queda abrupta da força para todos os valores de variação, o que mostra o comportamento frágil do adesivo AV138.

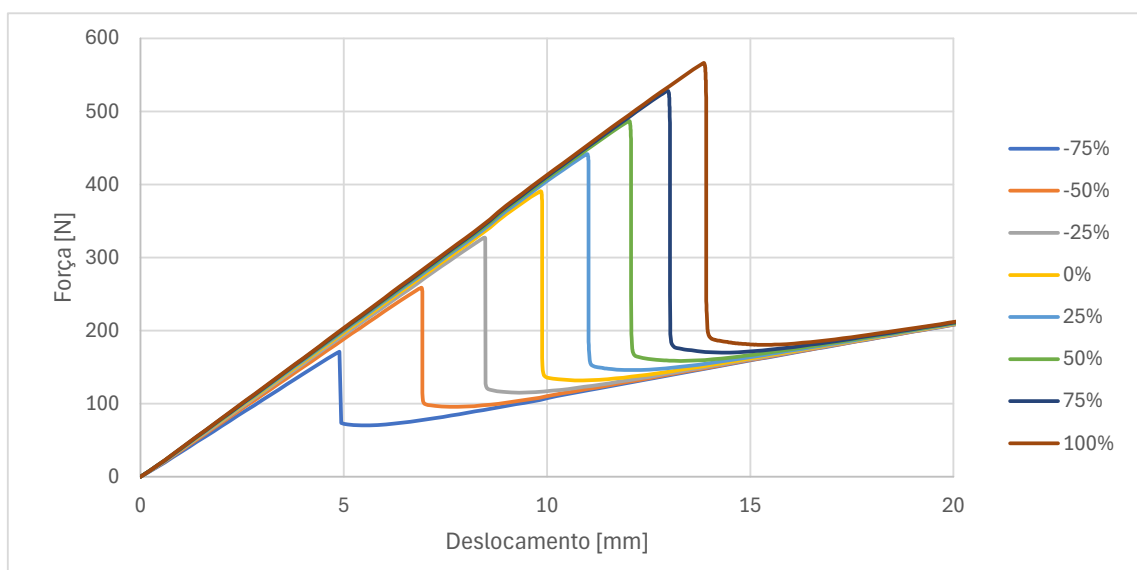


Figura 98-Variação de parâmetros para o provete AV138 Alumínio

Quanto ao provete 2015 CFRP (Figura 99), ao visualizar o domínio elástico das curvas $P-\delta$, deduz-se que a rigidez se mantém praticamente igual mesmo variando as propriedades todas em conjunto. Diminuindo os parâmetros, o provete aguenta uma força máxima inferior até ceder,

Desenvolvimento

e no sentido oposto, aumentando os parâmetros, a força máxima até o provete ceder e a fratura inicial se propagar aumenta também. Por fim, salienta-se que à medida que se aumentam as propriedades, mais abrupta é a queda da força exercida no provete, ou seja, mais frágil se torna o provete, e conseqüentemente mais abrupta é a propagação da fratura inicial. No sentido oposto, ao diminuir os parâmetros coesivos, verifica-se um maior amolecimento do provete, realçando a maior ductilidade do adesivo 2015 comparado com AV138.

