



Determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto pelo ensaio Single-Leg Bending

ANTÓNIO PEDRO OLIVEIRA AMORIM LEITE SOARES

Junho de 2015

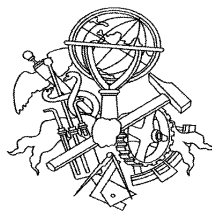
Determinação da tenacidade à fratura de adesivos
estruturais em modo misto pelo ensaio *Single-Leg*
Bending

António Pedro Oliveira Amorim Leite Soares

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



24 de julho de 2015

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

Candidato: António Pedro Oliveira Amorim Leite Soares, 1091423@isep.ipp.pt

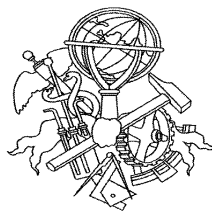
Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Francisco José Gomes da Silva, fgs@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



24 de julho de 2015

Dedico este trabalho aos meus Pais e família que sempre me apoiaram

Agradecimentos

Desejo agradecer a todas as individualidades e instituição que possibilitaram a realização da presente dissertação, nomeadamente:

Ao Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pelo apoio prestado durante todo este processo e sempre que solicitada ajuda pela minha parte.

Ao Professor Doutor Francisco Gomes da Silva pela disponibilização de material necessário à realização da etapa experimental e tempo despendido no auxílio da elaboração do trabalho.

Ao ISEP por conceder as suas instalações para a realização das etapas práticas integrantes a este trabalho.

Resumo

A utilização de juntas adesivas em aplicações industriais tem vindo a aumentar, em detrimento dos métodos tradicionais tais como a soldadura, brasagem e ligações aparafusadas e rebitadas. Este facto deve-se às vantagens que estas oferecem, como o facto de serem mais leves, comportarem-se bem sob cargas cíclicas ou de fadiga, a ligação de materiais diferentes e menores concentrações de tensões. Para aumentar a confiança no projeto de estruturas adesivas, é importante conseguir prever com precisão a sua resistência mecânica e respetivas propriedades de fratura (taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração, G_{IC} , e corte, G_{IIC}). Estas propriedades estão diretamente relacionadas com a Mecânica da Fratura e são estimadas através de uma análise energética. Para este efeito, distinguem-se três tipos de modelos: modelos que necessitam da medição do comprimento de fenda durante a propagação do dano, modelos que utilizam um comprimento de fenda equivalente e métodos baseados no integral J . Como na maioria dos casos as solicitações ocorrem em modo misto (combinação de tração com corte), é de grande importância a perceção da fratura nestas condições, nomeadamente das taxas de libertação de energia relativamente a diferentes critérios ou envelopes de fratura. Esta comparação permite, por exemplo, averiguar qual o melhor critério energético de rotura a utilizar em modelos numéricos baseados em Modelos de Dano Coesivo.

Neste trabalho é realizado um estudo experimental utilizando o ensaio *Single-Leg Bending* (SLB) em provetes colados com três tipos de adesivos, de forma a estudar e comparar as suas propriedades de fratura. Para tal, são aplicados alguns modelos de redução da taxa de libertação de energia de deformação à tração, G_I , e corte, G_{II} , enquadrados nos modelos que necessitam da medição do comprimento de fenda e nos modelos que utilizam um comprimento de fenda equivalente. Numa fase posterior, procedeu-se à análise e comparação dos resultados adquiridos durante a fase experimental de G_I e G_{II} de cada adesivo. A discussão de resultados foi também feita através da análise dos valores obtidos em diversos envelopes de fratura, no sentido de averiguar qual o critério de rotura mais adequado a considerar para cada adesivo.

Foi obtida uma concordância bastante boa entre métodos de determinação de G_I e G_{II} , com exceção do adesivo mais dúctil, para o qual o método baseado no comprimento de fenda equivalente apresentou resultados ligeiramente superiores.

Palavras-Chave

Single-Leg Bending, ligação adesiva, adesivo estrutural, mecânica da fratura, tenacidade à fratura, envelope de fratura.

Abstract

The industrial applications of bonded joints have been increasing, instead of more traditional methods like welding, brazing, and bolted and riveted connections. This is due to the advantages offered by bonded joints, opposed to the other joining methods, such as less weight, better behavior under cyclical or fatigue loads, enabling joining different materials and smaller stress concentrations. In order to increase the confidence in the design of adhesive structures, it is important to accurately predict their strength and respective fracture properties (critical strain energy release rate in tension, G_{IC} , and shear, G_{IIC}). These properties are directly related with Fracture Mechanics and are estimated by an energetic analysis. Three types of data reduction models are available: models that require the measurement of crack length, models that use an equivalent crack length and models based on the J integral. Since bonded joints are typically loaded in mixed-mode (combination of tensile and shear loads), it is highly important the perception of the fracture behavior under these conditions, namely the strain energy release rates with respect to different criteria or fracture envelopes. This comparison allows, for example, the investigation of the most suited energetic criterion to use in numeric models based on cohesive damage models.

This work consists of an experimental study using Single-Leg Bending (SLB) tests in specimens bonded by three kinds of adhesives, to compare their fracture properties. With this purpose, different models are applied to obtain strain energy release rate in tension, G_I , and shear, G_{II} , either requiring the measurement of the crack length or based on the use of an equivalent crack length. Afterwards, a comparison of the obtained G_I and G_{II} results of each adhesive is performed. The results were also plotted against several fracture envelopes to understand which is the most adequate criterion to be used for each adhesive.

A very good agreement was found between G_I and G_{II} estimation methods, apart from the most ductile adhesive, for which the method based on the equivalent crack presented slightly higher results.

Keywords

Single-Leg Bending, adhesive joint, structural adhesive, fracture mechanics, fracture toughness, fracture envelope.

Índice

AGRADECIMENTOS.....	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XV
ÍNDICE DE TABELAS	XIX
NOMENCLATURA	XXI
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS.....	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 <i>Caraterização das juntas adesivas</i>	6
2.1.2 <i>Esforços e modos de rotura em juntas adesivas</i>	9
2.1.3 <i>Configurações possíveis de junta</i>	16
2.2 ADESIVOS	19
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i>	21
2.2.1.1 Epóxidos.....	21
2.2.1.1.1 Epóxidos híbridos.....	22
2.2.1.2 Fenólicos	23
2.2.1.2.1 Fenólicos híbridos	23
2.2.1.3 Formaldeído	24
2.2.1.4 Poliaromáticos de alta temperatura.....	24
2.2.1.5 Poliuretanos.....	25
2.2.1.6 Anaeróbicos	25
2.2.1.7 Cianoacrilatos.....	25
2.2.1.8 Acrílicos modificados	26
2.2.1.9 Poliésteres	26
2.3 ENSAIOS PARA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA.....	26
2.3.1 <i>Modo I</i>	27
2.3.2 <i>Modo II</i>	29
2.3.3 <i>Modo misto I + II</i>	30
2.4 ENSAIO SINGLE-LEG BENDING (SLB)	33
2.4.1 <i>Caraterização do ensaio</i>	33

2.4.2	<i>Métodos para determinação da tenacidade à fratura</i>	34
2.4.2.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda.....	34
2.4.2.1.1	Szekrényes e Uj (modelo 1).....	34
2.4.2.1.2	Ye Zhu (modelo 2).....	37
2.4.2.1.3	W. S. Kim (modelo 3).....	38
2.4.2.1.4	da Silva et al. (modelo 4).....	40
2.4.2.1.5	Szekrényes e Uj (modelo 5).....	40
2.4.2.2	Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente.....	44
2.4.2.2.1	CBBM (modelo 6).....	44
2.4.2.3	Método baseado no integral J	45
3	DESENVOLVIMENTO	51
3.1	MATERIAIS.....	51
3.1.1	<i>Substratos</i>	51
3.1.2	<i>Adesivos</i>	52
3.1.2.1	Adesivo Araldite® AV138.....	52
3.1.2.2	Adesivo Araldite® 2015.....	53
3.1.2.3	Adesivo SikaForce® 7752.....	55
3.2	PROCEDIMENTO EXPERIMENTAL.....	57
3.2.1	<i>Geometria das juntas</i>	57
3.2.1.1	Otimização numérica da geometria.....	57
3.2.1.2	Geometria final.....	58
3.2.2	<i>Processo de fabrico</i>	59
3.2.3	<i>Preparação para ensaio</i>	63
3.2.4	<i>Procedimento de ensaio</i>	66
3.3	RESULTADOS.....	68
3.3.1	Adesivo Araldite® AV138.....	68
3.3.2	Adesivo Araldite® 2015.....	70
3.3.3	Adesivo SikaForce® 7752.....	71
3.4	DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE À FRATURA.....	73
3.4.1	Adesivo Araldite® AV138.....	73
3.4.2	Adesivo Araldite® 2015.....	79
3.4.3	Adesivo SikaForce® 7752.....	86
3.5	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	93
4	CONCLUSÕES	99
	REFERÊNCIAS	101

Índice de Figuras

Figura 1 – Áreas de estudo envolvidas na ciência da adesão	5
Figura 2 – Algumas aplicações de juntas adesivas, (a) – estrutura <i>sandwich</i> , (b) – raquete de ténis e (c) – ligação de painéis em helicóptero [3]	7
Figura 3 – Constituintes de uma junta adesiva [6]	8
Figura 4 - Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com adesivos rígidos e flexíveis [8]	9
Figura 5 - Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição com diferentes espessuras de adesivo [8]	10
Figura 6 – Distribuição de tensões numa junta adesiva à compressão [9]	10
Figura 7 - Esforços a que as juntas adesivas podem estar sujeitas [10]	10
Figura 8 - Junta sob esforço de tração [11]	11
Figura 9 - Junta sob esforço de compressão	11
Figura 10 - Junta sob esforço de corte [11]	12
Figura 11 - Deflexão transversa da junta de sobreposição simples [13]	12
Figura 12 - Deformação plástica da junta devido às concentrações de tensões [8]	13
Figura 13 - Junta sob esforço de clivagem [11]	13
Figura 14 – Junta sob esforço de arrancamento [11]	14
Figura 15 – Comparação entre o comportamento de um adesivo rígido e de um adesivo dúctil ao arrancamento	14
Figura 16 - Modos de rotura de juntas adesivas [15]	15
Figura 17 – Exemplo de rotura mista numa junta de sobreposição simples [4]	15
Figura 18 - Tipos de juntas adesivas mais comuns [8]	17
Figura 19 – Distribuição das tensões numa junta topo a topo sob carga axial e não axial [9]	18
Figura 20 – Possíveis geometrias de juntas tubulares [8]	19
Figura 21 - Diferentes modos de propagação de uma fenda [22]	27
Figura 22 - Representação esquemática do ensaio DCB [23]	28
Figura 23 - Representação esquemática do ensaio TDCB [2]	28
Figura 24 – Representação esquemática do ensaio ENF [26]	29
Figura 25 – Zona de processo de fratura [9]	30
Figura 26 – Representação esquemática do ensaio MMF ou SLB [2]	30
Figura 27 – Representação esquemática do ensaio ADCB [2]	31
Figura 28 - Representação esquemática do ensaio CMM [29]	31
Figura 29 – Representação esquemática do ensaio MMB [30]	32

Figura 30 – Representação esquemática do ensaio SLB [27]	33
Figura 31 – Esquema de corpo livre de um provete em modo de carregamento misto [27]	35
Figura 32 – Esquema representativo dos esforços e comportamento elástico do provete [34]	41
Figura 33 – Diagrama esquemático da aplicação do integral J	45
Figura 34 – Aplicação do Integral J no ensaio SLB [46]	46
Figura 35 - Adesivo epóxico Araldite® AV138/HV998	52
Figura 36 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [12].....	53
Figura 37 - Adesivo epóxico Araldite® 2015	54
Figura 38 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [12]	54
Figura 39 - Adesivo SikaForce® 7752.....	55
Figura 40 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo SikaForce® 7752 [52]	56
Figura 41 - Geometria do provete de ensaio SLB	58
Figura 42 - Aplicação de calor numa camada de pré-impregnado através de pistola de ar quente..	60
Figura 43 - Prensa de pratos quentes utilizada para a cura das placas de compósito	60
Figura 44 - Ciclo térmico aplicado às placas de compósito	61
Figura 45 – Fase de lixagem e limpeza dos substratos.....	61
Figura 46 – Posicionamento dos espaçadores, calço e grampos, durante a aplicação de pressão nos provetes	63
Figura 47 – Exemplo de provete após cura, com excesso de adesivo na zona de ligação	63
Figura 48 – Aspeto do provete após remoção manual do adesivo em excesso com um alicate.....	64
Figura 49 – Mó utilizada na fase final de remoção de excesso de adesivo	64
Figura 50 – Aspeto final de um provete apto para ensaio	65
Figura 51- Curva P - δ de um ensaio.....	66
Figura 52 – Provede preparado para ensaio: posicionamento no sistema de apoio e sistema de aquisição de imagem	67
Figura 53 – Fotografia durante o decorrer de um ensaio, em que o provete sai fora dos limites da imagem capturada	67
Figura 54 - Curvas P - δ relativas aos 7 provetes testados com adesivo Araldite® AV138	69
Figura 55 - Curvas P - δ relativas aos 7 provetes testados com o adesivo Araldite® 2015	71
Figura 56 - Curvas P - δ relativas aos 7 provetes testados com o adesivo SikaForce® 7752	72
Figura 57 – Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo Araldite® AV138	75
Figura 58 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo Araldite® AV138	76
Figura 59 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® AV138	77

Figura 60 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® AV138	78
Figura 61 – Valores médios e desvios padrão de G_I e G_{II} calculados através dos valores de patamar dos ensaios validados relativos ao adesivo Araldite® AV138.....	79
Figura 62 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® 2015	82
Figura 63 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® 2015	82
Figura 64 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #4 colado com o adesivo Araldite® 2015	83
Figura 65 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #4 colado com o adesivo Araldite® 2015	84
Figura 66 - Valores médios e desvios padrão de G_I e G_{II} calculados através dos valores de patamar dos ensaios validados relativos ao adesivo Araldite® 2015.....	85
Figura 67 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo SikaForce® 7752.....	88
Figura 68 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo SikaForce® 7752.....	89
Figura 69 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #5 colado com o adesivo SikaForce® 7752.....	90
Figura 70 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #5 colado com o adesivo SikaForce® 7752.....	91
Figura 71 - Valores médios e desvios padrão de G_I e G_{II} calculados através dos valores de patamar dos ensaios validados relativos ao adesivo SikaForce® 7752	92
Figura 72 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 1 (a) e 2 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® AV138.....	94
Figura 73 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 3 (a) e 4 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® AV138.....	95
Figura 74 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 5 (a) e 6 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® AV138.....	95
Figura 75 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 1 (a) e 2 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® 2015.....	96
Figura 76 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 3 (a) e 4 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® 2015.....	96
Figura 77 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 5 (a) e 6 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® 2015.....	96

Figura 78 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 1 (a) e 2 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo SikaForce[®] 7752..... 97

Figura 79 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 3 (a) e 4 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo SikaForce[®] 7752..... 97

Figura 80 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 5 (a) e 6 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo SikaForce[®] 7752..... 98

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens das juntas adesivas [5].....	6
Tabela 2 – Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção x [20].....	51
Tabela 3 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® AV138 [12, 50]	53
Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [12]	55
Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752.....	56
Tabela 6 – Tensões máximas de von Mises [MPa] para diferentes geometrias das juntas adesivas	57
Tabela 7 - Valores de a_0 [mm] medidos para cada provete.....	65
Tabela 8 – Valores de carga máxima e deslocamento associado à carga máxima obtidos para cada ensaio realizado com o adesivo Araldite® AV138	68
Tabela 9 - Valores de carga máxima e deslocamento associado à carga máxima obtidos para cada ensaio realizado com o adesivo Araldite® 2015	70
Tabela 10 - Valores de carga máxima e deslocamento associado à carga máxima obtidos para cada ensaio realizado com o adesivo SikaForce® 7752.....	71
Tabela 11 – Valores médios e desvios padrão de G_I [N/mm], obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® AV138, utilizando os 6 modelos de cálculo.....	74
Tabela 12 - Valores médios e desvios padrão de G_{II} [N/mm], obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® AV138, utilizando os 6 modelos de cálculo.....	74
Tabela 13 - Valores médios e desvios padrão de G_I , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® 2015 utilizando os 6 modelos de cálculo.....	80
Tabela 14 - Valores médios e desvios padrão de G_{II} , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® 2015 utilizando os 6 modelos de cálculo.....	81
Tabela 15 - Valores médios e desvios padrão de G_I , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo SikaForce® 7752 utilizando os 6 modelos de cálculo	86
Tabela 16 - Valores médios e desvios padrão de G_{II} , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo SikaForce® 7752 utilizando os 6 modelos de cálculo	87
Tabela 17 – Proporções de modo entre modelos considerados.....	93
Tabela 17 – Parâmetros utilizados para os critérios de avaliação [30, 37].....	94
Tabela 18 – Valores de G_{IC} e G_{IIC} dos diferentes adesivos analisados [12, 50, 52].....	94

Nomenclatura

Carateres Romanos

\vec{T} – Vetor de tração analisado no método integral J

\vec{n} – Vetor normal analisado no método integral J

\vec{u} – Vetor de deslocamento na direção xx analisado no método integral J

a – Comprimento de fenda

a.C. – Antes de Cristo

a_0 – Comprimento de fenda inicial

a_1, a_2 – Parâmetros referentes ao modelo 3

$a_{55,1}, a_{55,2}, d_{11,1}, d_{11,2}$ – Parâmetros referentes ao modelo 1

A_{CBBM} – Parâmetro referente ao modelo 6

a_e – Comprimento de fenda equivalente

A_i – Rigidez axial relativa ao substrato i

B – Largura do provete

c – Fator de distanciamento relacionado ao ensaio MMB

C – Flexibilidade

C_0 – Valor de patamar da Flexibilidade

$C_{0\text{corr}}$ – Flexibilidade corrigida inicial

C_{corr} – Flexibilidade corrigida

C_{EB} – Flexibilidade obtida pela teoria de Euler-Bernoulli

C_{TIM} – Flexibilidade obtida pela teoria de Timoshenko

$C_{wp1}, C_{wp2}, f_{SH2}, f_{SV}, f_{W1}, G_{SV}, G_{SH1}, G_{SH2}$ – Parâmetros referentes ao modelo 5

D – Rigidez à flexão associada à secção ligada

D_i – Rigidez à flexão do substrato i

E – Módulo de Elasticidade

E_{33} – Módulo de Elasticidade na direção da largura do provete

E_f – Módulo corrigido à flexão

E_i – Módulo de Elasticidade do substrato i

E_x – Módulo de Elasticidade na direção do eixo x

E_y – Módulo de Elasticidade na direção do eixo y

E_z – Módulo de Elasticidade na direção do eixo z

f_T, f_{W2}, M_I, M_{II} – Parâmetros referentes aos modelos 1 e 5

G – Taxa de libertação de energia de deformação

G_{11} – Módulo de Corte

G_{11xy} – Módulo de Corte no plano xy

G_{11xz} – Módulo de Corte no plano xz

G_{11yz} – Módulo de Corte no plano yz

G_C – Taxa crítica de libertação de energia/tenacidade à fratura

G_i – Taxa de libertação de energia do substrato i

G_I – Taxa de libertação de energia em modo I

$G_{I/II}$ – Taxa de libertação de energia em modo misto I+II

G_{IC} – Taxa crítica de libertação de energia em modo I

G_{II} – Taxa de libertação de energia em modo II

G_{IIC} – Taxa crítica de libertação de energia em modo II

G_{III} – Taxa crítica de libertação de energia em modo III

G_{int} – Fator térmico e mecânico relativo à taxa de libertação de energia

G_{mec} – Fator mecânico relativo à taxa de libertação de energia

G_T – Fator referente às tensões internas na análise da taxa de libertação de energia

h – Espessura do substrato

h_i – Espessura do substrato i

h_t – Espessura total do provete

I – Momento de inércia estático

J_I – Taxa de libertação de energia em modo I segundo o método baseado no integral J

$J_{I/II}$ – Taxa de libertação de energia em modo misto I+II segundo o método baseado no integral J

J_{II} – Taxa de libertação de energia em modo II segundo o método baseado no integral J

k – Fator de correção de corte

L – Comprimento característico do provete

m – Constante relativa ao ensaio TDCB

M – Momento fletor

M_i – Momentos de torção aplicados no substrato i

P – Carga aplicada

P_i – Resultante das forças aplicadas no substrato i

Q – Força de corte analisada no método integral J

Q_i – Força de corte aplicada no substrato i

Q_T – Resultante das forças de corte exercidas sobre a junta adesiva

R – Relação entre módulos de elasticidade dos dois substratos que compõem o provete

s – Comprimento do caminho escolhido no método integral J

W – Densidade de energia (analisada no método integral J)

w – Espessura do adesivo (analisada no método integral J)

w_0 – Separação normal entre dois aderentes na frente da fenda (analisada no método integral J)

Carateres Gregos

α, φ – Parâmetros referentes aos modelos 1 e 5

$\alpha_{\text{CBBM}}, \beta_{\text{CBBM}}$ e γ_{CBBM} – Parâmetros referentes ao modelo 6

β, α_1 – Parâmetros referentes ao modelo 3

γ_f – Deformação de rotura ao corte

δ – Deslocamento verificado durante um ensaio

δ_J – Deslocamento tangencial entre substratos, referente à análise do método baseado no integral J

δ_{J0} – Deslocamento tangencial inicial entre substratos, referente à análise do método baseado no integral J

ΔT – Diferença de temperatura

ε – Deformação

ε_f – Deformação de rotura à tração

θ_p – Rotação relativa entre os dois substratos na linha de aplicação de carga, referente à análise do método baseado no integral J

λ – Relação entre espessuras dos dois substratos que compõem o provete

ξ_1, ξ_2 – Parâmetros relacionados com a análise do método baseado no integral J

σ – Tensão normal

σ_f – Tensão de rotura à tração

σ_{VM} – Tensão de von Mises

σ_y – Tensão de cedência à tração

ν – Coeficiente de Poisson

ν_{xy} – Coeficiente de Poisson no plano xy

ν_{xz} – Coeficiente de Poisson no plano xz

ν_{yz} – Coeficiente de Poisson no plano yz

ϕ – Proporção de modos entre G_I e G_{II}

ϕ_1, ω – Parâmetros referentes ao modelo 5

φ_{EF} e λ_{EF} – Parâmetros dos critérios de avaliação utilizados na análise dos envelopes de fratura

Γ – Percurso referente ao método baseado no integral J

τ – Tensão de corte

τ_f – Tensão de rotura ao corte

τ_y – Tensão de cedência ao corte

Abreviaturas

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

ADCB – *Asymmetric Double-Cantilever Beam*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CBBM – *Compliance-Based Beam Method*

CMM – *Compact Mixed-Mode*

DCB – *Double-Cantilever Beam*

EB – Euler-Bernoulli

ELS – *End Loaded Split*

ENF – *End-Notched Flexure*

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

MMB – *Mixed-Mode Bending*

MMF – *Mixed-Mode Flexure*

SLB – *Single-Leg Bending*

SV – Saint-Venant

TDCB – *Tapered Double-Cantilever Beam*

TIM – Timoshenko

ZPF – Zona de Processo de Fratura

1 Introdução

1.1 Contextualização

Atualmente, as juntas adesivas desempenham um papel muito importante na sua vasta gama de aplicações, apresentando diversas vantagens relativamente a outros processos de união. Com o objetivo de permitir a utilização das juntas adesivas em estruturas, torna-se necessário conhecer as propriedades mecânicas e de fratura relevantes de cada adesivo e comportamento perante o aderente em causa. De acordo com a finalidade concebida a uma determinada junta, as solicitações a que esta poderá estar sujeita podem variar, juntamente com o seu desempenho, que depende da sua resistência aos esforços suportados. Existem diversos tipos de ensaios, necessariamente destrutivos, que permitem analisar a reação das juntas adesivas aos diversos modos de carregamento a que poderão ser sujeitos, e estudar as suas propriedades de fratura. O estudo destas propriedades é de elevada importância porque este permite obter as bases para a previsão da resistência das juntas adesivas. Uma junta adesiva pode estar sujeita a tensões de tração ou de corte, encontrando-se na maior parte das vezes sujeita a ambas simultaneamente, criando-se assim um modo de carregamento misto. Como tal, torna-se necessário o estudo das propriedades dos adesivos tendo em conta este modo misto. De facto, existem métodos numéricos como os modelos de dano coesivo associados a uma análise de Elementos Finitos para os quais é de primordial importância o conhecimento de parâmetros como a taxa crítica de libertação de energia em tração (G_{IC}) e corte (G_{IIC}). Para além deste facto, devido ao modo misto de carregamento anteriormente referido, é necessária a utilização de um critério de fratura que promova a propagação do dano nestas condições. Existem diversos critérios para este efeito e, como tal, é de extrema importância o conhecimento do critério mais adequado para cada tipo de adesivo. Neste âmbito, os ensaios de fratura em modo misto são uma ajuda imprescindível na medida em que permitem situar a rotura observada no envelope de fratura e assim seleccionar o critério mais adequado.

1.2 Objetivos

O principal objetivo desta dissertação é a análise da taxa de libertação de energia (propriedade relacionada com a mecânica da fratura, relativa à capacidade de um material resistir à propagação de uma fenda provocada por esforços externos), sobre efeitos de tração (modo I) e de corte (modo II), pelo ensaio de provetes *Single-Leg Bending* (SLB) em juntas adesivas, com substratos de matriz polimérica reforçada com fibra de carbono, colados através de três tipos distintos de adesivo (frágil, moderadamente dúctil e dúctil). Para tal foram fabricados 21 provetes, 7 por cada tipo de adesivo. O ensaio SLB permite caracterizar a taxa de libertação de energia dos diferentes tipos de adesivo sobre dois modos de carregamento, modo I (G_I) e modo II (G_{II}). Para avaliar tais parâmetros podem ser utilizados três tipos de métodos: métodos que requerem a medição do comprimento de fenda (a) ao longo do ensaio, métodos que usam um comprimento de fenda equivalente (a_e) (como o *Compliance-Based Beam Method*, CBBM) e através do integral J . Os modelos que requerem a medição contínua do valor de a apresentam a desvantagem de necessitarem dessa medição, associada a possíveis erros de medição. Já os modelos que utilizam a_e não requerem a medição deste parâmetro, sendo assim mais fiáveis do que os anteriormente mencionados. O método de redução baseado no integral J não se encontra enquadrado no âmbito desta dissertação e, como tal, não será utilizado na fase de processamento de resultados, sendo apenas descrito na revisão bibliográfica. Através dos resultados obtidos pelos ensaios realizados, são criadas curvas P - δ que servem de base à análise dos resultados a efetuar. Após obtidas e analisadas as curvas P - δ , é definida a amostra de ensaios a incluir numa posterior análise (excluindo os ensaios de resultado anómalo). Esta consiste na comparação das curvas- R obtidas pela aplicação de 6 modelos matemáticos de cálculo da taxa de libertação de energia nos modos de carregamento introduzidos pelo ensaio, e respetiva comparação dos valores médios e respetivos desvios padrão obtidos por cada modelo. É feita uma discussão de resultados que consiste na comparação de valores médios de G_I e G_{II} obtidos por cada ensaio. A apresentação destes resultados é feita através da utilização do envelope de fratura, que permite situar os valores de G_I e G_{II} obtidos relativamente aos de modo puro (G_{IC} e G_{IIC} , respetivamente).

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1: Neste Capítulo estão descritas a contextualização, os objetivos e o modo de organização deste trabalho.

Capítulo 2: Nesta Secção é apresentada informação, inicialmente de uma forma global, relativa ao estado de arte das ligações adesivas, sua caracterização e propriedades a ter em conta, esforços e

modos de rotura a que estão normalmente associadas, configurações das juntas adesivas mais usuais, caracterização e classificação dos tipos de adesivos estruturais com maior utilização e os diversos ensaios utilizados com o intuito de obter as propriedades de fratura (G_I , G_{II} e $G_{I/II}$) das juntas adesivas. De um modo mais particular, é analisado o ensaio em estudo nesta dissertação (SLB) quanto à sua caracterização e aos métodos de determinação de G_I e G_{II} .

Capítulo 3: São apresentados e discutidos neste Capítulo todos os passos envolventes na caracterização à fratura das juntas adesivas ensaiadas, desde os procedimentos levados a cabo na produção dos provetes a ensaiar e definição das respetivas geometrias de junta e do ensaio SLB, até aos resultados obtidos através dos 6 modelos de redução de G_I e G_{II} a analisar. São também discutidos em detalhe os resultados obtidos e tiradas as ilações consideradas pertinentes.

Capítulo 4: São apresentadas nesta Secção as conclusões retiradas neste trabalho e perspetivas de possíveis trabalhos futuros na área.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

Os adesivos são materiais desde há muito usados na natureza, por exemplo na construção de ninhos de pássaros, colmeias de abelhas e até mesmo em teias de aranha. Estes são de origem natural e podem ser criados tanto por plantas, como no caso da goma-arábica, ou pelos próprios seres-vivos que os utilizam em seu benefício. O homem apercebeu-se de que poderia tirar proveito deste tipo de materiais e começou a usá-los no seu dia-a-dia, havendo registos do seu uso desde quinze séculos a.C. no Egito [1]. Com o passar do tempo, criando-se novas necessidades, tornou-se relevante a evolução das ligações adesivas. Sendo assim, nos anos 40, nasceram os primeiros adesivos sintéticos poliméricos, que permitiram melhorar as propriedades dos adesivos naturais e aumentar a sua gama de aplicabilidade.

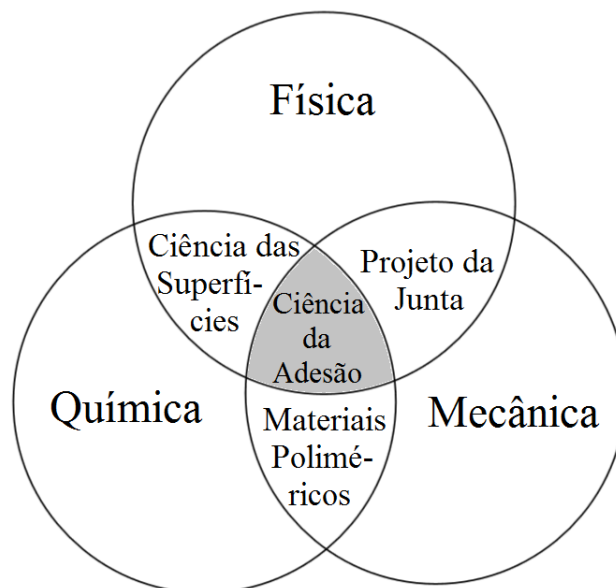


Figura 1 – Áreas de estudo envolvidas na ciência da adesão

No entanto, estes adesivos ainda apresentavam bastantes limitações, tais como serem frágeis e fraturarem com facilidade. Após alguns avanços científicos e tecnológicos, ainda nessa época, com a introdução de polímeros com boa tenacidade na composição química dos adesivos, foi possível criar com sucesso ligações adesivas em materiais como madeiras e metais [2]. Desde então, procurou-se sempre melhorar as características mecânicas dos adesivos já existentes de forma a poderem ser considerados como substitutos de outras formas de união. Para tal ser possível, é necessário compreender a ciência da adesão, responsável por garantir a qualidade de uma união. Esta ciência é bastante complexa e complementa-se através de diversas áreas de estudo científicas (Figura 1).

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Uma junta adesiva é obtida pela ligação de pelo menos duas superfícies de materiais sólidos através da propriedade de adesão de um determinado adesivo ligante, que confere ao conjunto uma resistência minimamente aceitável sobre certas condições [3]. As juntas adesivas podem substituir, em certas aplicações, outros métodos de ligação mais tradicionais, como a soldadura e a fixação por parafusos, que danificam a estrutura que estão a ligar, provocando zonas mais frágeis sujeitas a altas concentrações de tensões e podendo danificar tratamentos de proteção que tenham sido efetuados [4]. Em relação aos outros métodos de ligação, as juntas adesivas geralmente apresentam um menor peso global, preços acessíveis e em alguns casos conseguem acompanhar ou até melhorar a resistência da junta. A Tabela 1 resume as principais vantagens e desvantagens das juntas adesivas.

Tabela 1 - Principais vantagens e desvantagens das juntas adesivas [5]

Vantagens	Desvantagens
<ul style="list-style-type: none"> - Melhor eficiência na transferência de carga - Melhor acabamento - Melhor vedação - Melhor resistência à fadiga - Melhor eficiência aerodinâmica 	<ul style="list-style-type: none"> - Baixa resistência para cargas de arrancamento - A preparação da área de aplicação do adesivo é crítica para a resistência da junta - Não é desmontável - Os ensaios não destrutivos não são eficientes para garantir a qualidade da junta - Capacidade limitada de resistência a altas temperaturas

Devido às vantagens que podem ser conseguidas através deste método de ligação, as juntas adesivas são bastante utilizadas (Figura 2) na indústria aeronáutica, petrolífera, construção civil e equipamentos desportivos [5].

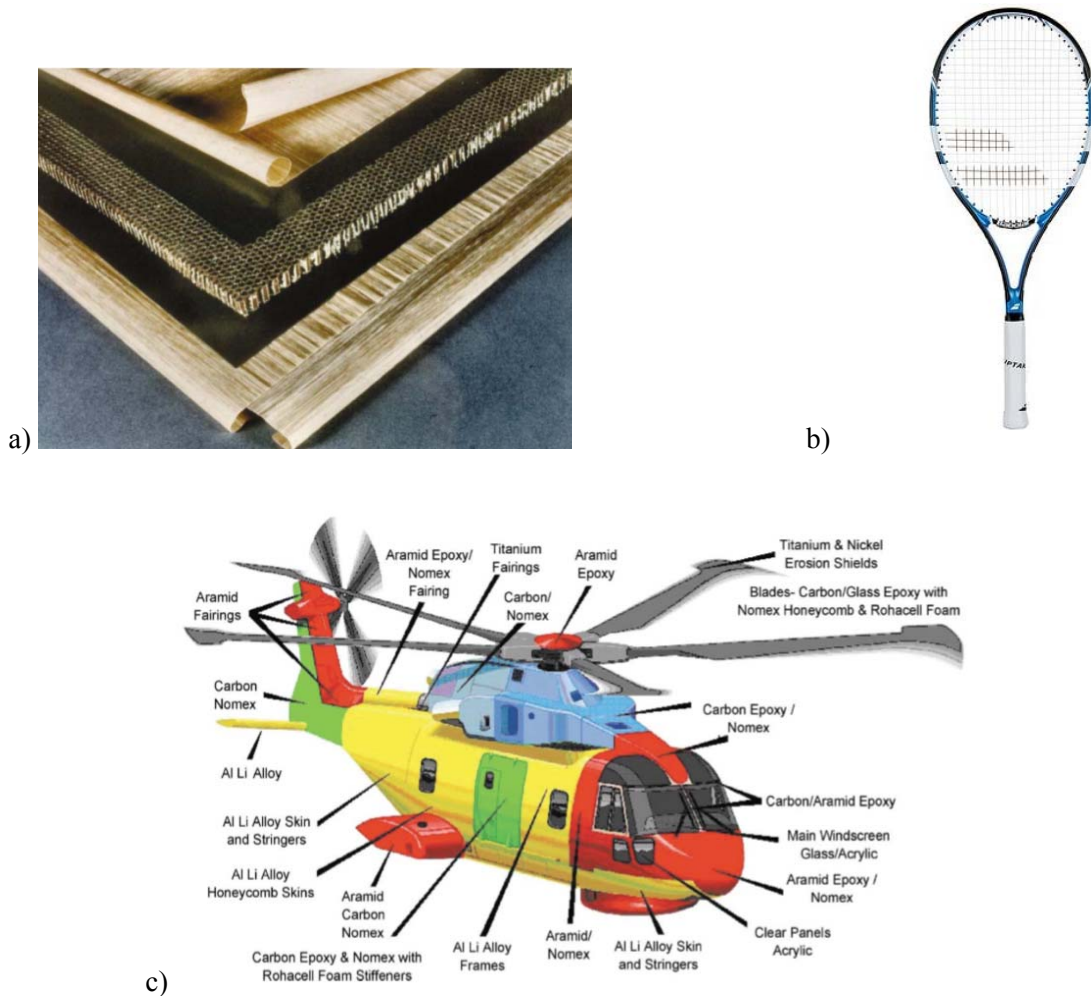


Figura 2 – Algumas aplicações de juntas adesivas, (a) – estrutura *sandwich*, (b) – raquete de ténis e (c) – ligação de painéis em helicóptero [3]

A adesão é um fenómeno físico-químico inerente a dois ou mais materiais, que atua nas imediações da sua zona de contacto (interface) e que garante a qualidade da união entre eles (Figura 3). O sucesso da adesão depende das propriedades dos materiais envolvidos em determinada união, do estado das superfícies a ligar e das características do meio envolvente.

