



Obtenção das leis coesivas em modo misto de adesivos estruturais em função da espessura de adesivo

JOEL OLIVEIRA
novembro de 2018

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

Joel Jorge Gomes de Oliveira

1160025

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestrado em Engenharia Mecânica



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

Joel Jorge Gomes de Oliveira

1160025

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

2018

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica

JÚRI

Presidente

Rui Pedro Cardoso da Silva Martinho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Orientador

Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Co-orientadores

Doutor Eduardo André Marques

Professor Convidado, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Mestre José Joaquim Mota Machado

Investigador, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Doutor Lucas Filipe Martins da Silva

Professor Associado, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto

Doutor Francisco José Gomes da Silva

Professor Adjunto, Instituto Superior de Engenharia do Porto

Arguente

Doutor José Filipe Palhares Chaves

Professor Auxiliar, Instituto Politécnico do Cávado e do Ave

AGRADECIMENTOS

O primeiro agradecimento é direccionado ao professor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Orientador Científico da presente dissertação, pela sua total disponibilidade em participar em todo o processo de realização deste trabalho.

Ao José Joaquim e ao Eduardo Marques, pelo seu total disponibilidade na ajuda à realização da parte experimental deste trabalho.

O próximo agradecimento é para o Eng^o Paulo Silva da Sika Portugal SA pela oferta do adesivo estudado neste trabalho.

Há minha família e amigos por todo o apoio e incentivo oferecido.

Por último, e não menos importante, há minha namorada pelo seu incansável apoio e enorme paciência nestes últimos dois anos.

PALAVRAS CHAVE

Single-Leg Bending, Ligação adesiva, Mecânica da Fractura, Espessura de Adesivo, Ductilidade, Envelope de Fractura, Método dos Elementos Finitos, Modelo de Dano Coesivo.

RESUMO

A utilização dos adesivos em construções industriais tem vindo nos últimos anos a aumentar em larga escala, em substituição dos métodos tradicionais como a soldadura, brasagem, e ligações mecânicas como aparafusamentos e rebitagens. Esta tendência verifica-se devido às elevadas vantagens que este tipo de ligação oferece, dos quais se destacam a leveza, o bom comportamento sob cargas cíclicas ou fadiga, e sem dúvida a maior de todos, permitem a ligação de diferentes materiais e menores concentrações de tensões. No sentido de se aumentar a confiança na projecção de juntas adesivas, é importante conseguir prever com a máxima precisão a sua resistência mecânica e respectivas propriedades de fractura (taxa crítica de libertação de energia de deformação à tracção e ao corte, G_{IC} G_{IIC} respectivamente). Estas duas propriedades relacionam-se com a mecânica da fractura e são estimadas através de uma análise energética. Para esse efeito existem três modelos distintos, sendo os que necessitam de medição do comprimento de fenda durante a propagação do dano, o modelo que utiliza o comprimento de fenda equivalente e o modelo baseado no integral J. Na maioria dos casos as solicitações ocorrem em modo misto (combinação de tracção e corte em simultâneo), a importância da fractura deve ser entendida nestas condições, nomeadamente das taxas de libertação de energia relativamente a diferentes critérios e envelopes de fractura. Esta comparação possibilita averiguar qual o critério energético de ruptura mais preciso a utilizar em modelos numéricos baseados em Modelos do Dano Coesivo.

No presente trabalho são apresentados os dois estudos efectuados, experimental e numérico utilizando o ensaio *Single-Leg Bending* (SLB) em provetes colados com o adesivo Sikaforce®-7752, com diferentes espessuras. Para isso, são aplicados alguns modelos de redução da taxa de libertação de energia de deformação à tracção G_I , e corte, G_{II} , enquadrados nos modelos que necessitam da medição do comprimento de fenda e nos modelos de que utilizam um comprimento de fenda equivalente (CBBM).

Na fase seguinte, procedeu-se à análise dos valores obtidos experimentalmente G_I e G_{II} de cada espessura de adesivo.

Na discussão de resultados foi efectuada uma análise dos valores em diversos envelopes de fractura, no sentido de se conseguir averiguar qual o critério de ruptura mais adequado a considerar para t_a de 1 mm. Na análise dos dados experimentais obtidos através dos vários modelos, conseguiu-se uma concordância bastante boa entre modelos de determinação de G_I e G_{II} . Nos ensaios numéricos foi possível retractor o comportamento verificado nos ensaios experimentais, apresentando estes, critérios de propagação aproximados relativamente aos resultados experimentais.

KEYWORDS

Single-leg-Bending, Adhesive Joint, Fracture Mechanics, Ductile, Adhesive Thickness, Fracture Envelope, Finite Element Method, Cohesive Zone Models.

ABSTRACT

The use of adhesives in industrial construction has come in the last years growing up, in replacement of traditional bonding methods which welded, brazed, riveted and bolted joints. This trends is due to the many advantages of adhesive joints, like as allowing the construction of lighter structures, more resistance to fatigue, lower stress concentrations, and the most important, the possibility to joint different materials. With the point of increase the trust in adhesive joints, it's important to prevent with precise the maximum strength and their mechanical properties to fracture (G_{IC} , G_{IIC}). This two properties are related with mechanical of fracture and can be calculated through energetic analyses. For this purpose, several fracture characterization tests were developed in the various fracture modes, which are based on the concepts of linear elastic fracture mechanics to determine the rate of strain energy release. In the most of the cases occurs mixed mode (combination of traction and lap shear simultaneously), a fracture propagation have to be understood in this conditions, such an energy release rates for different fracture criteria or envelopes. This allows the understanding of fracture energetic criteria more precise and the utilization of numeric models based on CZM.

In this work are presented numeric and experimental analyzes using Single-Leg Bending (SLB) tests in bonding specimens with Sikaforce®-7752 using different thickness. For that, was applied some reduction models of rate of strain energy release deformation to traction G_I , and shear G_{II} , related with models that need of fracture measure length and a_{eq} for the CBBM. In the next step was made in the experimental results an analyze value of G_I e G_{II} of each thickness. After this analysis a verification was made of the values in the fracture envelopes for 1 mm of thickness, because is the fracture propagation that could be compered.

In the results discussion was made an envelope fracture values analyze, to can get conclude the most appropriate fracture criteria to t_a of 1 mm. Overall, it was possible to obtained an agreement between methods for the determination of G_I and G_{II} . In the

numerical simulations it was possible to reproduce the observed behavior of the experimental tests, they show an equal propagation criteria in compered to the experimental results obtained.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

4ENF	4ENF 4- Point End-Notched Flexure
ADCB	<i>Assymetric Double Cantilever Beam</i>
CBBM	<i>Compliance Based Beam Method</i>
CLS	<i>Crack Lap Shear</i>
CT	<i>Compact Tension</i>
DCB	<i>Double-Cantiliver Beam</i>
ELS	<i>End-Loaded split</i>
ENF	<i>End-Notched Flexure</i>
FRMM	<i>Fixed Rate Mixed Mode</i>
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
SLB	<i>Single-Leg Bending</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantiliver Beam</i>

Lista de Unidades

°C	Grau Celsius
bar	Bar
GPa	GigaPascal

mm	Milímetros
----	------------

MPa	MegaPascal
-----	------------

N	Newton
---	--------

Lista de Símbolos

a	Comprimento de fenda
-----	----------------------

a_0	Comprimento inicial da fenda
-------	------------------------------

a_{eq}	Comprimento de fenda equivalente
----------	----------------------------------

A_i	Área de secção transversal
-------	----------------------------

B	Largura
-----	---------

c	Metade da espessura da viga
-----	-----------------------------

C	Flexibilidade
-----	---------------

C_0	Flexibilidade inicial
-------	-----------------------

dA	Varição do comprimento da fenda
------	---------------------------------

E	Módulo de Elasticidade Longitudinal
-----	-------------------------------------

E_{11}	Módulo de Elasticidade na direcção do comprimento do provete
----------	--

E_{33}	Módulo de Elasticidade na direcção da largura do provete
----------	--

E_f	Módulo de elasticidade à flexão
-------	---------------------------------

E_x	Módulo de Elasticidade na direcção do eixo x
-------	--

E_y	Módulo de Elasticidade na direcção do eixo y
-------	--

E_z	Módulo de Elasticidade na direcção do eixo z
-------	--

G	Taxa de libertação de energia
-----	-------------------------------

G	Módulo de elasticidade transversal
-----	------------------------------------

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_{13}	Módulo de Corte
G_c	Taxa crítica de libertação de energia
G_I	Taxa de libertação de energia em modo I
$G_{I/II}$	Taxa de libertação de energia em modo misto
G_{IC}	Taxa de libertação de energia à tracção
G_{II}	Taxa de libertação de energia em modo II
G_{IIC}	Taxa de libertação de energia ao corte
G_{int}	Taxa de libertação de energia interna
\bar{G}_{int}	Factor térmico e mecânico relativo à taxa de libertação de energia
\bar{G}_{mech}	Factor mecânico relativo à taxa de libertação de energia
G_T	Taxa de libertação de energia
G_{xy}	Módulo de elasticidade transversal
h	Espessura
h_t	Espessura total do provete
I	Momento de Inércia
J_I	Taxa de libertação de energia em modo I (Integral J)
$J_{I/II}$	Taxa de libertação de energia em modo misto (Integral J)
J_{II}	Taxa de libertação de energia em modo II (Integral J)
k	Factor de correcção, factor intensidade de tensão