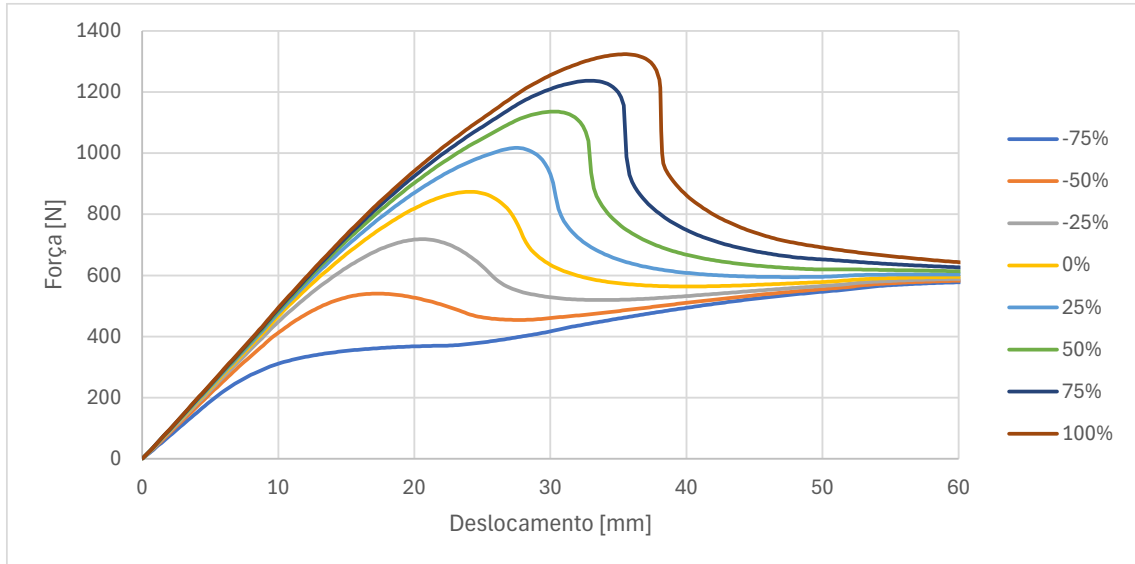


Figura 99-Variação de parâmetros para o provete 2015 CFRP

Quanto ao provete 2015 Alumínio (Figura 100), a rigidez mantém-se praticamente igual mesmo variando as propriedades todas em conjunto. Pela observação das retas dos gráficos, o declive mantém-se igual para qualquer variação das propriedades, apenas se verifica um aumento da força de pico até ocorrer a propagação da fratura inicial. Diminuindo os parâmetros, o provete aguenta uma força máxima inferior até ceder. Por fim, salienta-se que à medida que se aumentam as propriedades, mais abrupta é a queda da força exercida no provete, ou seja, mais frágil se torna o provete, e conseqüentemente mais abrupta é a propagação da fratura inicial, e o oposto verifica-se se diminuirmos os valores dos parâmetros coesivos em conjunto, ou seja o provete sofre maior amolecimento e o provete torna-se mais dúctil.

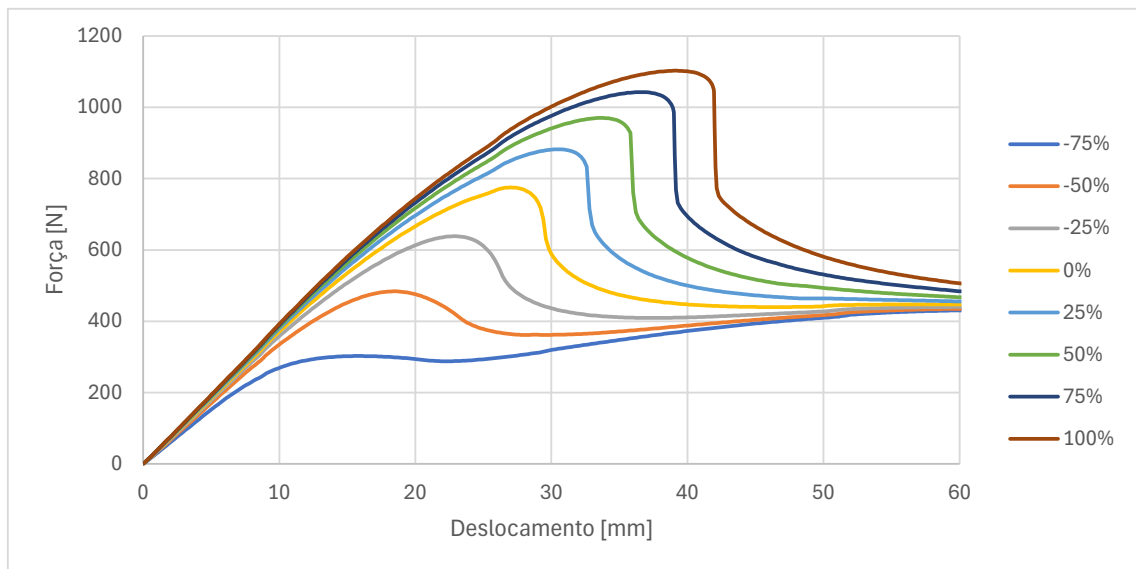


Figura 100-Variação de parâmetros para o provete 2015 Alumínio

Para o provete 7752 CFRP (Figura 101), a variação tanto positiva como negativa de todas as propriedades alteram ligeiramente a rigidez do provete, visto que o declive do domínio elástico se mantém praticamente inalterado, apenas faz variar o tamanho do domínio. À medida que se aumentam as propriedades em conjunto, aumenta-se também a força máxima exercida no provete até à propagação da fratura inicial. No sentido oposto, à medida que se diminui as propriedades, diminui-se também a força máxima que o provete aguenta até ceder. Nota-se também que a força exercida no provete experimenta uma queda mais acentuada quando cede à medida que se aumentam todas as propriedades, e oposto para o decréscimo das mesmas, ou seja, para valores de parâmetros coesivos mais elevados, mais frágil é a fratura, para valores mais baixos, mais dúctil é. Por fim, verifica-se também que, para as curvas -75% e -50%, não se verifica um pico de força, o que indica que não ocorreu fratura no provete para esses casos.