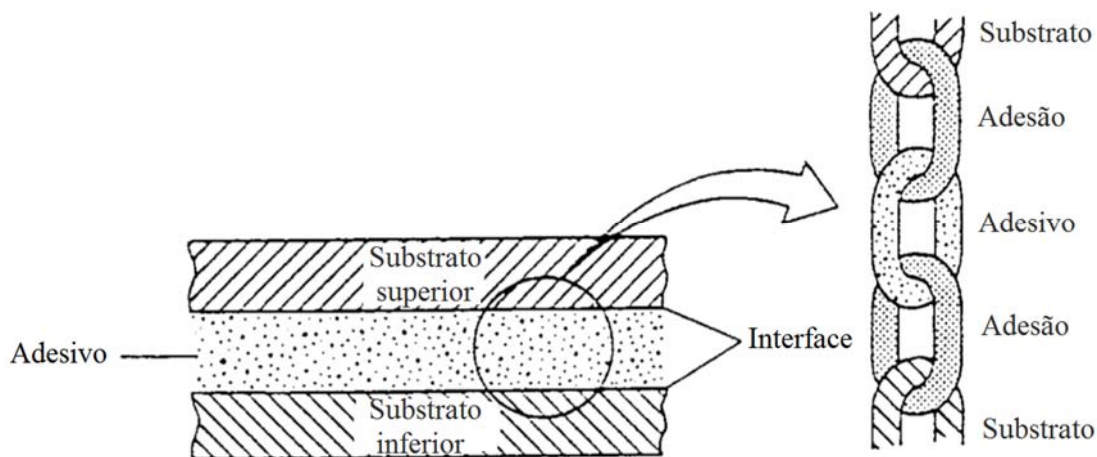


Figura 3 – Constituintes de uma junta adesiva [6]

Existem várias teorias que são usadas para explicar a adesão. Na realidade, todas elas estão interligadas, porque existem várias razões para se dar este fenómeno. Assim, estas teorias complementam-se. As mais conhecidas são a teoria da absorção, teoria da difusão, teoria elétrica, teoria mecânica, teoria da polaridade e a teoria da camada limite [7].

Quando se pretende criar uma ligação adesiva é necessário seguir o seguinte procedimento [2]:

1º - Seleção do adesivo, tendo em conta a finalidade da junta adesiva. Os parâmetros que vão afetar esta escolha são a temperatura de funcionamento, tipos e magnitude dos esforços a que a junta será sujeita, meio ambiente em que a junta será aplicada e método de aplicação do adesivo.

2º - Projeto da junta, consiste em definir a geometria da junta, dimensionando os seus parâmetros geométricos para que as tensões a que esta será sujeita não ultrapassem os valores limite admissíveis do adesivo selecionado, tendo em conta os diferentes esforços que se poderão desenvolver na junta.

3º - Preparação superficial, necessária para garantir uma junta com uma adesão mais forte entre o adesivo e os substratos a unir, o que reduz o risco de haver rotura adesiva e melhora assim a resistência da junta. Pode ser feita de várias formas e em diversas etapas, dependendo do tipo de adesivo e substratos.

4º - Fabrico da junta, abrange a aplicação de adesivo nos substratos a unir e todos os processos envolvidos durante a cura do adesivo, para conferir à junta as propriedades desejadas, como ciclos térmicos e aplicação de pressão.

5º - Controlo do processo, a fase final onde são executados uma sequência de ensaios, destrutivos e não destrutivos, para garantir que a ligação apresenta a curto e longo prazo características satisfatórias consoante a sua finalidade. Os métodos de previsão da resistência das juntas servem como ajuda na fase inicial de planeamento, mas não são suficientes, porque são calculados para situações perfeitas que não podem ser garantidas na realidade. De facto, podem ocorrer na prática defeitos de fabrico que não são contemplados nos modelos de previsão.

2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Os esforços exercidos numa junta adesiva vão depender do local onde a força está a ser aplicada, da sua direção, sentido e configuração estrutural da própria junta. Normalmente, ao longo de uma junta, a distribuição de esforços não é uniforme, havendo sempre zonas mais propícias às concentrações de tensões. Estas concentrações de tensões ocorrem em zonas de descontinuidade geométrica e nas extremidades da camada de adesivo, como se pode verificar na Figura 4 [2]. Normalmente, as concentrações de tensões limitam a resistência das juntas.

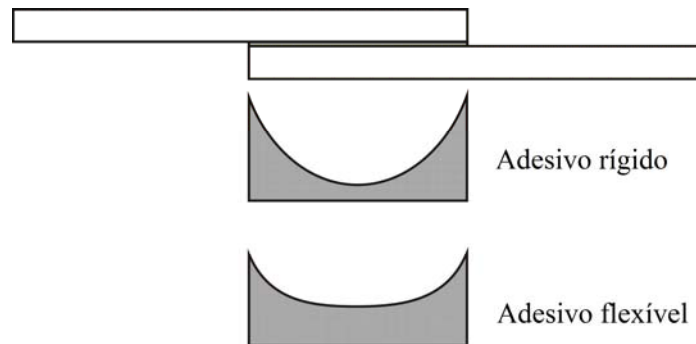


Figura 4 - Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição para juntas com adesivos rígidos e flexíveis [8]

Estas concentrações de tensões podem ser suavizadas utilizando um adesivo mais flexível (Figura 4), ou mesmo aumentando a sua espessura (Figura 5). Existem quatro modos de carregamento fundamentais no estudo das ligações adesivas: tração, corte, clivagem e arrancamento. Quando se fala em modos de carregamento também se pode falar na compressão (Figura 6), uma vez que um adesivo pode também estar sujeito a este tipo de carregamento. Porém, a sua análise não é tão significativa comparativamente aos outros modos, porque não é função principal de um adesivo suportar apenas este tipo de carregamento. De facto, se uma junta adesiva estivesse sujeita à compressão pura, a sua tensão de rotura seria de tal modo elevada, que se tornava dispensável a sua análise [2].

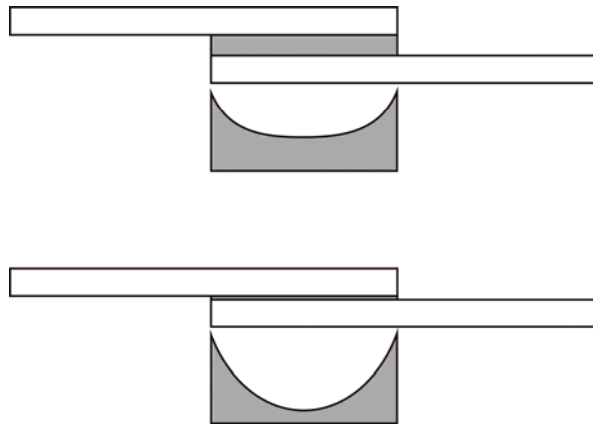


Figura 5 - Distribuição das tensões de corte ao longo do comprimento de sobreposição com diferentes espessuras de adesivo [8]

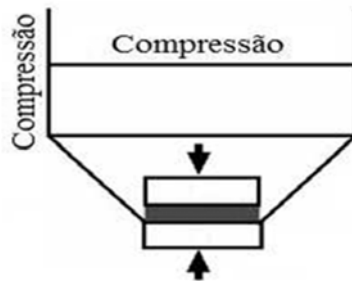


Figura 6 – Distribuição de tensões numa junta adesiva à compressão [9]

A Figura 7 ilustra os esforços que são averiguados neste capítulo.

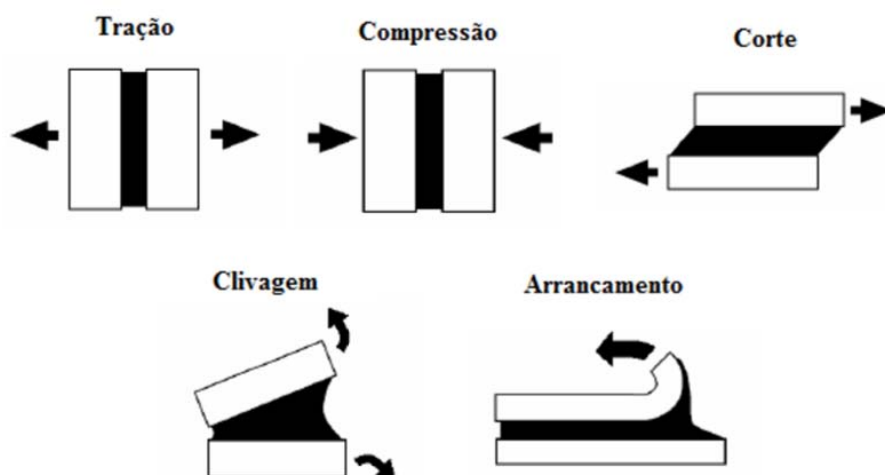


Figura 7 - Esforços a que as juntas adesivas podem estar sujeitas [10]

- Tração

A tração pura de uma junta adesiva dá-se quando as forças aplicadas na junta têm a direção perpendicular ao plano da junta no sentido da separação dos substratos (Figura 8), resultando numa distribuição de tensões uniforme. Para a realização de ensaios à tração, é necessário ter atenção especial ao paralelismo entre substratos (mais propriamente nas zonas ligadas). Apesar da simplicidade do ensaio, na prática torna-se difícil garantir este paralelismo de forma rigorosa e, conseqüentemente, uma espessura de adesivo igual em todo o seu comprimento. Quando é projetado este tipo de juntas, normalmente recorre-se a guias para garantir um carregamento puramente axial e a substratos suficientemente rígidos para não deformarem quando aplicada a carga, o que permite manter a distribuição uniforme de tensões [2].

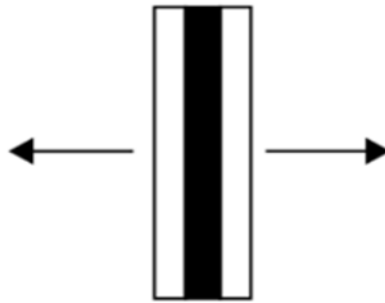


Figura 8 - Junta sob esforço de tração [11]

- Compressão

A compressão de uma junta adesiva dá-se nas mesmas condições que a tração, diferenciando apenas o sentido das forças aplicadas, neste caso, do exterior para o interior da junta (Figura 9). Apesar de haver a necessidade de garantir os mesmos parâmetros que no ensaio à tração (paralelismo e distribuição uniforme da tensão), este ensaio é mais fácil de realizar, visto serem necessárias apenas duas superfícies paralelas que apliquem o esforço de compressão sobre a superfície dos substratos, comprimindo o adesivo [2].

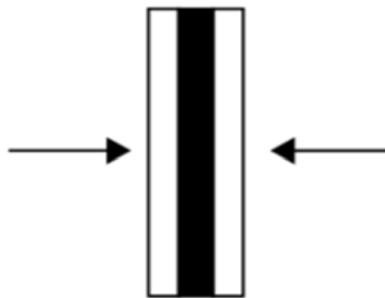


Figura 9 - Junta sob esforço de compressão

- Corte

O corte puro surge quando forças que atuam no plano do adesivo criam movimentos de deslizamento paralelo entre substratos (Figura 10) e é o tipo de carregamento preferencial para juntas adesivas. De facto, no corte, uma grande porção do adesivo é solicitada, o que ajuda à transmissão de esforços mais elevados [12]. Devido a esta característica, as juntas mais utilizadas são as projetadas para resistir ao corte, sendo entre elas a junta de sobreposição simples a mais comum devido à simplicidade no seu fabrico [2].

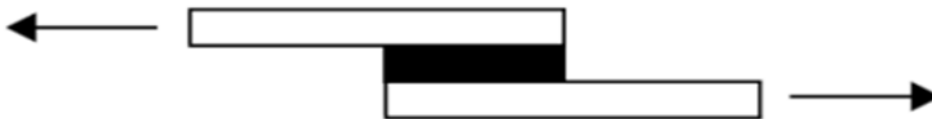


Figura 10 - Junta sob esforço de corte [11]

Porém, na realidade, é quase impossível de garantir corte puro numa junta adesiva já que se observa a deflexão transversa da junta (Figura 11) devido à assimetria do carregamento, o que provoca o aparecimento de esforços de arrancamento. Por outro lado, a distribuição das tensões de corte tende a não ser uniforme, o que se vai fazendo notar ainda mais com o aumento dos esforços aplicados na junta. Como referido anteriormente, as discontinuidades geométricas (no caso da junta de sobreposição simples, os extremos da camada de adesivo) tendem a apresentar maiores tensões. É através dos pontos onde existem tensões mais elevadas (picos de tensão) que são projetadas as juntas adesivas (Figura 12) [2].

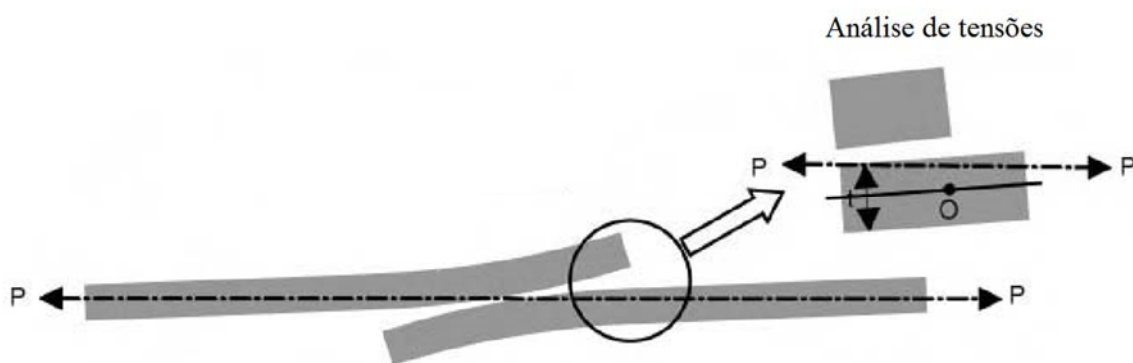


Figura 11 - Deflexão transversa da junta de sobreposição simples [13]

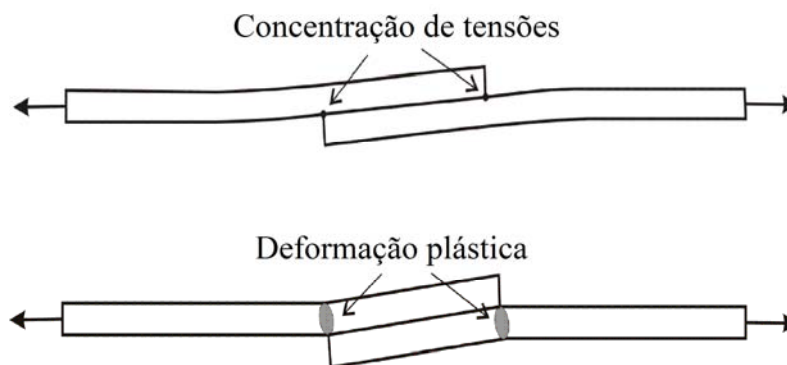


Figura 12 - Deformação plástica da junta devido às concentrações de tensões [8]

- Clivagem

As tensões de clivagem ocorrem quando, numa junta rígida, são aplicados esforços na extremidade da junta que tendem a separar os substratos em sentidos opostos (Figura 13). Quando uma junta está sujeita a este tipo de esforço, a sua resistência é bastante reduzida porque as tensões de clivagem desenvolvidas concentram-se numa área pequena [2].

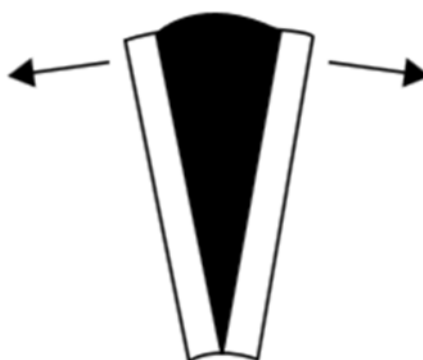


Figura 13 - Junta sob esforço de clivagem [11]

- Arrancamento

O arrancamento dá-se de forma semelhante à clivagem, a única diferença é que, neste caso, um ou ambos os substratos são flexíveis, o que vai estabelecer um maior ângulo de separação entre substratos (Figura 14).



Figura 14 – Junta sob esforço de arrancamento [11]

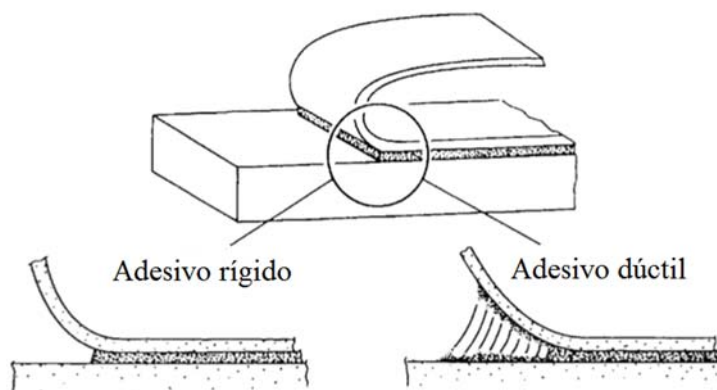


Figura 15 – Comparação entre o comportamento de um adesivo rígido e de um adesivo dúctil ao arrancamento

Como consequência, os adesivos sujeitos a este tipo de carregamento têm uma menor resistência do que os carregados sob clivagem, já que no arrancamento a área onde a tensão se encontra distribuída é consideravelmente menor. Os adesivos mais rígidos e frágeis são mais sensíveis a este esforço, comparativamente aos adesivos mais dúcteis (Figura 15), que conseguem ter uma melhor distribuição de tensões. Essa diferença de resistência ao arrancamento pode chegar até às 22 vezes [2].

Quando o limite da resistência de uma determinada junta é alcançado, independentemente dos esforços aplicados, a rotura pode ocorrer de diversas formas, das quais se destacam as representadas na Figura 16. Existem dois termos bastante importantes para ter em consideração nesta análise, rotura coesiva, que se refere à quebra de uma certa estrutura constituída por um tipo de material, e rotura adesiva, que se refere à rotura numa zona superficial onde são ligados dois tipos de materiais [9, 14].

A rotura coesiva no adesivo dá-se quando existe uma quebra da junta apenas pelo interior do adesivo, sem contacto com as superfícies do aderente. Este tipo de rotura é indicativo que a preparação das superfícies dos aderentes foi bem sucedida, isto porque a interface entre o adesivo e os aderentes se manteve intacta, e também que o adesivo selecionado foi indicado para o material de substrato (caso

tenha cumprido os objetivos em termos de resistência), porque a sua molhabilidade com a superfície foi suficiente para se dar este tipo de rotura.

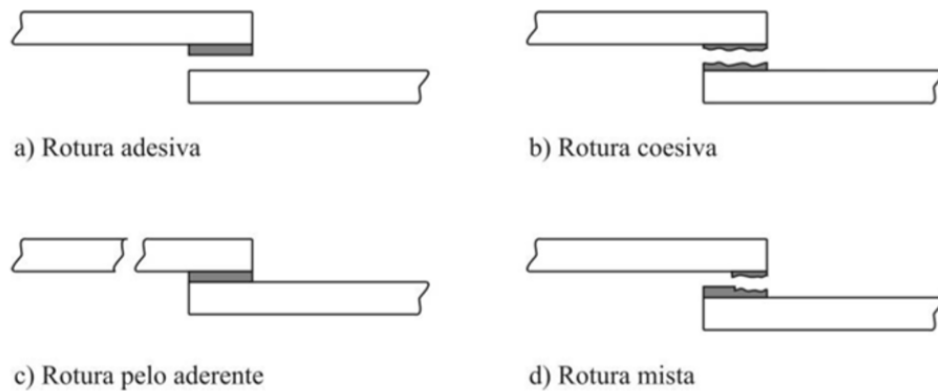


Figura 16 - Modos de rotura de juntas adesivas [15]

A rotura adesiva, ao contrário da anteriormente referida, dá-se quando o adesivo descola do substrato, na zona de interface (Figura 3). Este tipo de rotura pode acontecer devido à má preparação superficial, má seleção do adesivo ou mesmo até a um processo de cura que não o adequado.

A rotura coesiva no aderente acontece quando o material dos substratos cede antes do próprio adesivo ou da sua adesão aos substratos. As causas para o aparecimento deste tipo de rotura podem ser: a fraca resistência do material do substrato relativamente ao esforço aplicado (em comparação com o adesivo), a existência de algum defeito na constituição do aderente que ponha em causa a sua resistência, ou caso a geometria da junta seja desfavorável à uniformização de tensões em certas zonas do substrato.

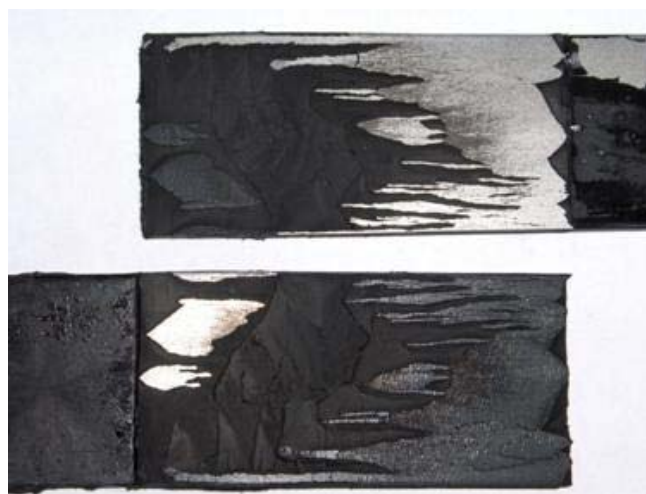


Figura 17 – Exemplo de rotura mista numa junta de sobreposição simples [4]

Existe ainda a rotura mista, que consiste na combinação entre rotura adesiva e rotura coesiva no adesivo (Figura 17). Este tipo de rotura é bastante usual e as causas que levam ao seu aparecimento podem ser a preparação superficial não uniforme, processo de cura não adequado e concentrações de tensões em determinadas zonas.

Para além dos anteriores modos de rotura, caso um ou ambos os substratos sejam laminados compósitos, pode-se dar ainda uma rotura interlaminar ou intralaminar do substrato de material compósito [16]. Esta rotura pode ocorrer devido a alguma falha no processo de fabrico do substrato, ou apenas pelo adesivo selecionado para a junta ser mais resistente do que a resistência do próprio compósito.

2.1.3 Configurações possíveis de junta

Consoante o(s) tipo(s) de esforço(s) a que as juntas poderão estar sujeitas e as possibilidades de aplicação, as juntas adesivas podem apresentar diversas configurações que permitam obter uma melhor eficiência para um dado caso em concreto. As mais comuns são as juntas de sobreposição simples e dupla, juntas com chanfro e juntas em degrau. Devido à facilidade de processamento, as juntas de sobreposição simples são as mais usadas, embora também apresentem algumas limitações em relação às restantes [2]. A Figura 18 mostra algumas geometrias de juntas adesivas mais usadas.

Junta de sobreposição simples: Como referido anteriormente, é o tipo de junta mais usual, devido ao seu fácil fabrico e, estando o adesivo a trabalhar maioritariamente ao corte, resiste assim a maiores esforços relativamente a outros tipos de junta. Porém, é necessária atenção à aplicação descentrada da carga, que provoca a flexão dos substratos (Figura 11), originando o aparecimento de tensões de arrancamento assinaláveis que provocam a diminuição da resistência da junta [13].

Junta de sobreposição dupla: Este tipo de junta foi projetada com o objetivo principal de contornar o problema de flexão existente na junta de sobreposição simples. Devido à utilização de 3 substratos, neste caso, a tensão de um dos lados da junta é dividida por 2 substratos, duplicando também a área em que o adesivo se encontra aplicado, o que provoca um aumento da resistência de junta [17]. Apesar das vantagens referidas, este tipo de junta apresenta algumas complicações relativamente à junta de sobreposição simples, como a necessidade de mais tempo no seu fabrico e o facto de ocupar mais espaço e ter uma configuração geométrica diferente, o que por vezes torna inviável a sua aplicação.

Junta de chanfro exterior: Como concluído anteriormente, as zonas de descontinuidade geométrica estão associadas a picos de tensão, como no caso da junta de sobreposição simples, em que o adesivo nas extremidades dos substratos se encontra sob este efeito. Atenuando as descontinuidades nessas

zonas dos substratos, a distribuição de tensões ao longo do adesivo torna-se mais uniforme [8]. O seu formato é globalmente semelhante ao de uma junta de sobreposição simples. No entanto, é necessária a maquinagem dos substratos nas extremidades da sobreposição.

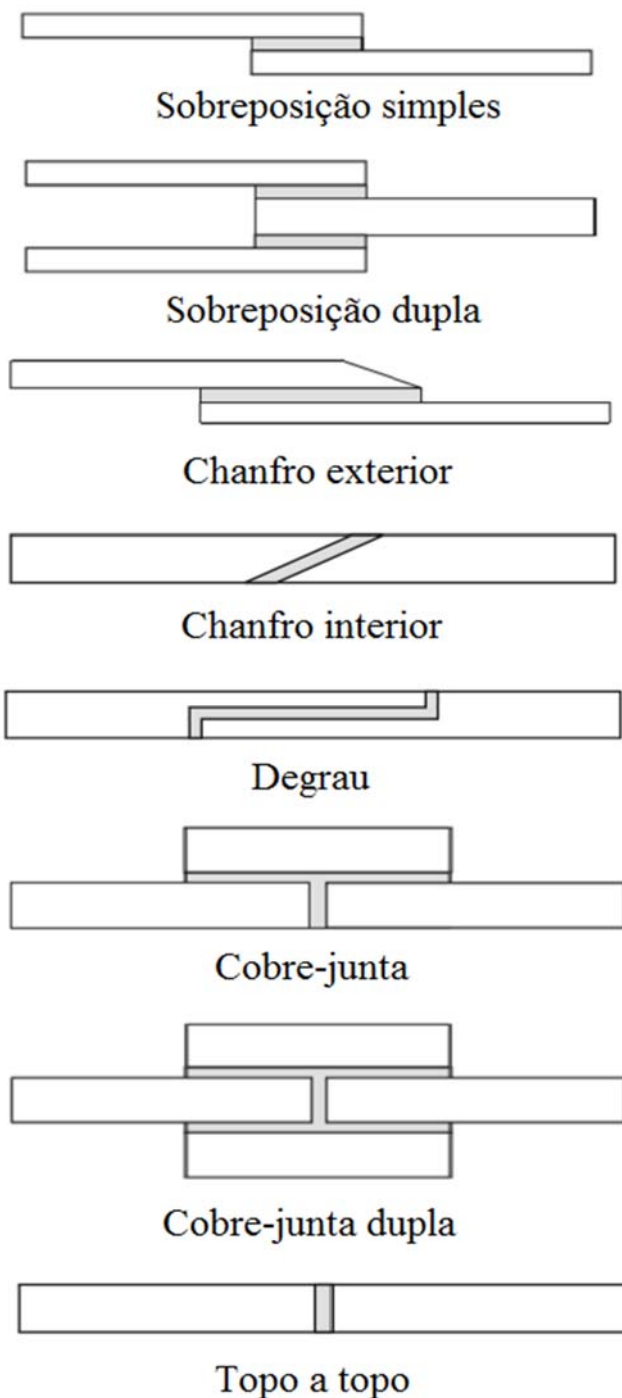


Figura 18 - Tipos de juntas adesivas mais comuns [8]

Junta de chanfro interior: É um tipo de junta que apresenta uma geometria semelhante à junta topo a topo (que será descrita seguidamente), porém, a área de união entre substratos dá-se com um certo declive. Esta alternativa geométrica é utilizada para aumentar a resistência da junta adesiva,

impedindo que esteja sob influência de um carregamento puro de tração (que é o caso da junta topo a topo) [18]. Devido à inclinação do plano de junta são criadas também tensões de corte, mais toleráveis pelo adesivo. O fabrico deste tipo de junta é mais dispendioso devido à implementação dos declives nos substratos, causando transtornos financeiros e podendo até ser impraticável devido à extensão necessária para a execução da ligação.

Junta em degrau: Semelhante à junta de chanfro interior, no sentido em que os degraus são criados para aumentar a área com adesivo e garantir que este não trabalhe apenas à tração. Há que referir que a geometria deste tipo de juntas está sempre associada a custos de maquinagem que poderão ser cruciais para uma tomada de decisão [19].

Junta com cobre-junta, simples e dupla: Normalmente, as juntas com cobre-junta simples apresentam uma maior resistência que as juntas de sobreposição simples devido à presença de um terceiro elemento que fortalece a união [20]. Não obstante, apresentam o mesmo problema relativamente à flexão. A junta com cobre-junta dupla é utilizada na tentativa de atenuar esse efeito, diminuindo o momento fletor verificado na junta simples, à semelhança da junta de sobreposição dupla.

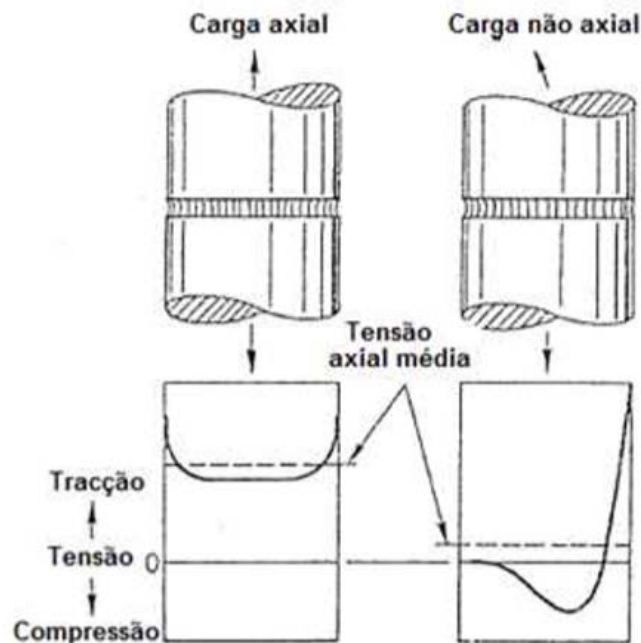


Figura 19 – Distribuição das tensões numa junta topo a topo sob carga axial e não axial [9]

Junta topo a topo: É o tipo de junta adesiva de fabricação mais simples, embora a resistência seja reduzida devido à área de ligação reduzida e concentrações de tensões de arrancamento nas periferias

[8]. Caso existam esforços de flexão aplicados neste tipo de junta, esta fica sujeita à clivagem, comprometendo ainda mais a sua resistência (Figura 19).

Junta tubular: São usadas quando existe a necessidade de se unirem tubos, independentemente do formato da sua secção, podendo assim variar bastante as condições geométricas associadas a este tipo de junta. É importante garantir a concentricidade entre os tubos, para evitar que se verifiquem esforços de clivagem na sua união (como na junta topo a topo) [21]. Para tubagens com diferentes diâmetros, o adesivo é aplicado na distância disponível entre os dois aderentes. Já para tubagens com os mesmos diâmetros, normalmente são criados chanfros nas zonas dos substratos em contacto com o adesivo para reforçar a adesão e evitar esforços de clivagem (Figura 20).

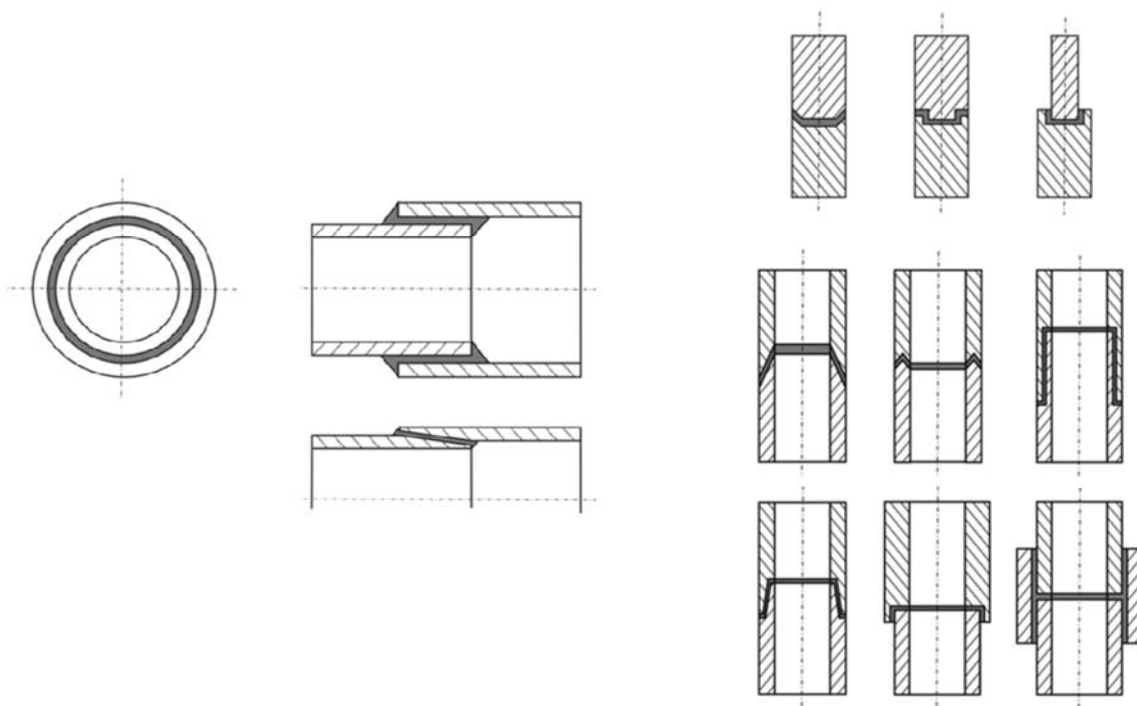


Figura 20 – Possíveis geometrias de juntas tubulares [8]

2.2 Adesivos

Existem diversos critérios de agrupamento de adesivos, podendo ser divididos em: origem, família, modo de apresentação, tipos de aderentes mais apropriados, processo de endurecimento, resistência, comportamento perante solicitações, tempo de cura e preço [10].

A **origem** dos adesivos depende dos processos que foram necessários para a sua criação, podendo ser dividida em: naturais, semi-sintéticos e sintéticos.

Outro tipo de classificação resulta da sua composição química, existindo três **famílias** que distinguem os adesivos neste aspeto: resinas termoplásticas, resinas termoendurecíveis e elastómeros.

O **modo de apresentação** é relativo ao estado em que o componente ou componentes do adesivo são comercializados: podem ser adquiridos sobre a forma de líquido, gel, películas, adesivos em barra ou em pó (podendo o mesmo adesivo ser adquirido sobre diversas formas).

Existem adesivos que conferem uma melhor ligação a determinados tipos de substratos do que a outros, podendo essa condição depender do diferencial da tensão superficial (a adesão de uma junta adesiva é tanto melhor quanto menor for a tensão superficial do adesivo relativamente à superfície [8]), das reações químicas que poderão surgir no contacto entre ambas as superfícies e da consistência estrutural que o adesivo irá proporcionar à junta. A classificação quanto ao **tipo de aderentes a ligar** é relativa ao tipo de material ou materiais para os quais um determinado adesivo é recomendado, podendo-se destacar adesivos para madeiras, metais, plásticos, cerâmicos e vidros.

Segundo o **processo de endurecimento**, os adesivos estruturais podem ser classificados como: adesivos que endurecem por reação química, devido à evaporação de um solvente ou arrefecimento a partir do estado líquido.

Outra classificação possível é segundo a **resistência**, sendo a partir desta definidas as alternativas de adesivos que possam garantir as condições de funcionamento desejadas. A resistência de um adesivo corresponde à sua capacidade de suportar determinados esforços mecânicos, como também o seu comportamento quando sujeito a condições impostas pelo meio envolvente (na presença de óleos, humidade, solventes, temperaturas variadas, etc.).

Para além da quantificação aos diversos tipos de esforços mecânicos máximos a que um adesivo poderá resistir, existe outra forma em que estes poderão ser classificados, envolvendo a sua resistência e composição química, que é o seu **comportamento perante solicitações**, podendo neste campo os adesivos ser caracterizados como rígidos ou dúcteis, em função dos modos de fratura verificados.

A classificação quanto ao **tempo de cura e preço** de um determinado adesivo deve efetuar-se de forma qualitativa, porque ambos os parâmetros são suscetíveis de variações significativas sob determinadas circunstâncias. O fornecedor ao qual o adesivo foi adquirido, os endurecedores e/ou aceleradores usados e as condições a que uma junta está sujeita durante o estágio de cura, são alguns

fatores que influenciam igualmente estes dois parâmetros. O modo de classificação do preço é feito utilizando os termos barato ou caro e, quanto ao tempo de cura, poderá variar entre alguns segundos até dias.