K_c	Tenacidade à fractura
L	Comprimento
M	Momento de flexão
n_j	Vector centrífugo do contorno C
P	Carga
t	Tempo
T_g	Transição vítrea
t_{m^0}	Carga máxima em modo misto
t_{n^0}	Carga máxima em tracção
t_{s^0}	Carga máxima em corte
t_y	Tensão de cedência ao corte
U	Energia de deformação interna do sólido
u_i	Vector de deslocamento
V	Carga transversal do segmento i
W	Trabalho realizado pelas forças exteriores
w	Espessura
W_f	Trabalho realizado por forças exteriores (Integral J)
W_{nk}	Densidade de energia de deformação
γ	Factor adimensional dependente da geometria e distribuição de carga
α	Coefficiente de expansão térmica
γ_f	Deformação de rotura ao corte
δ	Deslocamento

δ_{ij}	Tensor Kronecker
δ_{ij}	Tensor de carga
$\delta_{ij}n_j$	Vector de tracção
ϵ	Deformação
ϵ_f	Deformação de rotura à tracção
λ	Relação entre a tensão de cedência à compressão e à tracção
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
σ	Tensão
σ_c	Tensão de cedência
σ_f	Tensão de rotura à tracção
σ_{ij}	Tensor de carga
σ_R	Tensão remota aplicada
σ_u	Tensão de cedência
σ_y	Tensão de cedência à tracção
σ_y	Tensão de cedência à tracção
σ_{yc}	Tensão de cedência à compressão
σ_{yt}	Tensão de cedência à tracção
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Zonas num automóvel onde são aplicados adesivos (Automotive 2010).	9
Figura 2. Microship produzido com auxílio de adesivos (Cognard 2005).	10
Figura 3. Zonas normalmente coladas nas embarcações.	10
Figura 4. Exemplo da aplicação de adesivos em aviões (Cognard 2005).	11
Figura 5. Evolução ao longo dos anos da quantidade de adesivo utilizado (Chaudhury e Pocius 2002). ..	11
Figura 6. Exemplo dos tipos de falha possíveis (Petrie 2000).	12
Figura 7. Esforço de tracção sobre uma junta adesiva (Petrie 2000).	13
Figura 8. Esforço de compressão sobre uma ligação adesiva (Petrie 2000).	13
Figura 9. Esforço de corte sobre uma junta adesiva (Petrie 2000).	14
Figura 10. Distribuições de tensões numa junta adesiva, sobre um esforço de corte (Petrie 2000).	14
Figura 11. Esforço de clivagem numa junta adesiva (Petrie 2000).	15
Figura 12. Esforço de arrancamento sobre uma junta adesiva (Petrie 2000).	15
Figura 13. Tipos de roturas possíveis de ligações adesivas (Pinto 2007).	16
Figura 14. Tipos de juntas mais comuns (da Silva et al. 2007).	18
Figura 15. Distorção da junta, provocada pela concentração de tensões (da Silva et al. 2011).	19
Figura 16. Juntas com alterações na configuração (Petrie 2000).	19
Figura 17 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de (da Silva e Campilho 2011)).	30
Figura 18 – Modelo coesivo triangular (Campilho et al. 2007)	31
Figura 19 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) (Campilho et al. 2011)	33
Figura 20. Os três tipos de modos de fractura (Chaves et al. 2014).	34
Figura 21. Simbologia utilizada no ensaio DCB (de Moura et al. 2008).	35
Figura 22. Esquema do ensaio DCB (de Moura et al. 2008).	35
Figura 23. Ensaio TDCB (da Silva et al. 2007).	36
Figura 24. Esquema do ensaio ENF (da Silva et al. 2012).	37

Figura 25. Esquema do ensaio 4ENF (da Silva et al. 2012).	37
Figura 26. Esquema do ensaio ELS (da Silva et al. 2011).	38
Figura 27. Provete do ensaio ADCB com espessura diferentes (da Silva et al. 2012).	39
Figura 28. Representação do ensaio CLS (da Silva et al. 2012).	39
Figura 29. Ensaio FRMM (Constante 2014).	39
Figura 30. Representação do ensaio SLB (Chaves et al. 2014).	40
Figura 31. Representação do ensaio SLB (Soares 2015).	40
Figura 32. Esquema de redução para partição em modo misto (Szekrényes e Uj 2004).	44
Figura 33. Divisão do carregamento no topo da fenda no provete SLB (Kim et al. 2011).	48
Figura 34. Referencial de referência para o integral J 3D (Adams e Comyn 2000).	51
Figura 35. Adesivo SikaForce-7752 L60.	58
Figura 36- Geometria do provete SLB (Soares 2015)	60
Figura 37. Prensa de pratos aquecidos.....	61
Figura 38. Ciclo térmico das placas na prensa (Campilho 2009).	61
Figura 39. Máquina de corte com disco diamantado, para corte das placas de carbono.	62
Figura 40. Provetes de compósito com os espaçadores metálicos colados.	63
Figura 41. Aplicação do adesivo Sikaforce-7752 no provete de compósito.	64
Figura 42. Colocação do braço menor do provete, com grampos para assegurar a espessura final desejada.	64
Figura 43. Provete após o processo de acabamento.....	64
Figura 44. Provete colocado para ensaio, com respectiva escala.	65
Figura 45. Exemplo da forma como os dados são fornecidos pelo programa.	66
Figura 46. Posicionamento dos equipamentos para ensaio.....	67
Figura 47. Ruptura coesiva do adesivo Sikaforce®-7752 no ensaio SLB.	68
Figura 48. Curvas P- δ dos provetes com espessura de 0.1 mm.	69
Figura 49. Curvas P- δ dos provetes com espessura de 0.2 mm.	69
Figura 50. Curvas P- δ dos provetes com espessura de 0.5 mm.	70
Figura 51. Curvas P- δ dos provetes com espessura de 1 mm.	70
Figura 52. Curvas P- δ dos provetes com espessura de 2 mm.	71
Figura 53. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,1 mm.	75

Figura 54. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,2 mm.	75
Figura 55. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,5 mm.	76
Figura 56. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 1 mm.	76
Figura 57. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 2 mm.	77
Figura 58. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,1 mm.	77
Figura 59. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,2 mm.	78
Figura 60. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,5 mm.	78
Figura 61. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 1 mm.	79
Figura 62. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 2 mm.	79
Figura 63. Distribuição de tensões de corte em adesivos frágeis e ducteis (Troughton 2008).	81
Figura 64. Envelope de fratura para um t_a de 1 mm.	83
Figura 65. Gráfico com os valores de G para as várias espessuras.	84
Figura 66. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 0,1 mm no diferentes modelos estudados.	85
Figura 67. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 0,2 mm no diferentes modelos estudados.	85
Figura 68. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 0,5 mm no diferentes modelos estudados.	86
Figura 69. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 1 mm no diferentes modelos estudados.	86
Figura 70. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 2 mm no diferentes modelos estudados.	87
Figura 71. Curvas-R dos valores médios de G_I obtidos pelos 6 métodos através dos provetes com as várias espessuras de adesivo.	87
Figura 72. Curvas-R dos valores médios de G_{II} obtidos pelos 6 métodos através dos provetes com as várias espessuras de adesivo.	88
Figura 73. Refinamento geral da malha do provete em Abaqus.	89
Figura 74. Refinamento da malha dos provetes em Abaqus.	89
Figura 75. Refinamento da malha na zona de interação do punção com o provete.	90
Figura 76. Condições fronteira do provete em Abaqus®.	90
Figura 77. Interação entre os apoios, o punção e a superfície do provete.	91

Figura 78. Lei coesiva triangular do Modelo de Dano Coesivo implementado no software de simulação ABAQUS®.	91
Figura 79. Comparação da curva P- δ dos provetes 1, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.	95
Figura 80. Comparação da curva P- δ dos provetes 2, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.	96
Figura 81. Comparação da curva P- δ dos provetes 3, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.	96
Figura 82. Comparação da curva P- δ dos provetes 4, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.	97
Figura 83. Curvas-R de G_I do provete 1 para uma espessura de 1 mm.	97
Figura 84. Curvas-R de G_I do provete 2 para uma espessura de 1 mm.	98
Figura 85. Curvas-R de G_I do provete 3 para uma espessura de 1 mm.	98
Figura 86. Curvas-R de G_I do provete 4 para uma espessura de 1 mm.	98
Figura 87. . Curvas-R de G_{II} do provete 1 para uma espessura de 1 mm.	99
Figura 88. Curvas-R de G_{II} do provete 2 para uma espessura de 1 mm.	99
Figura 89. Curvas-R de G_{II} do provete 3 para uma espessura de 1 mm.	100
Figura 90. Curvas-R de G_{II} do provete 4 para uma espessura de 1 mm.	100
Figura 91. Envelope de fratura obtido numericamente para a espessura de 1 mm.	102
Figura 92. Comparação dos valores de G_I e G_{II} experimentais e numericos para 1 mm.	102