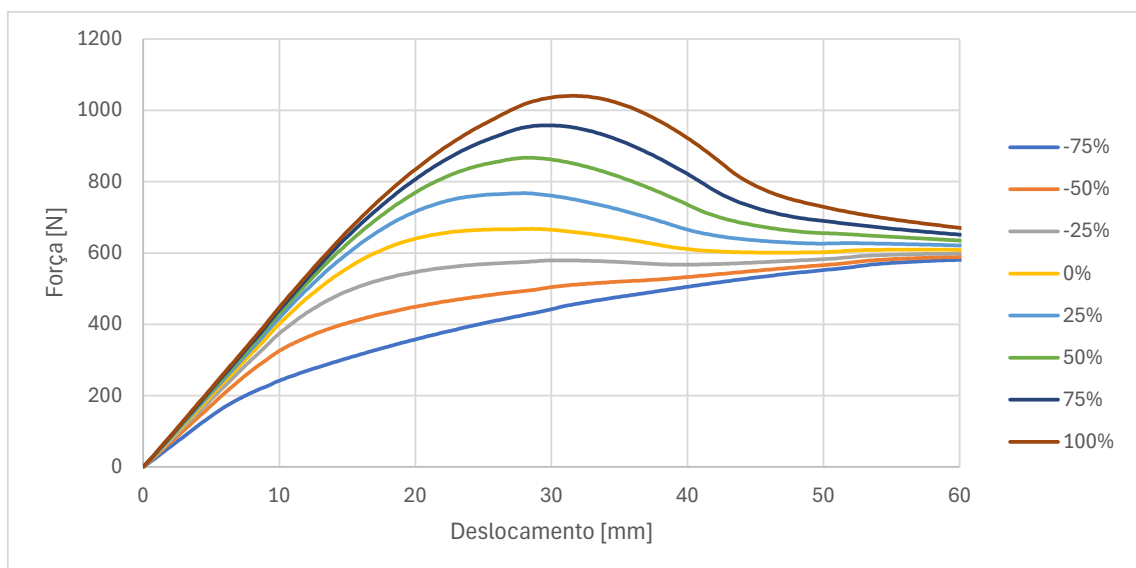


Figura 101-Variação de parâmetros para o provete 7752 CFRP

Desenvolvimento

Por fim, no caso do provete 7752 Alumínio (Figura 102), assim como para os restantes ensaios, as curvas do gráfico apresentam declive semelhante para qualquer variação das propriedades, o que indica que a rigidez do provete não sofre alteração considerável com a variação dos parâmetros coesivos. Nota-se também através da análise das curvas do gráfico que, quanto maiores forem as variações das propriedades, maior é a força exercida no provete até este ceder e se dar a propagação da fratura inicial, e mais abrupta é a queda da força exercida após a sua cedência, ou seja, mais frágil é a fratura, e oposto verifica-se para a diminuição dos valores dos parâmetros coesivo. Finalmente, pelas curvas do gráfico percebe-se uma particularidade para as curvas -75% e -50%, não ocorre uma queda da força exercida ao longo do ensaio, o que leva a concluir que para estes valores o provete não cedeu e não ocorreu a propagação da fratura inicial.