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Os adesivos estruturais fazem parte de uma fração dos adesivos que apresenta como característica o elevado desempenho mecânico. São considerados adesivos estruturais os adesivos com elevada resistência mecânica (tensão de rotura ao corte superior a 6,9 MPa [6]), o que lhes permite servir como substitutos de outros materiais de ligação, como parafusos ou soldadura, em aplicações permanentes. As ligações formadas por estes adesivos conseguem superar as ligações mecânicas em diversos aspetos, tais como: melhor distribuição de tensões, aumento da rigidez de estruturas, boa relação resistência/peso, melhor aparência, gama alargada de tipos de materiais a unir, entre outros. Porém, também têm algumas desvantagens como: cuidado para garantir que o adesivo trabalhe maioritariamente ao corte e evitar tensões localizadas, cuidada preparação superficial, reduzida resistência à temperatura e humidade, entre outras [2, 4]. De seguida, são apresentados os tipos de adesivos estruturais mais utilizados, apresentando e comparando algumas das suas características. Os adesivos estruturais podem ser subdivididos em grupos, de acordo com certas particularidades que lhes são características, sendo os grupos mais conhecidos [2] os que se apresentam de seguida.

2.2.1.1 Epóxidos

São a família dos termoendurecíveis mais versátil em termos de aplicabilidade devido à sua boa adesão a vários tipos de materiais, o que não se verifica tão satisfatoriamente em polímeros e elastómeros devido à sua baixa molhabilidade. Têm excelente resistência à tração, ao corte, à fluência e quando sujeitos ao contacto com óleo, humidade e vários solventes. Contudo, a sua resistência não é tão boa quando sujeitos ao arrancamento. A sua capacidade de penetração é elevada, alargando o seu uso ao preenchimento de cavidades. Os adesivos epóxidos podem curar à temperatura ambiente necessitando entre 18 a 72 horas, podendo os tempos de cura ser encurtados pelo aumento da temperatura. Os epóxidos podem ser fornecidos comercialmente em líquido, pasta, película ou sob a forma sólida, e ser constituídos por um ou dois componentes. As duas partes correspondem à resina epóxida e ao endurecedor, sendo que também podem ser vendidas ambas incorporadas, tornando-se apenas uma parte. Neste caso a cura realiza-se através da aplicação de calor, dependendo a temperatura necessária do tipo de epóxido e endurecedor. Os adesivos que curam a temperaturas mais altas terão uma temperatura de serviço superior, assim como maior resistência ao corte e ao meio ambiente. Contudo, apresentam menor tenacidade e resistência ao arrancamento.

Estes adesivos têm uma grande aplicação na indústria automóvel e aeronáutica. Muitas vezes são adicionados aditivos para a melhoria de certas características (como a tixotropia, resistência coesiva, ductilidade, resistência ao impacto, entre outras) ou mesmo cargas para diminuir o custo. Por outro lado, o próprio tipo de endurecedor condiciona algumas características do adesivo, tais como a resistência coesiva, dureza e durabilidade.

2.2.1.1.1 Epóxidos híbridos

Muitas vezes, para aprimorar certas propriedades, são misturadas às resinas epóxicas outros tipos de polímeros, formando epóxidos híbridos. Dentro desta gama de epóxidos modificados, os mais comuns são os adesivos epóxido-fenólico, epóxido-nylon, epóxido-polisulfeto e epóxidos modificados com resinas elastoméricas.

Os adesivos **epóxido-fenólicos** são utilizados para melhorar a resistência à alta temperatura dos epóxidos, e podem ser empregues em serviço permanente até aos 175 °C ou intermitente até aos 260 °C. Para além da boa resistência térmica, também apresentam uma boa resistência ao meio ambiente e um bom escoamento. Todavia, a sua resistência ao impacto e arrancamento são baixas devido à elevada rigidez, e também não têm boa resistência a choques térmicos. São muito utilizados na indústria aeronáutica e servem para ligar diversos tipos de materiais como metais, vidros, cerâmicos e compósitos.

Os adesivos **epóxido-nylons** foram os primeiros adesivos estruturais criados para suportarem elevados esforços de corte e de arrancamento. Porém, têm uma baixa resistência à temperatura (temperatura de serviço até 80 °C) e não são recomendados para utilização em ambientes adversos, devido principalmente à presença do nylon. São usados para colar folhas de alumínio e estruturas em *sandwich* na indústria aeronáutica.

Os adesivos **epóxido-polisulfetos** têm uma excelente flexibilidade, resistência química, ao arrancamento, a baixas temperaturas e aderem bem a diferentes tipos de substrato. Porém, apresentam baixa resistência ao corte e a altas temperaturas, tendo uma temperatura de serviço máxima semelhante aos epóxido-nylon. São geralmente fornecidos em forma de pasta de duas partes, e curam à temperatura ambiente. A sua boa resistência a esforços de flexão permite a utilização em aplicações que requerem elevada deformação. São usados para colar betão, vedantes, entre outras aplicações.

2.2.1.2 Fenólicos

Estes adesivos resultam da condensação de fenol e formaldeído, apresentando boa resistência ao calor, boa estabilidade dimensional, boa durabilidade e são resistentes à água a elevadas temperaturas. Mantêm a sua capacidade de transmissão de esforços a baixas temperaturas e são relativamente baratos. No entanto, os adesivos fenólicos apresentam uma ligação frágil com tendência a estilhaçar, podendo-se melhorar certas características através da adição de elastómeros. Geralmente, o adesivo é aplicado como uma solução em água, álcool ou acetona, e a sua cura é feita através da aplicação de pressão a 140 °C durante vários minutos. Estes adesivos também se encontram disponíveis na forma de pó, caso em que devem ser dissolvidos em água. São industrialmente aplicados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição.

2.2.1.2.1 Fenólicos híbridos

Estes adesivos são formados através da adição de outros géneros poliméricos, como borrachas sintéticas ou termoplásticos, às resinas fenólicas, que lhes conferem maior flexibilidade. Os principais tipos são:

Nitrilo-fenólicos

Adesivos criados através da associação de resinas fenólicas com 50% de borracha de nitrilo. Podem apresentar resistências ao corte até 35 MPa e excelentes propriedades de arrancamento e fadiga, quando aplicados em metais. A adição de borracha de nitrilo melhora a resistência ao impacto e a resistência a temperaturas mais elevadas (sendo necessária uma maior temperatura para obter a cura), comparativamente aos fenólicos puros. São geralmente disponibilizados sob a forma de soluções de solvente ou películas, e utilizados na indústria aeronáutica, eletrónica, do calçado e mobiliário.

Vinilo-fenólicos

Estes adesivos são formados pela combinação de resina fenólica com formal de polivinilo ou com resinas butiral de polivinilo. Apresentam excelentes propriedades de resistência ao corte e arrancamento como os nitrilo-fenólicos, melhor resistência ao impacto e a agentes químicos. No entanto, a sua temperatura de serviço é inferior, a rondar os 95 °C, devido à perda de rigidez a partir de tal temperatura. São fornecidos como soluções de solvente e como películas. São adesivos usualmente utilizados em metais, borrachas e plásticos.

Neopreno-fenólicos

Entre os adesivos fenólicos modificados, este é o que apresenta menor resistência ao corte e uma temperatura de serviço também baixa, comparável ao vinilo-fenólico. Porém, apresenta alta

resistência à fluência, a condições ambientais adversas e tem um excelente comportamento à fadiga e ao impacto. É normalmente disponibilizado em soluções de solvente e em película, e a sua gama de aplicações é elevada.

2.2.1.3 Formaldeído

Existem principalmente dois tipos de adesivos de formaldeído: **formaldeído de resorcinol** e **formaldeído de fenol-resorcinol**. As resinas resorcinol podem ser aplicadas em juntas de diversos materiais, embora não tenham boa aderência nos metais, têm uma gama de temperatura de serviço bastante ampla (-185 a 175 °C), sendo também resistentes a água a ferver, óleo, solventes e fungos, e curam à temperatura ambiente. Contudo, as resinas resorcinol são mais caras do que as resinas fenólicas, sendo usualmente misturadas a estas para diminuir custos, formando assim fenol-resorcinol. Comercialmente, os dois tipos de formaldeído encontram-se disponíveis em dois componentes, sendo que uma parte é formaldeído (em pó), que é o agente responsável pela cura, e outra parte resorcinol (em forma líquida) com ou sem adição de resinas fenólicas. A cura destes adesivos é alcançada entre 8 a 12 horas à temperatura ambiente. Porém, se esta for feita a uma temperatura mais elevada, obtém-se uma maior durabilidade.

Ainda dentro dos formaldeídos existe a **melamina-formaldeído**, termoendurecível incolor usado principalmente para colar madeiras. Este adesivo resulta da condensação de melamina e formaldeído, sendo normalmente fornecido sob a forma de pó, ao qual é adicionado um endurecedor na altura da aplicação. Para atingir a cura, este adesivo necessita de uma temperatura de 90 °C. Devido ao elevado preço destas resinas, é costume misturar-se com ureia-formaldeído, que para além de baixar o custo, também baixa a temperatura de cura. Todavia, a resistência mecânica, à humidade e a temperatura de serviço máxima (sendo esta de 60 °C para as resinas ureia-formaldeído), vão diminuir.

2.2.1.4 Poliaromáticos de alta temperatura

As resinas poliaromáticas são conhecidas pelo seu ótimo comportamento a altas temperaturas, fazendo parte desta família as poliimididas, bismaleimididas, resinas de polibenzimidazol, entre outras. Duas grandes desvantagens destas resinas são o seu elevado custo e a dificuldade do seu processamento, que causa com frequência defeitos intrínsecos difíceis de evitar, como por exemplo vazios e bolhas resultantes da condensação durante o período de cura. Normalmente são fornecidas em películas integradas ou soluções de solvente, são necessárias altas pressões e temperaturas entre os 290 e os 340 °C para a sua cura (recorrendo-se a ciclos térmicos e de pressão para tal) e são usadas com frequência na indústria aeronáutica.

2.2.1.5 Poliuretanos

Estes adesivos podem apresentar-se em estado sólido ou dissolvidos num solvente de uma ou duas partes, e a sua cura pode-se dar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas. Os poliuretanos são bastante flexíveis, apresentam boa resistência, tanto ao corte como ao arrancamento, aderem bem a diversos tipos de substratos devido à sua boa molhabilidade, formando ligações com boa tenacidade, têm boa resistência a temperaturas baixas e a meios químicos. No entanto, estes adesivos podem degradar-se facilmente quando expostos a elevados graus de humidade. A sua temperatura de serviço máxima não é muito elevada (aproximadamente 150 °C). São utilizados para ligar películas, folhas metálicas, elastómeros e outros tipos de materiais, devido às suas boas características de flexibilidade e molhabilidade.

2.2.1.6 Anaeróbicos

São designados adesivos anaeróbicos devido ao seu processo de cura se dar através da privação de oxigénio da resina, sendo todos eles baseados no monómero acrilato. Podem ser aplicados numa enorme variedade de materiais e tipos de superfícies diferentes, havendo apenas a necessidade de ter algumas precauções quando aplicados em superfícies inativas. Garantem uma ligação tenaz quando aplicados na maioria dos substratos metálicos. São fornecidos como componente único, de fácil aplicação, curam rapidamente à temperatura ambiente (entre alguns minutos até horas, dependendo da natureza das superfícies a colar, bem como o tipo de preparação superficial, podendo o uso de primários e/ou calor acelerar o processo) e o seu preço é relativamente baixo, quando aplicados em grandes áreas. São utilizados normalmente para maquinaria, aplicações estruturais como bloqueante de ligações aparafusadas e até como vedante para preenchimento de porosidades devido à sua grande capacidade de penetração.

2.2.1.7 Cianoacrilatos

Estes adesivos são fornecidos em líquido ou gel de apenas um componente que curam em poucos segundos à temperatura ambiente, apresentam uma excelente resistência ao corte, mas uma baixa resistência ao calor e, quando comparados com os anaeróbicos com tempos de cura semelhantes, têm maior rigidez mas são menos resistentes à humidade. São geralmente caros e a sua gama de temperatura de serviço não é muito alargada, variando entre -30 e 80 °C. Existem dois tipos principais de base cianoacrilato, os de etilo e os de metilo, sendo que os de metilo são mais resistentes ao impacto quando aplicados em materiais rígidos. Já os de etilo são mais utilizados em borrachas e superfícies plásticas.

2.2.1.8 Acrílicos modificados

Estes adesivos são termoendurecíveis fornecidos em duas partes, podendo ser aplicados em diversas superfícies. O seu tempo de cura é curto, a maioria apresenta uma boa resistência mecânica e ao meio ambiente e a sua temperatura de serviço vai normalmente dos -40 até aos 120 °C. Devido à facilidade de adaptação a vários tipos de superfícies e alta resistência, a sua variedade de aplicações é bastante alargada.

2.2.1.9 Poliésteres

Os poliésteres existentes podem apresentar uma grande variedade de propriedades, o que possibilita um uso alargado destas resinas em várias aplicações, para além do facto de serem relativamente baratos. Podem dividir-se em dois grandes grupos: os não saturados (termoendurecíveis), fornecidos em dois componentes, de cura rápida à temperatura ambiente após aplicação de um catalisador e, dependendo do tipo de poliéster, podem ser muito rígidos ou flexíveis, variando também bastante a sua resistência ao corte; e os saturados (termoplásticos), que têm uma elevada resistência ao arrancamento e são transparentes. Os poliésteres não saturados são utilizados em vários tipos de reparações, tanto de componentes automóveis, como para cimento para pisos. Os poliésteres saturados, devido à sua transparência, podem ser aplicados em equipamento ótico, e também usados para o processo de ligação de componentes em painéis elétricos.

2.3 Ensaio para determinação da tenacidade à fratura

A tenacidade à fratura, ou taxa crítica de libertação de energia de um material, caracteriza a sua resistência ao crescimento de uma fenda. A partir do momento em que a solitação aplicada leva a taxa de libertação de energia a atingir um valor crítico (dado pela taxa crítica de libertação de energia, G_C), dá-se a propagação da fenda.

A propagação da fenda pode ocorrer por diversos modos de carregamento, sendo os mais estudados o modo I (sob a ação de uma força trativa) e modo II (por corte, sob a ação de um par de forças perpendiculares à frente da fenda). Na realidade, é normal a presença simultânea de tensões normais e de corte numa junta adesiva, originando uma solitação de modo misto I+II. Para além destes dois modos, existe o modo III (Figura 21), que consiste num modo de corte sob a ação de um par de forças paralelas à frente da fenda. Através destes três modos de carregamento poderão ser criados modos mistos, de todas as alternativas possíveis, dependendo da direção da(s) força(s) aplicada(s) relativamente à frente da fenda. Para cada modo de carregamento está associada uma taxa crítica de libertação de energia, G_{IC} , G_{IIC} ou G_{IIIC} [2].

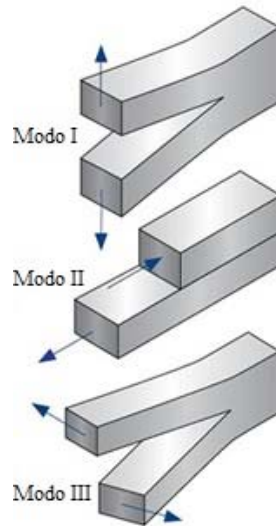


Figura 21 - Diferentes modos de propagação de uma fenda [22]

2.3.1 Modo I

Para a medição de G_{IC} é recorrente utilizar-se o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) que origina uma fratura em modo I. Para tal, é necessário definir a extensão do provete que não terá adesivo, compreendida ao longo de a_0 . A propagação da fenda tem lugar desde a_0 até à outra extremidade do adesivo, sendo o seu crescimento induzido através de forças com direção perpendicular ao provete, exercidas na extremidade do provete (Figura 22). A velocidade da solitação está normalmente compreendida entre 0,5 e 3 mm/min. Os valores a registar são os da carga aplicada (P), deslocamento (δ) e comprimento da fenda (a) [2]. G_{IC} é obtido utilizando a equação de Irwin-Kies da seguinte forma

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

em que B representa a largura do provete e $C=\delta/P$ a flexibilidade. Através da expressão (1) é obtida a seguinte, relativa a G_{IC} para o ensaio DCB

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{h^3B^2} \left(\frac{2a^2}{E} + \frac{h^2}{5G_{11}} \right), \quad (2)$$

em que h é a altura dos substratos, G_{11} o módulo de corte dos substratos no plano xy ; e E o módulo de elasticidade longitudinal dos substratos.

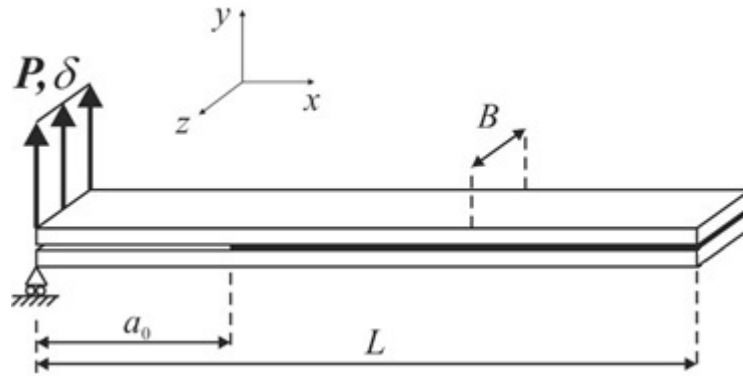


Figura 22 - Representação esquemática do ensaio DCB [23]

Também pode ser usado o ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB, Figura 23) para a determinação de G_{IC} , que apresenta como vantagem, em relação ao método anterior, o facto de não ser necessária a medição dos valores de a para o método de tratamento de dados convencional. Este é um aspeto relevante, pois estes valores estão sempre sujeitos a erros de leitura com alguma influência no resultado final, sendo normalmente obtidos através de registos fotográficos da face lateral do provete, que permitem a determinação de a . A expressão de G_{IC} é obtida pela norma ASTM D3433-99

$$G_{IC} = \frac{4P^2 m}{EB^2}, \quad (3)$$

em que m é uma constante que relaciona h com a da seguinte forma

$$m = \frac{1}{h} + \frac{3a^2}{h^3}. \quad (4)$$

É de extrema importância a utilização da relação geométrica patente na expressão (4), de forma a possibilitar a aferição de resultados com a exatidão pretendida.

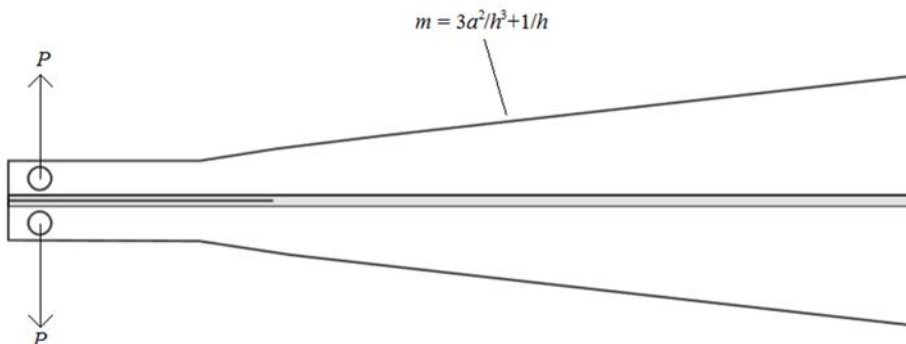


Figura 23 - Representação esquemática do ensaio TDCB [2]

2.3.2 Modo II

Existe uma norma para caracterização à fratura de adesivos em modo II, apesar de não ser consensual (Japanese Industrial Standard K 7086 de Março de 1993). Os ensaios mais utilizados baseiam-se em ensaios realizados em materiais compósitos, sendo alguns deles o *End-Notched Flexure* (ENF), *End-Loaded Split* (ELS) e *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF). O ensaio mais utilizado é o ENF (Figura 24), pela sua simplicidade de fabrico e de ensaio relativamente aos outros. Os outros ensaios apresentam algumas limitações: o ELS demonstra algumas dificuldades na obtenção de G_{IIC} e é bastante sensível quanto às condições de aperto [24], assim como o 4ENF, que requer um dispositivo de ensaio mais sofisticado e apresenta alguns problemas relacionados com a influência do atrito na região da pré-fenda [25].

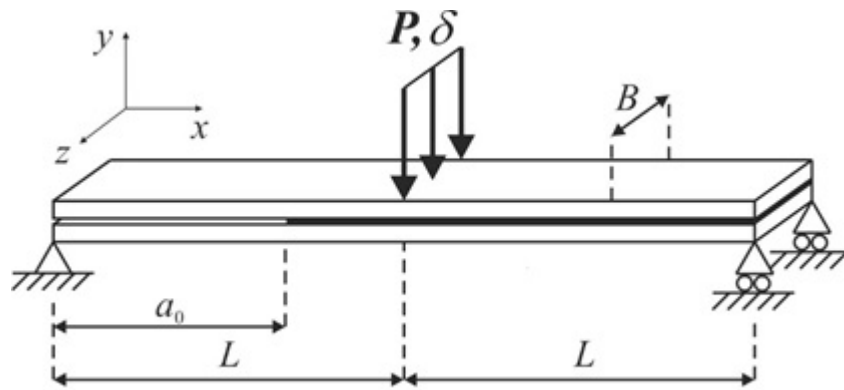


Figura 24 – Representação esquemática do ensaio ENF [26]

A taxa crítica de libertação de energia em modo II (G_{IIC}) para o ensaio ENF, proveniente da equação de Irwin-Kies (1), é dada pela seguinte relação matemática

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 a^2}{16EB^2 h^3} \quad (5)$$

Este método de redução apresenta a desvantagem da necessidade de medição de a durante a sua propagação. Devido à presença de uma solitação de corte, a fenda cresce em deslizamento e sem abertura, o que faz com que a perceção de a se torne mais complicada. Para além deste facto, existe outro fenómeno que dificulta ainda mais esta ação, nomeadamente a existência de uma zona de processo de fratura (ZPF, Figura 25), que consiste na presença de uma área (não desprezável e mais acentuada em adesivos dúcteis) de material danificado por processos inelásticos, à frente da fenda, que dificulta a exatidão na medição de a .

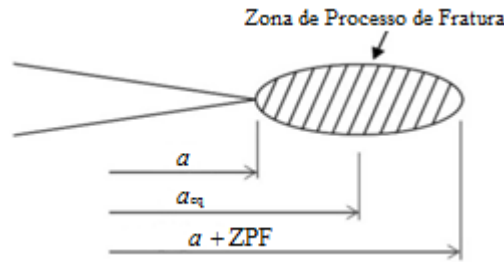


Figura 25 – Zona de processo de fratura [9]

Para contornar este problema, foi desenvolvido um método de análise (CBBM) que é baseado em a_e . Através do método CBBM, é obtida a seguinte equação relativa à taxa crítica de liberação de energia em modo II (G_{IIC}) para o ensaio ENF

$$G_{IIC} = \frac{9P^2}{16E_f B^2 h^3} \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{2}{3}}, \quad (6)$$

em que E_f é o módulo corrigido à flexão; C_{corr} a flexibilidade corrigida; C_{0corr} a flexibilidade corrigida inicial; e L metade do comprimento do provete entre apoios.

2.3.3 Modo misto I + II

Na generalidade das juntas adesivas, observa-se a existência em simultâneo de mais do que um modo de carregamento (normalmente I e II). Desta forma, existe a necessidade de se averiguar o comportamento da junta neste modo misto. Existem diversos ensaios para o estudo da propagação de dano em modo misto, sendo um dos mais usados o ensaio *Mixed-Mode Flexure* (MMF - Figura 26), que também pode ser chamado *Single-Leg Bending* (SLB), e que origina modo I e modo II durante a propagação da fenda [27]. Este ensaio é muito semelhante ao ENF, embora o substrato inferior apenas esteja apoiado numa das extremidades, encontrando-se o outro apoio sob o substrato superior, mais saliente nessa extremidade do que o inferior.

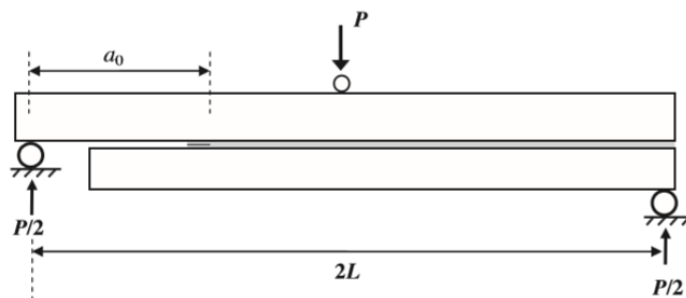


Figura 26 – Representação esquemática do ensaio MMF ou SLB [2]

Um dos ensaios alternativos ao anterior é o ensaio *Asymmetric DCB* (ADCB - Figura 27) [28]. Este ensaio é semelhante ao DCB, embora com espessuras diferentes dos substratos, que provoca o aparecimento também do modo de corte. Outra alternativa é a utilização de substratos com materiais de rigidez distinta.

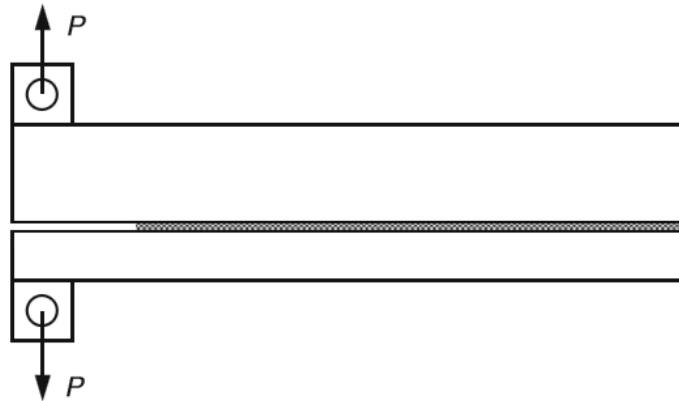


Figura 27 – Representação esquemática do ensaio ADCB [2]

Dependendo das geometrias dos provetes e da orientação da sollicitação, a proporção dos modos I e II obtida nestes ensaios pode ser bastante variável. O ensaio *Compact Mixed-Mode* (CMM) foi criado com o objetivo de estudar essa variação de combinações.

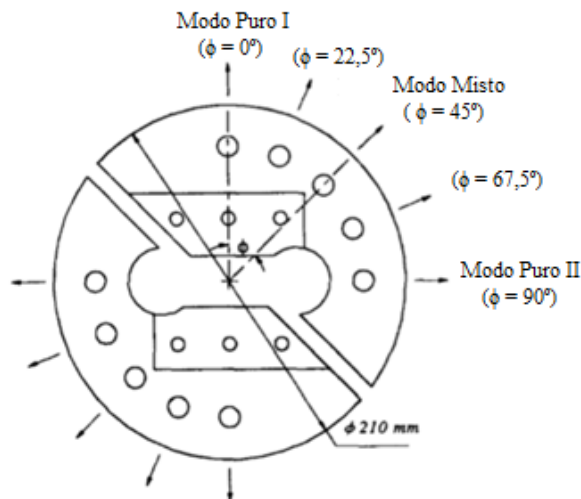


Figura 28 - Representação esquemática do ensaio CMM [29]

Como se pode observar na Figura 28, o provete CMM poderá ser testado em modo I puro, modo II puro e modo misto I+II, sendo a proporção entre modos (ϕ) dependente da orientação da sollicitação a exercer sobre o provete. A proporção de modos pode ser obtida pela seguinte expressão [30]

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\frac{G_{II}}{G_I}} . \quad (7)$$

Existe um ensaio que se encontra normalizado para a caracterização à fratura interlaminar de compósitos em modo misto, o ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB, Figura 29). Este ensaio parte da combinação de outros dois, o DCB para o modo I de abertura puro e o ENF para o modo II de corte puro, sendo o provete geometricamente igual aos ensaios referidos. A diferença deste ensaio para os anteriormente mencionados reside no modo como a sollicitação é aplicada.

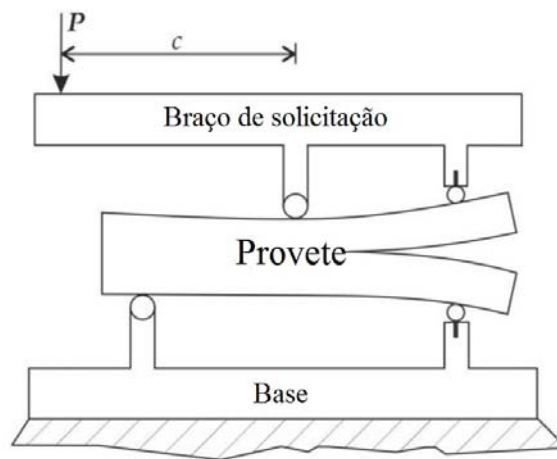


Figura 29 – Representação esquemática do ensaio MMB [30]

Ao longo deste ensaio, para a maioria das configurações geométricas, a relação entre modos (abertura e corte) mantém-se praticamente constante durante a propagação da fenda (exceto algumas variações iniciais). A distância c (posição do ponto de carregamento) vai definir o rácio entre os dois modos, estando também as sollicitações de cada modo relacionadas com c da seguinte forma

$$P_I = \frac{3c - L}{4L} P \quad (8)$$

e

$$P_{II} = \frac{c + L}{L} P , \quad (9)$$

correspondendo P_I à sollicitação gerada pelo ensaio em modo I de abertura, P_{II} à sollicitação gerada em modo II de corte e L o comprimento entre os dois pontos de contacto do braço de sollicitação com o provete. As taxas de libertação de energia dos modos I (G_I) e II (G_{II}) para o ensaio MMB, baseadas na teoria das vigas, são então dadas pelas seguintes relações matemáticas

$$G_I = \frac{3a^2 P^2 (3c - L)^2}{4EB^2 h^3 L^2} \quad (10)$$

e

$$G_{II} = \frac{9a^2 P^2 (c + L)^2}{16EB^2 h^3 L^2}. \quad (11)$$

Chaves [31] desenvolveu um dispositivo de teste à fratura de juntas adesivas para modo I, modo II e modo misto I+II que permite obter o envelope de fratura completo sem necessidade de medição do comprimento de fenda.

2.4 Ensaio Single-Leg Bending (SLB)

Neste capítulo são abordados os princípios do ensaio SLB e os respectivos métodos de obtenção de G_I e G_{II} , incluindo as técnicas que necessitam da medição de a , as que usam a_e e o método baseado no integral J .

2.4.1 Caracterização do ensaio

O ensaio SLB, aplicado a juntas adesivas, baseia-se na aplicação de uma força a meio vão de um provete formado por dois substratos paralelos colados com um determinado adesivo, onde o substrato superior é mais comprido que o inferior. Desta forma, na extremidade onde se encontra localizada a pré-fenda, o apoio é apenas realizado pelo substrato superior.

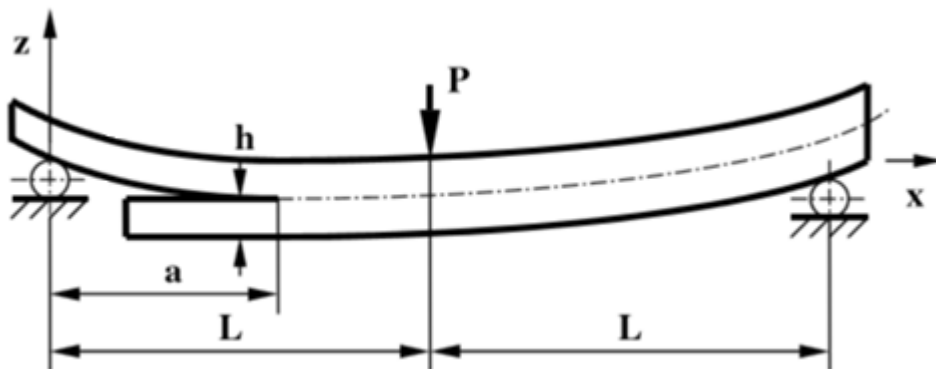


Figura 30 – Representação esquemática do ensaio SLB [27]

A pré-fenda é criada ainda na fase de preparação dos provetes e é essencial para uma propagação de fenda mais controlada. O comprimento desde a pré-fenda (inclusive) até ao apoio mais próximo é denominado por a_0 . Quando a fenda começa a propagar, a distância do apoio à posição atual da fenda

é denominada por a . O ensaio é dado por terminado quando a fenda atingir a proximidade do punção de solicitação. A partir da zona em que o punção atua, existem também esforços de compressão (provocados pelo punção de solicitação que esmaga o adesivo entre os substratos), que impossibilitam a medição correta dos valores de G_I e G_{II} . O esquema deste ensaio pode ser observado na Figura 30.

Relativamente à geometria dos provetes associados ao ensaio SLB, esta pode apresentar algumas variações. Pode variar a espessura dos substratos (podendo até mesmo um dos substratos ter espessura superior) e do adesivo, assim como o comprimento e largura dos substratos. Mesmo existindo a possibilidade na decisão dimensional de certos parâmetros geométricos como os mencionados anteriormente, existem algumas regras que devem ser respeitadas, como a relação entre a_0/L , que deverá ser de aproximadamente 70/100 e não inferior, para garantir uma área de estudo suficiente que permita obter resultados concretos e para evitar a propagação instável da fenda [23]. Esta regra vai também restringir o comprimento relativo entre substratos.

Através deste ensaio, a extremidade da fenda é solicitada numa combinação de modos I e II, que permite a obtenção de G_I e G_{II} para um dado rácio de modos. É um ensaio expedito que não requer componentes fora do vulgar para a sua realização, nem exige medidas sofisticadas no processamento dos provetes. Contudo, os métodos de determinação da taxa de libertação de energia que requerem a medição de a necessitam de uma câmara com resolução suficientemente boa para possibilitar a leitura do comprimento da fenda. Estes métodos também estão associados às complicações referidas anteriormente, quanto à perceção da localização e comprimento real da fenda.

2.4.2 Métodos para determinação da tenacidade à fratura

Neste capítulo são expostos os métodos ou modelos usados para a determinação da taxa de libertação de energia para o ensaio SLB em ambos os modos (I e II). São analisados cinco modelos que requerem a medição de a , um modelo que utiliza a_e (CBBM) e o método baseado no integral J .

2.4.2.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

2.4.2.1.1 Szekrényes e Uj (modelo 1)

Szekrényes e Uj [27] usaram a teoria linear das vigas que incorpora o corte transversal e os efeitos de uma base elástica para deduzir as taxas de libertação de energia dos modos I e II para o ensaio SLB. Inicialmente, a taxa de libertação de energia pode ser expressa através da expressão de Irwin-Kies (1), sendo C obtido com base no trabalho de Ozdil et al. [32] através da derivação de uma equação usada para um provete do tipo ENF, usando a teoria das vigas de Timoshenko

$$C = \left[\frac{2L^3 d_{11,2} + a^3 (d_{11,1} - d_{11,2})}{12} + \frac{2La_{55,2} + a(a_{55,1} - a_{55,2})}{4k} \right], \quad (12)$$

onde k é o fator de correção de corte, assumindo o valor 5/6. Mais informações sobre esta dedução podem ser encontradas em [27].