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Áreas e exemplos de adesivos (Petrie 2000).	6
Tabela 2. Tipo de rotura relacionado com a ligação (Petrie 2000).....	17
Tabela 3, Base química dos adesivos estruturais (Pinto 2007).....	25
Tabela 4. Propriedades elásticas do composto reforçado a fibras de carbono, com alinhamento unidirecional Campilho et al. (2005), Soares (2015).....	58
Tabela 5. Propriedades do adesivo Sikaforce®-7752 (Campilho et al. 2013).	59
Tabela 6. Valores de a_0 dos vários provetes.	65
Tabela 7. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 0,1 mm.	71
Tabela 8. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 0,2 mm.	72
Tabela 9. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 0,5 mm.	72
Tabela 10. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 1 mm.	73
Tabela 11. . Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 2 mm.	73
Tabela 12. Resumo dos valores obtidos para as espessuras de adesivo estudadas.	80
Tabela 13. Valores máximos de G_I obtidos experimentalmente.	82
Tabela 14. Valores máximos de G_{II} obtidos experimentalmente	82
Tabela 15. Valores de $P_{máx}$ e respectivo δ obtidos da análise numérica para a espessura de 1 mm.	94
Tabela 16. Valores de a utilizados nos ensaios numericos.....	95
Tabela 17. Valores de G_I obtidos numericamente para o adesivo SikaForce® 7752.....	101
Tabela 18. Valores de G_{II} obtidos numericamente para o adesivo SikaForce® 7752.	101

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objectivos.....	1
1.3	Organização do relatório.....	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1	Ligação de componentes por juntas adesivas.....	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	7
2.1.2	Aplicações das juntas adesivas.....	8
2.1.3	Esforços e modos de rotura	12
2.1.4	Configurações possíveis de junta	17
2.1.5	Adesivos estruturais	21
2.2	Previsão de resistência.....	25
2.2.1	Métodos analíticos	26
2.2.2	Métodos numéricos	27
2.2.2.1	Mecânica dos meios contínuos.....	27
2.2.2.2	Mecânica da fractura	28
2.2.2.3	Modelos de dano coesivo	29
2.2.2.4	Tipos de leis coesivas	30
2.2.2.5	Mecânica do dano.....	31
2.2.2.6	Método dos Elementos Finitos Extendido	32
2.3	Ensaio de caracterização à fractura.....	34
2.3.1	Fractura em tracção (modo I).....	34
2.3.2	Fractura em corte (modo II)	36
2.3.3	Fractura em modo misto (modo I+II)	38

2.4	Ensaio Single-Leg Bending (SLB).....	40
2.4.1	Caracterização do ensaio.....	40
2.4.2	Métodos para determinação da energia de fractura	41
2.4.2.1	Métodos que requerem a monitorização do comprimento de fenda.....	41
2.4.2.1.1	Modelo 1 - (Oliveira et al. 2009)	41
2.4.2.1.2	Modelo 2 - (Szekrényes e Uj 2004)	42
2.4.2.1.3	Modelo 3 - (Zhu 2008).....	46
2.4.2.1.4	Modelo 4 - Kim et al. (2011).....	47
2.4.2.1.5	Modelo 5 - (Chaves et al. 2014)	49
2.4.2.2	Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente	49
2.4.2.2.1	Compliance-Based Beam Method (CBBM) (Fernández et al. 2013)	49
2.4.2.3	Método do integral-J	50
2.5	Efeito da espessura do adesivo em juntas adesivas	52
3	DESENVOLVIMENTO.....	57
3.1	Trabalho experimental.....	57
3.1.1	Materiais utilizados	57
3.1.1.1	Substratos	57
3.1.1.2	Adesivo Sikaforce® 7752.....	58
3.1.2	Geometria das juntas	59
3.1.3	Processo de fabrico	60
3.1.4	Ensaio das juntas	66
3.1.5	Resultados obtidos	67
3.1.5.1	Modos de rotura.....	68
3.1.5.2	Curvas P- δ	68
3.1.5.3	Curvas-R	74
3.1.5.4	Análise dos resultados obtidos	79
3.1.5.5	Envelope de fractura.....	82
3.1.5.6	Efeito da espessura	84

3.2	Trabalho numérico	88
3.2.1	Condições da análise numérica	88
3.2.2	Modelo de dano coesivo triangular	91
3.2.3	Estimativa da lei coesiva em modo misto	92
3.2.4	Previsão do comportamento das juntas	93
4	CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS.....	105
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO	109

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

Nos dias de hoje, as juntas adesivas são utilizadas em muitas aplicações, devido ao facto de apresentarem diversas vantagens relativamente a outros processos de união. No sentido de utilizar juntas adesivas em estruturas, torna-se necessário e importante conhecer e identificar as propriedades mecânicas e de fractura relevantes de cada adesivo e o seu comportamento em relação ao substrato da junta. Dependendo da finalidade da ligação adesiva, as solicitações a que esta poderá estar sujeita podem variar, influenciando assim o seu desempenho, que depende da sua resistência aos esforços suportados. Há diversos tipos de ensaios destrutivos, que permitem analisar a reacção das juntas adesivas aos diversos modos de carregamento a que poderão ser sujeitos na realidade. Desta forma, é possível estudar as suas propriedades de fractura com mais precisão. O estudo destas propriedades tem uma importância elevada, pois permite obter informações que poderão permitir a previsão da resistência das juntas adesivas. As ligações adesivas podem estar sujeitas a tensões de corte, tracção ou, como em muitos casos reais, em modo misto (combinação de ambas). Como isto, é importante o estudo das propriedades dos adesivos tendo em conta este modo. De facto, existem métodos numéricos como os modelos de dano coesivo associados a uma análise de Elementos Finitos, para os quais é de extrema importância o conhecimento de parâmetros como a taxa crítica de libertação de energia em tracção (G_{IC}) e corte (G_{IIC}). Para além destes parâmetros, devido ao modo misto de carregamento anteriormente mencionado, é necessária a utilização de um critério de fractura que promova a propagação do dano nestas condições. Existem diversos critérios para este efeito e, como tal, é importante o conhecimento do critério mais adequado para cada tipo de adesivo. Neste âmbito, os ensaios de fractura em modo misto são uma ajuda imprescindível, na medida em que permitem situar a rotura observada no envelope de fractura e seleccionar o critério mais adequado.

1.2 Objectivos

O objectivo desta dissertação é efectuar a análise da taxa de libertação de energia, propriedade esta que está relacionada com a mecânica da fractura, relativa à capacidade de um dado material resistir à propagação de fenda provocada por esforços externos. Esta propriedade pode ser calculada sobre esforços de tracção (modo I) e de corte (modo II). Consideram-se os ensaios de provetes *Single-Leg Bending* (SLB) em juntas adesivas, com substratos de matriz base polimérica com reforço a fibra de

carbono, colados com um adesivo dúctil. 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}). Como tal, obtêm-se resultados das curvas P - δ servindo de base à análise dos resultados. Esta análise consiste na comparação das curvas R obtidas pela aplicação de 6 modelos que permitem o cálculo da taxa de libertação de energia (5 modelos consideram o comprimento de fenda real e 1 considera o comprimento de fenda equivalente) em modo I e em modo II. A apresentação destes resultados é feita através da utilização do envelope de fractura, que permite situar os valores de G_I e G_{II} obtidos relativamente aos de modo puro (G_{IC} e G_{IIC} , respectivamente) e determinar qual o critério de propagação em modo misto mais adequado para cada espessura de adesivo. Após seleccionado o critério de propagação mais indicado para o adesivo, nos casos que se aplique, são realizados ensaios numéricos, recorrendo ao *software* Abaqus®, tendo em consideração valores de G_{IC} e G_{IIC} previamente estabelecidos em trabalhos anteriores e usando como comprimento de fenda inicial o registado experimentalmente para cada provete de modo a simular os ensaios experimentais e validar o critério de propagação escolhido anteriormente.

1.3 Organização do relatório

A presente Dissertação de Mestrado encontra-se seccionada em quatro capítulos essenciais. No capítulo um encontram-se descritas a contextualização, os objectivos e a organização deste relatório. O capítulo 2 contém a revisão bibliográfica relativa às ligações adesivas, a caracterização e propriedades que se deve ter em conta, esforços e modos de ruptura associados normalmente, configurações possíveis das ligações, a caracterização e classificação dos principais tipos de adesivos estruturais e os vários ensaios utilizados com o objectivo de se obter as propriedades de libertação de energia (G_I , G_{II} e $G_{I/II}$). Neste último tema, foca-se mais no ensaio SLB, visto a parte experimental incidir sobre este ensaio, e ainda são indicados os modelos para a determinação do G_I e G_{II} .

No capítulo 3 são apresentadas todas as etapas envolvidas para o fabrico dos provetes SLB. A caracterização à fractura das juntas adesivas ensaiadas, e procedimentos envolvidos na preparação de toda a parte experimental, são também descritos nesta secção. Após se obter os resultados experimentais, estes são calculados através dos seis modelos de redução G_I e G_{II} e apresentados sob a forma de gráficos para uma fácil percepção e análise. A nível numérico, toda a modelação foi efectuada no *software* Abaqus®, assim como os resultados e validação do critério de propagação escolhido através dos ensaios experimentais.