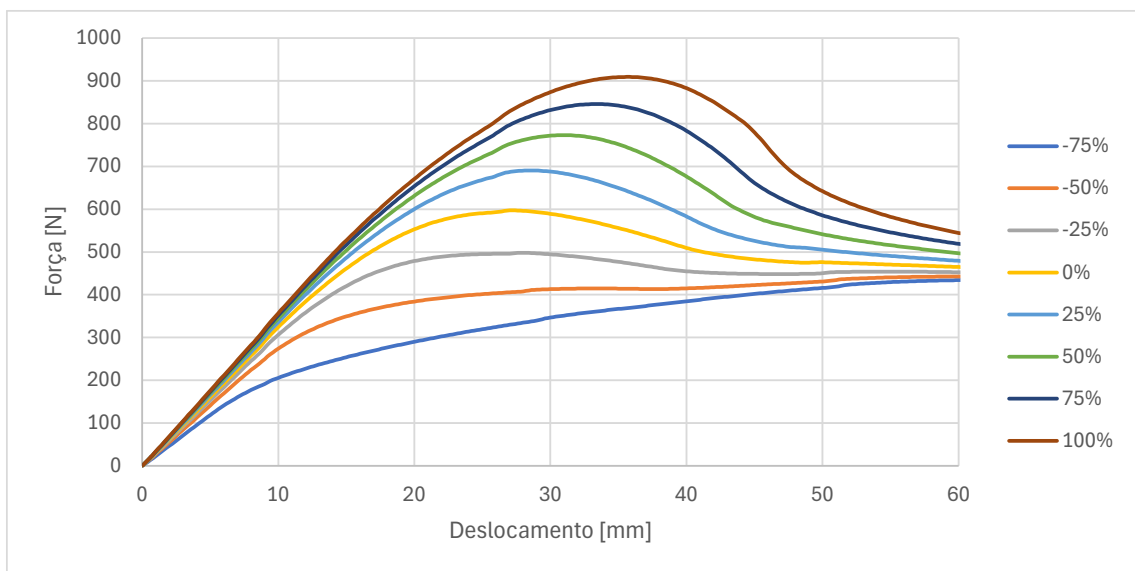


Figura 102-Variação de parâmetros para o provete 7752 Alumínio

Para terminar a análise de sensibilidade, faz-se uma apreciação geral de todos os ensaios. Analisando todos os gráficos de combinação de propriedades deduz-se que combinando todas as propriedades e variando-as da mesma forma, verifica-se uma variação ligeira da rigidez em todos os provetes, ou seja, a variação das propriedades coesivas influencia a rigidez do provete, embora de forma suave. No entanto, quanto maior for o aumento dos valores das propriedades combinadas, maior é o domínio elástico, maior é a força máxima que se precisa de exercer no provete antes de se dar a queda da mesma e consequente propagação da fratura e maior é o deslocamento do provete até a sua propagação, que leva também a concluir que quanto maiores forem os valores dos parâmetros coesivos, mais frágil se torna o provete e quanto mais pequenos forem, mais dúcteis estes se tornam.

4. Conclusão

Neste capítulo estão descritas as conclusões finais e últimas considerações em relação ao trabalho realizado.

4.1. Conclusões finais

Nas últimas décadas o crescente uso das ligações adesivas, levou a um estudo cada vez mais detalhado para compreender e maximizar as suas potencialidades. Originou uma análise aos esforços atuantes nas juntas adesivas, às suas propriedades mecânicas, em particular a tenacidade à fratura G , e aos ensaios mecânicos para testar as suas propriedades quando sujeitas aos esforços, nomeadamente à fratura. Para além disso, caracterizou-se a fratura em três modos possíveis, o modo I, o modo II, e o modo misto. Para tal foram desenvolvidos ensaios para testar o comportamento das juntas adesivas à fratura em modo II, como por exemplo, os ensaios ENF, 4ENF e o ELS, este último o menos explorado, e sobre o qual este trabalho se debruça. Do ensaio retiram-se a força e o deslocamento exercidos no provete, para cálculo da tenacidade à fratura, com recurso a métodos de redução, capazes de obter uma curva R , a partir da curva $P-\delta$, e da qual se pode extrair um valor de tenacidade à fratura em modo II, G_{IIc} , quando a curva R estabiliza num patamar. Para verificação da fiabilidade destes métodos, realizou-se uma modelação numérica do ensaio ELS no *software* Abaqus®. No *software* fez-se uso de uma abordagem da mecânica da fratura, o CZM, que combina outras abordagens clássicas e faz uso de parâmetros coesivos para prever uma aproximação da curva $P-\delta$ do ensaio ELS. Depois da obtenção de todas as curvas necessárias e posterior comparação com os valores obtidos na modelação no *software*, conclui-se que o método de redução CBBM é o que determina G_{IIc} com mais fidelidade e que o modelo de dano coesivo triangular é um modelo adequado simular e prever o comportamento do provete durante o ensaio. Foi também possível avaliar a influência dos parâmetros coesivos no ensaio ELS. Aumentando-os observa-se uma fratura mais frágil e por sua vez diminuindo-os regista-se uma fratura mais dúctil.