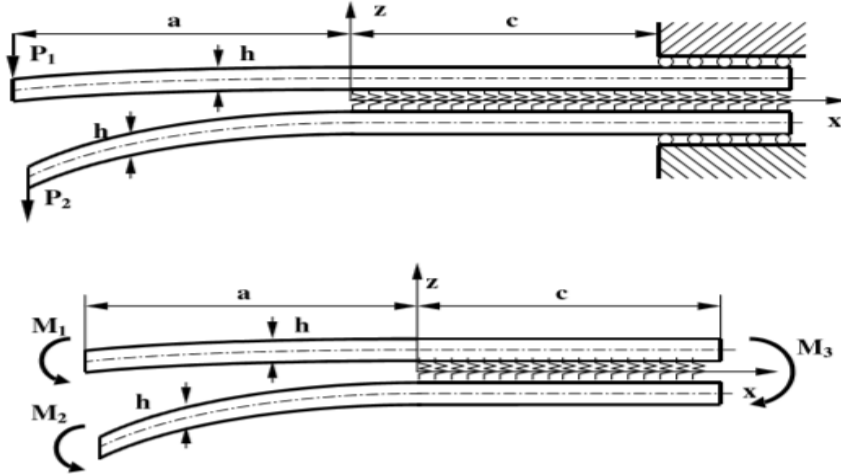


Figura 31 – Esquema de corpo livre de um provete em modo de carregamento misto [27]

Através das relações anteriores, são obtidas as taxas de libertação de energia para os diferentes modos

$$G_{\text{I}} = \frac{21P_1^2 a^2}{4B^2 h^3 E} - \frac{3P_1 P_2 a^2}{4B^2 h^3 E} + \frac{P_1(P_1 - P_2)}{4B^2 h k G_{11}} + \frac{P_1(P_1 - P_2)a^2}{4Bh^3 E} f w_2 \quad (13)$$

e

$$G_{\text{II}} = \frac{21P_2^2 a^2}{4B^2 h^3 E} - \frac{3P_1 P_2 a^2}{4B^2 h^3 E} + \frac{P_2(P_2 - P_1)}{4B^2 h k G_{11}} + \frac{P_2(P_2 - P_1)a^2}{4Bh^3 E} f w_2, \quad (14)$$

em que P_1 e P_2 (Figura 31) são as resultantes das forças aplicadas nos substratos de cima e de baixo, respetivamente, forças essas deduzidas através da teoria das vigas, e em que $f w_2$ é obtido através da seguinte expressão

$$f w_2 = 5,42 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\left(\frac{1}{4} \right)} + 2,45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\left(\frac{1}{2} \right)}, \quad (15)$$

onde E_{33} representa o módulo de elasticidade na direção da largura do provete. Somando as equações (13) e (14) obtém-se

$$G_{I/III} = \frac{21(M_1^2 + M_2^2) - 6M_1M_2 + (M_1 - M_2)^2(f_T + fw_2)}{4B^2h^3E}, \quad (16)$$

onde M_1 e M_2 são os momentos de torção equivalentes que atuam no substrato superior e inferior, respectivamente, da junta adesiva durante o ensaio de modo misto (Figura 31) e

$$f_T = \frac{1}{k} \frac{E}{G_{II}} \left(\frac{h}{a} \right)^2. \quad (17)$$

De acordo com Ducept et al. [33] o momento de torção equivalente pode ser decomposto como

$$M_1 = M_I + M_{II} \quad (18)$$

e

$$M_2 = \alpha M_I + \varphi M_{II}. \quad (19)$$

Substituindo na equação (16), resulta

$$G_{I/III} = \frac{9M_I M_{II} (1 + \alpha)}{B^2 h^3 E}, \quad (20)$$

podendo ser encontradas mais informações sobre estas deduções na referência [27]. Para anular este termo, usa-se $\alpha = -1$ e então obtêm-se os componentes I e II

$$G_I = \frac{M_I^2 (12 + f_T + fw_2)}{B^2 h^3 E} \quad (21)$$

e

$$G_{II} = \frac{9M_{II}^2}{B^2 h^3 E}. \quad (22)$$

Rearranjando as equações (18) e (19) obtêm-se

$$M_I = \frac{M_1 - M_2}{2} \quad (23)$$

e

$$M_{II} = \frac{M_1 + M_2}{2}. \quad (24)$$

Para a aplicação destas fórmulas aos provetes SLB, os momentos de torção utilizados consideram-se $M_1=0$ e $M_2=Pa/2$. Utilizando as equações (21) e (22) obtêm-se as seguintes taxas de libertação de energia

$$G_1^{\text{SLB}} = \frac{12P^2a^2}{16EB^2h^3} + \frac{P^2}{16kG_{11}B^2h} + \frac{P^2a^2}{16EB^2h^3} \left[5,42 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\left(\frac{1}{4}\right)} + 2,45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\left(\frac{1}{2}\right)} \right] \quad (25)$$

e

$$G_{\text{II}}^{\text{SLB}} = \frac{9P^2a^2}{16EB^2h^3}. \quad (26)$$

2.4.2.1.2 Ye Zhu (modelo 2)

Outro método de aquisição da taxa de libertação de energia dos modos I e II para o ensaio SLB foi analisado por Ye Zhu [34], utilizando o trabalho realizado por Szekrényes e Uj [35], onde foram aplicadas as teorias das vigas de Euler-Bernoulli e Timoshenko em conjunção com a análise de Winkler-Pasternak, a análise do efeito Saint-Venant no início da fenda e a análise da deformação da fenda por corte, onde foi deduzida a seguinte equação de C

$$C^{\text{SLB}} = \frac{7a^3 + 2L^3}{8Bh^3E} + \frac{a + 2L}{8BhkG_{11}} + \frac{a^3}{8Bh^3E} \left[0,98 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,43 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right) \right] + \frac{1}{\pi} \frac{3a^2}{4Bh^2E} \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + \frac{a^3}{8Bh^3E} \left[5,07 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 8,58 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 2,08 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{3}{4}} \right], \quad (27)$$

que foi utilizada para se obterem as equações de G_I e G_{II} para o método SLB

$$G_1^{\text{SLB}} = \frac{12P^2a^2}{16EB^2h^3} \times \left[1 + 0,85 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 0,71 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,32 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,1 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right) \right] \quad (28)$$

e

$$G_{II}^{SLB} = \frac{9P^2 a^2}{16EB^2 h^3} \times \left[1 + 0,22 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,048 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right) \right]. \quad (29)$$

2.4.2.1.3 W. S. Kim (modelo 3)

Kim et al. [36] utilizaram a teoria das vigas para proceder ao cálculo dos valores da taxa de libertação de energia para os modos I e II para o ensaio SLB. Este modelo é aplicado num provete constituído por substratos de diferentes materiais e espessuras. Para tal, existiu a necessidade de se criarem parâmetros (equações (30) e (31)) inerentes a cada substrato e respetivo valor equivalente da ligação

$$D_1 = E_1 I_1, \quad (30)$$

$$D_2 = E_2 I_2 \quad (31)$$

e

$$D = (EI)_{\text{eff}}. \quad (32)$$

$(EI)_{\text{eff}}$ é a rigidez à flexão da secção ligada. O índice 1 está associado ao substrato superior e o 2 ao substrato inferior, por exemplo D_1 – rigidez à flexão do substrato superior, E_1 – módulo de elasticidade do substrato superior e I_1 – o momento de inércia estático do substrato superior, que é calculado através da seguinte relação

$$I = \frac{Bh^3}{12}. \quad (33)$$

A equação (33) refere-se à secção total do provete, ao invés da secção de apenas um substrato. Para se proceder ao cálculo das expressões de G_I e G_{II} para o ensaio SLB, foi utilizada a expressão de Irwin-Kies (1). Em vez de ser usada a teoria das vigas para derivar $C=f(a)$, foi utilizada uma determinação experimental que tem em consideração o efeito de corte e flexão nas proximidades da fenda. C e a foram normalizados como $E_1 BC$ e a/h_1 , respetivamente, e a forma usual de $C=f(a)$, que é $C=k(a+\Delta a)^3$, foi apresentada como

$$\frac{a}{h_1} = \alpha_1 (E_1 BC)^{\frac{1}{3}} + \beta, \quad (34)$$

onde α_1 e β são constantes que devem ser determinadas experimentalmente. Com esta forma de normalização, C pode ser obtido independentemente da espessura do substrato superior (h_1), que vai

ser usada para controlar a proporção entre modos I e II. Deste modo, e utilizando as equações (1) e (34), a taxa crítica da libertação de energia pode ser apresentada como

$$G_C = \frac{3}{2h_1} \left(\frac{P}{B} \right)^2 \frac{(E_1 BC)^{\frac{2}{3}}}{\alpha_1 E_1}. \quad (35)$$

Quando materiais dissimilares são unidos através de temperatura, são criadas tensões internas que afetam a taxa de libertação de energia (efeito contabilizado por G_T)

$$G = G_{mec} + G_T + G_{int}, \quad (36)$$

onde G_{int} é um termo que resulta das interações térmicas e mecânicas e G_{mec} corresponde à expressão (35). Baseando-se na teoria das vigas e na mecânica da fratura elástica linear, Nairn [37] calculou os seguintes termos

$$G_T = \frac{1}{2} \frac{E_1 h_1 \Delta \alpha_1^2 \Delta T^2 (1 + R\lambda^3)}{1 + R\lambda(4 + \lambda(6 + \lambda(4 + R\lambda)))} \quad (37)$$

e

$$G_{int} = \frac{3Pa\Delta\alpha_1\Delta T(R\lambda^2(1+\lambda))}{Bh_1(1+R\lambda(4+\lambda(6+\lambda(4+R\lambda))))}, \quad (38)$$

onde ΔT é a diferença de temperatura, $\Delta\alpha_1 = \alpha_1 + \alpha_2$, $R = E_1/E_2$ e $\lambda = h_1/h_2$, sendo h_2 a espessura do substrato inferior. A taxa de libertação de energia total (em modo misto) do ensaio SLB é dada por $G_{I/II} = G_I + G_{II}$, decompondo $G_{I/II}$ pelos dois modos de carregamento. São então obtidas as seguintes expressões para cálculo de G_I e G_{II}

$$G_I^{SLB} = \frac{P^2 a^2}{8B} \times \left(\frac{D_2^2}{(D_1 + D_2)^2} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) \right) \quad (39)$$

e

$$G_{II}^{SLB} = \frac{P^2 a^2}{8B} \times \left(\frac{1}{(D_1 + D_2)} - \frac{1}{D} \right). \quad (40)$$

2.4.2.1.4 da Silva et al. (modelo 4)

No trabalho de da Silva et al. [38] foi utilizada a teoria das vigas proposta por Szekrényes e Uj [35] para deduzir as expressões de G_I e G_{II} para o método SLB (não sendo dados pormenores sobre a obtenção das mesmas), através das seguintes relações matemáticas

$$G_I^{\text{SLB}} = \frac{12P^2 a^2}{16EB^2 h^3} \times \left[1 + 0,55 \left(\frac{h}{a} \right) + 0,31 \left(\frac{h}{a} \right)^2 + 0,32 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{G_{11}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,1 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{G_{11}} \right) \right] \quad (41)$$

e

$$G_{II}^{\text{SLB}} = \frac{9P^2 a^2}{16EB^2 h^3} \times \left[1 + 0,218 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{G_{11}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,048 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{G_{11}} \right) \right]. \quad (42)$$

2.4.2.1.5 Szekrényes e Uj (modelo 5)

Num outro trabalho de Szekrényes e Uj [35], utilizando expressões que incorporam a teoria do corte transversal [32], o efeito Saint-Venant [39], o efeito de uma base elástica de Winkler-Pasternak [27, 40], a análise de deformação do início da fenda por corte [41], bem como as teorias das vigas de Euler-Bernoulli e de Timoshenko, foram também deduzidas expressões de G_I e G_{II} para o método SLB. Através da equação (1) de Irwin-Kies [39], a expressão de C foi obtida através da teoria das vigas de Timoshenko (TIM) e Euler-Bernoulli (EB) do seguinte modo [27]

$$C^{\text{SLB}} = C_{\text{EB}}^{\text{SLB}} + C_{\text{TIM}}^{\text{SLB}} = \frac{7a^3 + 2L^3}{8Bh^3 E} + \frac{a + 2L}{8BhkG_{11}}, \quad (43)$$

reformulando-se a equação (1) da seguinte forma

$$G_{I/II}^{\text{SLB}} = \frac{21P^2 a^2}{16B^2 h^3 E} + \frac{P^2 a^2}{16B^2 h^3 E} f_{\text{T}}, \quad (44)$$

onde

$$f_{\text{T}} = \frac{1}{k} \frac{E}{G_{11}} \left(\frac{h}{a} \right)^2. \quad (45)$$

Para se obter o valor de C para ambos os substratos, são usadas as seguintes expressões

$$C_{WP1} = \frac{7a^3 + L^3}{2Bh^3E} - \frac{(L^3 - a^3)P_2}{2Bh^3EP_1} + \frac{a^3(P_1 - P_2)}{2Bh^3EP_1} f_{w1} \quad (46)$$

e

$$C_{WP2} = \frac{7a^3 + L^3}{2Bh^3E} - \frac{(L^3 - a^3)P_1}{2Bh^3EP_2} + \frac{a^3(P_1 - P_2)}{2Bh^3EP_2} f_{w1}, \quad (47)$$

em que C_{WP1} diz respeito ao substrato superior e C_{WP2} ao substrato inferior (ver Figura 32).

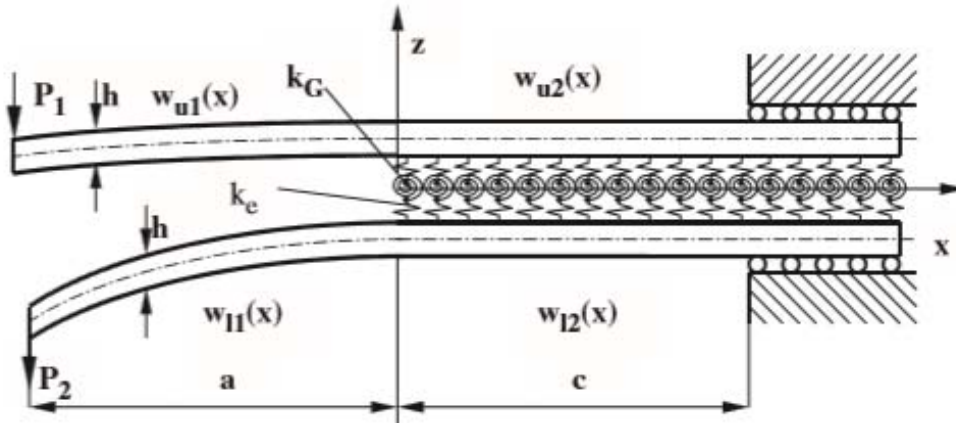


Figura 32 – Esquema representativo dos esforços e comportamento elástico do provete [35]

Para o cálculo de f_{w1} é utilizada a seguinte expressão

$$f_{w1} = 2.71\phi^{(1/2)} \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{E_{33}}\right)^{(1/4)} + 2.45\phi \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}}\right)^{(1/2)} + 1.11\phi^{(1/2)} \left(\frac{h}{a}\right)^3 \left(\frac{E}{E_{33}}\right)^{(3/4)}, \quad (48)$$

onde $\phi = 1 + \omega$, sendo ω um parâmetro relacionado com o fundamento de Pasternak, considerado como constante [40] e igual a 2,5. Para conhecer as taxas de libertação de energia de cada substrato, são usadas as seguintes expressões

$$G_1 = \frac{P_1^2}{2B} \frac{dC_1}{da} \quad (49)$$

e

$$G_2 = \frac{P_2^2}{2B} \frac{dC_2}{da}, \quad (50)$$

em que o índice 1 se refere ao substrato superior e o 2 ao inferior. Substituindo as equações (46) e (47) nas equações (49) e (50), pode-se dizer

$$G_{WP1} + G_{WP2} = \frac{21a^2(P_1^2 + P_2^2)}{4B^2h^3E} - \frac{6P_1P_2a^2}{4B^2h^3E} + \frac{a^2(P_1 - P_2)^2}{4B^2h^3E} fw_2, \quad (51)$$

em que

$$fw_2 = 5.42\phi^{(1/2)} \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{E_{33}}\right)^{(1/4)} + 2.45\phi \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}}\right)^{(1/2)}. \quad (52)$$

Considerando a taxa de libertação de energia de Saint-Venant (G_{SV}) [40]

$$G_{SV} = \frac{(P_1 - P_2)^2 a^2}{4B^2h^3E} f_{SV}, \quad (53)$$

onde

$$f_{SV} = \frac{12}{\pi} \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{G_{11}}\right)^{(1/2)}. \quad (54)$$

Para as taxas de libertação de energia das equações (49) e (50), tem-se que

$$G_{SH1} + G_{SH2} = \frac{(P_1 + P_2)^2 a^3}{4B^2h^3E} f_{SH2}, \quad (55)$$

em que

$$f_{SH2} = 1.96 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{G_{11}}\right)^{(1/2)} + 0.43 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{G_{11}}\right). \quad (56)$$

Tendo em conta os efeitos de Winkler-Pasternak, corte transversal e outros, e equalizando as equações (51), (53) e (55), é deduzida a seguinte expressão

$$G = \frac{21(M_1^2 + M_2^2) - 6M_1M_2 + (M_1 - M_2)^2(fw_2 + f_{SV}) + (M_1 + M_2)^2 f_{SH2}}{4B^2h^3E}. \quad (57)$$

Decompondo M_1 e M_2 da seguinte forma [42]

$$M_1 = M_I + M_{II} \quad (58)$$

e

$$M_2 = \alpha M_1 + \varphi M_{II}, \quad (59)$$

onde φ é considerado igual a 1 devido a uma suposição cinemática e, para anular uma equação intrínseca ao modelo, à semelhança do que foi feito na equação (20), é considerado $\alpha = -1$. Mais informações sobre estas deduções podem ser encontradas em [33]. Assim, obtêm-se

$$G_I = \frac{M_1^2(12 + f_{W_2} + f_T + f_{SV})}{B^2 h^3 E} \quad (60)$$

e

$$G_{II} = \frac{M_{II}^2(9 + f_{SH2})}{B^2 h^3 E}. \quad (61)$$

Rearranjando as equações (58) e (59)

$$M_1 = \frac{M_1 - M_2}{2}, \quad (62)$$

$$M_{II} = \frac{M_1 + M_2}{2} \quad e \quad (63)$$

utilizando as equações (60) e (61) e, considerando os momentos de torção $M_1=0$ e $M_2=Pa/2$, obtêm-se as fórmulas finais das taxas de libertação de energia

$$G_I^{SLB} = \frac{12P^2 a^2}{16EB^2 h^3} \times \left[1 + 0,85 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 0,71 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,32 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{G_{11}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,1 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{G_{11}} \right) \right] \quad (64)$$

e

$$G_{II}^{SLB} = \frac{9P^2 a^2}{16EB^2 h^3} \times \left[1 + 0,22 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{G_{11}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0,048 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{G_{11}} \right) \right]. \quad (65)$$

2.4.2.2 Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente

2.4.2.2.1 CBBM (modelo 6)

No trabalho de de Moura et al. [43], com base na teoria das vigas de Szekrényes e Uj [27], obtém-se um método de cálculo de G_I e G_{II} para o ensaio SLB que utiliza a_e , evitando as complicações associadas à medição desta variável. Através da teoria das vigas, é deduzida a expressão de C

$$C = \frac{28a^3 + (2L)^3}{32EBh^3} + \frac{3(a+2L)}{20G_{11}Bh}. \quad (66)$$

Utilizando o valor de patamar da flexibilidade obtido experimentalmente (C_0) e a_0 , E torna-se então E_f do seguinte modo

$$E_f = \left(C_0 - \frac{3(a_0 + 2L)}{20G_{11}Bh} \right)^{-1} \frac{28a_0^3 + (2L)^3}{32Bh^3}. \quad (67)$$

Através da expressão (1) de Irwin-Kies, é deduzida a expressão da taxa de libertação de energia em modo misto I+II pelo método SLB (G^{SLB})

$$G_{I/II}^{\text{SLB}} = \frac{21P^2 a_e^2}{16E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{40G_{11} B^2 h}. \quad (68)$$

De acordo com Szekrényes e Uj [27], a taxa de libertação de energia em modo misto é decomposta da seguinte forma pelos dois modos de carregamento

$$G_I^{\text{SLB}} = \frac{3P^2 a_e^2}{4E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{40G_{11} B^2 h} \quad (69)$$

e

$$G_{II}^{\text{SLB}} = \frac{9P^2 a_e^2}{16E_f B^2 h^3}. \quad (70)$$

Para se proceder ao cálculo de a_e , é usada a seguinte expressão

$$a_e = \left(\frac{1}{6\alpha_{CBBM}} \right) A_{CBBM} - \left(\frac{2\beta_{CBBM}}{A_{CBBM}} \right), \quad (71)$$

em que

$$\alpha_{CBBM} = \frac{7}{8E_f Bh^3}, \quad (72)$$

$$\beta_{CBBM} = \frac{3}{20G_1 Bh}, \quad (73)$$

$$A_{CBBM} = \left(\left(-108\gamma_{CBBM} + 12\sqrt{3 \frac{(4\beta_{CBBM}^3 + 27\gamma_{CBBM}^2 \alpha_{CBBM})}{\alpha_{CBBM}}} \right) \alpha_{CBBM}^2 \right)^{\left(\frac{1}{3}\right)} \quad (74)$$

e

$$\gamma_{CBBM} = \frac{(2L)^3}{32E_f Bh^3} + \frac{6L}{20G_1 Bh} - C. \quad (75)$$

2.4.2.3 Método baseado no integral J

Devido às dificuldades que se verificavam na análise de materiais com plasticidade não desprezável, em 1968 Rice [44] introduziu o Integral J , que caracteriza o modo como a fenda se propaga num material elástico não-linear, sendo este um parâmetro da mecânica da fratura elasto-plástica. A expressão genérica do integral J é definida como

$$J = \int_{\Gamma} \left[W dy - \vec{T} \times \frac{d\vec{u}}{dx} \times ds \right], \quad (76)$$

em que Γ é um percurso traçado no sentido anti-horário, utilizando um ponto inicial e um final, não coincidentes, de tal forma que os dois pontos devem encontrar-se em faces da fenda opostas (ver Figura 33).

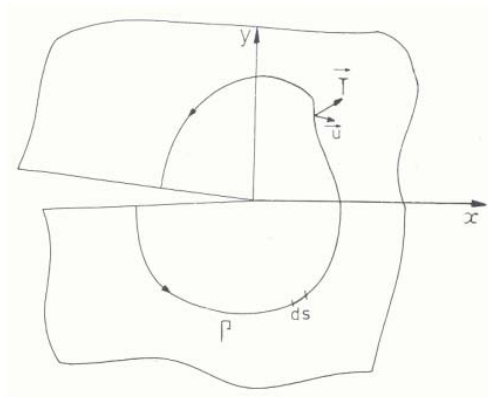


Figura 33 – Diagrama esquemático da aplicação do integral J

O valor de J é independente do caminho escolhido. W é a densidade de energia de deformação num material elástico, \vec{T} é o vetor de tração ao longo do percurso definido por Γ de acordo com a normal exterior \vec{n} do contorno, \vec{u} é o vetor de deslocamento na direção xx e s o comprimento do caminho escolhido. Este método pode ser aplicado em condições de elasticidade não linear e representa uma extensão do parâmetro energético da taxa de libertação de energia (G) [45]. Para se proceder ao estudo das taxas de libertação de energia segundo o método baseado no integral J em modo I (J_I), em modo II (J_{II}) e em modo misto ($J_{I/II}$) de uma junta adesiva pelo ensaio SLB, Shivakumar e Raju [46] criaram um método de decomposição baseado na separação de tensões e deslocamentos em modo simétrico e assimétrico. No entanto, este método apresenta algumas lacunas e entretanto foi corrigido por diversos autores, originando a decomposição que está patente na Figura 34, que mostra como são traçados os percursos de integração e distribuídos os momentos fletores.

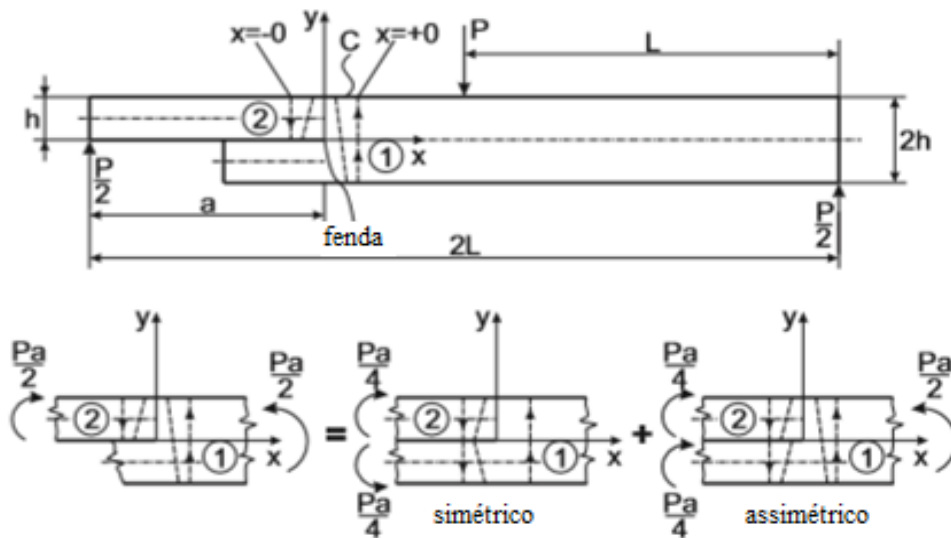


Figura 34 – Aplicação do Integral J no ensaio SLB [47]

De acordo com a Figura 34, verifica-se que um ensaio SLB se assemelha à sobreposição de efeitos de um ensaio DCB solicitado com momentos de flexão de $(P \times a)/2$ com um ensaio ENF. Através desta análise, utilizando o método global de Williams [42] e as equações (77) – relativa ao provete DCB e (78) – relativa ao provete ENF, obtidas pela teoria das vigas [48]

$$J_I = \frac{12M^2}{B^2h^3E} \quad (77)$$

e

$$J_{II} = \frac{9P^2a^2}{16B^2h^3E} \quad (78)$$

em que M representa o momento fletor, chega-se assim ao resultado da taxa de libertação de energia pelo método baseado no Integral J para o ensaio SLB, para cada um dos modos

$$J_{\text{I}}^{\text{SLB}} = \frac{12P^2 a^2}{16B^2 h^3 E}, \quad J_{\text{II}}^{\text{SLB}} = \frac{9P^2 a^2}{16B^2 h^3 E}, \quad J_{\text{III}}^{\text{SLB}} = \frac{21P^2 a^2}{16B^2 h^3 E}. \quad (79)$$

Outra formulação distinta para a obtenção do integral J pelo método SLB é apresentada por Ji et al. [49]. Assume-se que os aderentes apresentam um comportamento elástico linear durante todo o processo de fratura, ao contrário do adesivo. Considerando uma aplicação de carga contínua durante a realização do ensaio, a separação coesiva e a deformação plástica podem ser não-lineares. De acordo com anteriores trabalhos, as leis que descrevem este sistema podem ser descritas como (Ouyang e Li [50])

$$\frac{D_2 D_1}{(D_1 + D_2)} \frac{d^4 w}{dx^4} = \frac{\xi_1 - \frac{\delta_j^*}{\tau}}{\xi_2 - \frac{\delta_j^*}{\tau}} \sigma(w) \quad (80)$$

e

$$\delta_j^* + \left(\frac{h_1}{2D_1} Q_1 + \frac{h_2}{2D_2} Q_2 \right) = \left(\frac{h_1^2}{4D_1} + \frac{h_2^2}{4D_2} + \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} \right) \tau, \quad (81)$$

em que w é a espessura de adesivo, δ_j é o deslocamento tangencial entre substratos, σ e τ são as trações normal e de corte, h_i , A_i e D_i ($i=1,2$ - estando o índice 1 associado ao substrato superior e o 2 ao inferior) são a espessura, a rigidez axial e a rigidez à flexão dos substratos, Q_i é a força de corte aplicada no substrato i e ξ_1 e ξ_2 são dados por

$$\xi_1 = \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2} + \frac{(h_1 + h_2)^2}{4(D_1 + D_2)} \quad (82)$$

e

$$\xi_2 = \frac{h_1^2}{4D_1} + \frac{h_2^2}{4D_2} + \frac{1}{A_1} + \frac{1}{A_2}. \quad (83)$$

Para casos em que os substratos da junta são similares, $D_1=D_2=D$ (tornando-se assim D a única variável associada à rigidez à flexão), $h_1=h_2=h$ (tornando-se assim h a única variável associada à espessura unitária dos substratos) e $\xi_1=\xi_2$. Assim, para um provete padrão SLB, as equações (80) e (81) podem ser simplificadas da seguinte forma

$$\frac{D d^4 w}{2 dx^4} = \sigma(w) \quad (84)$$

e

$$\delta_J'' + \frac{h}{2D}(Q_1 + Q_2) = \left(\frac{h^2}{2D} + \frac{2}{A} \right) \tau. \quad (85)$$

Por conveniência de análise, considera-se $Q_1 + Q_2 = Q_T$, correspondendo Q_T à resultante das forças de corte exercidas sobre a junta adesiva. Da associação anterior, a equação (85) é assim reformulada

$$\delta_J'' + \frac{h}{2D}Q_T = \left(\frac{h^2}{2D} + \frac{2}{A} \right) \tau. \quad (86)$$

As equações (84) e (86) são as equações que regem/descrevem os modos I e II, respetivamente. Derivando estas equações, pode-se obter a componente do integral J relativa ao modo I (J_I) (Ouyang e Li [26])

$$J_I(w_0) = \int_0^{w_0} \sigma(w) dw = \frac{Q_T}{2} \theta_p, \quad (87)$$

onde θ_p é a rotação relativa entre os dois substratos na linha de aplicação de carga e w_0 é a separação normal entre os dois aderentes na frente da fenda. Para um provete SLB onde $P=2Q_T$, a componente do modo I do integral J pode também ser apresentada sob a forma seguinte

$$J_I(w_0) = \int_0^{w_0} \sigma(w) dw = \frac{P}{4} \theta_p. \quad (88)$$

Para a componente do integral J relativa ao modo II, através de Ouyang e Li [26] obtém-se

$$J_{II}(\delta_{J_0}) = \int_0^{\delta_{J_0}} \tau(\delta_J) d\delta_J = \frac{\frac{1}{2} \left(\frac{h}{D} \right)^2 Q_T^2 a^2 + \frac{h Q_T}{2D} \delta_{J_0}}{\frac{2}{A} + \frac{h^2}{2D}}, \quad (89)$$

Onde δ_{J_0} é deslocamento tangencial inicial entre substratos na frente da fenda. Através da teoria do integral J , as equações da tensão normal σ e da tensão de corte τ podem ser definidas da seguinte forma

$$\sigma(w) = \frac{\partial J_I(w_0)}{\partial w_0} = \frac{\partial \left\{ \frac{1}{4} P \theta_p \right\}}{\partial w_0} \quad (90)$$

e

$$\tau(\delta_j) = \frac{\partial J_{II}(\delta_{j0})}{\partial \delta_{j0}} = - \frac{\partial \left\{ \frac{1}{2} \left(\frac{ha}{2D} \frac{P}{2} \right)^2 + \frac{h}{2D} \frac{P}{2} \delta_{j0} \right\}}{\partial \delta_{j0}} \frac{2}{A} + \frac{h^2}{2D}} . \quad (91)$$

As expressões (90) e (91) permitem obter as leis coesivas em tração e corte, respetivamente, que podem ser posteriormente utilizadas para efeitos de previsão de resistência.

3 Desenvolvimento

3.1 Materiais

Neste capítulo são descritos e caracterizados os materiais utilizados nos provetes SLB (substratos e adesivos).

3.1.1 Substratos

De início, ponderou-se utilizar uma liga de alumínio (6082-T651) para material dos substratos. Porém, através de uma análise realizada através do *software* Abaqus[®], que conjuga as propriedades dos materiais envolvidos com as suas dimensões e esforços aplicados, verificou-se que essa escolha daria problemas a nível do comportamento elasto-plástico do material, para qualquer dimensão de junta que fosse adotada. Este problema será abordado mais à frente, no subcapítulo referente à geometria das juntas. Sendo assim, verificou-se a necessidade de escolher um novo material para o substrato, pelo que se optou por um compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono, pré-impregnada e unidirecional (SEAL[®] Texipreg HS 160 RM), por ter melhores propriedades mecânicas do que a liga de alumínio, e pela disponibilidade imediata de aquisição.

Tabela 2 – Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção x [20].

$E_x=1,09E+05$ MPa	$\nu_{xy}=0,342$	$G_{11xy}=4315$ MPa
$E_y=8819$ MPa	$\nu_{xz}=0,342$	$G_{11xz}=4315$ MPa
$E_z=8819$ MPa	$\nu_{yz}=0,380$	$G_{11yz}=3200$ MPa

Após efetuados os mesmos testes a que a liga de alumínio foi submetida pelo *software*, verificaram-se resultados positivos para qualquer dimensão de junta, no que concerne à ausência de

comportamento plástico para as cargas envolvidas. Foi então decidido que o compósito reforçado com fibra de carbono seria o material a utilizar para os substratos (Tabela 2).

3.1.2 Adesivos

Este capítulo descreve os três adesivos utilizados neste trabalho. Dos três adesivos selecionados, todos eles são bi-componente (resina e endurecedor), dois deles epóxicos (Araldite® AV138 e 2015) e um poliuretano (SikaForce® 7752). Todos estes adesivos são caracterizados pela fácil aplicação devido à viscosidade relativamente baixa. A forma bi-componente é vantajosa em relação à película, na medida em que permite flexibilidade na escolha da espessura da camada adesiva, incluindo a possibilidade de compensar alguma falta de planeza dos aderentes. Estes adesivos apresentam uma ductilidade crescente pela ordem apresentada, desde a consideração de um adesivo frágil até um adesivo bastante dúctil, o que vai permitir a caracterização e modelação dos ensaios em condições diferentes.

3.1.2.1 Adesivo Araldite® AV138

O Araldite® AV138 (Figura 35), juntamente com o endurecedor HV998, é um adesivo do fabricante *Huntsman Advanced Materials*, considerado estrutural de base epóxida, termoendurecível de dois componentes. É um adesivo que se apresenta na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis, excelente resistência química e resistente a temperaturas até aos 120 °C.



Figura 35 - Adesivo epóxido Araldite® AV138/HV998

O Araldite® AV138 com o endurecedor HV998, quando combinado nas proporções corretas, descreve-se como um adesivo epóxido frágil, mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros [12]. A Figura 36 apresenta curvas típicas de tensão normal - deformação (σ - ϵ) de provetes maciços ensaiados à tração, obtidas experimentalmente no trabalho [12].

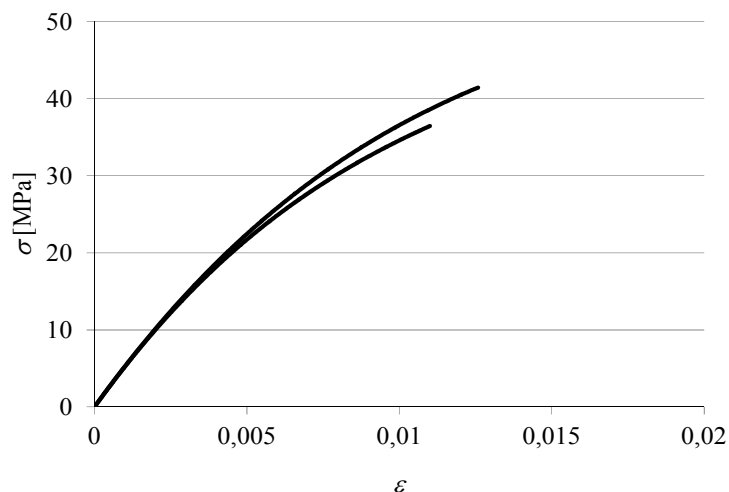


Figura 36 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [12]

A Tabela 3 indica as propriedades mecânicas elásticas e plásticas mais relevantes do adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [12, 51].

Tabela 3 - Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® AV138 [12, 51]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young/Elasticidade, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, G_{xy} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	0,20 ^b
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	0,38 ^b
^a valor do fabricante	
^b valores estimados na referência [52]	

3.1.2.2 Adesivo Araldite® 2015

O Araldite® 2015 (Figura 37) é um adesivo do fabricante *Huntsman Advanced Materials* considerado estrutural, de base epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentado na forma de pasta

tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa contração e uma alta resistência ao corte e clivagem, com uma ductilidade moderada.



Figura 37 - Adesivo epóxico Araldite® 2015

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies a ligar. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona, isopropanol (para plásticos) ou outros agentes desengordurantes, a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas σ - ϵ dos provetes maciços, ensaiados à tração, são dadas na Figura 38 [12].

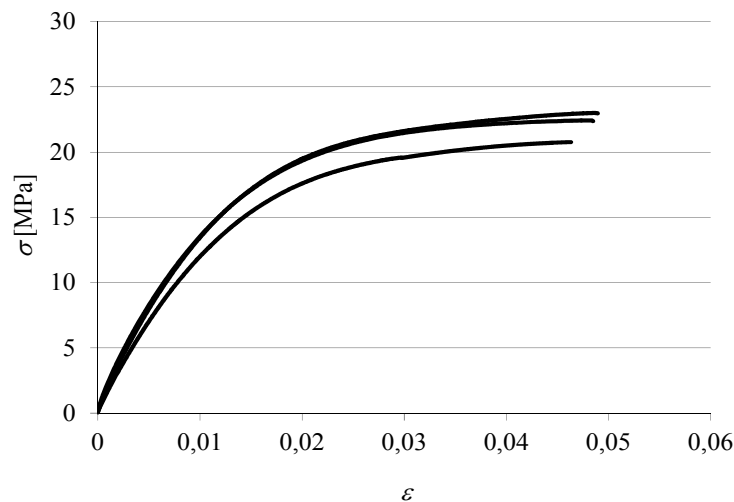


Figura 38 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [12]

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentrações de tensões, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos

aderentes [12]. A Tabela 4 indica as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [12].

Tabela 4 - Propriedades mecânicas do adesivo Araldite® 2015 [12]

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

Comparando os valores deste adesivo com o Araldite® AV138, verifica-se que a deformação de rotura ao corte é quase seis vezes superior. Por outro lado, as tensões de rotura à tração e ao corte do Araldite® AV138 são praticamente o dobro das do Araldite® 2015.