No capítulo 4, e último dos mencionados, são apresentadas os resultados e conclusões retiradas do trabalho efectuado, bem como sugestões para trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Nesta secção vai-se expor toda informação base necessária à compreensão adequada do trabalho redigido. Numa forma resumida serão referidas as várias tecnologias adesivas existentes actualmente, e os sectores onde estes são utilizados.

2.1 Ligação de componentes por juntas adesivas

Um adesivo não é mais que a mistura de uma ou mais substâncias (podendo ser mono ou bicomponente) no estado líquido ou aquoso, podendo ser de origem natural ou sintética com a capacidade de sustentar os substratos que se pretende colar. Devido à sua capacidade de fluir, este é capaz de preencher espaços vazios entre juntas cujo objectivo é a colagem de substratos para desempenhar determinada função. As ligações adesivas têm sido muito utilizadas nos vastos sectores da indústria moderna, dos quais se destacam o sector automóvel, o aeroespacial, indústria naval, e a construção civil.

A produção de materiais compósitos através da utilização de adesivos tem aplicações em estruturas de grandes barcos (ex. comerciais) e aviões. Devido às suas inúmeras vantagens, como o peso reduzido, o menor custo em relação ao tipo de ligações utilizadas e a elevada eficiência na distribuição de tensões, estes têm sido utilizados com maior frequência. Contudo, o processo de colagem também apresenta desvantagens, pois quando uma fenda se inicia e propaga ao longo do cordão, devido a esforços mecânicos aplicados, os componentes ligados têm de ser substituídos, pois a reparação das ligações adesivas é muito complicada. O caso ideal seria a capacidade de auto-reparação das camadas de adesivo (ex. cola de contacto), de forma a prolongar o tempo de vida da ligação e reduzir os tempos, pontos de fragilidade na ligação, e custos de manutenção (Li et al. 2012).

A nível de comportamento mecânico, os adesivos à temperatura ambiente apresentam eleva resistência na ligação de substratos de diferentes tipos evitando assim alguns problemas encontrados em outros métodos de ligação. Muitos adesivos são viscoelásticos e agem como materiais rígidos, e relativamente flexíveis, tendo a capacidade de acomodar as movimentações dos materiais (expansão e dilatação dos materiais). Isto permite a colagem de materiais com coeficiente de dilatação térmica ou módulo de elasticidade diferente. A rigidez também proporciona resistência à propagação de fendas, e ciclos térmicos (Petrie 2000). Na colagem, o comportamento do produto, deve ser próximo de um líquido, de forma a ser possível aplicá-lo na superfície do aderente, e a existir molhabilidade na interface do adesivo e do aderente. Este deve desenvolver aderência na superfície através de forças intermoleculares, para conseguir assim suportar cargas contínuas, e variáveis ao longo do seu tempo de serviço.

Na sua ligação ele distribui essa carga ao longo dos aderentes na montagem, devendo ainda preencher as juntas, cavidades e espaços vazios. O adesivo deve trabalhar com os aderentes, funcionando como peça única, de forma a proporcionar uma longa e duradoura ligação (Petrie 2000).

Tabela 1. Áreas e exemplos de adesivos (Petrie 2000).

Áreas aplicações para adesivos	Exemplos
Materiais distintos	Combinações de metais, borrachas, plásticos, materias de espumas, madeira, cerâmicos, vidro, etc.
Materiais distintos que constitui uma ligação corrosiva	Aço com cobre ou latão
Materiais sensíveis ao calor	Termoplásticos, materiais magnéticos, vidro
Estruturas laminadas	Construção em sanduíche baseada em materiais favo de abelha
Reforço de estruturas	Reforços para painéis de parede, caixas e contentores, partições, chassis automoveis, partes em aeronaves
Aplicações estruturais	Estruturas sob tensões na fuselagem de aeronaves, construção civil e industria automóvel
Colagem de insertos	Botões, pregos, revites, veios concentricos, tubos, estruturas na construção, ligações veio-rotor, ferramentas, plásticos reforçados com insertos metalicos, pinceis de pintura
Selagens de juntas	Ligações em tubagens, encapsulamentos, juntas em contentores, selagens em tampas
Componentes Frágeis	Instrumentação, filmes finos e folhas, componentes microeltronicos e outros onde seja necessario precisão na zona da colagem
Componentes de dimensões particulares	Onde as áreas de colagem são amplas ou existe uma necessidade de adaptação á forma entre os componentes
Ligações temporárias	Na qual a inteção é desmontar a colagem mais tarde após utilização de vários rótulos, sirurgicos ou fitas adesivas, adesivos para posicionar e localizar partes, em vez de moldes, antes da montagem através de outro tipo de fixação

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

A ligação de componentes através de adesivos deve ter em conta a caracterização de algumas propriedades relevantes e os vários tipos de adesivos que podem realizar a função pretendida. A configuração da junta deve ser devidamente especificada, assim como dimensionada (ex. espessura do adesivo), de forma a conseguir desempenhar a função pretendida. A eficiência da ligação adesiva depende, não só do que foi mencionado no tópico anterior, mas também do projecto da estrutura. Assim, torna-se bastante complexo projectar uma junta adesiva devido aos vários factores que podem indirectamente comprometer a ligação.

A escolha do adesivo adequado é essencial para eficiência da ligação, uma vez que o este deve ser o mais apropriado para resistir às condições a que será exposto, como as variações de temperatura, humidade, raios UV e intempéries. Para além das condições ambientais este deve ainda ser adequado aos materiais a unir e aos processos de fabrico dos substratos, sendo assim capaz de acompanhar e resistir aos esforços e movimentos dos aderentes. Contudo, antes da aplicação do produto, deve ser realizada uma preparação prévia de superfície. Esta preparação pode ser apenas uma limpeza através de um processo mecânico (Ex: despolimento), químico (Ex: activadores), ou ainda pode ser necessário a utilização de um primário para homogeneizar a superfície. O processo de cura, deve ser respeitado, de acordo com a ficha de produto do fabricante, para se conseguir assim uma aplicação correcta do produto.

As ligações efectuadas através de adesivos são cada vez mais utilizadas como uma alternativa viável às ligações mecânicas nas construções de engenharia. Este facto, deve-se às inúmeras vantagens em relação aos métodos de ligação comumente utilizados. Algumas dessas vantagens são apresentadas de seguida (Petrie 2000, da Silva et al. 2011):

- A redução do peso em relação às fixações mecânicas, permitindo assim à estrutura obter uma menor carga a suportar e um menor número de componentes para fixação. A ligação adesiva permite uma fixação resistente e contínua, apresentando desta forma uma distribuição de tensões uniforme na área de colagem, conseguindo-se ainda uma maior rigidez e transmissão de esforços eficiente. A utilização de adesivos evita a perfuração e tensões localizadas nos substratos, concedendo assim à estrutura uma maior resistência à fadiga e a outros esforços inerentes;
- Nas ligações através de soldadura, os adesivos não provocam alterações estruturais nas propriedades dos aderentes, pois este é aplicado à temperatura ambiente. A nível estético, o adesivo é mais vantajoso pois não está visível, ao contrário da soldadura que não apresenta um bom acabamento estético;
- O dimensionamento de uma ligação através de adesivos para além do menor custo, apresenta uma maior facilidade de automatização do processo e o fabrico de formas complexas com elevada resistência mecânica;

- Esta tecnologia permite a ligação de substratos de diferentes tipos e famílias. Pois o adesivo, devidas as suas propriedades elásticas, é capaz de acompanhar a dilatação térmica dos aderentes e não permite a propagação da corrosão galvânica entre substratos;
- Exibem capacidade de selagem (vedação das juntas), isolamento térmico e ainda tem bom comportamento sonoro (amortecimento das vibrações), sendo esta característica uma boa propriedade na resistência à fadiga.

No entanto, estes métodos de ligação apresentam algumas desvantagens em determinadas situações. Algumas dessas desvantagens apresentam-se de seguida (Petrie 2000, da Silva et al. 2011):

- A ligação efectuada é permanente, pelo que a sua desmontagem apenas é possível através da destruição da estrutura;
- São normalmente sensíveis às condições atmosféricas, nomeadamente aos raios UV, temperatura e humidade;
- A realização da inspecção torna-se difícil;
- Não são muito resistentes a esforços de clivagem e arrancamento, pelo em situações em que não é possível alterar a configuração da junta é recomendado não utilizar este tipo de ligação;
- É necessária uma preparação prévia de superfície, e o processo de cura pode ter um custo elevado devido ao tempo e forma de cura.

2.1.2 Aplicações das juntas adesivas

No presente século, os adesivos são usados num enorme número de aplicações de alta responsabilidade estrutural, o que lhes tem conferido uma maior importância nos mais diferentes sectores existentes no mercado. Este modo de ligação é utilizado cada vez mais na indústria, que vai desde o sector automóvel, têxtil, construção civil, aeronáutica, marítima, mobiliária, veículos comerciais (autocarros e comboios) e caixas isotérmicas para o transporte de alimentos. Devido aos vários sectores mencionados, foram sendo desenvolvidos adesivos direccionados para cada sector, podendo abranger aplicações variadas ou específicas.