4.2. Limitações e trabalhos futuros

Como proposta de trabalho futuro, realizar o ensaio e simulações com rácio a_0/L superior ao considerado para prevenir possível propagação instável de fratura agregado ao uso dos métodos de redução que fazem uso do comprimento equivalente para o cálculo de G_{IIc} .

Conclusão

Referências

1. Adams, R.D., *Adhesive Bonding: Science, Technology and Applications*. 2005: Elsevier.
2. Adams, R.D., et al., *Structural adhesive joints in engineering*. 1997: Springer Science & Business Media.
3. Habenicht, G., *Applied adhesive bonding: a practical guide for flawless results*. 2008: John Wiley & Sons.
4. Cognard, P., *Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding*. 2005: Elsevier.
5. da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*.
6. Dillard, D.A., *Advances in Structural Adhesive Bonding*. 2010: Elsevier.
7. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000.
8. Pocius, A.V. and D.A. Dillard, *Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications*. 2002: Elsevier.
9. Kaye, R. and M. Heller, *Through-thickness shape optimisation of typical double lap-joints including effects of differential thermal contraction during curing*. International journal of adhesion and adhesives, 2005. **25**(3): p. 227-238.
10. ISO, *ISO 527-2. Plastics — Determination of tensile properties. Part 2: Test conditions for moulding and extrusion plastics*. 2012, ISO: Genebra, Suíça.
11. AFNOR, *NF T51-101. Plastiques. Détermination des caractéristiques en compression*. 1981, AFNOR: Saint-Denis, França.
12. ASTM, *ASTM D695-23, Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. 2023, ASTM: West Conshohocken, EUA.
13. ISO, *ISO 604. Plastics — Determination of compressive properties*. 2002, ISO: Genebra, Suíça.
14. ISO, *ISO D695. Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics*. 2023, ISO: Genebra, Suíça.
15. Gali, S., G. Dolev, and O. Ishai, *An effective stress/strain concept in the mechanical characterization of structural adhesive bonding*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1981. **1**(3): p. 135-140.
16. ASTM, *ASTM D1002-10, Standard Test Method for Apparent Shear Strength of Single-Lap-Joint Adhesively Bonded Metal Specimens by Tension Loading (Metal-to-Metal)*. 2019, ASTM: West Conshohocken, EUA.
17. ISO, *ISO 4587. Adhesives — Determination of tensile lap-shear strength of rigid-to-rigid bonded assemblies*. 2003, ISO: Genebra, Suíça.
18. Iosipescu, N., *New accurate procedure for single shear testing of metals*. J Mater, 1967. **2**: p. 537-566.
19. ASTM, *ASTM D 5379. Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method*. 2021, ASTM: West Conshohocken, EUA.
20. Adams, D.F. and D.E. Walrath, *Current status of the Iosipescu shear test method*. Journal of Composite Materials, 1987. **21**(6): p. 494-507.
21. de Moura, M.F.d.S., A.M.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos: materiais, fabrico e comportamento mecânico*. 2005.
22. Voloshin, A. and M. Arcan, *Pure shear moduli of unidirectional fibre-reinforced materials (FRM)*. Fibre Science and Technology, 1980. **13**(2): p. 125-134.
23. Pinto, A., et al. *Shear modulus and strength of an acrylic adhesive by the notched plate shear method (Arcan) and the thick adherend shear test (TAST)*. in *Materials Science Forum*. 2010. Trans Tech Publ.