3.1.2.3 Adesivo SikaForce® 7752

O SikaForce® 7752 L60 (VP) (Figura 39) é um adesivo à base de poliuretano, estrutural tixotrópico de 2 componentes, formado por uma resina polioli com cargas e endurecedor de base isocianato, com baixa emissão de gases e perdas voláteis e com boa resistência a altas temperaturas.



Figura 39 - Adesivo SikaForce® 7752

O SikaForce® 7752 é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, com grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas. Encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. É um adesivo bastante dúctil, o que pode ser comprovado nos valores de tenacidade obtidos anteriormente [53]. As curvas σ - ε dos provetes maciços ensaiados à tração estão apresentadas na Figura 40 [53].

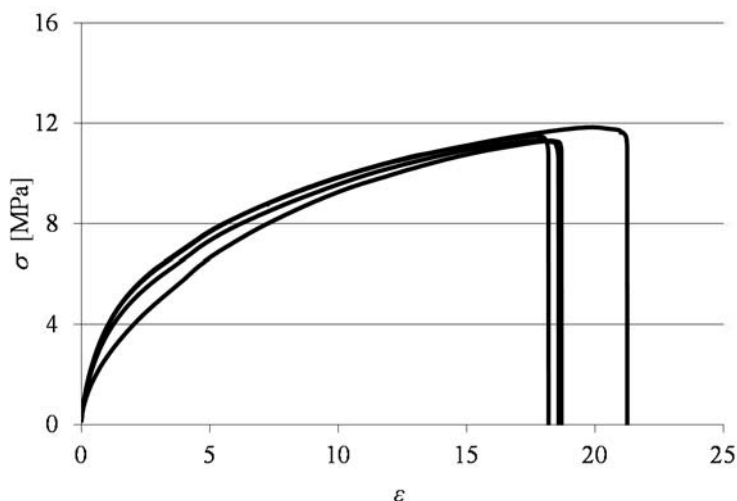


Figura 40 - Curvas σ - ε de provetes maciços do adesivo SikaForce® 7752 [53]

A Tabela 5 indica os valores mais relevantes das propriedades mecânicas do adesivo, obtidas num trabalho realizado anteriormente [53].

Tabela 5 - Propriedades mecânicas do adesivo SikaForce® 7752

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de Young/Elasticidade, E [GPa]	0,49±0,09
Coefficiente de Poisson, ν	0,30 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3,24±0,48
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11,48±0,25
Deformação de rotura à tração, ε_f [%]	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, G_{xy} [GPa]	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	54,82±6,38
Tenacidade à tração, G_{TC} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{TC} [N/mm]	5,41±0,47
^a valor do fabricante	

3.2 Procedimento experimental

Neste capítulo é descrito o procedimento experimental levado a cabo neste trabalho, começando pela geometria das juntas, seguido dos processos de fabrico, preparação e procedimento dos ensaios.

3.2.1 Geometria das juntas

3.2.1.1 Otimização numérica da geometria

Foi inicialmente efetuado um estudo para seleção da geometria e material dos substratos devido ao potencial de plastificação dos mesmos durante o ensaio, o que inviabilizaria a validade dos resultados obtidos. De facto, se os esforços aplicados durante o ensaio provocarem tensões acima do limite elástico dos substratos, parte da energia proveniente do ensaio vai-se dissipar pelo substrato, o que afeta a medição de G_I e G_{II} . Para a escolha da geometria das juntas foi usado o *software* Abaqus®, que conjuga as geometrias e propriedades dos materiais intrínsecos aos provetes com os esforços a que estarão submetidos durante o ensaio e apresenta resultados potenciais relativamente às tensões verificadas. Este processo permite uma melhor perceção das solicitações aplicadas aos aderentes dos provetes SLB com geometrias distintas.

Tabela 6 – Tensões máximas de von Mises [MPa] para diferentes geometrias das juntas adesivas

Adesivo	Dimensões (mm)			
	$L = 100$ $a_0 = 70$	$L = 150$ $a_0 = 70$	$L = 75$ $a_0 = 45$	$L = 125$ $a_0 = 87,5$
Araldite AV138	$\sigma_{VM} = 221$			
Araldite 2015	$\sigma_{VM} = 263$ $\sigma_{VM} = 543$			
SikaForce 7752	$\sigma_{VM} = 276$ $\sigma_{VM} = 752$	$\sigma_{VM} = 282$	$\sigma_{VM} = 280$	$\sigma_{VM} = 283$ $\sigma_{VM} = 752$

A Tabela 6 apresenta as dimensões iniciais que foram consideradas e o resultado obtido para cada uma com os diferentes tipos de adesivos e materiais de substrato. σ_{VM} é a tensão de von Mises máxima

nos substratos. De referir que, em algumas das geometrias testadas, não se respeitou o rácio de a_0/L de 70/100 referido anteriormente, como recomendado para o ensaio SLB. A vermelho encontram-se os resultados obtidos nas simulações com substratos de alumínio e a verde os resultados para compósito reforçado com fibras de carbono.

Uma vez que a liga de alumínio testada (6082-T651) apresenta uma tensão de cedência (σ_{ced}) de $261,67 \pm 7,65$ MPa [17] e o compósito reforçado com fibra de carbono de 750 MPa [16], para qualquer das hipotéticas geometrias consideradas, os substratos de alumínio iriam sofrer deformação plástica durante os ensaios destrutivos. Por esta razão foi escolhido o compósito reforçado com fibra de carbono como material para os substratos. Não foram efetuados todos os cálculos referentes às hipóteses possíveis, sendo apenas necessário garantir que o substrato se mantém no regime elástico na pior das situações (maior tensão a que possa estar sujeito durante o ensaio). Para tal, inicialmente foi verificado qual o adesivo que submeteria o provete à maior σ_{VM} , no qual o adesivo SikaForce® 7752 se destacou, como demonstra a Tabela 6. Posteriormente, para efeitos de cálculo, apenas foram consideradas as geometrias de junta que influenciariam de forma mais significativa a tensão máxima verificada para este adesivo.

3.2.1.2 Geometria final

Tendo já sido definido o material do substrato que teoricamente não manifestará o problema de plastificação mencionado (compósito), foi decidido optar-se pela última hipótese de dimensão de junta ($L=125$ mm e $a_0=87,5$ mm), por apresentar um L superior aos demais (tendo em conta que a hipótese de $L=150$ foi sugerida meramente para uma análise virtual, não tendo o molde disponível de fabrico das placas de compósito dimensões suficientes para produzir tais substratos). As dimensões das juntas são idênticas para todos os tipos de adesivos e, de acordo com as conclusões retiradas até ao corrente ponto de situação, as dimensões finais são (em mm) $L=125$, $B=15$, $h=3$ (igual para os dois substratos), $a_0=87,5$ e $h_t=7$ (Figura 41).

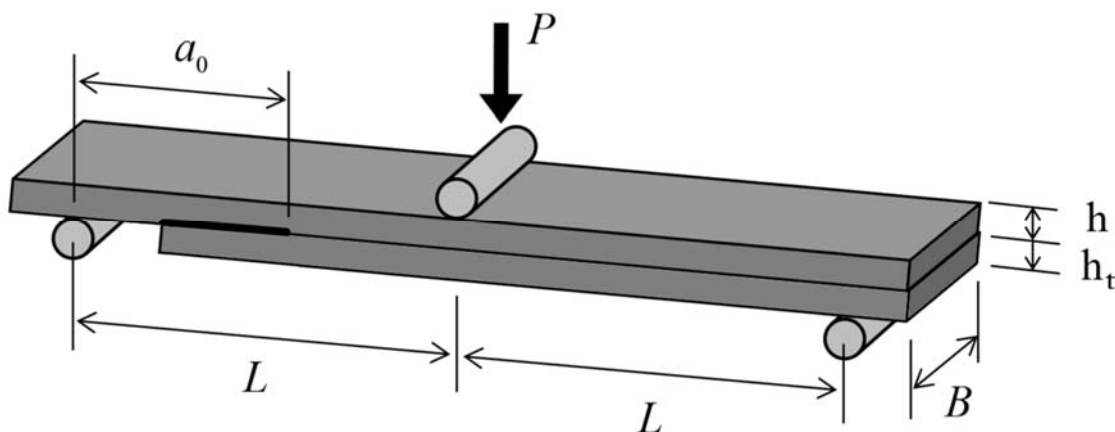


Figura 41 - Geometria do provete de ensaio SLB

Relativamente ao comprimento dos substratos, o superior apresenta 280 mm e o inferior 200 mm. No caso de a_0 , esta é uma dimensão que poderá variar ligeiramente entre provetes, dependendo da propagação manual da fenda na altura de fabrico do provete (a detalhar posteriormente).

3.2.2 Processo de fabrico

O material base dos substratos, como referido anteriormente, é um compósito de matriz epóxida reforçada com fibras de carbono (SEAL[®] Texipreg HS 160 RM). Foram fabricados 21 provetes no total, 7 por cada adesivo. Optou-se por testar um número elevado de provetes para cada adesivo para prevenir os casos em que os ensaios são considerados inválidos, caso ocorra uma rotura prematura da junta que não permita uma aquisição de dados suficiente ou mesmo a existência de adversidades de outra natureza como a disparidade assinalável de resultados adquiridos. Para a obtenção dos substratos foi necessária a produção de 3 placas de compósito com 3 mm de espessura, para posterior corte e obtenção dos substratos a usar no fabrico dos provetes SLB. Estas placas foram fabricadas a partir de um rolo de 0,15 mm de espessura de pré-impregnado do compósito referido. Inicialmente, foi retirado o rolo do congelador onde se conservava de forma a manter as suas propriedades inalteráveis. De seguida, foi desenrolado e foram dele cortados pedaços de 300×300 mm² (dimensões do molde onde será colocado) com um X-ato em cima de uma mesa de vidro temperado. Após obtidas as camadas de pré-impregnado suficientes para a produção das placas (20 tiras por placa para obtenção de uma espessura de 3 mm), é iniciado o empilhamento das 20 camadas a 0° com a ajuda de uma pistola de ar quente (Figura 42). Neste processo, aplicou-se o calor em 2 camadas para ativar a resina contida no pré-impregnado, e de seguida juntaram-se as camadas todas na mesma direção da fibra (0°). Após a deposição de cada camada, com a ajuda de um bloco metálico para fazer pressão do interior para a periferia, tentava-se eliminar as bolhas de ar contidas no interior das tiras já ligadas. Esta pressão é feita sobre uma folha de proteção contida na parte exterior de todas as tiras que, após a ligação às restantes (tiras já empilhadas), era removida para permitir a ligação da próxima tira. Este processo é repetido para todas as tiras até estarem 20 empilhadas. As últimas folhas de proteção (na parte de baixo e de cima da placa) não são removidas para servirem de proteção contra as placas do molde. Após realizado o empilhamento, a placa é colocada num molde constituído por 2 tampas de alumínio de igual dimensão e uma moldura de aço colocada no interior das tampas, que contornava a placa em todos os cantos. Como esta moldura tem precisamente 3 mm e são deixadas as folhas de proteção em cada face da placa, é necessário entre tampa e moldura colocar uns espaçadores de alumínio de forma a ajustar essa diferença.

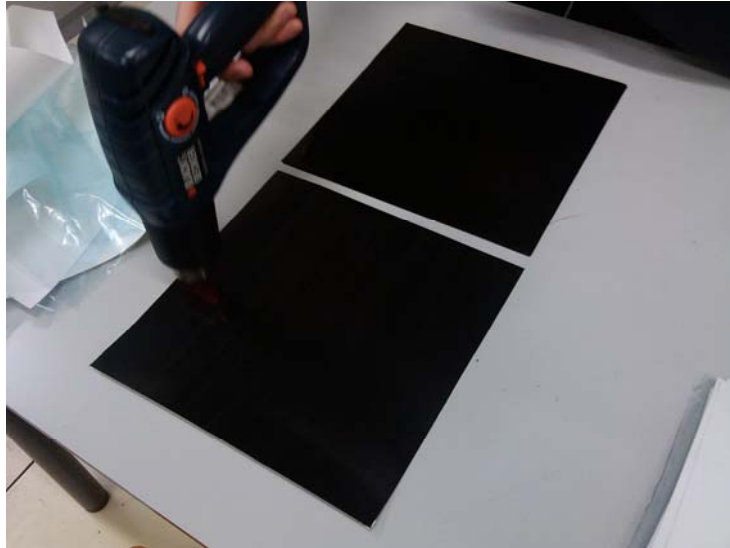


Figura 42 - Aplicação de calor numa camada de pré-impregnado através de pistola de ar quente

Estando o molde pronto, este é colocado na prensa de pratos quentes (Figura 43) com uma pressão de 30 bar, constantemente exercida nas tampas do molde, e realizado o ciclo térmico apresentado na Figura 44.



Figura 43 - Prensa de pratos quentes utilizada para a cura das placas de compósito

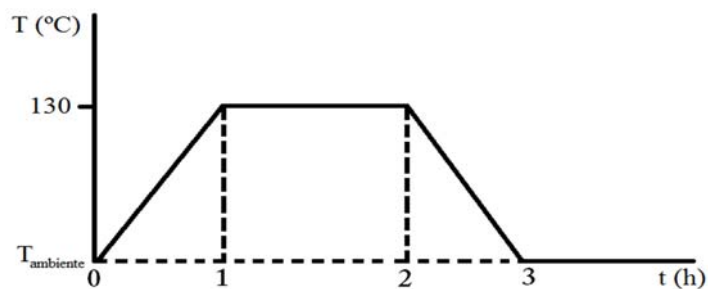


Figura 44 - Ciclo térmico aplicado às placas de compósito

Após o fim do ciclo térmico descrito na Figura 44, a placa é retirada do molde com as propriedades finais desejadas. São retiradas as folhas de proteção e é cortada a placa, consoante as medidas desejadas para os substratos. O corte das placas em substratos é efetuado numa máquina de corte com disco diamantado e pulverização de água, para evitar a suspensão de partículas nocivas. Como referido anteriormente, as medidas necessárias para os substratos são de $280 \times 15 \text{ mm}^2$ para os superiores e de $200 \times 15 \text{ mm}^2$ para os inferiores.

Após o corte das tiras, estas são secas e dá-se início à fase de preparação superficial das superfícies a ligar para se proceder à colagem. É utilizada uma lixa de grão P60, com o objetivo de limpar a superfície de sujidades que reduzam a adesão do adesivo à superfície e de aumentar a área de contacto entre superfícies dos substratos e adesivo, obtendo-se assim uma ligação mais forte (Figura 45). Após a lixagem, as superfícies são bem limpas com acetona. Esta ação é bastante importante para eliminar agentes externos na ligação durante o processo de fabrico.



Figura 45 – Fase de lixagem e limpeza dos substratos

Paralelamente ao procedimento anteriormente descrito, são preparados os espaçadores de aço a utilizar nas extremidades do adesivo durante o processo de cura. Estes servem para definir a altura de adesivo e, na outra extremidade, também servem para ajudar a criar a pré-fenda por onde terá início a propagação da mesma. Para preparar o espaçador com lâmina são necessárias 2 chapas de alumínio, com 0,45 mm de espessura e uma lâmina de 0,1 mm que será posicionada no interior das chapas, perfazendo a espessura do adesivo desejada. Em primeiro lugar limpam-se todas as superfícies com acetona. De seguida o conjunto é fixo com um adesivo de cianoacrilato, fazendo-se sobressair a zona de corte da lâmina numa extremidade, que permitirá a criação da pré-fenda. Posteriormente, os espaçadores são aquecidos num forno elétrico com o objetivo de elevar a sua temperatura para então ser aplicado o desmoldante (prática que facilita o processo de adesão). Para os espaçadores sem lâmina, constituídos apenas por um componente, repetem-se os mesmos processos de limpeza das superfícies e aplicação do desmoldante. Como estes espaçadores são constituídos por um só elemento, a sua altura é a correspondente à pretendida, ou seja, 1 mm. O desmoldante deverá ser aplicado três vezes sobre cada superfície, aguardando até que a superfície seque para se proceder a uma nova aplicação.

Na fase de aplicação de adesivo, foram utilizadas cadeiras para sustentar as plataformas de madeira onde são colocados os provetes SLB durante esta etapa, e onde permanecerão de seguida a curar. Foi colocada uma película de Teflon[®] protetora nas plataformas em contacto com os provetes para prevenir, em casos de vazamento de adesivo em excesso, que estes ficassem colados à madeira. De seguida, colocaram-se os substratos maiores (superiores) dispostos paralelamente (como se pode verificar na Figura 46) e marcou-se a caneta nas suas laterais a posição que os espaçadores deveriam ocupar. Após esta fase concluída, foi necessária, como medida preventiva, a fixação dos espaçadores nos seus locais devidos através da aplicação de pequenas quantidades de cianoacrilato, para evitar que estes se movessem durante os processos posteriores. Depois, foi aplicado na área desejada o adesivo respetivo e posicionado o substrato em falta no topo. Usando alguma pressão manual, escoou-se o excesso de adesivo e foi assegurado o contacto entre espaçadores e substratos, garantindo assim a espessura de 1 mm de adesivo. Como medida auxiliar ao procedimento anterior, foi também usada uma régua para garantir uma melhor distribuição de tensões durante a aplicação da pressão e evitar assim zonas com menor concentração de adesivo. Paralelamente aos processos anteriores, iam sendo colados os calços na extremidade da pré-fenda.

Após concluídas as etapas anteriores, são colocados grampos (Figura 46) a exercer pressão nos locais onde se encontram os espaçadores (durante a aplicação destes é necessário ter atenção ao cumprimento do paralelismo entre substratos). Os grampos são deixados durante o estágio de cura, para garantir a espessura desejada de adesivo e um correto posicionamento entre substratos.

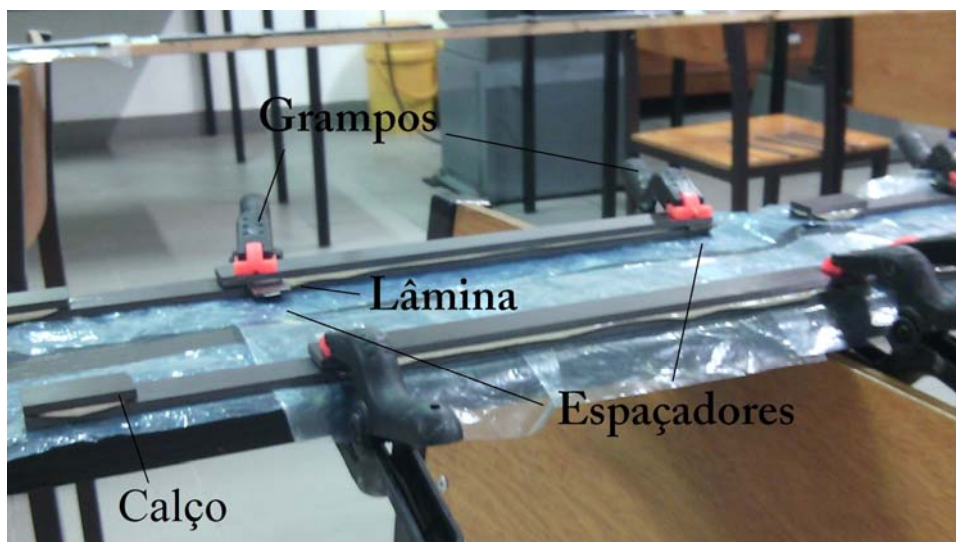


Figura 46 – Posicionamento dos espaçadores, calço e grampos, durante a aplicação de pressão nos provetes

3.2.3 Preparação para ensaio

A preparação dos provetes para ensaio deve ser realizada apenas após o adesivo ter adquirido uma rigidez satisfatória. Para tal, é testado o comportamento do adesivo através da tentativa de remoção dos bordos do provete, tendo em conta que o tempo de cura indicado pelo fornecedor já está ultrapassado. Caso o adesivo ainda não tenha rigidez suficiente, é necessário esperar até que este apresente tal característica. No caso desta dissertação, foram dados 3 dias de cura (sendo 48 horas o período mais longo de cura indicado pelo fornecedor entre os três adesivos) e verificou-se que o único que ainda não apresentava rigidez suficiente para prosseguir com esta fase era o adesivo SikaForce® 7752, sendo que foram dados mais 2 dias de cura para este (que se verificou ter sido o suficiente).



Figura 47 – Exemplo de provete após cura, com excesso de adesivo na zona de ligação

Este processo começa pela remoção dos dois espaçadores nas extremidades da camada de adesivo, o que foi facilmente conseguido utilizando um alicate e devido à aplicação prévia do desmoldante. No entanto, alguns espaçadores que se encontravam bloqueados por uma maior quantidade de adesivo tornaram-se mais difíceis de remover, sendo necessário recorrer a outros métodos como a fixação da peça em questão num torno. De seguida, é removido o excesso de adesivo (Figura 47) dos bordos dos provetes. Na fase inicial deste processo é utilizado um alicate para remover a máxima quantidade de adesivo em excesso que for possível, com cuidado para não danificar nenhuma parte do substrato nem retirar mais adesivo para além da face lateral dos provetes (na área delimitada pelos substratos). Após esta fase, o provete apresenta o aspeto da Figura 48.



Figura 48 – Aspeto do provete após remoção manual do adesivo em excesso com um alicate

Como passo final para a remoção do adesivo que ainda se encontra em excesso, é utilizada uma mó (Figura 49) com uma rugosidade suficientemente pequena, para que seja possível ao operador poder controlar este processo sem danificar os aderentes de compósito.



Figura 49 – Mó utilizada na fase final de remoção de excesso de adesivo

De seguida, os provetes foram limpos com acetona para remover poeiras provenientes do processo anterior e registado numa das suas faces o seu tipo de adesivo e número de provete, para melhorar a organização sequencial dos ensaios. Após a limpeza dos provetes, segue-se a pintura com corretor da face que irá ser alvo de registo fotográfico durante o ensaio, permitindo assim uma melhor perceção da localização da fenda na fase de análise fotográfica. Após secagem da tinta de corretor, é criada uma pré-fenda forçada através de um esforço leve de separação dos substratos na zona onde a fenda se iniciará (zona interior do provete) e registando a distância dessa pré-fenda até ao apoio esquerdo. A Tabela 7 resume os valores de a_0 medidos para cada provete.

Tabela 7 - Valores de a_0 [mm] medidos para cada provete

# provete	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	85,60	88,39	85,98
2	85,83	85,60	88,51
3	84,54	85,40	85,82
4	86,87	84,67	88,61
5	104,36	88,96	87,17
6	86,4	88,52	86,70
7	91,45	86,80	85,30

Em dois dos provetes do adesivo Araldite® AV138, observou-se que o valor de a_0 é marcadamente superior aos restantes, o que está relacionado com a propagação manual da fenda antes do ensaio, que resultou numa propagação superior à desejada devido à fragilidade do adesivo.

Prossegue-se para a próxima etapa, que consiste na colagem de uma escala em cada substrato do provete do lado onde será realizado o registo fotográfico.

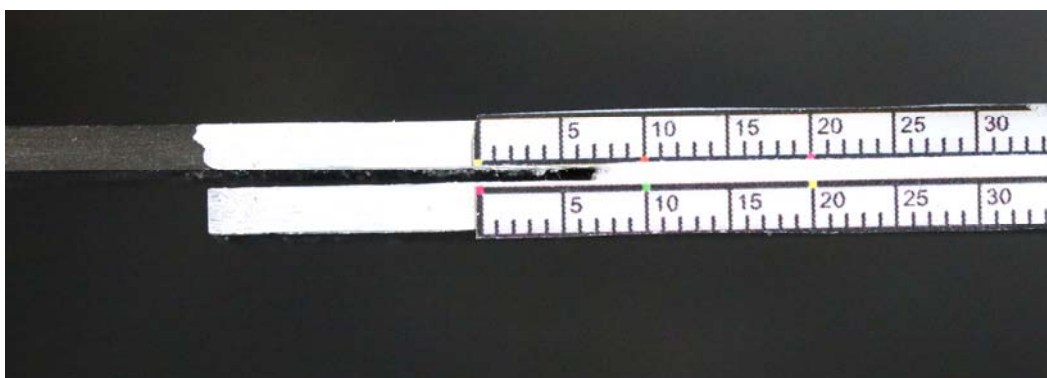


Figura 50 – Aspeto final de um provete apto para ensaio

É colada uma escala própria em cada aderente (Figura 50). A 10ª unidade de milímetro da escala deve situar-se o mais próximo possível da frente da pré-fenda, para efeitos de uniformização. Sempre que são coladas as escalas, há que ter atenção à zona que será avaliada pelo ensaio e a distância a que a escala se encontra do ponto de apoio esquerdo do provete no ensaio. De facto, esta medida deve ser registada para cada provete, para numa fase posterior se estimar o valor de a_0 . Após terminado o procedimento referido, o provete encontra-se preparado para ensaio.

3.2.4 Procedimento de ensaio

Para a realização dos ensaios foi utilizada uma máquina de ensaios eletromecânica Shimadzu AG-X 100 com uma célula de carga de 100 kN, com ligação a um computador responsável pelo processamento do ensaio e obtenção dos dados relativos a este, apresentando-os sob a forma de gráfico força P (N) vs. deslocamento δ (mm) (Figura 51) e com aquisição de dados a uma frequência de 4 Hz.

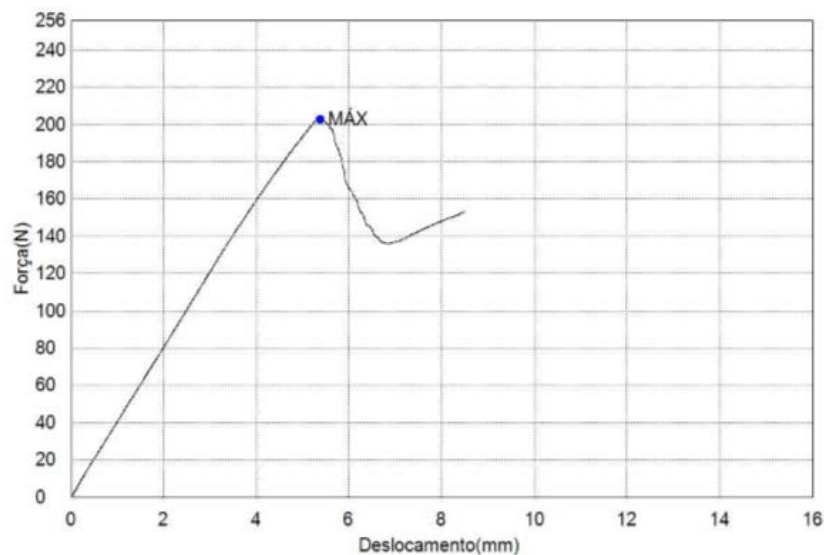


Figura 51- Curva P - δ de um ensaio

A realização dos ensaios foi levada a cabo com recurso a um sistema de apoio regulável em 3 pontos, conforme se exemplifica na Figura 52. Para além destes dois equipamentos, foi utilizado também um suporte e punção próprios para este tipo de ensaio, os provetes fabricados, uma máquina fotográfica Canon EOS 70D de 20,2 MPx, um apoio fixo, algumas placas de aço para dar estabilidade e altura suficiente à câmara para esta poder registar todos os momentos do ensaio, um cronómetro e um sistema de iluminação para melhorar a visualização do ensaio e qualidade das fotografias (Figura 52).

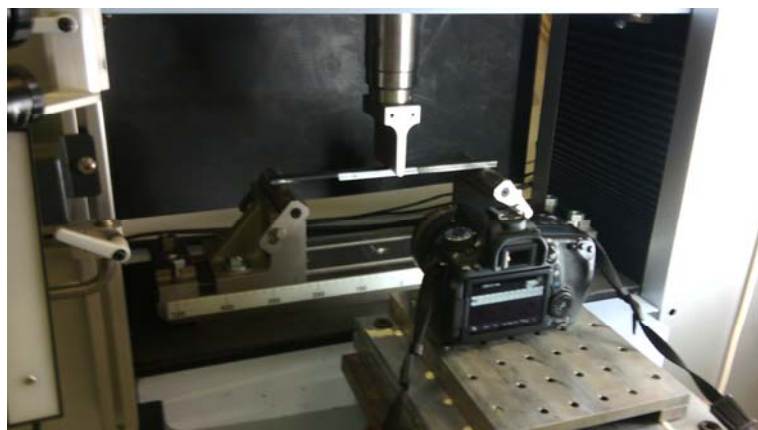


Figura 52 – Provete preparado para ensaio: posicionamento no sistema de apoio e sistema de aquisição de imagem

O posicionamento de cada provete consiste no seu alinhamento pelas linhas paralelas marcadas em ambos os apoios do ensaio, para garantir assim a perpendicularidade da força aplicada com o comprimento dos provetes. Após o provete estar alinhado, é regulada manualmente a altura do punção de carregamento, baixando este para perto do provete, onde se iniciará o ensaio, através do acionamento de um botão giratório contido na máquina de ensaio. Estando estas fases preparadas, a máquina fotográfica é posicionada para a altura e posição ideal à captura da zona a analisar, e preparado o cronómetro para se dar início ao ensaio.



Figura 53 – Fotografia durante o decorrer de um ensaio, em que o provete sai fora dos limites da imagem capturada

Para os provetes colados com adesivo Araldite[®] AV138 a velocidade de ensaio (velocidade do punção de solicitação) definida foi de 0,35 mm/min, para os colados com Araldite[®] 2015 foi de 0,8 mm/min e para os colados com SikaForce[®] 7752 de 3 mm/min. Foram consideradas velocidades de ensaios distintas devido à ductilidade marcadamente diferente dos três adesivos, por forma a conseguir executar cada teste em tempo útil e garantindo o número mínimo de dados necessário para

o tratamento dos resultados obtidos. Apesar desta diferença, considera-se que as velocidades escolhidas se enquadram na suposição de ensaios quase-estáticos, de tal forma que não haja influência de efeitos viscoelásticos. Concluída a fase anterior, é iniciado o ensaio através do computador e ao mesmo tempo iniciado o cronómetro. Durante o ensaio são tiradas fotografias com um intervalo de 5 segundos. Após se verificar que a fratura atingiu $L/2$, ou caso se dê rompimento total do adesivo precocemente, o ensaio dá-se por terminado. Há que ter atenção na mudança de provetes com diferentes adesivos, já que a câmara pode não acompanhar o ensaio todo, caso a resistência do adesivo a testar seja demasiado elevada, como aconteceu no caso do primeiro provete do adesivo SikaForce® 7752 (Figura 53).

3.3 Resultados

Nesta Secção são apresentados, analisados e comparados os dados obtidos pelos ensaios SLB dos 3 tipos de adesivo, nomeadamente no que concerne aos valores de G_I e G_{II} .

3.3.1 Adesivo Araldite® AV138

Por cada provete ensaiado foi gerada uma curva $P-\delta$ com uma taxa de aquisição de dados de 4 Hz, sendo testados 7 provetes por cada tipo de adesivo, como referido anteriormente.

Tabela 8 – Valores de carga máxima e deslocamento associado à carga máxima obtidos para cada ensaio realizado com o adesivo Araldite® AV138

# provete	Carga máxima (N)	Deslocamento de carga máxima (mm)
1	87,98	2,18
2	82,87	2,09
3	79,14	1,81
4	82,16	1,92
5	72,22	2,59
6	83,70	2,02
7	80,28	2,17
Média	81,19	2,11
Desvio padrão	4,86	0,25

Os valores de carga máxima sustentada em cada ensaio e o deslocamento associado à carga máxima dos ensaios efetuados com o adesivo Araldite® AV138 estão apresentados na Tabela 8. De acordo com os resultados obtidos na Tabela 8, pode-se verificar que existe uma boa repetibilidade de resultados obtidos, embora com um pequeno desvio na carga máxima suportada pelo provete #5, que apresentou rotura instável a uma carga inferior à carga de início de dano para os restantes provetes. Quanto ao desvio padrão verificado para os valores de carga máxima ($\approx 6\%$) e deslocamento ($\approx 12\%$) relativamente ao valor médio, podem-se verificar valores reduzidos, coerentes com a consistência dos resultados obtidos.

Na Figura 54 são apresentadas as curvas $P-\delta$ referentes aos 7 ensaios realizados para o adesivo Araldite® AV138.

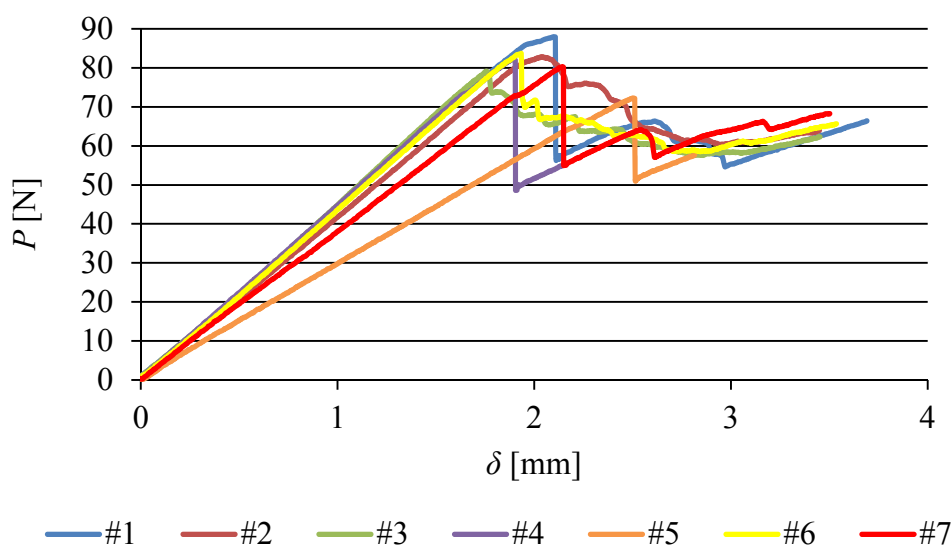


Figura 54 - Curvas $P-\delta$ relativas aos 7 provetes testados com adesivo Araldite® AV138

Excluindo os provetes #5 e #7, verifica-se que até ser atingida a carga máxima, a rigidez entre a maioria dos provetes é semelhante. As diferenças de rigidez relativas aos provetes #5 e #7 devem-se ao elevado valor de a_0 , embora tal não afete a medição dos valores de G_I e G_{II} . Analisando as curvas $P-\delta$ dos provetes #2, #3 e #6, verifica-se que, após registada a carga máxima, os valores de P decrescem de forma estável, embora com algumas oscilações na propagação. Por outro lado, os provetes #1, #4, #5 e #7 apresentam uma região inicial de propagação instável de fenda. De uma forma global, e de acordo com a queda repentina verificada após atingida a carga máxima, pode-se concluir que este adesivo tem um comportamento de rotura frágil, que resulta numa rápida propagação da fenda (que torna a medição de a mais complicada). Este tipo de comportamento indicia uma menor resistência da junta adesiva, comparando com um adesivo de rotura mais progressiva, sendo esta ainda mais comprometida na presença de defeitos [17].

3.3.2 Adesivo Araldite® 2015

São apresentados na Tabela 9 os valores registados das cargas máximas de cada ensaio aos provetes colados com o adesivo Araldite® 2015 e o deslocamento associado à respetiva carga máxima.

Tabela 9 - Valores de carga máxima e deslocamento associado à carga máxima obtidos para cada ensaio realizado com o adesivo Araldite® 2015

# provete	Carga máxima (N)	Deslocamento de carga máxima (mm)
1	202,83	5,38
2	199,48	4,99
3	181,99	4,84
4	200,78	5,41
5	203,37	5,79
6	215,59	6,06
7	226,08	6,60
Média	204,30	5,58
Desvio padrão	13,77	0,62

Verifica-se um aumento significativo na carga máxima suportada relativamente ao adesivo Araldite® AV138 em cerca de 3 vezes. A repetibilidade de resultados é semelhante à do adesivo tratado anteriormente. Apenas os valores do provete #3 se encontram um pouco abaixo dos valores médios, e os dos provetes #6 e #7 um pouco acima. Pode-se observar um aumento do deslocamento associado à carga máxima de $\approx 200\%$ relativamente ao adesivo Araldite® AV138. Relativamente aos valores médios da carga máxima e deslocamento associado, os valores do desvio padrão situam-se em $\approx 7\%$ e $\approx 11\%$, respetivamente, comparáveis aos verificados para o adesivo analisado anteriormente.

Na Figura 55 são apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas através dos ensaios realizados aos 7 provetes colados com o adesivo Araldite® 2015. Pode-se observar que os 7 provetes ensaiados apresentam uma rigidez até à carga máxima muito idêntica entre eles, não se constatando neste caso a queda repentina verificada no adesivo Araldite® AV138, logo após a carga máxima, o que leva a concluir que este adesivo apresenta um comportamento de rotura mais dúctil. O provete #3 não apresentou uma descida de P tão acentuada quanto os restantes durante a zona de propagação de fenda, o que provavelmente ocorreu devido a algum defeito na junta que propiciou a propagação prematura do dano. Apesar das curvas $P-\delta$ dos provetes #1 e #4 não apresentarem um formato semelhante às do

provete #3, é possível notar que, em todas estas, foi obtida uma propagação de fenda mais estável (após registada a carga máxima) que as registadas nos restantes provetes, onde se verificam descidas abruptas de P .