Na indústria automóvel, as ligações adesivas têm-se tornado cada vez mais importantes, não só pelo facto da redução de peso do veículo, mas também pelas suas propriedades de isolamento sonoro. Esta é uma das mais activas indústrias na utilização de adesivos (Figura 1).

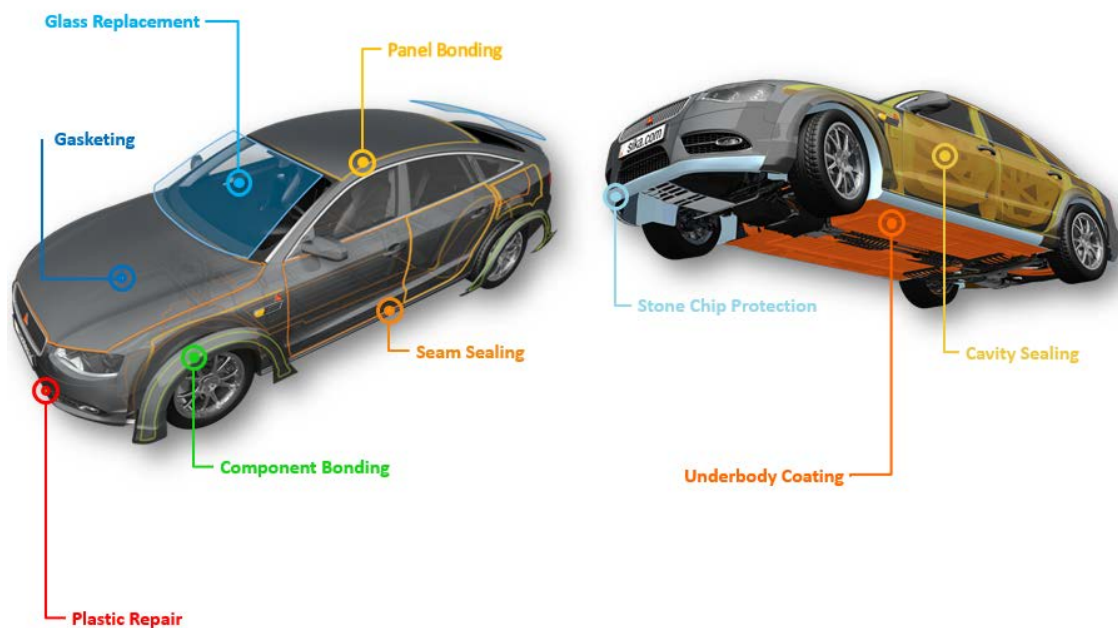


Figura 1. Zonas num automóvel onde são aplicados adesivos (Automotive 2010).

Este método de ligação era já utilizado para a colagem do forro do tejadilho, do pára-brisas e vidro traseiro (adesivos elásticos), contudo, devido ao desenvolvimento de uma nova gama de adesivos estruturais, aplicados na ligação dos constituintes da carroçaria do automóvel, estes permitiram a construção de veículos mais leves e de elevada resistência ao impacto (da Silva et al. 2011).

A possibilidade de construir veículos mais leves com maior ou igual resistência das fixações mecânicas, com o uso destes produtos, satisfaz os objectivos da indústria automóvel, que procura acima de tudo construir veículos mais rápidos, mais resistentes e com consumos mais reduzidos. O facto de os adesivos conseguirem ter aderência a uma vasta gama de materiais como os aços de elevada resistência (carroçaria), alumínio, compósitos de todo o tipo e ligas de magnésio, torna este método ainda mais vantajoso para este sector.

Algumas aplicações das juntas adesivas na construção de automóveis são por exemplo, a colagem dos pára-brisas, da frente e traseira, através aplicação do adesivo na serigrafia do vidro (parte negra no rebordo), de forma automatizada, e colocação na carroçaria.

O facto de se utilizar adesivos para selar, colar e revestir certos materiais permite reduzir os ruídos, as vibrações e ainda melhorar a acústica no interior dos automóveis.

Na indústria electrónica cada vez mais têm sido aplicados adesivos, tornando-se assim uma aplicação regular na produção de circuitos integrados, pois as fixações convencionais de microcircuitos em plástico e cerâmica têm sido substituídas por adesivos condutores anisotrópicos.

As estruturas híbridas dos módulos *microchip* são produzidas por meio de adesivos isolantes e resistentes à temperatura, utilizados para ligar a estrutura do *chip* ao substrato de silício (Figura 12).

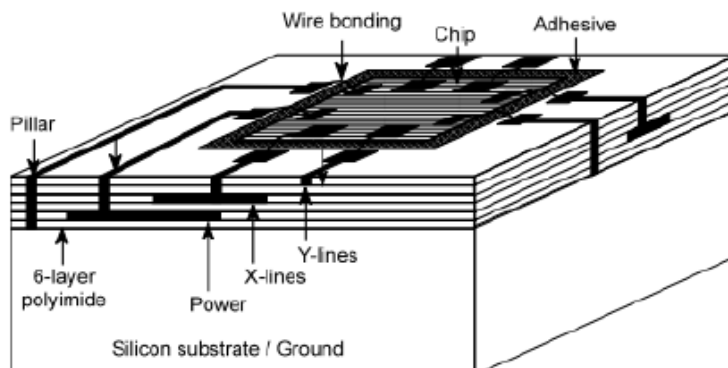


Figura 2. *Microship* produzido com auxílio de adesivos (Cognard 2005).

Na indústria naval, os plásticos reforçados com fibras (PRF) são tipicamente os materiais usados na construção de embarcações de lazer e pesca. Para ligar os vários componentes deste tipo de barcos, recorre-se aos adesivos estruturais. A técnica de colagem é preferencialmente utilizada na junção dos seguintes materiais:

- PRF – (placa) madeira;
- PRF – Policloreto de vinilo (PVC);
- PRF – metal (alumínio ou aço).

Em termos de aplicações dos adesivos na construção naval (Figura 3), destacam-se:

- Forros internos do casco;
- Ligação do convés ao casco;
- Colagem dos vidros;
- Calafetagem do piso;
- Junção de painéis do casco;
- Colagem de *decks* decorativos no convés.



Figura 3. Zonas normalmente coladas nas embarcações.

Na indústria aeronáutica, são utilizados adesivos essencialmente na construção da estrutura do avião (Figura 4), onde diversas partes são unidas por adesivos devido à elevada utilização de materiais compósitos, os quais apenas aceitam a colagem como método de ligação, mesmo em aplicações de extrema exigência em termos mecânicos, como as protecções das turbinas. Neste caso, as vibrações e a temperatura são factores condicionantes no dimensionamento da junta e escolha do adesivo.

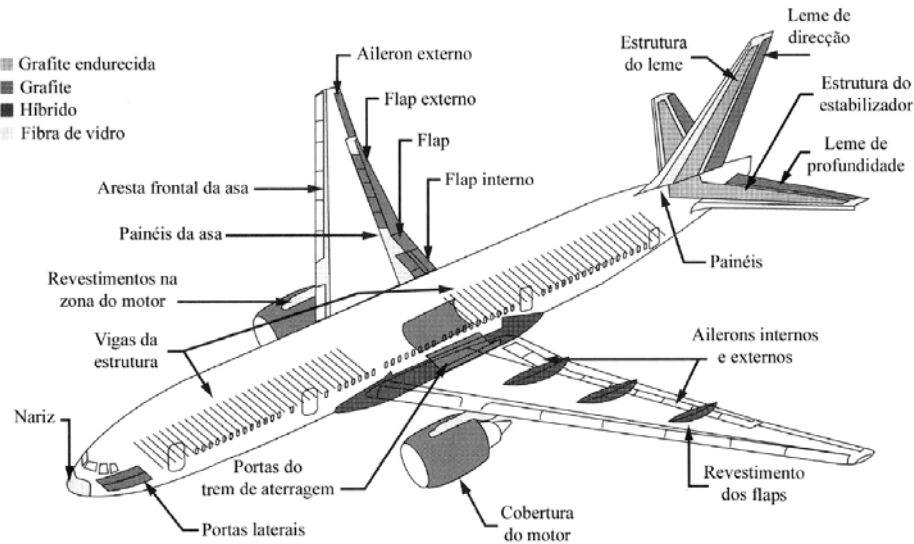


Figura 4. Exemplo da aplicação de adesivos em aviões (Cognard 2005).

Com aumento significativo do uso de materiais compósitos, a colagem na estrutura dos aviões com adesivos, tem sido o método mais adequado para juntar este tipo de materiais, têm visto a sua aplicação generalizar-se cada vez mais na indústria da aviação (Figura 5).