Referências

24. Arcan, M., Z.a. Hashin, and A. Voloshin, *A method to produce uniform plane-stress states with applications to fiber-reinforced materials: A specially designed specimen yields material properties under pure shear or uniform plane-stress conditions*. Experimental mechanics, 1978. **18**: p. 141-146.
25. Dean, G., et al., *Comparison of bulk and joint specimen tests for determining the mechanical properties of adhesives*, in Unknown. 1995. p. 11-18.
26. Grabovac, I. and C. Morris, *The application of the iosipescu shear test to structural adhesives*. Journal of applied polymer science, 1991. **43**(11): p. 2033-2042.
27. Wycherley, G., S. Mestan, and I. Grabovac, *A method for uniform shear stress-strain analysis of adhesives*. Journal of Testing and Evaluation, 1990. **18**(3): p. 203-209.
28. Weissberg, V. and M. Arcan, *A uniform pure shear testing specimen for adhesive characterization*, in *Adhesively Bonded Joints: Testing, Analysis, and Design*. 1988, ASTM International.
29. Cognard, J.Y., et al., *Development of an improved adhesive test method for composite assembly design*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(3-4): p. 359-368.
30. ASTM, *ASTM E229. Standard Test Method for Shear Strength and Shear Modulus of Structural Adhesives*. 2017, ASTM: West Conshohocken, EUA.
31. ISO, *ISO 11003-1. Adhesives — Determination of shear behaviour of structural adhesives*. 2019, ISO: Genebra, Suíça.
32. DIN, *DIN 54451. Testing of adhesives for metals and of bonded metal joints; tensile shear test for the determination of the shear stress-strain diagram of an adhesive in a bonded joint*. 1978, DIN: Berlin, Alemanha.
33. Krieger, R.B., *Stress analysis concepts for adhesive bonding of aircraft primary structure*, in *Adhesively bonded joints: Testing, analysis, and design*. 1988, ASTM International.
34. Althof, W. and G. Neumann, *Verfahren zur Ermittlung von Schubspannungs-Gleitungs-Diagrammen von Konstruktionsklebstoffen in dünnen Klebschichten*. Materials Testing, 1974. **16**(12): p. 387-388.
35. Vaughn, L.F., *Measurement of basic mechanical properties of adhesives for design use*. 1998, University of Bristol.
36. Lilleheden, L., *Mechanical properties of adhesives in situ and in bulk*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 1994. **14**(1): p. 31-37.
37. Cognard, J.-Y., et al., *Analysis of the nonlinear behavior of adhesives in bonded assemblies—Comparison of TAST and Arcan tests*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2008. **28**(8): p. 393-404.
38. ASTM, *ASTM D903. Standard Test Method for Peel or Stripping Strength of Adhesive Bonds*. 2017, ASTM: West Conshohocken, EUA.
39. ASTM, *ASTM D1876. Standard Test Method for Peel Resistance of Adhesives (T-Peel Test)*. 2023, ASTM: West Conshohocken, EUA.
40. ASTM, *ASTM D3167. Standard Test Method for Floating Roller Peel Resistance of Adhesives*. 2017, ASTM D3167: West Conshohocken, EUA.
41. ASTM, *ASTM D1781. Standard Test Method for Climbing Drum Peel for Adhesives*. 2021, ASTM: West Conshohocken, EUA.
42. ASTM, *ASTM D1062. Standard Test Method for Cleavage Strength of Metal-to-Metal Adhesive Bonds*. 2023, ASTM: West Conshohocken, EUA.
43. ASTM, *ASTM D3433. Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2020, ASTM: West Conshohocken, EUA.
44. ASTM, *ASTM D3807. Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2020, ASTM: West Conshohocken, EUA.

45. ASTM, *ASTM D5041. Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints*. 2020, ASTM: West Conshohocken, EUA.
46. Adams, R.D., *Adhesive bonding: science, technology and applications*. 2021: Woodhead Publishing.
47. Kumar, S. and K.L. Mittal, *Advances in modeling and design of adhesively bonded systems*. 2013: John Wiley & Sons.
48. Sadek, J., *Industrial applications of adhesive bonding*. 2012: Springer Science & Business Media.
49. Anderson, G.P., S.J. Bennett, and K.L. DeVries, *Analysis and testing of adhesive bonds*. 1977.
50. Da Silva, L.F.M., et al., *Advances in numerical modelling of adhesive joints*. 2012: Springer.
51. Da Silva, L.F., A. Öchsner, and R.D. Adams, *Handbook of adhesion technology*. 2011: Springer Science & Business Media.
52. Irwin, G.R., *Analysis of stresses and strains near the end of a crack traversing a plate*. 1957.
53. Rybicki, E.F. and M.F. Kanninen, *A finite element calculation of stress intensity factors by a modified crack closure integral*. *Engineering fracture mechanics*, 1977. **9**(4): p. 931-938.
54. Dionísio, J., et al., *Fracture mechanics approach to stress singularities in composite adhesive joints*. *Composite Structures*, 2021. **276**: p. 114507.
55. Rice, J.R., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. 1968.
56. Da Silva, L.F., et al., *Testing adhesive joints: best practices*. 2012: John Wiley & Sons.
57. ISO, *ISO 25217. Adhesives — Determination of the mode I adhesive fracture energy of structural adhesive joints using double cantilever beam and tapered double cantilever beam specimens*. 2009, ISO: Genebra, Suíça.
58. Cognard, J.-Y., et al., *Analysis of the influence of hydrostatic stress on the behaviour of an adhesive in a bonded assembly*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2010. **24**(11-12): p. 1977-1994.
59. Liu, C.-W. and T.-C. Chiu, *Cohesive-zone based fracture mechanics model of an edge delamination in bimaterial beam under mixed-mode bending test*. *European Journal of Mechanics-A/Solids*, 2023. **99**: p. 104928.
60. Desai, C.R., D.C. Patel, and C.K. Desai, *Investigations of joint strength & fracture parameter of adhesive joint: A review*. *Materials Today: Proceedings*, 2023.
61. Chen, T., et al., *Analytical corrections for double-cantilever beam tests*. *International Journal of Fracture*, 2021. **229**(2): p. 269-276.
62. Teixeira, J., et al., *Comparative evaluation of different fracture tests for the tensile fracture toughness of a ductile adhesive*. *Procedia Manufacturing*, 2019. **38**: p. 1268-1275.
63. Carbas, R., et al., *Effect of the adhesive thickness on butt adhesive joints under torsional loads*. *Journal of Advanced Joining Processes*, 2021. **3**: p. 100061.
64. Chen, T., et al., *Theory of dynamic mode-II delamination in end-notched flexure tests*. *Composite Structures*, 2021. **274**: p. 114332.
65. Blackman, B., A. Kinloch, and M. Paraschi, *The determination of the mode II adhesive fracture resistance, GIIC, of structural adhesive joints: an effective crack length approach*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2005. **72**(6): p. 877-897.
66. Wang, H. and T. Vu-Khanh, *Use of end-loaded-split (ELS) test to study stable fracture behaviour of composites under mode II loading*. *Composite structures*, 1996. **36**(1-2): p. 71-79.