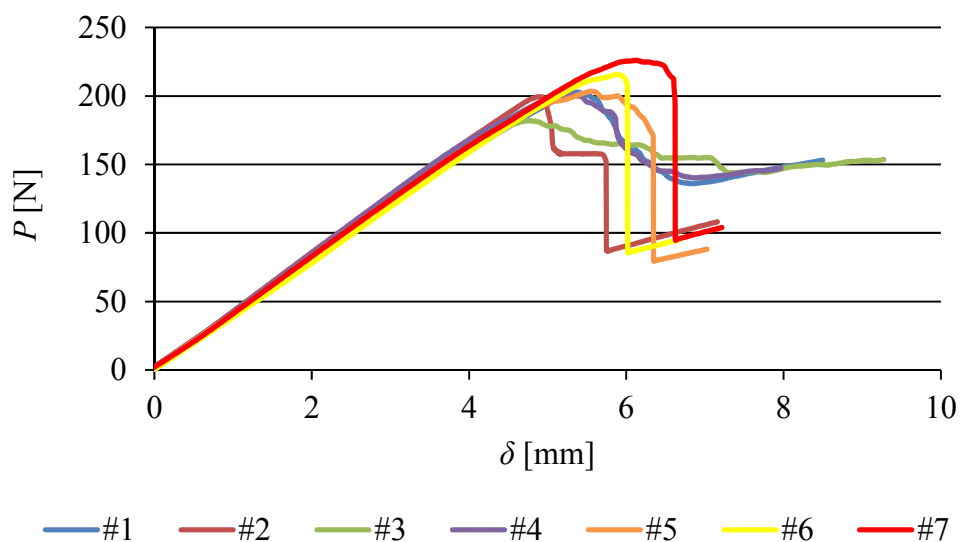


Figura 55 - Curvas P - δ relativas aos 7 provetes testados com o adesivo Araldite® 2015

3.3.3 Adesivo SikaForce® 7752

Os valores de pico da carga sustentada de cada provete colado com o adesivo SikaForce® 7752 e o seu deslocamento associado estão apresentados na Tabela 10. Analisando os valores da Tabela 10, pode-se concluir que este adesivo suportou esforços máximos superiores em cerca de 3 vezes aos esforços verificados nos provetes com adesivo Araldite® 2015. Para condições geométricas idênticas dos provetes, pode-se concluir que este é o adesivo mais resistente à fratura dos 3 adesivos analisados. Destacam-se os provetes #1 e #4 pela maior diferença de resultados quanto à carga máxima registada. Quanto ao deslocamento associado à carga máxima, observa-se um aumento superior a 400% relativamente ao adesivo Araldite® 2015. A elevada resistência e deslocamentos associados são indícios de se tratar de um adesivo dúctil. Os valores dos desvios padrão relativamente aos valores médios de carga máxima e deslocamento associado são ambos de $\approx 4,5\%$, valores ligeiramente inferiores aos verificados nos dois adesivos analisados anteriormente, e que espelham a elevada consistência e repetibilidade de resultados obtidos.

Tabela 10 - Valores de carga máxima e deslocamento associado à carga máxima obtidos para cada ensaio realizado com o adesivo SikaForce® 7752

# provete	Carga máxima (N)	Deslocamento de carga máxima (mm)
1	589,89	27,56
2	603,69	27,21
3	613,42	27,89
4	662,85	30,29
5	642,90	28,28
6	657,45	29,98
7	642,19	27,23
Média	630,34	28,35
Desvio padrão	28,06	1,28

Na Figura 56 são apresentadas as curvas P - δ obtidas pelos ensaios realizados aos 7 provetes colados com o adesivo SikaForce® 7752.

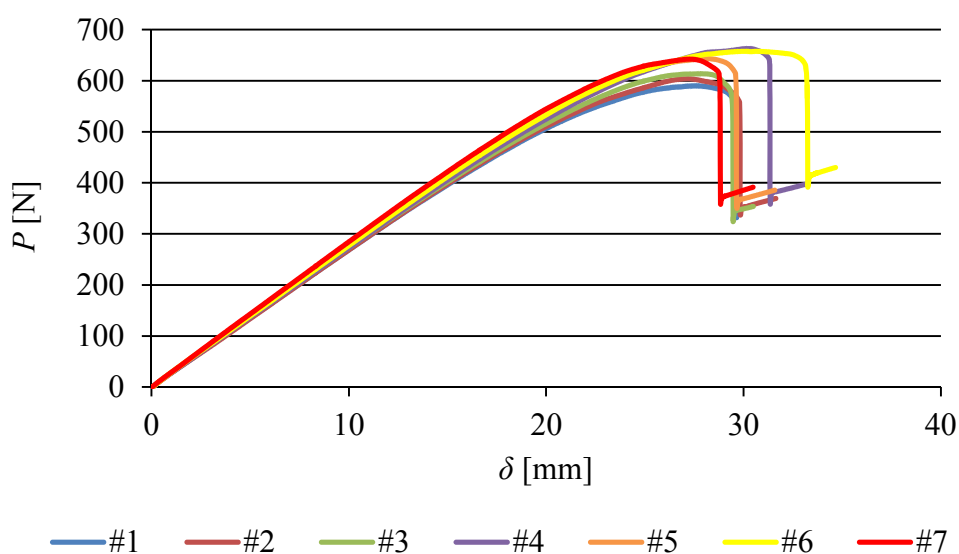


Figura 56 - Curvas P - δ relativas aos 7 provetes testados com o adesivo SikaForce® 7752

Analisando as curvas P - δ da Figura 56, observa-se uma rigidez até à carga máxima quase idêntica entre os 7 provetes e um comportamento à fratura dúctil, podendo-se notar um amaciamento progressivo da carga após atingida a carga máxima, antes da rotura abrupta da junta. Neste caso não é possível concluir que algum dos provetes tenha cedido antes do expectável, devido à forma semelhante que as curvas P - δ apresentam ao longo do ensaio e à baixa diferença percentual dos valores obtidos relativos à carga máxima.

3.4 Determinação da tenacidade à fratura

Neste capítulo são expostos, analisados e comparados os valores obtidos para a taxa de libertação de energia em modo I (G_I) e II (G_{II}) dos diversos provetes com os 3 tipos de adesivos, ensaiados pelo método SLB. Para tal, recorreu-se aos 6 métodos de avaliação mencionados anteriormente, sendo os 5 primeiros relativos a um valor de a medido com base em registos fotográficos e o método 6 relativo a a_e . Os resultados provenientes dos métodos utilizados são inicialmente apresentados sob a forma de curvas- R , que representam a evolução da taxa de libertação de energia (G_I ou G_{II}) em função do comprimento de fenda (a ou a_e). O modelo 6 (CBBM) utiliza a_e para reprodução de resultados, pelo que as curvas- R referentes a este modelo foram ajustadas manualmente no eixo correspondente a esta medida, de forma a poderem ser comparadas às demais. No decurso da análise, são mencionados os provetes que foram invalidados e referidas as razões que levaram a tal decisão, não tendo sido os resultados obtidos através dos provetes eliminados considerados a partir deste ponto da dissertação.

3.4.1 Adesivo Araldite® AV138

Os provetes #4 e #5 não foram considerados por terem cedido demasiado cedo, não permitindo assim a obtenção de dados suficientes referentes ao comprimento de fenda, que seriam processados e pelos quais seriam calculados G_I e G_{II} . Para além desse facto, o provete #5 apresentava um a_0 superior aos demais, devido a questões relacionadas com o fabrico, o que dificultou ainda mais a medição de G_I e G_{II} . O provete #6 foi invalidado por apresentar resultados não conformes com os restantes provetes, o que poderia resultar numa influência negativa da análise objetiva. Os três provetes invalidados não são então considerados nas análises subsequentes.

Os valores médios de G_I e G_{II} obtidos pelos diferentes modelos aplicados aos ensaios considerados válidos do adesivo Araldite® AV138 são apresentados na Tabela 11 e Tabela 12, respetivamente. Analisando os valores registados na Tabela 11, pode-se observar uma boa consistência de resultados, apresentando o provete #3 resultados ligeiramente inferiores aos restantes três, diferença pouco significativa, mas de certo modo previsível, devido à inferioridade constatada da carga máxima deste provete relativamente aos demais e pelo facto de a_0 não apresentar uma variação significativa entre os provetes analisados. Os desvios padrão apresentam uma baixa diferença percentual relativamente aos valores da média de G_I obtidos por cada modelo ($\approx 7\%$), o que indica uma boa consistência de resultados entre os diferentes modelos.

Tabela 11 – Valores médios e desvios padrão de G_I [N/mm], obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® AV138, utilizando os 6 modelos de cálculo

Modelo Provete #	1	2	3	4	5	6
#1	0,0545	0,0573	0,0531	0,0564	0,0581	0,0513
#2	0,0568	0,0600	0,0552	0,0590	0,0609	0,0569
#3	0,0493	0,0521	0,0479	0,0513	0,0529	0,0486
#7	0,0575	0,0604	0,0560	0,0595	0,0611	0,0541
Média	0,0545	0,0574	0,0531	0,0565	0,0582	0,0527
Desvio padrão	0,0037	0,0038	0,0036	0,0038	0,0038	0,0036

Tabela 12 - Valores médios e desvios padrão de G_{II} [N/mm], obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® AV138, utilizando os 6 modelos de cálculo

Modelo Provete #	1	2	3	4	5	6
#1	0,0399	0,0407	0,0448	0,0411	0,0411	0,0383
#2	0,0416	0,0426	0,0468	0,0430	0,0430	0,0426
#3	0,0360	0,0368	0,0404	0,0372	0,0372	0,0363
#7	0,0420	0,0429	0,0472	0,0433	0,0432	0,0405
Média	0,0399	0,0408	0,0448	0,0412	0,0411	0,0394
Desvio padrão	0,0028	0,0028	0,0031	0,0028	0,0028	0,0027

Comparando os valores médios de G_{II} da Tabela 12, verifica-se que os valores associados ao provete #3 se mantêm inferiores aos restantes provetes, tal como observado para G_I . Verifica-se que a discrepância de valores obtidos para G_{II} , entre provetes, se mantém constante à observada anteriormente para o modo I. Este facto pode ser comprovado pelos valores dos desvios padrão que, quando comparados aos valores médios, registam valores idênticos aos obtidos em G_I ($\approx 7\%$).

Quando comparados os valores médios de G do modo I com o modo II, obtidos pela maioria dos modelos, estes apresentam uma variação de $\approx 28\%$ ($\phi=40,32^\circ$), não considerando o modelo 3 cujos valores entre os dois modos estão mais próximos ($\approx 16\%$, ou seja, $\phi=42,51^\circ$). Após tratamento de dados e comparação das curvas- R obtidas para os 4 provetes colados com o adesivo Araldite® AV138, foram selecionados dois provetes que são representativos dos resultados obtidos nos ensaios válidos para este adesivo. Para o adesivo Araldite® AV138 foram selecionados os provetes #2 e #3, cujas curvas- R são apresentadas nas figuras seguintes.

Na Figura 57 são apresentadas as curvas- R de G_I obtidas pelos diferentes modelos relativos ao provete #2 colado com o adesivo Araldite® AV138.

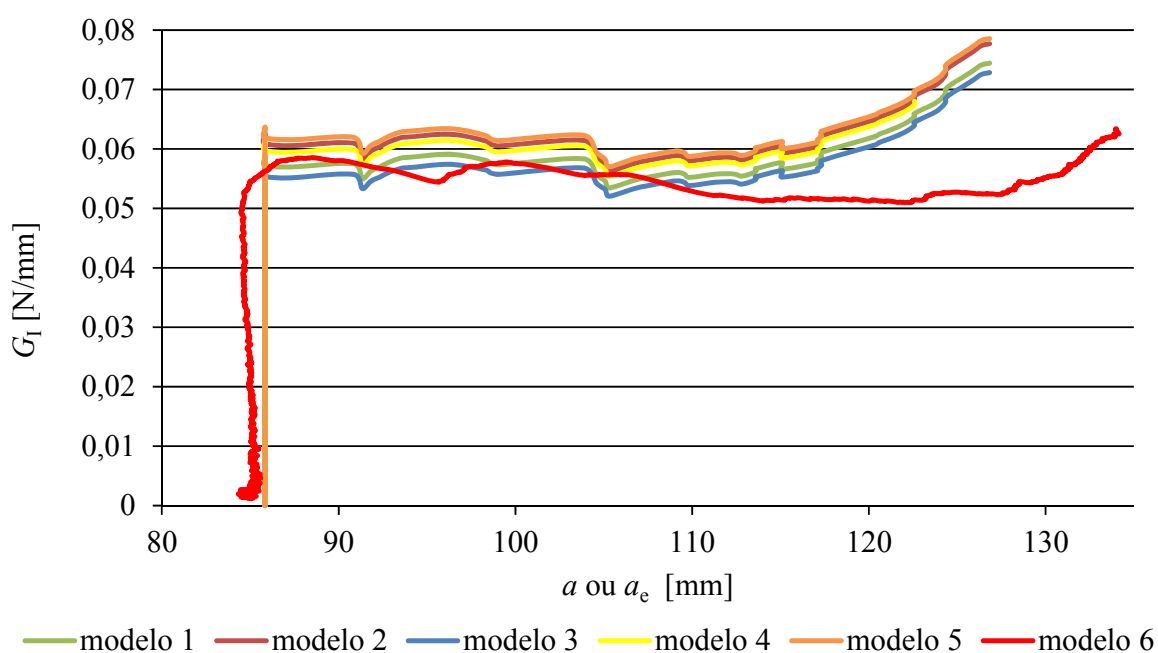


Figura 57 – Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo Araldite® AV138

De acordo com a Figura 57, pode-se verificar que as curvas obtidas pelos diferentes modelos que requerem a medição do valor de a apresentam uma evolução idêntica, embora com magnitudes de G_I ligeiramente diferentes, devido a pequenas diferenças nos fatores típicos de cada método. Quanto à curva- R gerada pelo modelo 6 (CBBM), é possível notar-se uma forma irregular numa fase inicial, ocorrência característica deste modelo. Contudo, estes valores iniciais, quer no modelo 6 quer nos outros modelos, são desprezáveis, sendo contabilizados apenas os valores a partir do momento em que a taxa de libertação de energia apresenta um patamar, indicativo da propagação da fenda. Comparando as curvas obtidas pelos 5 primeiros modelos com a curva obtida pelo modelo 6, podem-se observar algumas semelhanças quanto à forma e valor médio de G_I (diferença por defeito de $\approx 2\%$

do modelo 6 em relação aos restantes, relativa ao valor médio de G_I , considerando os valores desde o início do patamar de G_I até à subida abrupta, a partir de ≈ 115 mm). Devido à consideração da ZPF por este modelo, a curva do modelo 6 tem uma tendência a estender-se um pouco mais que os restantes modelos, relativamente ao eixo do comprimento de fenda, o que se irá verificar para todas as curvas- R obtidas. A existência de um patamar relativo aos valores de G_I e G_{II} obtido ao longo do desenvolvimento da fenda, indicia uma propagação com rácio de modos constante.

As curvas- R de G_{II} relativas ao mesmo provete são apresentadas na Figura 58.

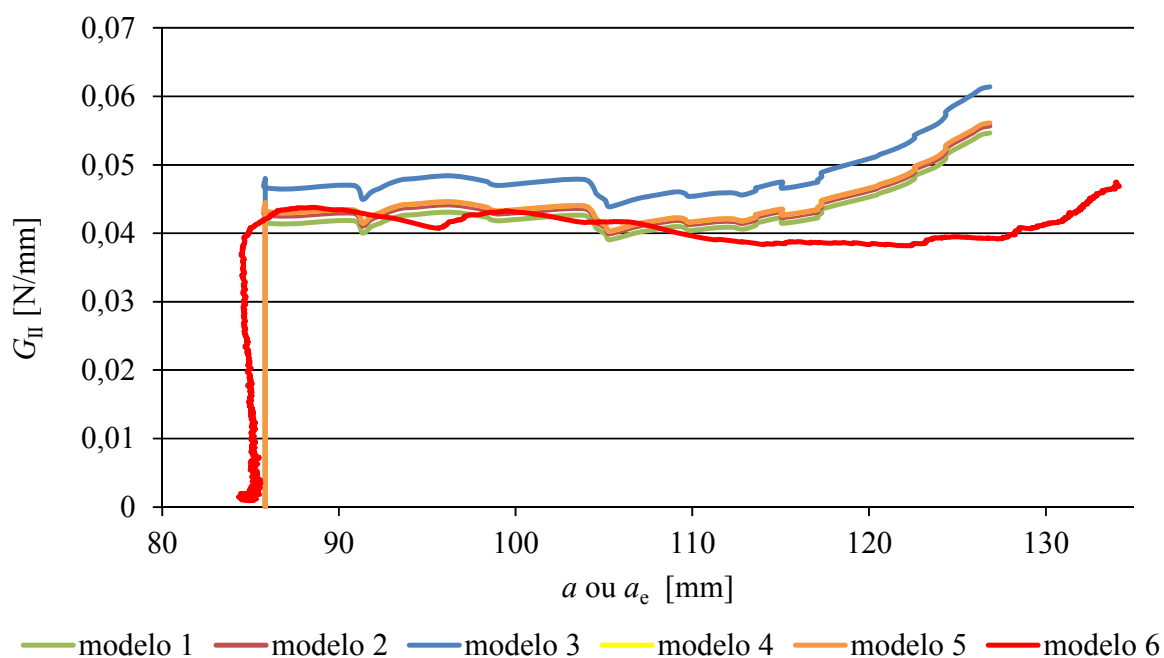


Figura 58 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo Araldite® AV138

Analisando a Figura 58, podem-se aferir conclusões análogas às retiradas para a Figura 57 quanto à forma das curvas- R e extensão do modelo 6. Porém, neste caso os valores médios de G_{II} obtidos pelos diferentes modelos, à exceção do modelo 3, encontram-se mais aproximados (menor variância), peculiaridade resultante da semelhança ou mesmo igualdade das expressões que os diferentes modelos utilizam para o cálculo de G_{II} . É de notar que, considerando os modelos com resultados mais próximos (excluindo os modelos 3 e 6), os valores médios de G_{II} diminuiram em média $\approx 28\%$ ($\phi=40,32^\circ$) relativamente aos valores de G_I . No entanto, isto não se verifica considerando apenas o modelo 3, cuja formulação matemática é um pouco distinta da generalidade dos restantes modelos, o que leva à aproximação de resultados entre G_I e G_{II} (diferenciando apenas 16% , ou seja, $\phi=42,51^\circ$). Isolando o modelo 6 é possível verificar uma diferença entre valores médios de G_I e G_{II} de $\approx 25\%$, ou seja, $\phi=40,89^\circ$ (que não causa alteração significativa ao valor médio de $\approx 28\%$, referente à análise

global), destacando-se este modelo também pelos valores médios de G (em ambos os modos) inferiores aos dos restantes modelos. A diferença percentual dos valores médios de G_{II} obtidos pelos modelos que utilizam a relativamente ao modelo que utiliza a_e é de $\approx 2\%$, idêntico a G_I , tendo sido os valores utilizados para aferir tal resultado retirados no mesmo intervalo de comprimento de fenda.

Na Figura 59 são apresentadas as curvas- R de G_I obtidas para o provete #3 colado com o adesivo Araldite® AV138, através dos diferentes modelos.

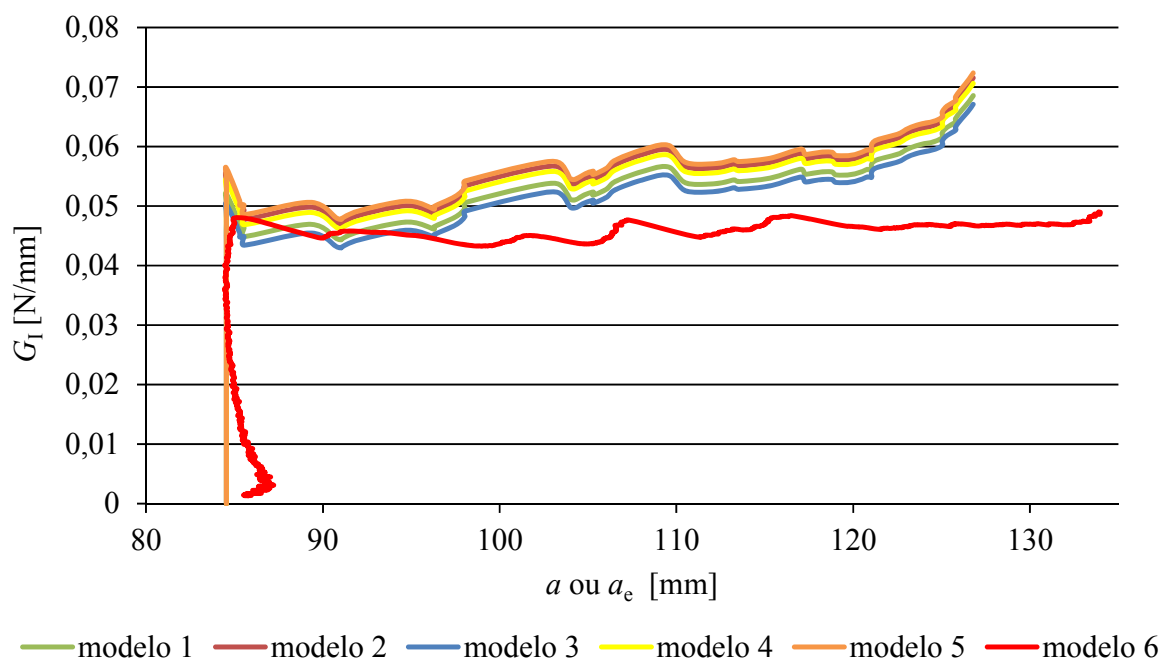


Figura 59 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® AV138

Através das curvas- R de G_I do provete #3, explícitas na Figura 59, verificam-se certas semelhanças entre os modelos que requerem a medição de a e o que utiliza a_e , já analisadas no provete anterior (sendo o valor de G_I médio obtido pelo modelo 6 agora $\approx 4\%$ inferior ao valor médio obtido através dos restantes modelos, considerando apenas a extensão de a na qual se observa um valor de patamar de G_I). Porém, a partir de um dado valor de a , a evolução do modelo 6 toma a forma de patamar, enquanto nos restantes modelos os valores de G_I apresentam valores ligeiramente crescentes com a progressão do dano. Esta ocorrência deveu-se provavelmente ao comportamento que o provete apresentou após a carga máxima, comportamento este analisado anteriormente através da sua curva $P-\delta$ (Figura 54) e que, como constatado pelos resultados dos valores médios, não teve influência no resultado final. Comparando as curvas- R de G_I da Figura 59 com as curvas- R de G_I do provete anterior (Figura 57), pode-se constatar uma descida geral ($\approx 9\%$), que de certo modo se podia prever

devido à diferença de cargas máximas suportadas entre os dois provetes, já que não há uma variação significativa de a_0 entre ambos.

Na Figura 60 apresentam-se as curvas- R de G_{II} obtidas pelos diferentes modelos em relação ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® AV138.

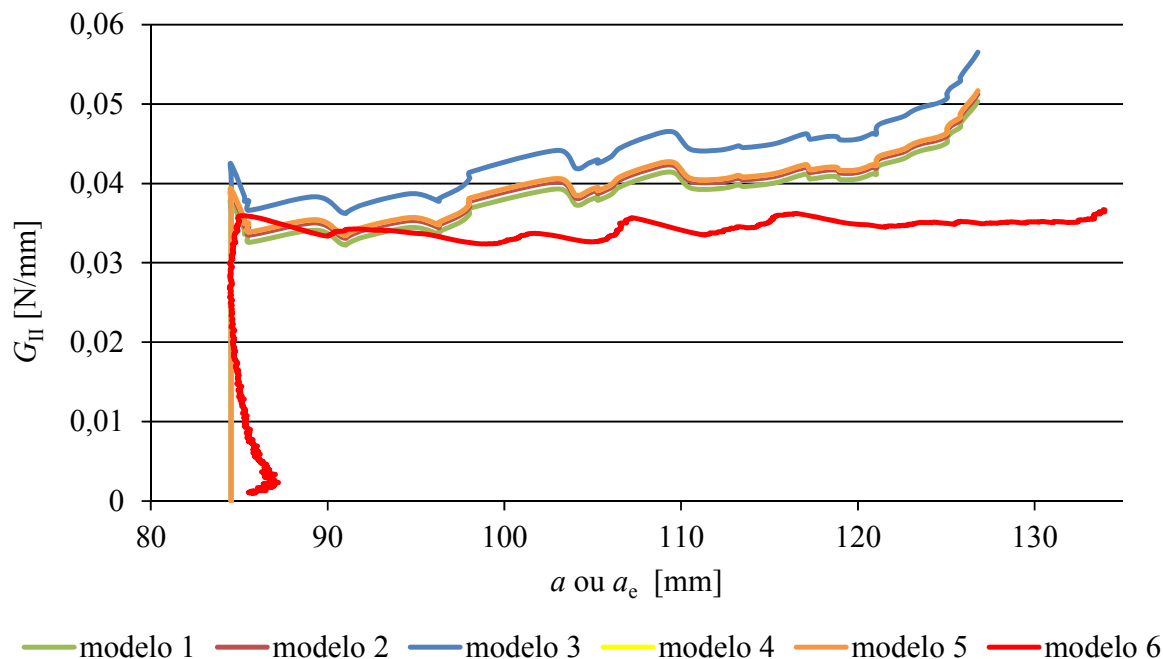


Figura 60 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® AV138

Na Figura 60 pode-se verificar uma conjugação de alguns aspetos já mencionados anteriormente, como a semelhança dos valores de G_{II} entre os modelos que requerem a medição do valor de a , excluindo o modelo 3, devido às diferenças na expressão matemática inerente ao método; a evolução crescente, a partir de certo momento do ensaio, dos valores de G_{II} dados pelos modelos que utilizam a relativamente ao modelo que utiliza a_e (já analisada na Figura 59); e a extensão de a_e do modelo 6 (CBBM) relativamente aos outros modelos.

A diferença dos valores médios de G_{II} obtidos pelos modelos que requerem a medição de a comparativamente ao modelo que utiliza a_e é de $\approx 3\%$, considerando a mesma extensão utilizada quando analisadas as curvas- R de G_I (apenas a zona de patamar). Relativamente aos valores médios de G_{II} do provete #2 (Figura 58), os valores de G_{II} do provete #3 diminuíram em cerca de $\approx 10\%$, à semelhança da redução de $\approx 9\%$ verificada em modo I. Comparando os valores médios de G_I com os

valores médios de G_{II} obtidos para este provete, verifica-se que a proporção entre modos se mantém constante relativamente ao provete #2 (analisado anteriormente).

Na Figura 61 são apresentados os valores médios e respetivos desvios padrão de G_I e G_{II} (utilizando os 6 modelos considerados) obtidos através dos provetes validados com o adesivo Araldite® AV138.

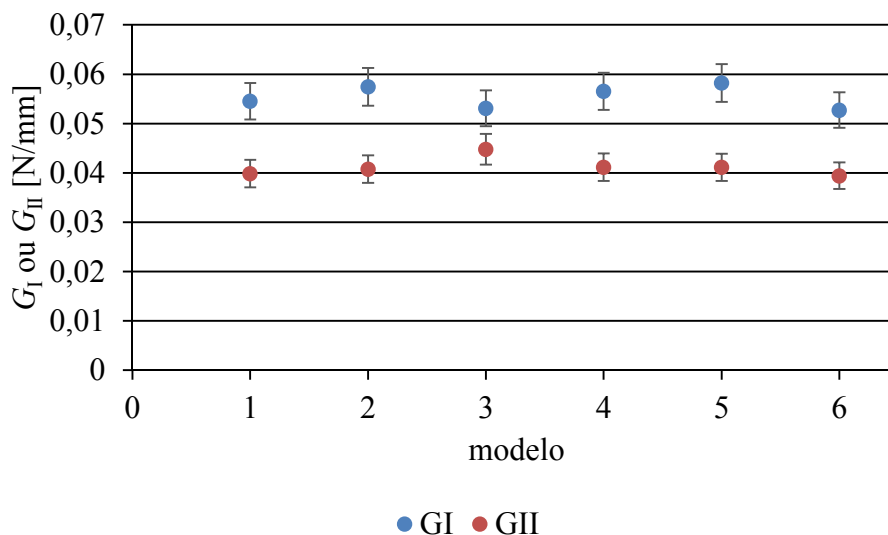


Figura 61 – Valores médios e desvios padrão de G_I e G_{II} calculados através dos valores de patamar dos ensaios validados relativos ao adesivo Araldite® AV138

Através da Figura 61 podem-se confirmar certas observações extraídas das análises anteriores, como a aproximação de valores entre G_I e G_{II} do modelo 3 e uma maior conformidade entre os valores de G_{II} obtidos com recurso aos diferentes modelos, relativamente aos valores de G_I . O modelo 6 destaca-se por apresentar valores ligeiramente por defeito em comparação com os demais (diferença até $\approx 4\%$), como já inferido anteriormente. Numa análise global, pode-se observar uma boa repetibilidade de resultados entre os diversos modelos, encontrando-se o modelo 3 um pouco à parte da média, mesmo em relação ao modelo CBBM. Os valores médios dos desvios padrão de ambos os modos são pouco significativos ($\approx 7\%$ do valor médio de G).

3.4.2 Adesivo Araldite® 2015

Neste caso, apenas o provete #7 foi considerado inválido, devido à discrepância de resultados obtidos comparativamente aos outros provetes ensaiados com este adesivo, não se considerando assim a partir daqui os resultados provenientes deste.

Os valores médios e desvios padrão de G_I e G_{II} , obtidos através dos diferentes modelos aplicados aos ensaios validados do adesivo Araldite® 2015, são apresentados na Tabela 13 e Tabela 14,

respetivamente. De acordo com os resultados demonstrados na Tabela 13 podem-se observar valores médios ligeiramente inferiores para o provete #2, relativamente aos dos restantes provetes. Por excesso destaca-se o provete #6 que, para além de apresentar os maiores valores médios de G_I em todos os modelos, relativamente aos outros provetes, é o único provete em que o valor médio obtido pelo modelo 6 ultrapassa grande parte dos restantes modelos. Os valores médios de G_I , comparativamente aos valores médios obtidos no adesivo analisado anteriormente, aumentaram em cerca de 6,5 vezes, o que se traduz numa tenacidade à tração muito superior do adesivo Araldite® 2015 em relação ao Araldite® AV138. Observa-se um ligeiro aumento percentual do desvio padrão (em relação ao valor da média), comparativamente à diferença registada no adesivo Araldite® AV138, sendo neste caso de $\approx 10\%$ para os modelos que utilizam a e de $\approx 12\%$ para o modelo CBBM.

Tabela 13 - Valores médios e desvios padrão de G_I , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® 2015 utilizando os 6 modelos de cálculo

Modelo	1	2	3	4	5	6
Provete #						
#1	0,3319	0,3480	0,3240	0,3431	0,3525	0,3224
#2	0,3126	0,3304	0,3037	0,3248	0,3353	0,3067
#3	0,3354	0,3528	0,3267	0,3474	0,3576	0,3319
#4	0,3515	0,3695	0,3426	0,3639	0,3745	0,3441
#5	0,3868	0,4089	0,3756	0,4020	0,4151	0,3688
#6	0,4012	0,4255	0,3889	0,4179	0,4322	0,4276
Média	0,3532	0,3725	0,3436	0,3665	0,3779	0,3502
Desvio padrão	0,0342	0,0372	0,0327	0,0362	0,0380	0,0433

A Tabela 14 mostra que os valores de G_{II} obtidos através dos diferentes modelos para os provetes #2 e #6 mantêm as mesmas características referidas em G_I (representando os extremos da Tabela 14). A superioridade de valores do modelo 6 aplicado ao provete #6 (já verificada para G_I), mantém-se para G_{II} , relativamente à maioria dos restantes modelos aplicados ao mesmo provete. Os valores médios dos desvios padrão em relação à média de G_{II} mantêm-se coerentes quando comparados com os obtidos em G_I , de $\approx 10\%$ para os modelos que utilizam a e de $\approx 12\%$ para o modelo que utiliza a_e .

Relativamente aos valores médios de G_{II} obtidos por cada modelo, verifica-se um aumento de $\approx 6,5$ vezes em relação ao adesivo Araldite® AV138, superioridade que se manteve idêntica à analisada na comparação de G_I entre os dois adesivos. A variação de valores de G entre os dois modos, obtida pelos diversos modelos, é de $\approx 28\%$ ($\phi=40,32^\circ$) para este adesivo, onde apenas se exclui o modelo 3, cuja diferença percentual entre ambos os modos é de apenas 16% ($\phi=42,51^\circ$). Esta relação entre modos mantém-se constante à analisada no adesivo Araldite® AV138.

Tabela 14 - Valores médios e desvios padrão de G_{II} , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo Araldite® 2015 utilizando os 6 modelos de cálculo

Modelo Provete #	1	2	3	4	5	6
#1	0,2430	0,2480	0,2730	0,2502	0,2503	0,2412
#2	0,2278	0,2334	0,2559	0,2358	0,2358	0,2294
#3	0,2451	0,2505	0,2753	0,2529	0,2529	0,2485
#4	0,2569	0,2626	0,2886	0,2650	0,2651	0,2574
#5	0,2817	0,2887	0,3165	0,2917	0,2918	0,2759
#6	0,2917	0,2993	0,3277	0,3026	0,3027	0,3198
Média	0,2577	0,2638	0,2895	0,2664	0,2664	0,2620
Desvio padrão	0,0245	0,0254	0,0275	0,0258	0,0259	0,0324

Após análise das curvas- R geradas pelos diferentes modelos para os 6 provetes com o adesivo Araldite® 2015, foram selecionados dois provetes que são representativos dos resultados obtidos através dos ensaios válidos para este adesivo. Para o adesivo Araldite® 2015 foram selecionados os provetes #3 e #4, cujas curvas- R são analisadas seguidamente.

Na Figura 62 são apresentadas as curvas- R de G_I dos diferentes modelos, para o ensaio realizado ao provete #3 colado com adesivo Araldite® 2015. Podem-se observar curvas- R com formas bastante semelhantes entre todos os modelos, embora o modelo 6 apresente uma extensão superior aos restantes, pelos motivos já apresentados. Relativamente ao adesivo Araldite® AV138, observa-se um aumento significativo do valor médio de G_I ($\approx 6,5$ vezes, já analisado na discussão da Tabela 13) e

uma disparidade de valores médios semelhante entre os modelos que usam a e o que usa a_e ($\approx 4\%$). As curvas- R relativas ao modo II do provete em análise estão apresentadas na Figura 63.