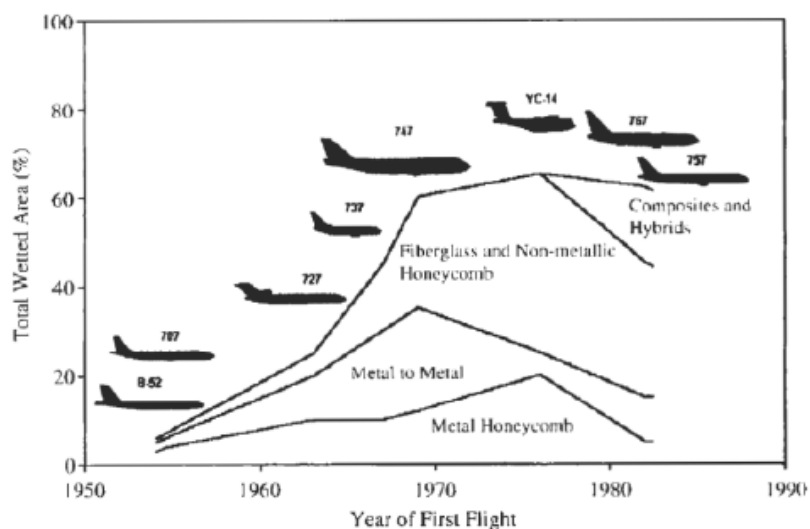


Figura 5. Evolução ao longo dos anos da quantidade de adesivo utilizado (Chaudhury e Pocius 2002).

2.1.3 Esforços e modos de rotura

No dimensionamento da junta, deve-se ter em atenção evitar esforços agressivos, ou seja, a geometria deve ser dimensionada para que esforços de clivagem ou arrancamento sejam evitados, prevenindo assim tensões localizadas. Na Figura 6, pode-se observar os tipos de falhas que podem ocorrer numa junta adesiva. Na realidade, quando se pretende caracterizar experimentalmente adesivos, procura-se sempre que a falha seja coesiva.

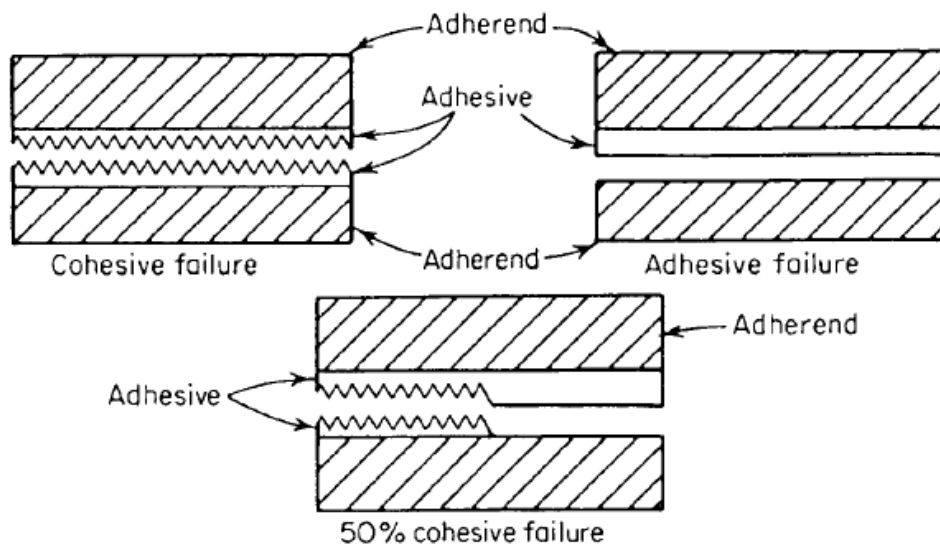


Figura 6. Exemplo dos tipos de falha possíveis (Petrie 2000).

A falha coesiva ocorre quando a tensão de fractura entre o adesivo e o material permite que a camada de adesivo permaneça em ambos os lados do aderente. A ligação do adesivo ao substrato é tão forte que, o que rompe é adesivo nas suas camadas internas (Petrie 2000).

O elemento importante na elevada resistência de ligação através de adesivos é a sua capacidade de distribuição de tensões. Apesar de este tipo de ligação permitir uma distribuição de tensões muito eficaz, estas não estão totalmente isentas de concentração de tensões. As concentrações de tensões na colagem podem ocorrer devido à forma errada na preparação da junta, às dilatações térmicas do produto, que são consequência das variações de temperatura (Pocius e Dillard 2002). Contudo, a mais frequente causa de tensões, deriva dos esforços mecânicos aplicados na ligação. Os esforços capazes de provocar tensões na ligação são de tracção, compressão, corte, arrancamento e clivagem.

- **Esforços de Tracção**

As tensões de tracção surgem quando são aplicadas forças perpendiculares ao plano da junta, originando assim esforços normais uniformes de tracção ao longo da ligação (Petrie 2000). A distribuição de tensões normais ao longo do comprimento não é uniforme, pois nas arestas existem picos de concentrações de tensões, estando sujeitas, como mostra a Figura 7, a uma tensão superior.



Figura 7. Esforço de tracção sobre uma junta adesiva (Petrie 2000).

A carga deve ser aplicada para que as superfícies dos aderentes estejam paralelas, e apenas se verificarem cargas axiais. Os aderentes utilizados devem ter rigidez suficiente para permitir uma distribuição uniforme das cargas, para desta forma se tentar evitar o aparecimento de tensões de clivagem nas extremidades do provete (Petrie 2000).

- **Esforços de compressão**

Os esforços de compressão actuam na direcção contrária aos de tracção, e as cargas devem ser perpendiculares à superfície de ligação, de modo a que o adesivo permaneça em compressão pura. O adesivo, sujeito a este tipo de carga, Figura 8, dificilmente irá falhar, contudo, pode fractura em pontos mais fracos na sua ligação, provocada pelas tensões localizadas (Petrie 2000).



Figura 8. Esforço de compressão sobre uma ligação adesiva (Petrie 2000).

- **Esforços de Corte**

Carregamento caracterizado pela aplicação de forças no plano do adesivo, que provocam o escorregamento entre os dois aderentes. Observa-se que as extremidades da junta ficam sujeitas a concentrações de tensões elevadas, enquanto a região central da junta pouco contribui para a sustentação da carga representada na Figura 9.



Figura 9. Esforço de corte sobre uma junta adesiva (Petrie 2000).

As tensões de corte surgem quando são aplicados esforços que actuam nos planos paralelos ao do adesivo e forçam a separação os aderentes (Petrie 2000). Os adesivos têm uma elevada resistência a tensões de corte, pois este esforço envolve toda a área de colagem contribuindo assim para uma alta resistência da junta.

Grande parte das tensões estão localizadas nas extremidades da junta adesiva, enquanto a parte interior do adesivo contribui para a resistência da ligação, como mostra a Figura 10 (da Silva e Adams 2007).

Este comportamento deve-se ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade até à extremidade oposta da sobreposição (Adams et al. 1997, Adams e Comyn 2000).

Na análise deste comportamento, verifica-se que é devido ao efeito de deformação diferencial dos substratos ao longo do seu comprimento de sobreposição, que descreve assim a forma como cada aderente se deforma longitudinalmente. Assim, verifica-se que os aderentes apresentam uma taxa crescente de deformação desde a extremidade sem adesivo, até à outra extremidade, isto devido ao comportamento elástico dos aderentes e à continuidade existente no contacto entre o adesivo e o substrato (Adams et al. 1997).

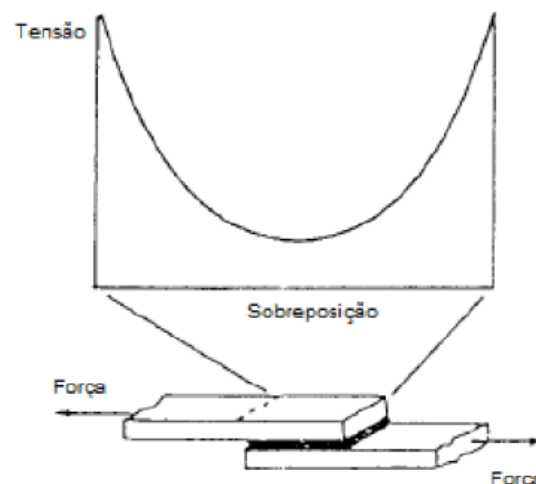


Figura 10. Distribuições de tensões numa junta adesiva, sobre um esforço de corte (Petrie 2000).

No caso de se aumentar a largura da ligação adesiva, torna a junta mais resistente, pois aumenta a área nos dois extremos da colagem, que correspondem às zonas onde o nível de tensão é maior. Por outro lado, o aumento do comprimento de sobreposição também aumenta a resistência da junta, mas também aumenta a deformação diferencial dos aderentes, e assim, o seu efeito vai diminuindo.

- **Esforços de Clivagem**

Os esforços de clivagem, acontecem quando as forças actuam numa extremidade da junta adesiva e forçam os substratos a separar-se, sendo uma forma de tensão indesejada (Petrie 2000). As juntas que estão sujeitas a este tipo de carga são menos resistentes do que as que estão sob outro tipo de tensões pois a carga é concentrada numa pequena área. Como se observa na Figura 11, existe uma forte concentração de tensões na extremidade da junta que está sob as forças de clivagem e que tendem a separar os substratos. A extremidade oposta numa situação como este pouco contributo oferece.