Referências

67. De Moura, M. and A. De Morais, *Equivalent crack based analyses of ENF and ELS tests*. Engineering Fracture Mechanics, 2008. **75**(9): p. 2584-2596.
68. Polyzos, E., et al., *Delamination analysis of 3D-printed nylon reinforced with continuous carbon fibers*. Additive Manufacturing, 2021. **46**.
69. Monsef, S.A., et al., *The influence of mode II test configuration on the cohesive law of bonded joints*. Composite Structures, 2020. **234**.
70. ISO, *ISO 15114. Fibre-reinforced plastic composites — Determination of the mode II fracture resistance for unidirectionally reinforced materials using the calibrated end-loaded split (C-ELS) test and an effective crack length approach*. 2014, ISO: Genebra, Suíça.
71. Perez-Galmes, M., et al., *Towards a consensus on mode II adhesive fracture testing: Experimental study*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2018. **98**: p. 210-219.
72. Sacchetti, F., et al., *Interlaminar fracture toughness of 5HS Carbon/PEEK laminates. A comparison between DCB, ELS and mandrel peel tests*. Polymer Testing, 2018. **66**: p. 13-23.
73. Blackman, B.R.K., A.J. Brunner, and J.G. Williams, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(16): p. 2443-2455.
74. ASTM, *ASTM D790. Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials*. 2017, ASTM: West Conshohocken, EUA.
75. Ghasemnejad, H., H. Hadavinia, and A. Aboutorabi, *Effect of delamination failure in crashworthiness analysis of hybrid composite box structures*. Materials & Design, 2010. **31**(3): p. 1105-1116.
76. Poursartip, A., et al., *In-situ SEM measurements of crack tip displacements in composite laminates to determine local G in mode I and II*. Engineering Fracture Mechanics, 1998. **60**(2): p. 173-185.
77. Ding, Z.H., et al., *A semi-analytical method for the determination of fracture toughness and bridging law in ELS test*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023. **123**: p. 11.
78. Shahverdi, M., A.P. Vassilopoulos, and T. Keller, *Mixed-mode fatigue failure criteria for adhesively-bonded pultruded GFRP joints*. Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, 2013. **54**: p. 46-55.
79. Yasaei, M., et al., *Mode II interfacial toughening through discontinuous interleaves for damage suppression and control*. Composites Part a-Applied Science and Manufacturing, 2012. **43**(1): p. 121-128.
80. Zhang, Y., A.P. Vassilopoulos, and T. Keller, *Mode I and II fracture behavior of adhesively-bonded pultruded composite joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2010. **77**(1): p. 128-143.
81. Kenane, M. *Delamination Growth In Unidirectional Glass/Epoxy Composite Under Static And Fatigue Loads*. in *11th Maghreb Days Conference on Materials Science/JMSM 2008*. 2008. Mahdia, TUNISIA.
82. Silva, M.A.L., et al., *Mode II wood fracture characterization using the ELS test*. Engineering Fracture Mechanics, 2007. **74**(14): p. 2133-2147.
83. Groupe, W.J.B., L.L. Warnet, and R. Akkerman, *Critical assessment of the mandrel peel test for fiber reinforced thermoplastic laminates*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **101**: p. 96-108.