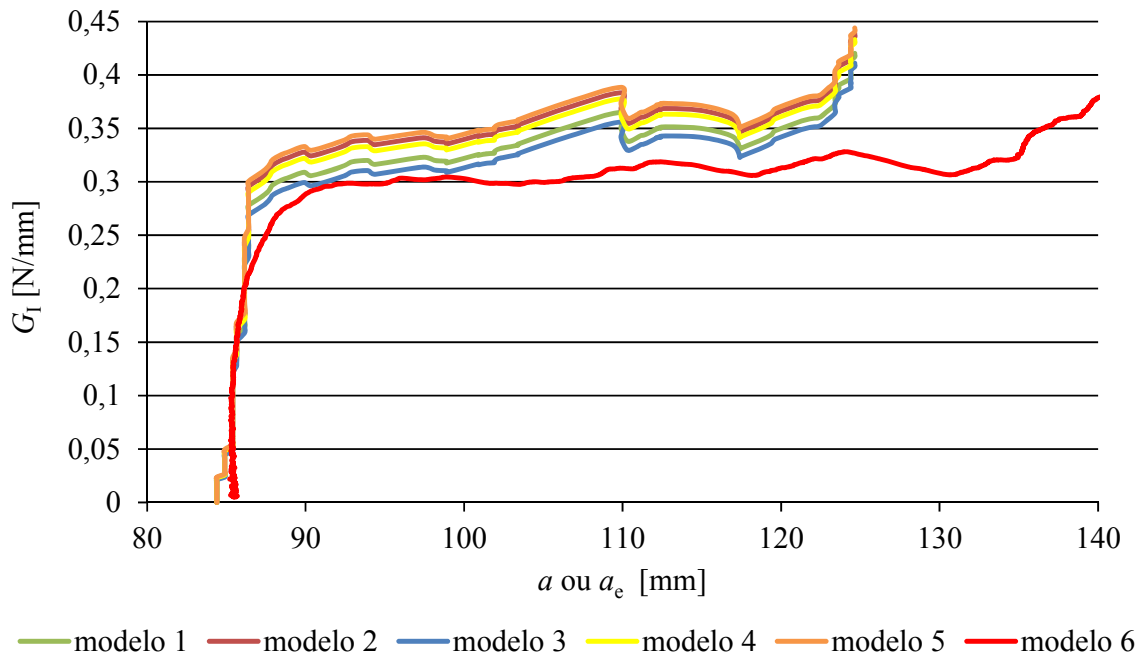


Figura 62 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® 2015

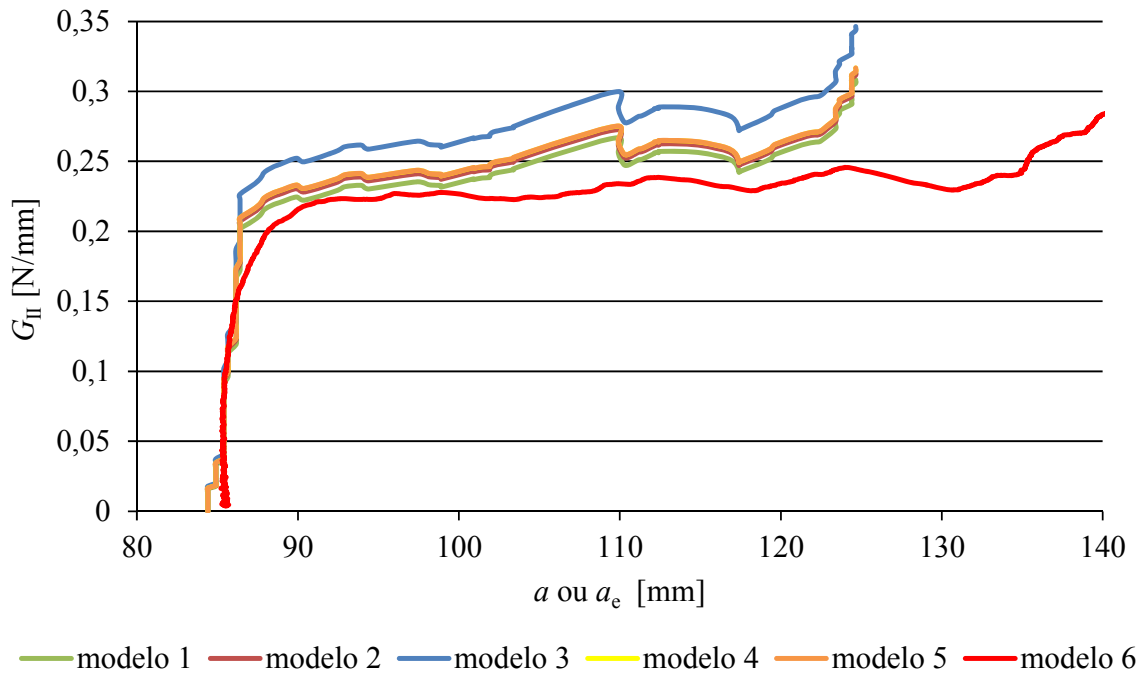


Figura 63 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 colado com o adesivo Araldite® 2015

Analisando a Figura 63 relativa às curvas- R de G_{II} obtidas para o provete em análise, podem-se tirar conclusões semelhantes às mencionadas para G_I do mesmo provete quanto à forma das curvas e extensão de a_e . Estas curvas podem ser também comparadas com as curvas- R de G_{II} da Figura 60 (referentes ao provete #3 com adesivo Araldite® AV138), em que pode ser também verificada a aproximação dos valores de G_{II} entre a maioria dos modelos (à exceção do modelo 3 e 6), mais notada neste modo.

Comparando o valor médio de G_{II} obtido pelas curvas- R entre os modelos que utilizam a e os modelos que utilizam a_e , verifica-se uma variação de $\approx 3\%$, resultado que está de acordo com os anteriormente apresentados. A diferença entre os valores de G_{II} deste adesivo relativamente aos valores de G_{II} obtidos para o adesivo Araldite® AV138 é de $\approx 6,5$ vezes, mantendo-se a diferença de G_I calculada anteriormente durante a análise global de resultados, onde foram comparados os resultados de todos os provetes.

As curvas- R de G_I obtidas pelos diferentes modelos e relativas ao provete #4 com adesivo Araldite® 2015 estão apresentadas na Figura 64.

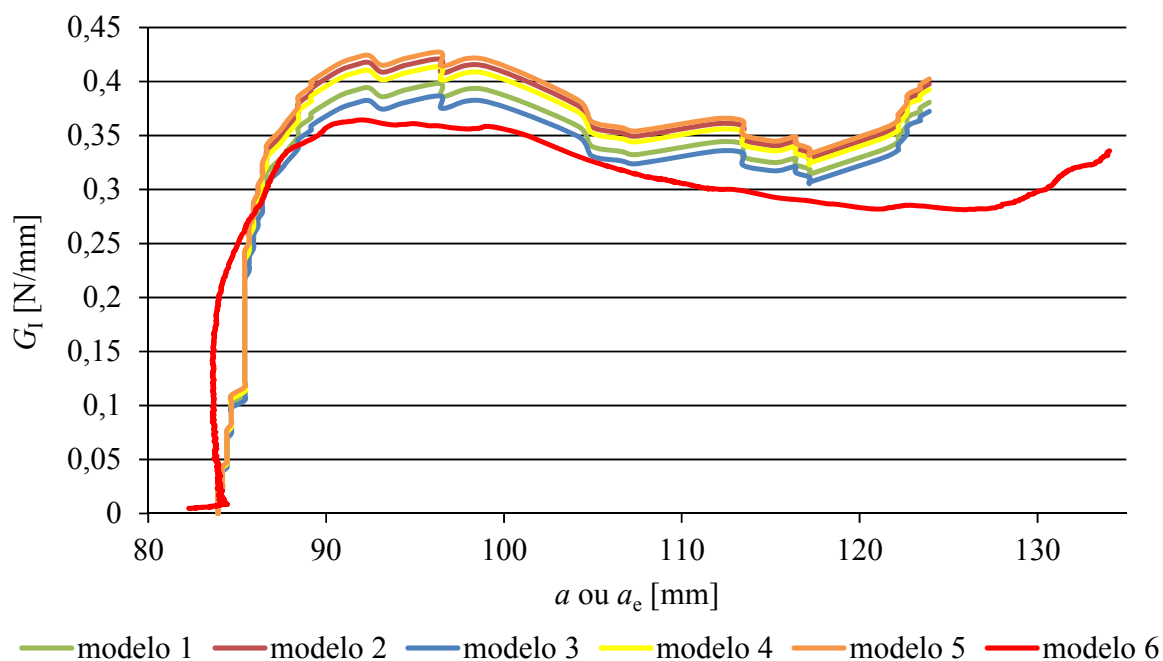


Figura 64 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #4 colado com o adesivo Araldite® 2015

Comparando as curvas- R de G_I apresentadas na Figura 64 com as curvas- R de G_I da Figura 62, referentes ao provete analisado anteriormente com o mesmo adesivo, verifica-se que o distanciamento do modelo 6 relativamente aos restantes modelos se mantém idêntico durante toda a

fase de propagação da fenda. A diferença de valores de G_I entre o modelo 6 e o valor médio dos restantes modelos encontra-se na ordem dos $\approx 5\%$, semelhante à do provete #3 de $\approx 4\%$. Os valores médios de G_I obtidos para este provete são superiores em cerca de $\approx 5\%$ relativamente aos valores médios de G_I obtidos para o provete #3 com o mesmo adesivo, diferença muito pouco significativa, mas de certo modo previsível, quando analisadas as cargas máximas suportadas, tendo em conta que o a_0 de ambos os provetes apresentava valores muito semelhantes. Para além das semelhanças já discutidas, poderão outras ser analisadas através da comparação destas curvas- R com as curvas- R até aqui apresentadas, como a extensão de a_e e as semelhanças da forma entre os diferentes modelos de obtenção de G .

Na Figura 65 encontram-se as curvas- R em modo II relativas ao provete em análise.

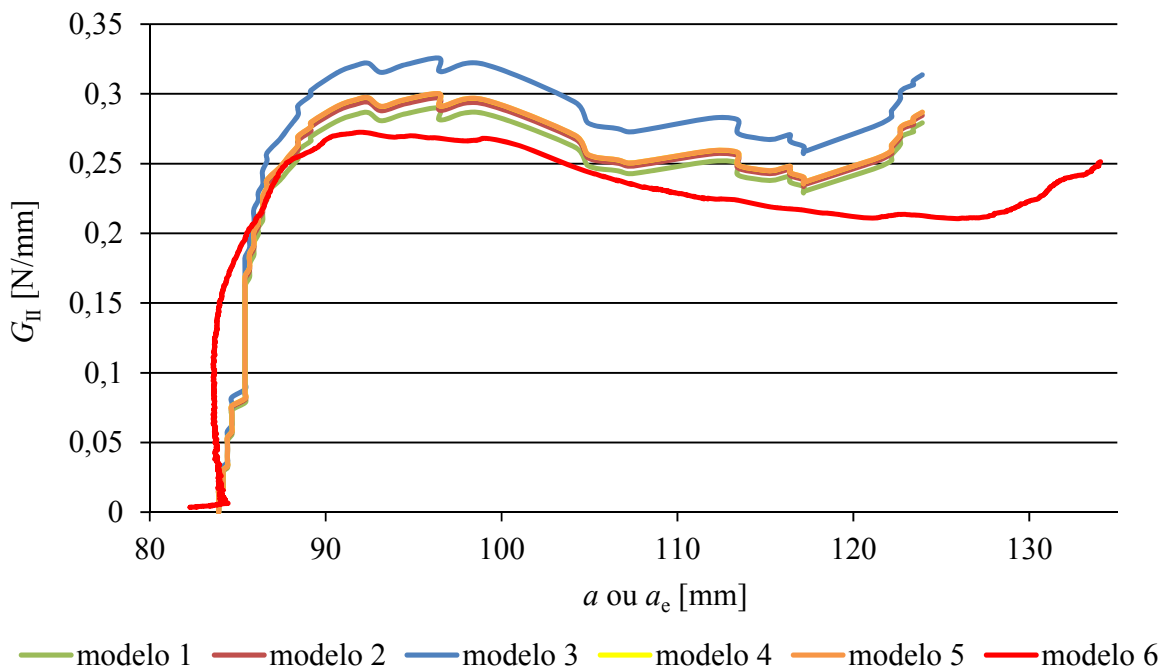


Figura 65 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #4 colado com o adesivo Araldite® 2015

Analisando a Figura 65 pode-se observar um comportamento semelhante às curvas- R discutidas anteriormente, sendo de realçar a forma entre o modelo 6 e os restantes, embora se mantenha a extensão superior da região de propagação do modelo 6 relativamente aos restantes. Por outro lado, analisando as curvas- R do modo II até aqui apresentadas, pode-se verificar a consistência de certas características deste modo de carregamento, como a aproximação dos valores de G_{II} entre a maioria dos modelos, à parte do modelo 3, que se distancia relativamente aos restantes e que tende em diminuir a proporção entre modos. O valor de patamar inferior do modelo CBBM relativamente aos

modelos que necessitam da medição do valor de a mantém-se, apesar de não ser uma diferença muito notável ($\approx 4\%$, e de apenas $\approx 2\%$ quando excluído o modelo 3 dessa análise).

Comparando os valores médios de G_{II} obtidos por cada modelo entre os 2 provetes analisados para este adesivo, verifica-se uma diferença média de $\approx 5\%$, a mesma diferença percentual constatada para o modo I. Conclui-se desta observação que a diferença percentual entre modos é mantida (no caso dos ensaios em modo misto), devido à invariância da proporção de modos (ϕ).

Na Figura 66 são apresentados os valores médios de G_I e G_{II} (utilizando os 6 modelos considerados), obtidos pelos provetes validados com o adesivo Araldite[®] 2015 e respetivos desvios padrão.

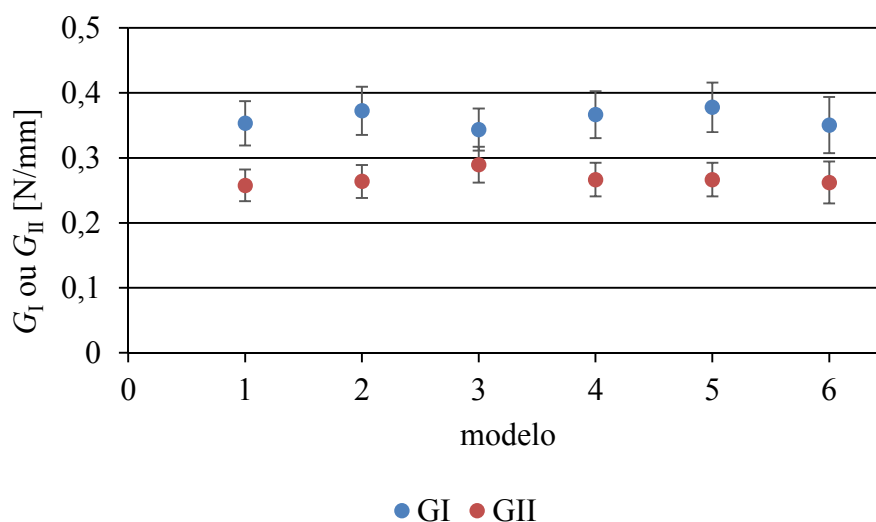


Figura 66 - Valores médios e desvios padrão de G_I e G_{II} calculados através dos valores de patamar dos ensaios validados relativos ao adesivo Araldite[®] 2015

Através da análise da Figura 66 observa-se um aumento dos valores dos desvios padrão respeitantes ao valor da média de G , relativamente aos valores registados para o adesivo Araldite[®] AV138 (sendo a agora a diferença percentual de $\approx 10\%$ para os modelos de a e de $\approx 12\%$ para o modelo CBBM). Este aumento leva a que, no modelo 3, com valores de G_I e G_{II} mais próximos, haja a sobreposição de desvios padrão. Apesar desta discrepância, a concordância de resultados obtidos pelos diferentes modelos é bastante boa. É possível verificar também valores médios de G em ambos os modos inferiores pelo modelo 6 relativamente aos restantes modelos, diferença essa bastante reduzida mas notada principalmente no modo I ($\approx 3\%$ para o modo I e $\approx 2\%$ para o modo II). Para além dos factos mencionados, a diferença notada entre os dois modos de G do modelo 3 continua a destacar-se por defeito em relação aos restantes modelos ($\approx 16\%$ em relação aos $\approx 28\%$). O valor médio de G_I deste modelo representa um dos valores inferiores (a par do modelo 6), e G_{II} um dos superiores.

3.4.3 Adesivo SikaForce® 7752

O provete #1 do adesivo SikaForce® 7752 foi invalidado porque a posição do sistema de aquisição de imagem, definida inicialmente, não era a adequada para acompanhar na totalidade a deformação da junta facultada por este adesivo, o que impossibilitou a medição de a num segmento crucial do ensaio (como ficou patente na Figura 53). O provete #6 não foi considerado porque os valores de G_I e G_{II} se distanciavam bastante da média de resultados obtidos nos outros provetes com adesivo SikaForce® 7752. Os resultados obtidos pelos ensaios aos dois provetes invalidados não são considerados a partir deste ponto.

Os valores médios de G_I e G_{II} obtidos através dos diferentes modelos aplicados aos ensaios validados do adesivo SikaForce® 7752 são apresentados na Tabela 15 e Tabela 16, respetivamente.

Tabela 15 - Valores médios e desvios padrão de G_I , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo SikaForce® 7752 utilizando os 6 modelos de cálculo

Modelo	1	2	3	4	5	6
Provete #						
#2	4,4949	4,7311	4,3772	4,6577	4,7963	4,8595
#3	4,0218	4,2301	3,9182	4,1655	4,2876	4,5475
#4	4,1542	4,3863	4,0379	4,3140	4,4506	4,5888
#5	4,4795	4,7275	4,3552	4,6503	4,7962	4,9976
#7	4,3932	4,6200	4,2804	4,5496	4,6826	5,0002
Média	4,3087	4,5390	4,1938	4,4674	4,6027	4,7987
Desvio padrão	0,2104	0,2223	0,2046	0,2186	0,2257	0,2185

Analisando os dados da Tabela 15 pode-se verificar que o provete #3 apresenta valores médios de G_I ligeiramente inferiores aos dos restantes provetes, ao contrário dos provetes #2 e #5. Estas diferenças não são tão perceptíveis como nos adesivos analisados anteriormente, como se pode comprovar através dos baixos valores dos desvios padrão relativamente aos valores da média de $\approx 5\%$, que neste caso são semelhantes para todos os modelos. Relativamente aos valores médios de G_I obtidos para o adesivo Araldite® 2015, verifica-se um aumento superior a 12,2 vezes ($\approx 13,7$ vezes quando

comparado o modelo CBBM), podendo-se concluir que o SikaForce[®] 7752 é o adesivo mais resistente à fratura em modo I dentro da gama analisada.

É de notar que, para todos os provetes ensaiados com este adesivo, os valores médios de G_I estimados pelo modelo CBBM são superiores em cerca de $\approx 8\%$ aos valores obtidos por qualquer outro modelo, relativamente a este modo. Esta diferença, superior à verificada nos adesivos analisados anteriormente, deve-se possivelmente ao aumento da área afetada pela ZPF (sendo este o adesivo mais dúctil ensaiado). De facto, é possível que os modelos baseados na medição de a não contabilizem com precisão a ductilidade deste adesivo.

Tabela 16 - Valores médios e desvios padrão de G_{II} , obtidos com os ensaios realizados ao adesivo SikaForce[®] 7752 utilizando os 6 modelos de cálculo

Modelo	1	2	3	4	5	6
Provete #						
#2	3,2829	3,3572	3,6881	3,3891	3,3901	3,6386
#3	2,9386	3,0041	3,3013	3,0323	3,0331	3,4057
#4	3,0284	3,1015	3,4022	3,1330	3,1339	3,4350
#5	3,2664	3,3445	3,6696	3,3781	3,3791	3,7417
#7	3,2103	3,2816	3,6065	3,3122	3,3132	3,7436
Média	3,1453	3,2178	3,5335	3,2490	3,2499	3,5929
Desvio padrão	0,1535	0,1571	0,1724	0,1587	0,1588	0,1635

Ao comparar os valores da Tabela 16 com os da Tabela 15, podem-se retirar conclusões idênticas às inferidas anteriormente para o modo I. As semelhanças com o modo I dizem respeito aos provetes que apresentam o maior desvio, valores de desvios padrão relativos à média de G_{II} e a superioridade dos valores de G_{II} obtidos pelo modelo CBBM em relação aos outros modelos. Em relação aos valores médios de G_{II} do adesivo Araldite[®] 2015 apresentados na Tabela 14, os valores médios de G_{II} do adesivo SikaForce[®] 7752 mantêm o aumento verificado para G_I (superior a 12,2 vezes quando comparados com os modelos que utilizam a e $\approx 13,7$ vezes quando comparados com o modelo de a_e). Para este modo, constata-se uma variação de $\approx 9\%$ entre os valores médios de G_{II} obtidos pelos modelos que utilizam a e o modelo de a_e , podendo-se aferir as mesmas conclusões referidas anteriormente para G_I .

A diferença percentual entre os valores médios de G_I e G_{II} (proporção entre modos) para o adesivo SikaForce® 7752 é igual às diferenças anteriormente analisadas para os restantes adesivos: $\approx 16\%$ ($\phi=42,51^\circ$) para o modelo 3, $\approx 25\%$ ($\phi=40,89^\circ$) para o modelo 6 e $\approx 28\%$ ($\phi=40,32^\circ$) para os restantes. Através deste facto, poderá concluir-se que a proporção entre modos I e II depende apenas das expressões matemáticas utilizadas por cada modelo, e não das propriedades dos adesivos, partindo do princípio que todas as condições geométricas são inalteradas. Comparando de forma crítica as curvas- R obtidas pelos diferentes modelos aplicados aos 5 ensaios válidos com o adesivo SikaForce® 7752, foram seleccionados dois provetes que são representativos dos resultados obtidos nos ensaios deste adesivo. Para o adesivo SikaForce® 7752 foram seleccionados os provetes #2 e #5, cujas curvas- R são analisadas seguidamente.

Na Figura 67 estão representadas as curvas- R de G_I referentes ao ensaio realizado ao provete #2 com adesivo SikaForce® 7752, obtidas através dos diferentes modelos em análise.

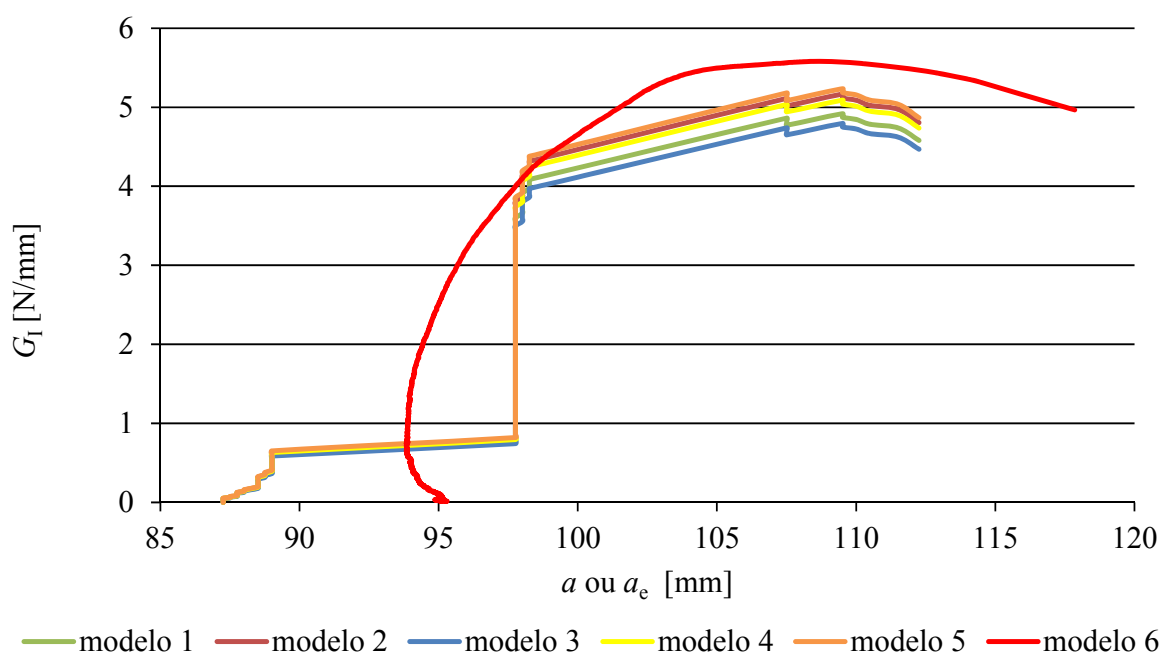


Figura 67 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo SikaForce® 7752

Pela análise da Figura 67 verifica-se que as curvas- R obtidas pelos vários modelos têm um formato algo distinto, relativamente às curvas dos adesivos já analisados. De facto, tanto na Figura 67 como nas seguintes, observa-se um aumento mais gradual de G_I ou G_{II} até ao valor correspondente à propagação da fenda, que por sua vez não apresenta um patamar tão definido, onde não se consegue tão facilmente, em relação aos outros adesivos, extrair um valor médio. Para este adesivo, as curvas apresentam valores crescentes de G_I ou G_{II} , onde a média dos valores respetivos foi retirada em torno

do valor de pico. Considera-se que este comportamento está relacionado com a ductilidade do adesivo em causa. Por outro lado, a ausência de um patamar bem definido está relacionada com a extensão considerável da ZPF, que é afetada pelo cilindro de carregamento e assim induz a medição de valores crescentes de G_I ou G_{II} à medida que a fenda cresce. Comparando os valores médios de G_I obtidos pelo ensaio a este provete, pode-se verificar um aumento muito significativo ($\approx 12,2$ vezes, e $\approx 13,7$ vezes quando comparado apenas o modelo CBBM) em relação ao adesivo Araldite[®] 2015, diferença de certo modo esperada em função das cargas máximas registadas.

Quando comparados os valores de G_I obtidos por este ensaio, entre os modelos que necessitam da medição de a e o modelo CBBM, é obtida uma diferença percentual de $\approx 5\%$, estando neste caso o modelo CBBM num patamar superior. Esta variação é oposta à observada para os adesivos analisados anteriormente, podendo esta diferença de valores estar relacionada com a ductilidade acentuada do adesivo em análise, o que faz os métodos baseados na medição de a preverem G_I por defeito, por não contabilizarem de forma correta os efeitos da plasticidade [54]. Também existe a possibilidade de, devido à extensão da zona plástica à frente da fenda deste adesivo, esta ser afetada pelo punção de carregamento, o que pode induzir valores medidos de G_I e G_{II} superiores aos reais.

As curvas- R de G_{II} relativas ao provete #2 colado com o adesivo SikaForce[®] 7752 e obtidas pelos diversos modelos, estão apresentadas na Figura 68.

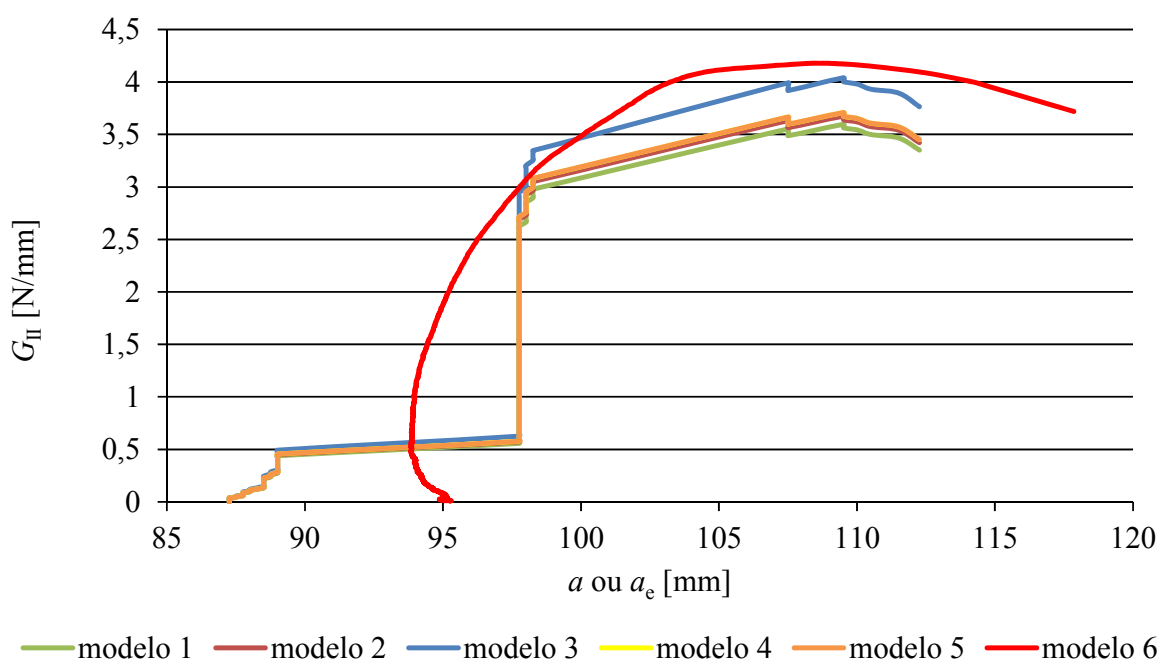


Figura 68 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #2 colado com o adesivo SikaForce[®] 7752

Através das curvas- R apresentadas na Figura 68 podem retirar-se conclusões análogas às retiradas nas curvas dos adesivos anteriormente analisados, apesar da diferença de forma destas quando comparadas às dos restantes adesivos. De realçar a aproximação das curvas- R em modo II, à exceção do modelo 3 e 6 (que preveem valores por excesso) e a forma semelhante das curvas- R entre modelos que utilizam a e o que utiliza a_e , com variações pouco acentuadas dos valores em torno do pico, não sendo esta semelhança tão notável como nos outros adesivos. Os valores médios de G_{II} (à semelhança de G_I) obtidos através do modelo 6 para o provete #2, encontram-se acima ($\approx 6\%$) da média de valores obtidos para os restantes modelos.

De acordo com os resultados de G_{II} observados na Figura 68, pode-se observar um decréscimo médio de 28% relativamente aos valores de G_I verificados no mesmo provete (Figura 67), à exceção do modelo 3, cuja diferença entre G_I e G_{II} é de apenas 16%. Esta diferença já foi discutida quando realizada a análise global e comparados os provetes válidos ensaiados com o adesivo SikaForce® 7752, na Tabela 16.

As curvas- R de G_I adquiridas pelos diferentes modelos aplicados para o provete #5 com o adesivo SikaForce® 7752, estão apresentadas na Figura 69.

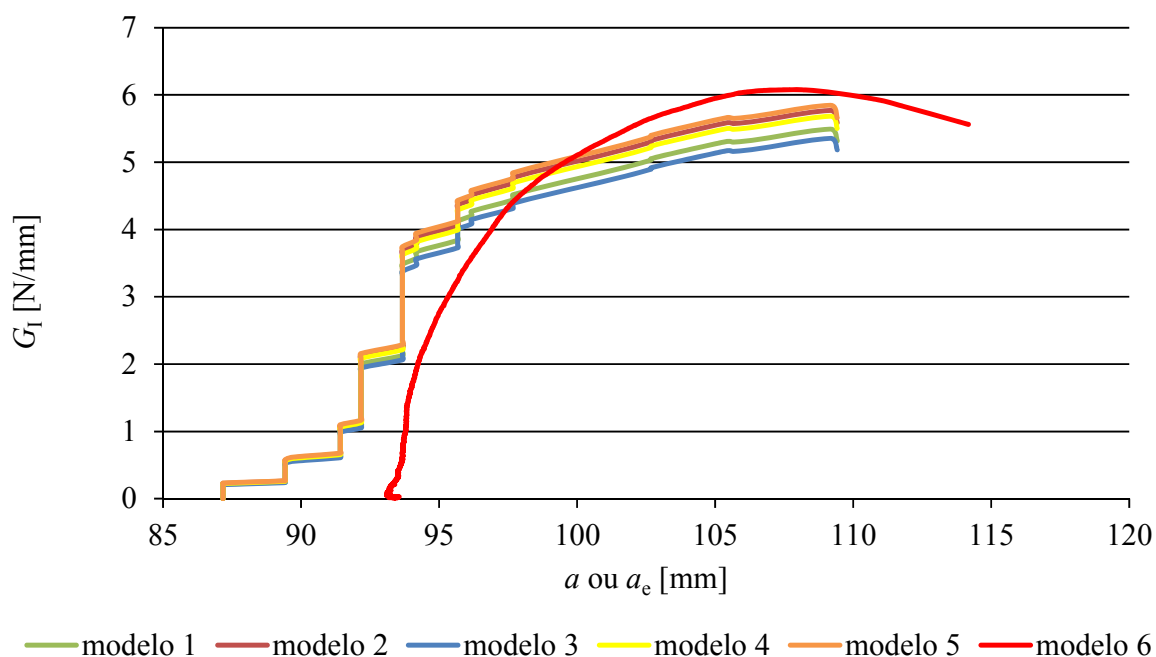


Figura 69 - Curvas- R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #5 colado com o adesivo SikaForce® 7752

Analisando as curvas- R da Figura 69, verifica-se um crescimento mais gradual dos valores de G_I obtidos pelos modelos que requerem a medição de a , relativamente às subidas bruscas verificadas

nas curvas- R adquiridas pelos mesmos modelos para o provete #2, já analisado. Ao comparar as curvas- R do modelo 6 com as curvas do mesmo modelo do provete #2, verifica-se uma forma muito semelhante, notando-se apenas uma pequena diferença nos valores de pico.

Relativamente aos valores médios de G_I registados para o provete #2, analisado anteriormente, verifica-se um desvio inferior a $\approx 1\%$ para este provete, sendo esta diferença mais significativa quando analisado o modelo CBBM ($\approx 3\%$). A diferença percentual de valores de G obtidos entre os diferentes provetes válidos é a mais pequena entre os três adesivos analisados, como já foi referido anteriormente quando analisados os valores dos desvios padrão. Verifica-se um aumento da diferença dos valores de G_I entre o modelo que utiliza a_e e os que utilizam a ($\approx 9\%$), relativamente ao provete #2, destacando-se também valores por excesso para o modelo CBBM.

Na Figura 70 estão expostas as curvas- R referentes ao modo II, adquiridas pelo ensaio realizado ao provete #5 com o adesivo SikaForce® 7752.

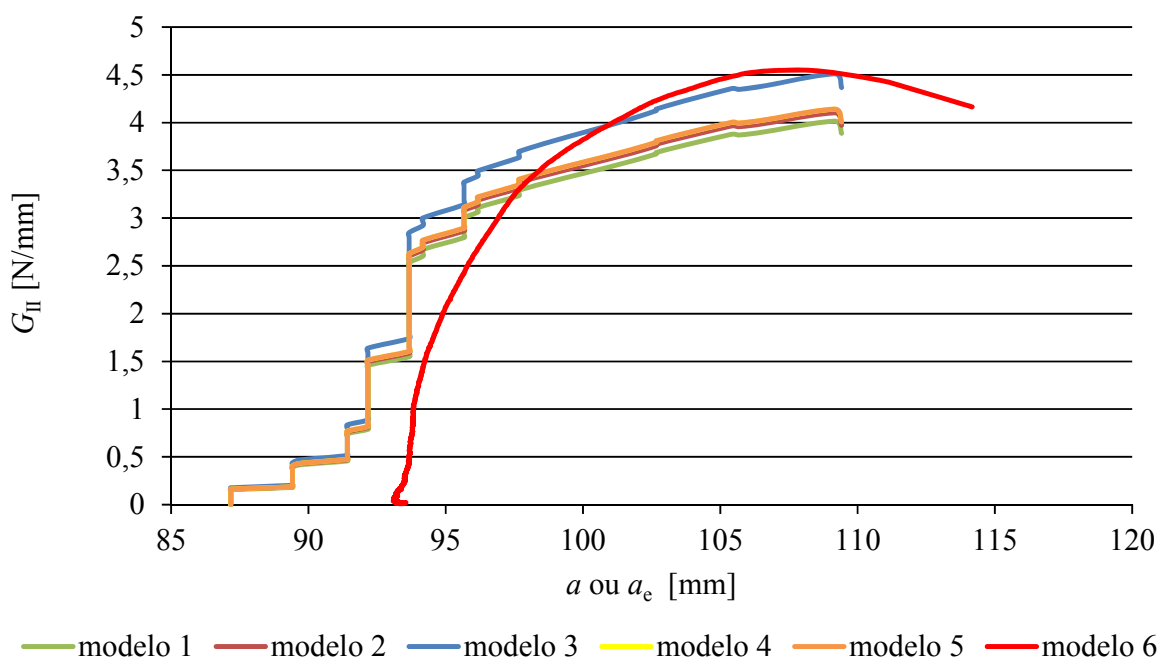


Figura 70 - Curvas- R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #5 colado com o adesivo SikaForce® 7752

Através da análise das curvas- R apresentadas na Figura 70 verifica-se a subida gradual dos valores de G_{II} (já notada em G_I do mesmo provete) obtidos pelos diversos modelos. Observam-se também as mesmas relações entre curvas já constatadas anteriormente relativamente aos diversos modelos e características do modo II.

A diferença percentual dos valores médios de G_{II} obtidos entre os modelos que requerem a medição de a e o CBBM ronda os $\approx 10\%$, sendo ligeiramente superior à registada para G_I no mesmo provete. Esta diferença de valores (em G_I e G_{II}) obtida entre os dois métodos distintos de averiguação, é mais acentuada neste adesivo do que nos restantes. A razão principal para tal ocorrência é possivelmente a ductilidade acentuada do adesivo SikaForce[®] 7752, já referida anteriormente. Ao comparar estes valores com os valores de G_{II} do provete #2, pode-se verificar uma variação semelhante à analisada nos valores de G_I entre estes dois provetes, devido à proporcionalidade constante de modos já analisada.

Na Figura 71 são apresentados os valores médios de G_I e G_{II} (utilizando os 6 modelos considerados) obtidos pelos provetes validados com adesivo SikaForce[®] 7752 e respetivos desvios padrão.