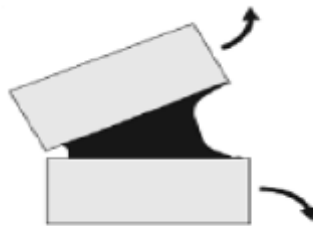


Figura 11. Esforço de clivagem numa junta adesiva (Petrie 2000).

- **Esforços de Arrancamento**

Os esforços de arrancamento são similares aos esforços de clivagem, com a diferença de que pelo menos um dos aderentes deve ser flexível o suficiente de forma a poder deformar-se plasticamente devido a esforços aplicados, provocando assim tensões concentradas de tracção numa das extremidades da ligação (Figura 12).



Figura 12. Esforço de arrancamento sobre uma junta adesiva (Petrie 2000).

- **Tipos de Rotura**

Os tipos de rotura podem ser do tipo adesiva (a), rotura coesiva (b), rotura de um dos aderentes (c) ou ainda rotura mista (d). Estes tipos de rotura podem ser observados na Figura 13.

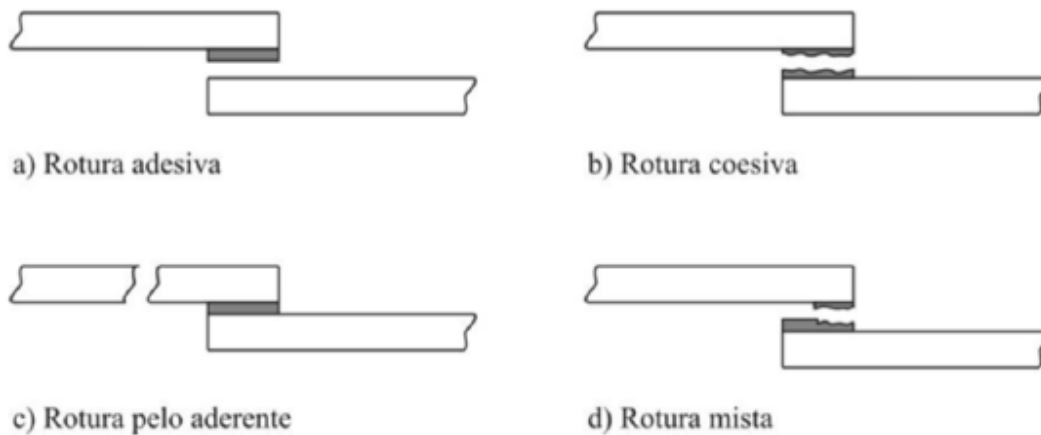


Figura 13. Tipos de roturas possíveis de ligações adesivas (Pinto 2007).

Adesiva

A rotura na interface entre o adesivo e um dos aderentes designa-se por rotura adesiva. Depois de ocorrer rotura verifica-se que a superfície de um dos aderentes não apresenta qualquer vestígio de adesivo, enquanto a superfície do segundo aderente apresenta todo o adesivo (Figura 13 a).

Este tipo de falha ocorre devido à falha de aderência entre o adesivo e a superfície de substrato. Contudo, é necessário realizar sempre uma análise da rotura, pois caso exista na superfície uma película de adesivo, esta é considerada falha mista e não adesiva (Pinto 2007).

Coesiva

Quando a rotura se propaga ao longo da camada do adesivo e se mantém em ambos os aderentes, é considerada rotura coesiva. Neste tipo de rotura pode-se verificar que as forças de ligação entre o adesivo e o aderente são superiores às forças internas do adesivo (Petrie 2000, Pinto 2007). Este tipo de rotura é normalmente pretendido visto que a ligação entre o aderente e o adesivo é resistente tal que, o adesivo fractura pelo adesivo. Quando a ligação falha pelo substrato, pode também ser considerada falha coesiva (Pocius e Dillard 2002).

Tabela 2. Tipo de rotura relacionado com a ligação (Petrie 2000).

Tipo	Parâmetros da Ligação
Rotura Adesiva	Força coesiva maior que a Força da interface
Rotura Coesiva	Força coesiva maior que a Força da interface
Rotura no Aderente	Força coesiva e da interface maior do que a resistência do aderente
Rotura Mista	Força da interface igual à Força coesiva

Mista

Consiste na rotura adesiva e coesiva. Este modo de rotura pode resultar devido à ineficaz ou inexistência da preparação de superfície realizada numa dada região das superfícies a juntar, ou à má preparação do produto. Neste tipo de falha, os aderentes não ficam danificados (Pinto 2007).

2.1.4 Configurações possíveis de junta

No mundo das ligações adesivas, existem vários tipos de configurações possíveis para as juntas. Esta variedade deve-se ao facto de as diferentes aplicações necessitarem geometrias diferentes para se fazer um bom uso da ligação, sendo as seguintes as mais comuns (Petrie 2000):

- Sobreposição simples;
- Sobreposição dupla;
- Chanfro exterior;
- Chanfro interior;
- Degrau;
- Cobre-junta;
- Cobre-junta dupla;
- Topo a topo;
- Tubular.

Na Figura 14 podem-se observar os vários tipos de junta mencionados anteriormente.

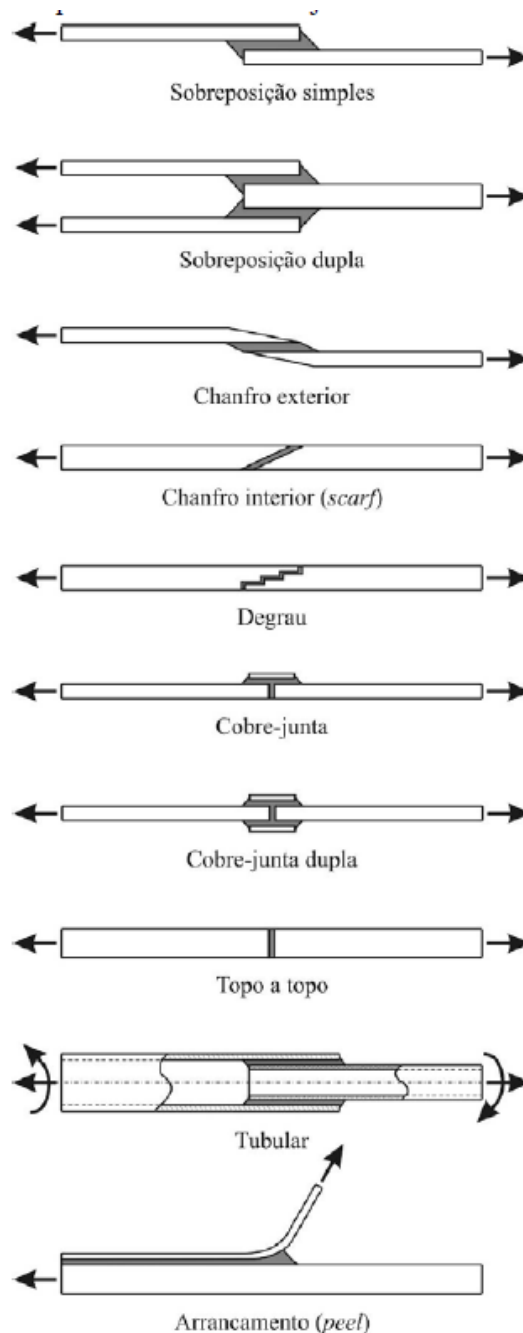


Figura 14. Tipos de juntas mais comuns (da Silva et al. 2007).

Sobreposição simples

A junta de sobreposição simples é a mais utilizada em aplicações industriais, pela sua facilidade de fabrico (Her 1999, Yeh e Tandjung 2005), e por poder ser aplicada com aderentes de baixa espessura e assim submeter o adesivo maioritariamente a tensões de corte. Contudo se utilizados aderentes flexíveis existe a tendência para aparecer

flexão dos aderentes, provocando assim desalinhamentos na área de colagem, como mostra a Figura 15.

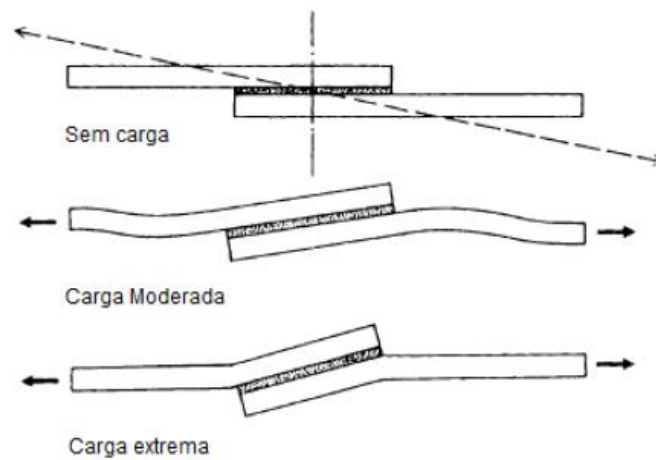


Figura 15. Distorção da junta, provocada pela concentração de tensões (da Silva et al. 2011).