84. Wu, C.L., R. Huang, and K.M. Liechti, *Simultaneous extraction of tensile and shear interactions at interfaces*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2019. **125**: p. 225-254.
85. Wu, C.L., et al., *On determining mixed-mode traction-separation relations for interfaces*. International Journal of Fracture, 2016. **202**(1): p. 1-19.
86. Ding, Z.H., et al., *A semi-analytical method for the determination of fracture toughness and bridging law in ELS test*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2023. **123**.
87. Rizov, V., *Mixed-Mode II/III fracture in foam core sandwich beams*. Cellular Polymers, 2014. **33**(6): p. 287-300.
88. Barenblatt, G.I., *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. Advances in applied mechanics, 1962. **7**: p. 55-129.
89. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 1960. **8**(2): p. 100-104.
90. Campilho, R.D., *Strength prediction of adhesively-bonded joints*. 2017: CRC Press.
91. Yang, Q. and M.D. Thouless, *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International journal of fracture, 2001. **110**: p. 175-187.
92. Yang, Q., M. Thouless, and S. Ward, *Elastic-plastic mode-II fracture of adhesive joints*. International journal of solids and structures, 2001. **38**(18): p. 3251-3262.
93. Turon, A., et al., *Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue*. Composites Part A: applied science and manufacturing, 2007. **38**(11): p. 2270-2282.
94. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(10): p. 2827-2855.
95. Song, S.H., G.H. Paulino, and W.G. Buttlar, *A bilinear cohesive zone model tailored for fracture of asphalt concrete considering viscoelastic bulk material*. Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**(18): p. 2829-2848.
96. Kafkalidis, M. and M. Thouless, *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002. **39**(17): p. 4367-4383.
97. Li, S., et al., *Use of a cohesive-zone model to analyze the fracture of a fiber-reinforced polymer-matrix composite*. Composites Science and Technology, 2005. **65**(3-4): p. 537-549.
98. Biel, A. and U. Stigh, *Effects of constitutive parameters on the accuracy of measured fracture energy using the DCB-specimen*. Engineering Fracture Mechanics, 2008. **75**(10): p. 2968-2983.
99. Banea, M., L.F. da Silva, and R. Campilho, *Temperature dependence of the fracture toughness of adhesively bonded joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2010. **24**(11-12): p. 2011-2026.
100. Campilho, R., et al., *eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I*. Computational Materials Science, 2011. **50**(4): p. 1543-1549.
101. Campilho, R.D.S.G., et al., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single-and double-strap repairs*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2009. **29**(6): p. 678-686.
102. Campilho, R.D., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
103. Alfano, G. and M. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International journal for numerical methods in engineering, 2001. **50**(7): p. 1701-1736.

Referências

104. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International journal of Fracture, 1996. **77**: p. 111-140.
105. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and repaired sandwich panel by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002. **15**(5): p. 429-442.
106. Campilho, R.D., M. De Moura, and J. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008. **45**(5): p. 1497-1512.
107. Kenane, M., S. Benmedakhene, and Z. Azari, *Fracture and fatigue study of unidirectional glass/epoxy laminate under different mode of loading*. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2010. **33**(5): p. 284-293.
108. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
109. Campilho, R.D., 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.
110. Neto, J., R.D. Campilho, and L. Da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
111. Faneco, T.M.d.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica, no Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
112. Fernandes, R. and R. Campilho, *Accuracy of cohesive laws with different shape for the shear behaviour prediction of bonded joints*. The Journal of Adhesion, 2019. **95**(4): p. 325-347.

Declaração de Integridade

Declaro ter conduzido este trabalho académico com integridade. Não plagiei ou apliquei qualquer forma de uso indevido de informações ou falsificação de resultados ao longo do processo que levou à sua elaboração.

Declaro que o trabalho apresentado neste documento é original e de minha autoria, não tendo sido utilizado anteriormente para nenhum outro fim.

Declaro ainda que tenho pleno conhecimento do Código de Conduta Ética do P.PORTO.

NOME: João Manuel Amaral Fontes

ISEP, Porto, 17 de Junho de 2024