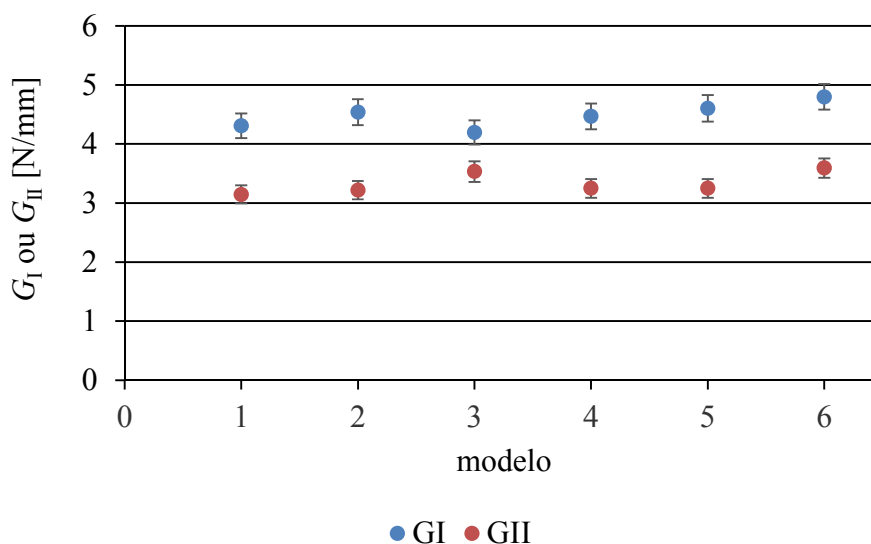


Figura 71 - Valores médios e desvios padrão de G_I e G_{II} calculados através dos valores de patamar dos ensaios validados relativos ao adesivo SikaForce[®] 7752

A Figura 71 mostra uma boa repetibilidade de resultados entre os diferentes modelos. Os desvios padrão apresentam diferenças percentuais bastante reduzidas em relação ao valor médio, $\approx 5\%$, sendo este o menor valor registado entre os três adesivos analisados, o que se traduz numa maior consistência de resultados obtidos. Este adesivo destaca-se pela maior diferença de valores médios de G (em ambos os modos) entre o modelo 6 e os restantes modelos, facto que provém da ductilidade acentuada do adesivo em causa. A diferença, por excesso, dos resultados do modelo 6 relativamente aos valores médios de G_I dos restantes modelos é de $\approx 8\%$, e em relação aos valores médios de G_{II} é de $\approx 9\%$.

Sendo este o último adesivo sob apreciação, poderá concluir-se que, como mencionado na Tabela 16 quando comparados os resultados gerais, a proporção de modos se mantém contante (podendo-se assim retirar as mesmas ilações para o modelo 3), como apresentado na Tabela 17. Os valores de % representam a diferença percentual entre valores de G_I e G_{II} , normalizada relativamente a G_I . As variações que efetivamente, nos casos analisados, provocaram alterações na proporção de modos, foram apenas as diferenças das expressões matemáticas associadas a cada modelo. Sabe-se que através de variações da geometria das juntas, ou por diferentes modos de aplicação do carregamento na junta, se obtêm também variações de proporção de modo, como nos caso dos ensaios analisados no ponto 2.3 desta dissertação.

Tabela 17 – Proporções de modo entre modelos considerados

	Proporções de modo	
	%	ϕ
Modelo 3	$\approx 16\%$	$\approx 43^\circ$
Modelo 6	$\approx 25\%$	$\approx 41^\circ$
Restantes	$\approx 28\%$	$\approx 40^\circ$

3.5 Discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo são apresentados os gráficos que relacionam os valores médios de G_I vs. G_{II} para cada modelo e tipo de adesivo. A comparação destas duas grandezas é realizada com o objetivo de posicionar o ensaio SLB no envelope de fratura de cada adesivo, que permite visualizar o rácio de modos do ensaio e critério de modo misto mais adequado para a simulação do mesmo em modelos numéricos de previsão de resistência. De forma a avaliar determinado desempenho, foram introduzidos cinco critérios sob a forma de curvas e uma reta, representadas no próprio diagrama onde são comparadas as duas grandezas. Os critérios representam funções de diferentes proporções de modo a que os valores de G_I e G_{II} obtidos pelos ensaios deverão respeitar sobre condições de propagação da fenda, sendo as funções respetivas a cada critério calculadas a partir da seguinte expressão base

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^{\phi_{EF}} + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^{\lambda_{EF}} = 1, \quad (92)$$

sendo os critérios mais conhecidos na análise do modo misto, o critério linear ($\phi_{EF}=\lambda_{EF}=1$) e o quadrático ($\phi_{EF}=\lambda_{EF}=2$) [30]. As variações dos critérios utilizados na análise realizada neste capítulo são apresentadas na Tabela 18 [30, 38]. G_{IC} e G_{IIC} são valores característicos de cada adesivo, obtidos

em trabalhos anteriores [12, 51, 53] tipicamente por ensaios DCB (G_{IC}) e ENF (G_{IIC}). Na Tabela 19 estão apresentados os valores de G_{IC} e G_{IIC} utilizados.

Tabela 18 – Parâmetros utilizados para os critérios de avaliação [30, 38]

Critério	φ_{EF}	λ_{EF}
a	1	1
b	2	2
c	3/2	3/2
d	1/2	1/2
e	1	1/2

Tabela 19 – Valores de G_{IC} e G_{IIC} dos diferentes adesivos analisados [12, 51, 53]

Adesivo	G_{IC} (N/mm)	G_{IIC} (N/mm)
Araldite® AV138	0,2	0,38
Araldite® 2015	0,43	4,7
SikaForce® 7752	2,36	5,41

Os valores apresentados na Tabela 19 irão definir as interseções dos critérios com os eixos, correspondendo os valores apresentados na tabela aos valores de modo puro. De seguida são discutidas as figuras onde são apresentados no envelope de fratura os pontos G_I vs. G_{II} , obtidos pelos ensaios válidos realizados a cada adesivo, e aferidos relativamente aos vários critérios à fratura.

Araldite® AV138

São apresentadas a Figura 72, Figura 73 e Figura 74, utilizadas para analisar o envelope de fratura do adesivo Araldite® AV138, segundo os diversos modelos em análise.

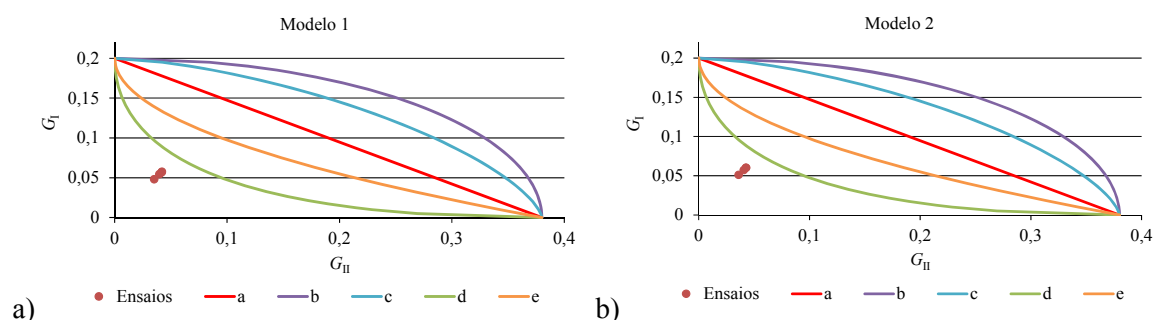


Figura 72 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 1 (a) e 2 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® AV138

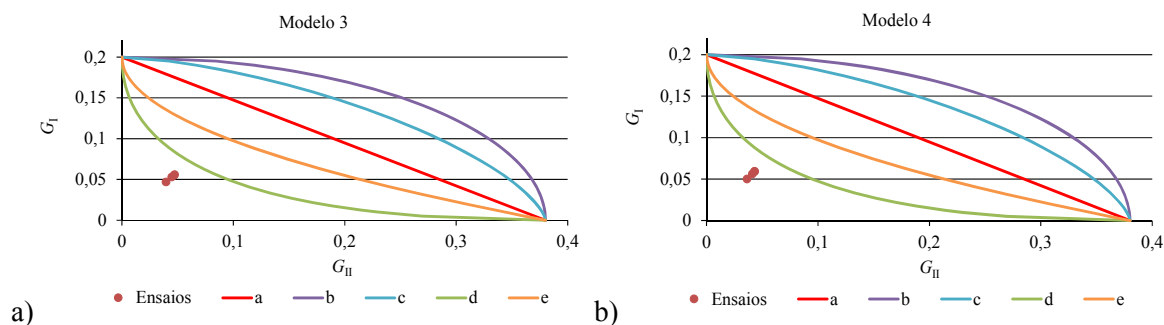


Figura 73 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 3 (a) e 4 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® AV138

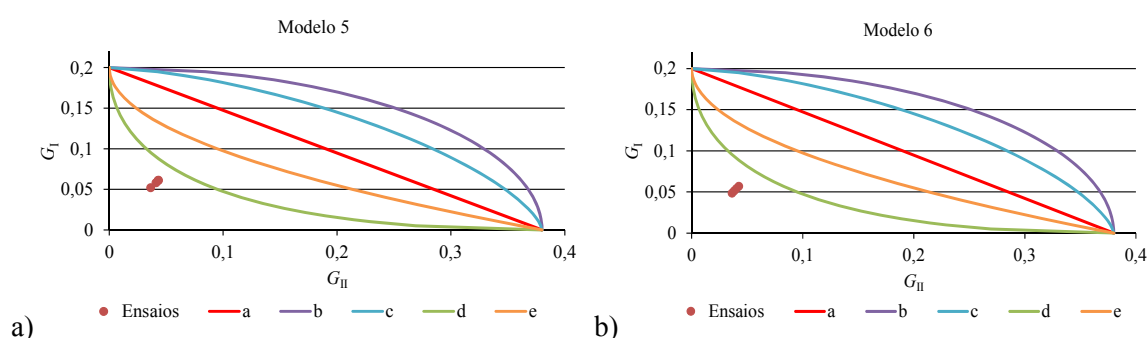


Figura 74 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 5 (a) e 6 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® AV138

Comparando a Figura 72, Figura 73 e Figura 74, pode-se observar uma dispersão muito reduzida dos pontos de G_I vs. G_{II} de cada ensaio (com variação mínima entre modelos). Porém, é notado um ligeiro desvio por defeito dos pontos obtidos relativamente ao que seria esperado pela aplicação dos cinco critérios. A maior proximidade é observada para o critério (d), que se revela o mais adequado para efeitos de modelação numérica. Conclui-se assim que os valores obtidos para a taxa de libertação de energia foram inferiores aos valores previstos por qualquer um dos critérios analisados. Para este caso seria mais apropriado um critério com valores de φ_{EF} e λ_{EF} inferiores aos do critério (d), que tivesse em consideração o posicionamento observado dos pontos de G_I vs. G_{II} . Considera-se que esta discrepância relativamente ao posicionamento esperado dos valores de G_I vs. G_{II} pode estar relacionada com condições e geométricas distintas entre a caracterização do adesivo neste trabalho e os ensaios de modo puro.

Araldite® 2015

De seguida são analisadas a Figura 75, Figura 76 e Figura 77, correspondentes ao envelope de fratura do adesivo Araldite® 2015, segundo os vários modelos que terão sido aplicados para obter G_I vs. G_{II} .

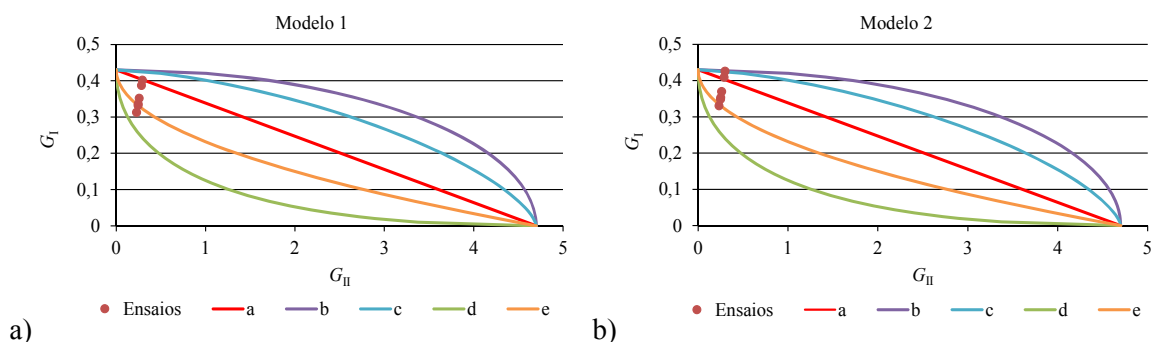


Figura 75 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 1 (a) e 2 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® 2015

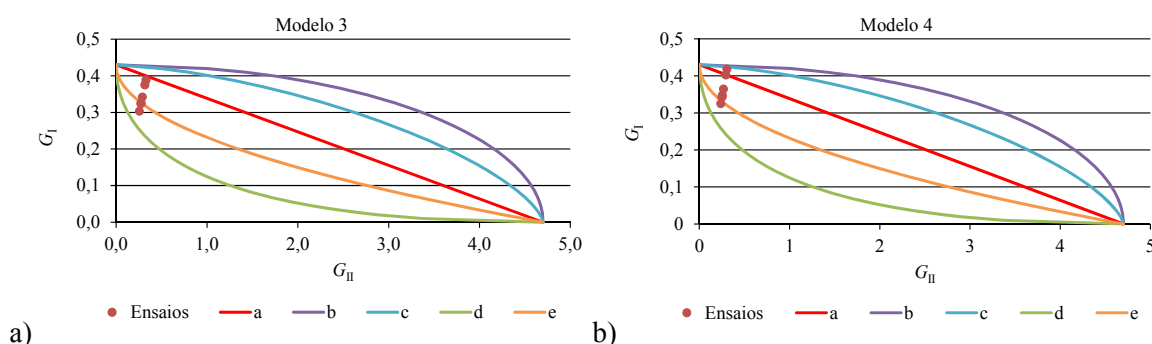


Figura 76 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 3 (a) e 4 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® 2015

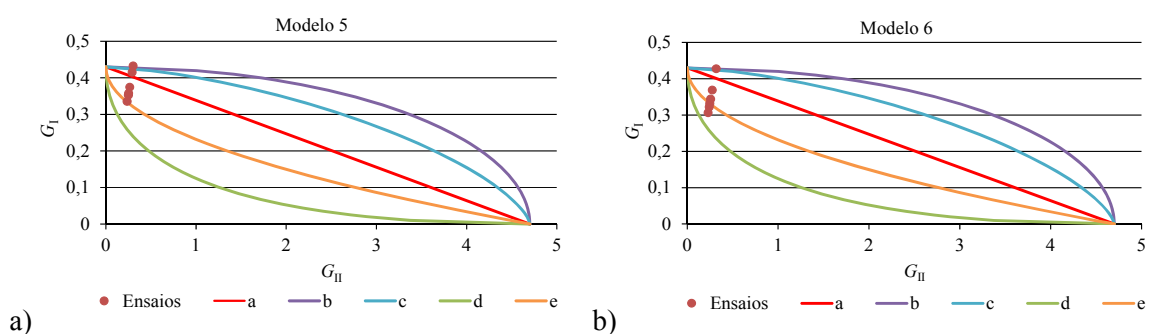


Figura 77 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 5 (a) e 6 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo Araldite® 2015

É possível observar uma dispersão reduzida entre os pontos de cada ensaio para cada modelo, porém superior à verificada para o adesivo Araldite® AV138. Esta diferença era expectável em função do maior desvio padrão dos valores médios obtidos para este adesivo. Comparando os diversos modelos, observam-se resultados muito conformes, embora com ligeiros desvios na nuvem de pontos correspondente ao conjunto de ensaios, podendo-se observar também a diminuição de G_I num dos ensaios do modelo 6. Verifica-se também uma elevada aproximação dos pontos de G_I vs. G_{II}

relativamente às curvas descritas pelas leis utilizadas para prever o comportamento do adesivo. De notar que, na maioria dos modelos, a generalidade dos ensaios é melhor descrita pelo critério (e), sendo que dois dos provetes mais isolados tendem a seguir as leis (b) e (c), ou mesmo a (a) para determinados modelos. A distância entre os pontos dos ensaios parece manter-se pouco variável com a alternância dos modelos aplicados, apresentando o modelo 6 uma dispersão ligeiramente superior. Para efeitos de simulação numérica, o critério de modo misto a considerar para este adesivo deveria ser o (e), pela maior proximidade dos pontos, em comparação com os outros critérios.

SikaForce® 7752

Neste subcapítulo são discutidas as figuras correspondentes ao envelope de fratura do adesivo SikaForce® 7752, segundo os modelos considerados.

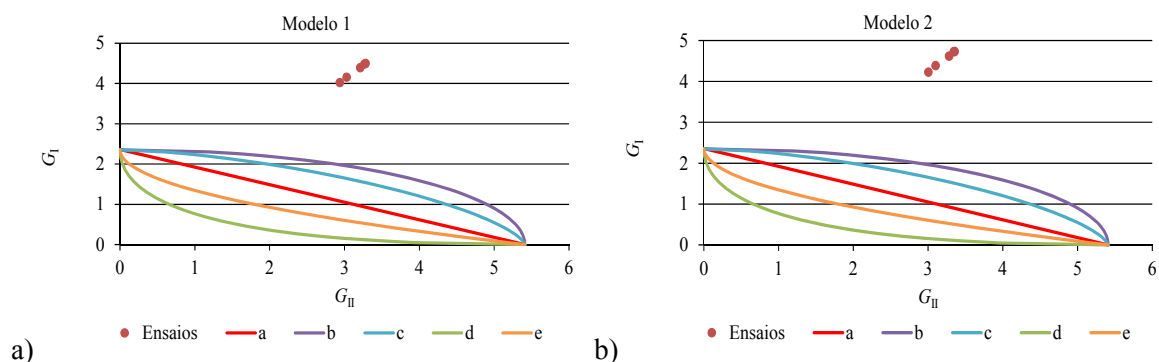


Figura 78 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 1 (a) e 2 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo SikaForce® 7752

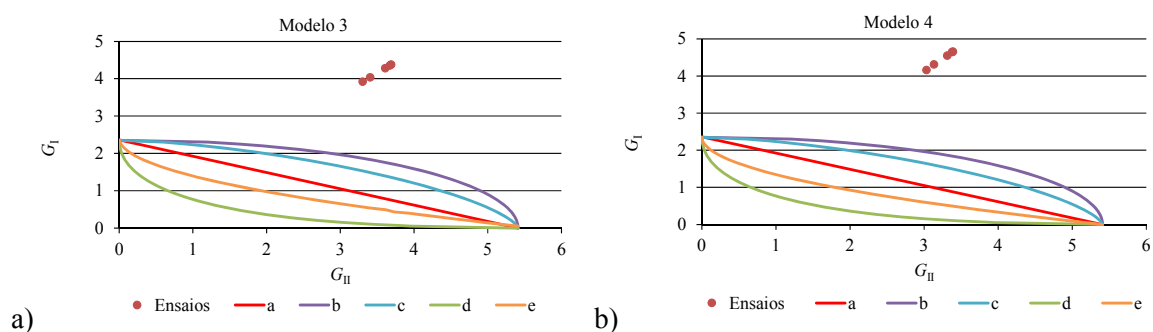


Figura 79 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 3 (a) e 4 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo SikaForce® 7752

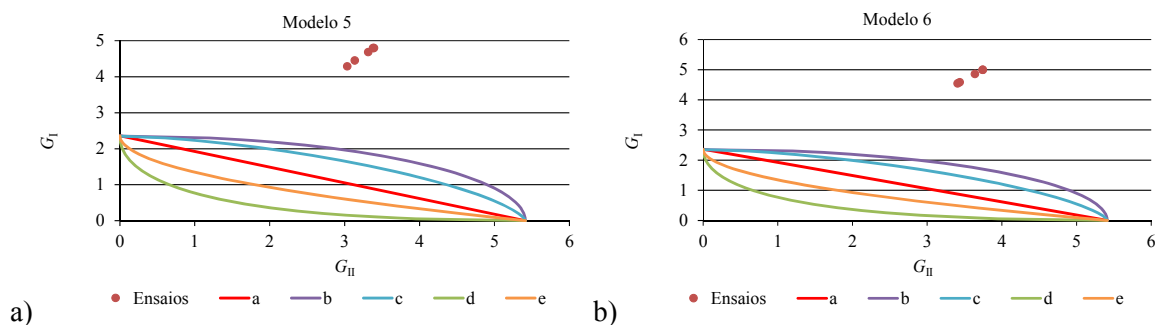


Figura 80 - G_I vs. G_{II} obtidos pelos modelos 5 (a) e 6 (b) considerando os ensaios válidos do adesivo SikaForce[®] 7752

Analisando a Figura 78, Figura 79 e Figura 80, podem-se observar pontos de ensaio (G_I vs. G_{II}) muito distantes da gama de valores previstos pelos critérios considerados, em função dos valores conhecidos de G_{IC} e G_{IIC} deste adesivo. Através dos valores de G_{IC} e G_{IIC} considerados, seria difícil definir um critério que conseguisse englobar os resultados obtidos pelos ensaios. Assim sendo, para efeitos de simulação de comportamento numérico, nenhum dos critérios analisados deveria ser considerado, devido ao efetivo distanciamento constatado entre as curvas definidas pelos critérios e os pontos de ensaio obtidos (mesmo sendo do critério (b) a que os pontos se aproximam mais). Considera-se que esta diferença pode estar relacionada com a utilização de valores de G_{IC} e G_{IIC} que foram obtidos pelo ensaio de provetes DCB e ENF, respetivamente, com geometria diferente. Como é sabido que os valores medidos de G_{IC} e G_{IIC} são bastante dependentes da espessura dos aderentes, é possível que esta diferença esteja na base da utilização de valores de G_{IC} e G_{IIC} que não são os mais adequados.

Comparando os conjuntos de pontos dos ensaios entre os diferentes modelos, não são verificadas diferenças notórias, estando apenas os pontos obtidos pelo modelo 6 ligeiramente mais afastados dos critérios considerados relativamente aos obtidos pelos restantes modelos, o que era previsível tendo em conta os valores superiores de G_I e G_{II} deste modelo relativamente aos restantes. Por outro lado, é constatada uma boa repetibilidade de resultados para cada método, devido à baixa dispersão verificada entre pontos dos vários ensaios.

Determinar o envelope de fratura de juntas adesivas é uma tarefa difícil, sendo os valores da tenacidade à fratura influenciados pelo percurso da fenda e, como tal, estes podem assim não representar as verdadeiras propriedades do adesivo [38]. Para além desta dificuldade, torna-se necessária a realização de diferentes tipos de ensaios com rácios de modo distintos para possibilitar a obtenção de outros pontos, e assim melhor validar o critério de modo misto a utilizar.

4 Conclusões

Nesta dissertação foi apresentado um trabalho experimental que consistiu na caracterização à fratura em modo misto de três tipos de adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752). Para este efeito foi utilizado o ensaio SLB.

A parte inicial do trabalho consistiu no fabrico de 21 provetes (7 por cada adesivo) com dimensões pré-definidas pela análise de tensões efetuada, respeitando as relações geométricas inerentes ao ensaio SLB. De seguida, através dos ensaios realizados aos provetes, foram criadas e analisadas as curvas $P-\delta$ respetivas. Os resultados gerais obtidos nesta etapa foram bastante satisfatórios, verificando-se uma boa repetibilidade de resultados, mais acentuada no adesivo SikaForce® 7752 e menos no adesivo Araldite® AV138. A dispersão de resultados notada nos adesivos menos dúcteis deve-se à maior probabilidade de ocorrência de propagação instável da fenda ou rutura antecipada da junta na presença de imperfeições. Após concluída a análise às curvas $P-\delta$ dos ensaios realizados, foram calculados os valores de G_I e G_{II} através dos 6 modelos de redução considerados, aplicados aos resultados adquiridos pelos ensaios. Estes valores foram comparados entre provetes, modelos, modos e adesivos com o intuito de ser feita uma análise pormenorizada com resultados concretos. Através dessa análise verificou-se que as proporções de modo se mantêm constantes entre os provetes analisados pelos três adesivos, sendo de $\approx 16\%$ ($\phi=42,51^\circ$) quando comparados os valores de G_I com G_{II} obtidos pelo modelo 3, $\approx 25\%$ ($\phi=40,89^\circ$) para o modelo 6 e uma média (com dispersão de valores quase nula) de $\approx 28\%$ ($\phi=40,32^\circ$) para os restantes quatro modelos. Estes quatro modelos apresentam menor dispersão de resultados entre eles, uma vez que apenas se diferenciam nas parcelas menos significativas das expressões matemáticas relacionadas a cada modelo. Com o objetivo de alargar as possibilidades de análise a novas observações, foram discutidas as curvas- R para dois provetes válidos por adesivo, representativas do comportamento dos valores de G à medida que a propagação da fenda se desenvolve. Com a análise dos dados provenientes das curvas- R , puderam-se observar adesivos com valores de patamar de G com o aumento de a (caraterística dos adesivos mais frágeis, Araldite® AV138 e Araldite® 2015) e valores de G pouco estáveis com o aumento de a (como no caso do adesivo SikaForce® 7752). Comparadas e discutidas as curvas- R de cada provete, foram analisados os valores médios e respetivos desvios padrões de G_I e G_{II} obtidos para cada adesivo, onde

se verificou um aumento bastante significativo dos valores de G obtidos conforme o aumento da ductilidade do adesivo ($\approx 6,5\times$ superior para o adesivo Araldite[®] 2015 relativamente ao adesivo Araldite[®] AV138, e de $\approx 14\times$ superior para o adesivo SikaForce[®] 7752 relativamente ao adesivo Araldite[®] 2015). Por outro lado, os valores dos desvios padrão não seguiram a mesma evolução. No caso dos desvios padrão analisados (relativamente aos valores médios de G) para cada adesivo, verificam-se valores mais elevados para o adesivo Araldite[®] 2015 (de $\approx 10\%$ para os modelos que utilizam a e de $\approx 12\%$ para o modelo CBBM), valores médios para o adesivo Araldite[®] AV138 ($\approx 7\%$ para os dois tipos de modelo) e valores inferiores para o adesivo SikaForce[®] 7752 ($\approx 5\%$), o que comprova a reduzida dispersão de resultados. Numa fase final foram analisados os envelopes de fratura de cada tipo de adesivo, registados para cada modelo e enquadrados com os ensaios válidos. Através desta análise constatou-se a aproximação ou distanciamento dos pontos de G_I vs. G_{II} obtidos por cada ensaio relativamente aos critérios considerados, definidos por curvas e apresentados no mesmo diagrama. A seleção do critério mais adequado tem como objetivo a sua utilização em modelos numéricos onde se pretende prever o comportamento à fratura para um dado rácio de modos. De acordo com esta análise verificou-se uma elevada consistência dos resultados do adesivo Araldite[®] 2015 com o critério (e). No caso do adesivo Araldite[®] AV138, os resultados não foram tão conformes, apresentando um distanciamento geral dos critérios analisados, sendo (d) o critério mais próximo. O distanciamento dos resultados obtidos de cada ensaio com os diversos critérios é ainda mais acentuado para o adesivo SikaForce[®] 7752, embora neste caso por excesso.

Com o trabalho realizado conclui-se também que o ensaio SLB é um ensaio expedito para extrair as propriedades de fratura de juntas adesivas com um rácio de modos fixo, em função da elevada repetibilidade verificada pelos resultados obtidos em todas as etapas de cálculo e tratamento de dados.

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

- Realização de ensaios com diferentes rácios de modo misto, com o intuito da obtenção de forma mais fiável do critério de modo misto mais adequado.
- Realização de ensaios SLB com geometrias diversificadas, com o objetivo de averiguar a forma como a proporção entre modos é alterada.
- Simulação numérica do ensaio SLB para averiguar a adequabilidade de cada método de redução de G_I e G_{II} , pela tentativa de reprodução dos valores introduzidos nos modelos a partir das curvas P - δ dos ensaios numéricos.

Referências

- [1] A. M. G. Pinto, *Ligações Adesivas Entre Materiais Poliméricos com e sem Alteração Superficial dos Substratos*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Tese de Doutoramento, 2007.
- [2] L. F. M. da Silva, A. G. de Magalhães e M. F. S. F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, Porto: Publindustria, 2007.
- [3] P. Cognard, *Handbook of Adhesives and Sealants*, França: Elsevier, 2005.
- [4] R. J. C. Carbas, *Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Tese de Mestrado, 2008.
- [5] M. L. Ribeiro, *Programa para análise de juntas coladas: compósito/compósito e metal/compósito*, São Carlos: Escola de Engenharia de São Carlos - Tese de Mestrado, 2009.
- [6] E. M. Petrie, *Handbook of adhesives and Sealants*, USA: McGraw-Hill, 2000.
- [7] C. Batalha, P. Lúcio, P. Reis, H. Soares, F. Silva e J. Sarilho, “Adesivos Estruturais - Que adesivos se utilizam nos aviões e qual a sua função?,” Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [8] L. F. M. da Silva, A. Ochsner e R. D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*, Porto: Springer, 2011.
- [9] C. J. Constante, *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto - Tese de Mestrado, 2014.
- [10] N. F. Ribeiro, *Efeito de alterações geométricas na resistência de juntas de sobreposição*, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto - Tese de Mestrado, 2012.
- [11] S. Ebnesajjad, *Adhesives Technology Handbook*, USA: William Andrew, 2008.
- [12] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, J. A. B. P. Neto e L. F. M. da Silva, “Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 44, pp. 48-56, 2013.
- [13] R. D. Adams, *Adhesive bonding*, USA: Woodhead Publishing Limited, 2005.
- [14] R. M. Fernandes, *Definição de uma lei coesiva para juntas coladas em Carbono-Epóxico solicitadas em Modo II*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Tese de Mestrado, 2012.
- [15] J. C. S. Azevedo, *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto - Tese de Mestrado, 2014.

- [16] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, "Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 45, pp. 1497-1512, 2008.
- [17] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, A. M. G. Pinto, L. F. M. da Silva e A. M. P. de Jesus, "Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 31, pp. 363-372, 2011.
- [18] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, "Stress and Failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model," *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 21, pp. 855-870, 2007.
- [19] R. A. Odi e C. M. Friend, "A comparative study of finite element models for the bonded repair of composite structures," *Journal of Reinforced Plastics and Composites*, vol. 21, pp. 311-332, 2002.
- [20] R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura e J. J. M. S. Domingues, "Modelling single and double-lap repairs on composite materials," *Composites Science and Technology*, vol. 65, pp. 1948-1958, 2005.
- [21] D. Croccolo, M. de Agostinis e N. Vincenzi, "Design of hybrid steel-composite interference fitted and adhesively bonded connections," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 37, pp. 19-25, 2012.
- [22] "Fracture Toughness," 20 Fevereiro 2015. [Online]. Available: <https://www.nde-ed.org/EducationResources/CommunityCollege/Materials/Mechanical/FractureToughness.htm>.
- [23] M. F. S. F. de Moura, R. D. S. G. Campilho e J. P. M. Gonçalves, "Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mod I Loading," *Composites Science and Technology*, vol. 68, pp. 2224-2230, 2008.
- [24] M. F. S. F. de Moura e A. B. de Moraes, "Equivalent crack based analyses of ENF and ELS tests," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 75, pp. 2584-2596, 2008.
- [25] C. Schuecker e B. D. Davidson, "Effect of Friction on the Perceived Mode II Delamination Toughness from Three- and Four-Point Bend End-Notched Flexure Tests," *Composite Structures: Theory and Practice*, pp. 334-344, 2000.
- [26] Z. Ouyang e G. Li, "Nonlinear interface shear fracture of end notched flexure specimens," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 2659-2668, 2009.
- [27] A. Szekrényes e J. Uj, "Beam and finite element analysis of quasi-unidirectional composite SLB and ELS specimens," *Composites Science and Technology*, vol. 64, pp. 2393-2406, 2004.
- [28] V. Mollón, J. Bonhomme, J. Viña e A. Arguelles, "Mixed mode fracture toughness: An empirical formulation for GI/GII determination in asymmetric DCB specimens," *Engineering Structures*, vol. 32, pp. 3699-3703, 2010.
- [29] H. L. J. Pang e C. W. Seetoh, "A compact mixed mode (CMM) fracture specimen for adhesive bonded joints," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 57, pp. 57-65, 1997.

- [30] F. Chaves, “Técnicas avançadas nos processos de ligação e consolidação - workshop,” 07 Outubro 2013. [Online]. Available: <http://www.ordemengenheiros.pt/pt/centro-de-informacao/dossiers/apresentacoes/processos-de-ligacao-e-consolidacao-na-ordem/>.
- [31] F. J. P. Chaves, *Fracture mechanics applied to the design of adhesively bonded joints*, Porto: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto - Tese de Doutoramento, 2013.
- [32] F. Ozdil, L. A. Carlsson e P. Davies, “Beam analysis of angle-ply laminate end-notched flexure specimens,” *Composites Science and Technology*, vol. 58, pp. 1929-1938, 1998.
- [33] F. Ducept, D. Gamby e P. Davies, “A mixed-mode failure criterion derived from tests of symmetric and asymmetric specimens,” *Composites Science and Technology*, vol. 59, p. 609–619, 1999.
- [34] Y. Zhu, *Characterization of Interlaminar Fracture Toughness of a Carbon/Epoxy Composite Material*, Pensilvânia: The Pennsylvania State University - Tese de Mestrado, 2009.
- [35] A. Szekrényes e J. Uj, “Over-leg bending test for mixed-mode I/II interlaminar fracture in composite laminates,” *International Journal of Damage Mechanics*, vol. 16, pp. 5-33, 2011.
- [36] W. S. Kim, D. S. Hwang, C. J. Jang e C. J. Lee, “Enhancement of Composite-Metal Adhesion Strength by Micro-Patterning of Metal Surfaces,” em *18th International Conference On Composite Materials*, Daejeon, 2011.
- [37] J. A. Nairn, “On the calculation of energy release rate for cracked laminates with residual stresses,” *International Journal of fracture*, vol. 139, pp. 267-293, 2006.
- [38] L. F. M. da Silva, V. H. C. Esteves e F. J. P. Chaves, “Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings,” *Materialwissenschaft und Werkstofftechnik*, vol. 42, pp. 460-470, 2011.
- [39] R. Olsson, “A Simplified Improved Beam Analysis of the DCB Specimen,” *Composites Science and Technology*, vol. 43, pp. 329-338, 1992.
- [40] A. Szekrényes e J. Uj, “An Improved Analytical Delamination Model for Unidirectional Specimens,” *Mechanical of Materials*, 2005 (submetida para publicação).
- [41] J. Wang e P. Qiao, “Novel Beam Analysis of the End Notched Flexure Specimen for Mode-II Fracture,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 71, pp. 219-231, 2004.
- [42] J. Williams, “On the calculation of energy release rates for cracked laminates,” *International Journal of Fracture*, vol. 36, pp. 101-119, 1988.
- [43] J. M. Q. Oliveira, M. F. S. F. de Moura e J. J. L. Morais, “Application of the end loaded split and single-leg bending tests to the mixed-mode fracture characterization of wood,” *Construction and Building Materials*, vol. 25, p. 1956–1962, 2011.
- [44] J. R. Rice, “A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks,” *Journal of Applied Mechanics*, p. 379–386, 1968.
- [45] EST Setúbal, *Mecânica da Fractura Elasto-Plástica - Apresentação Power Point*, Setúbal: EST Setúbal, 2005.
- [46] K. N. Shivakumar e I. S. Raj, “An equivalent domain integral method for three dimensional mixed-mode fracture problems,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 42, pp. 935-959, 1992.

- [47] A. Szekrényes, “J-integral for delaminated beam and plate models,” *Periodica Polytechnica*, vol. 56, p. 63–71, 2012.
- [48] T. L. Anderson, *Fracture Mechanics – Fundamentals and Applications*, 3 ed., vol. 3, Estados Unidos: CRC Press, 2005.
- [49] G. Ji, Z. Ouyang e G. Li, “On the Interfacial constitutive laws of mixed mode fracture with various adhesive thicknesses,” *Mechanics of Materials*, vol. 47, pp. 24-32, 2012.
- [50] Z. Ouyang e G. Li, “Nonlinear interface shear fracture of end notched flexure specimens,” *international journal of solids and structures*, vol. 46, pp. 2659-2668, 2009.
- [51] J. A. B. P. Neto, R. D. S. G. Campilho e L. F. M. da Silva, “Parametric study of adhesive joints with composites,” *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 37, pp. 96-101, 2012.
- [52] J. A. B. P. Neto, *Estudo Paramétrico de Juntas Adesivas em Material Compósito*, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto - Tese de Mestrado, 2011.
- [53] T. M. S. Faneco, *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*, Porto: Instituto Superior de Engenharia do Porto - Tese de Mestrado, 2014.
- [54] M. V. Fernandez, M. F. S. F. de Moura, L. F. M. da Silva e A. T. Marques, “Mixed mode I + II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-leg Bending test,” *Composites Part A: Applied Science and Manufacturing*, vol. 44, pp. 63-69, 2013.