Este desalinhamento provoca tensões de clivagem nas extremidades da junta, diminuindo assim consideravelmente a resistência da ligação (da Silva et al. 2012). Este esforço mecânico é indesejado e pode ser reduzido através de uma pequena alteração na geometria dos aderentes (Figura 16).

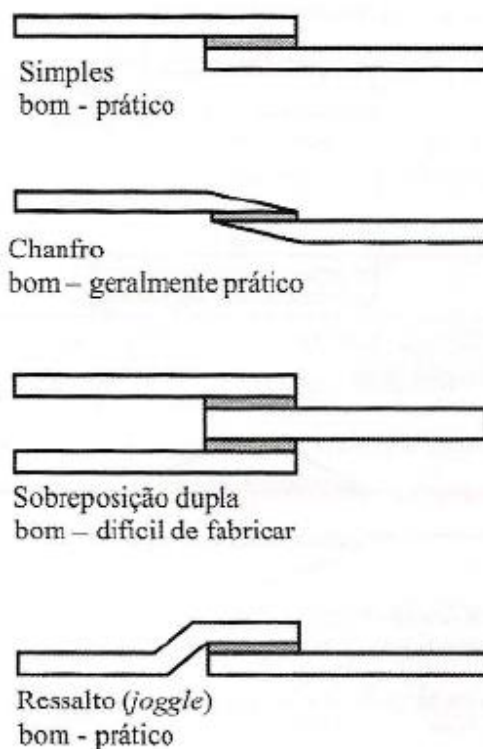


Figura 16. Juntas com alterações na configuração (Petrie 2000).

As juntas com chanfro e reforço duplo reduzem as tensões de arrancamento, apesar dessa alteração, a que apresenta um bom alinhamento das forças na junta sem existam tensões de clivagem, é a de ressalto (Petrie 2000).

Sobreposição dupla

A junta de sobreposição dupla é mais difícil de produzir do que a simples. A junta ao ser simétrica, não tem esforços de flexão nos aderentes o que é uma vantagem para este tipo de configuração (Petrie 2000, da Silva e Adams 2007).

Chanfro Exterior

Este tipo de junta é mais eficiente do que a de sobreposição simples devido ao simples facto das extremidades com chanfro nos aderentes permitirem a sua deformação durante a aplicação do esforço. Esta alteração na geometria, provoca assim uma redução dos esforços de arrancamento nas extremidades da junta (Petrie 2000, da Silva et al. 2007).

Chanfro Interior

Junta que apresenta uma geometria semelhante à junta topo a topo, contudo, a área de união entre substratos dá-se com um certo declive. Este tipo de ligação é utilizado para aumentar a resistência da junta adesiva, impedindo assim que esta esteja sujeita a um carregamento puro de tracção (Campilho et al. 2007). Devido à inclinação do plano da junta, aparecem ainda tensões de corte. O fabrico deste tipo de junta é mais dispendioso devido à necessidade de realizar os declives nos substratos, provocando um aumento no custo de fabrico e podendo até ser impraticável devido à extensão necessária para a execução da ligação.

Junta topo a topo

A junta topo a topo, é a de fabricação mais simples, embora a resistência seja devido à superfície de ligação ser reduzida e existir concentrações de tensões de arrancamento na periferia (da Silva et al. 2011). Na eventualidade de existirem esforços de flexão aplicados neste tipo de junta, esta fica sujeita ao esforço de clivagem, comprometendo assim mais ainda a sua resistência

Junta Tubular

A junta tubular usa-se quando existe a necessidade de colar tubos, podendo assim variar bastante as condições geométricas associadas à junta. É importante garantir-se a

concentricidade entre tubos, de forma a evitar que se verifiquem esforços de clivagem na ligação (Croccolo et al. 2012). Este tipo de junta tem boa resistência à flexão e implica uma área de colagem superior, contudo a maioria destas juntas necessita de operações de maquinagem (Petrie 2000).

Cobre-junta e Cobre-junta dupla

Os esforços das juntas cobre-juntas ficam normalmente alinhados e são usados quando não é possível o uso das juntas de sobreposição devido à espessura dos aderentes. A junta cobre junta simples, à semelhança das juntas de sobreposição, está sujeita a tensões de arrancamento quando sujeita a esforços de flexão. Na eventualidade de se prever a ocorrência de esforços de flexão a cobre junta dupla é mais indicada (Petrie 2000, da Silva et al. 2007).

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são elementos que permitem a ligação de componentes, e oferecem rigidez à estrutura, conseguindo resistir a elevadas cargas (da Silva et al. 2011). A sua capacidade de resistir a tensões de corte acima de 7 MPa, torna estes elementos de ligação vantajosos. A aplicação dos adesivos, normalmente deve resistir durante toda a vida útil tanto agentes químicos de limpeza como às movimentações da estrutura (Petrie 2000).

Tipos de Adesivos Estruturais

Os adesivos estruturais comercialmente disponíveis, estas podem apresentar vários tipos de base química. Uma listagem dos compostos químicos a partir do qual os adesivos são produzidos, apresenta-se de seguida.

Epóxidos

Os adesivos base epóxi são uma família de adesivos muito versáteis pois estes ligam eficientemente diferentes tipos de substratos e a sua capacidade para conseguir outras propriedades através de modificação e poder alcançar as mais variadas propriedades é uma grande vantagem (Petrie 2000). A cura destes produtos pode ser a elevadas temperaturas, exibindo um baixo nível de contracção e baixa deformação sob cargas prolongadas e não libertam gases resultantes da reacção de cura (Adams 2005). Este tipo de adesivos demonstram boa resistência à tracção, contudo baixa resistência ao arrancamento (Petrie 2000). A aplicação destes produtos é bastante diversificada, podendo ser utilizados na ligação de quase todos materiais na construção mecânica (Pinto 2007). Aplicam-se em revestimentos, união de materiais compósitos, ligação de componentes eléctricos e electrónicos, materiais de construção e aplicações na área da

engenharia civil (da Silva et al. 2011). Vários outros tipos de polímeros podem ser misturados com resinas de epóxi para se obter determinadas características. De seguida apresentam-se alguns tipos de adesivos híbridos base epóxi:

Base Epóxi-fenólico

Através da mistura de resina de epóxi com resina fenólica o desempenho a altas temperaturas é melhorado, relativamente às normais resinas de epóxi. São indicados para esforço constante a 175°C ou esforços variáveis a uma temperatura de 260°C (Petrie 2000). Apresentam uma excelente resistência química a óleos, solventes e à humidade, contudo, devido à sua rigidez, têm baixa resistência ao arrancamento e ao impacto, apresentando ainda uma limitada resistência ao choque térmico (da Silva et al. 2012). Além de aplicações a altas temperaturas, este adesivo pode ser usado para colar vidro, cerâmicos e materiais compósitos de matriz fenólica. A sua boa capacidade de escoamento, torna este tipo de adesivo indicado para a produção de materiais cujo núcleo seja em favo de abelha (da Silva et al. 2012).

Epóxi-polissulfido

Este adesivo apresenta boa resistência química, bom comportamento quando exposto às intempéries e ainda elevada resistência ao impacto, sendo direccionados para aplicações que envolvam choques e vibrações (Pinto 2007). A sua utilização incide em aplicações que requerem um alto nível de alongamento e para a colagem de substratos com diferentes coeficientes de dilatação (da Silva et al. 2012).

Epóxi-poliamida

O objectivo desta formulação é conceder ao adesivo uma boa flexibilidade, resistência à fadiga e impacto, uma elevada resistência ao corte e uma extremamente elevada resistência ao arrancamento (Petrie 2000). A limitação mais evidente, é a baixa resistência à humidade. Aplicam-se normalmente na colagem de painéis de alumínio a núcleos com formato favo de abelha e em estruturas para o sector da aviação (da Silva et al. 2012).

Epóxi-poliuretano

A combinação com poliuretano é formulada com o objectivo de fortalecer o adesivo aumentando-lhe assim a sua resistência ao corte e ao arrancamento (da Silva et al. 2012). Esta formulação a tem também boa resistência à fadiga (Pinto 2007).

Epóxido-nitrilo

A formulação deste tipo de adesivo apresenta propriedades como a elevada resistência quando sujeito a esforços mecânicos, e ainda alguma resistência à humidade, embora não sendo tão elevada como a formulação da resina fenólica (Petrie 2000). A sua aplicação na construção e manutenção de aviões comerciais a jacto (Esteves 1990, Pinto 2007).

Fenólicos

Os adesivos fenólicos apresentam uma boa resistência a elevadas temperaturas, ao meio ambiente, têm um baixo custo (Petrie 2000). Contudo, são muito frágeis, e apresentam baixa resistência ao impacto e baixa resistência a agentes químicos (Ex: solventes). Inicialmente eram utilizados para efectuar a colagem de madeira (Esteves 1990), embora possam também ser usados para a colagem de metal ao vidro. A sua alta resistência a altas temperaturas, faz com que sejam aplicados em moldes de fundição, lixas, rodas abrasivas e revestimentos de travões (da Silva et al. 2012). No sentido de reduzir a sua fragilidade (elevada rigidez), foram formulados adesivos que combinam a resina fenólica com resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou policloropreno) (Esteves 1990).

Fenólico-nitrilo

A característica mais vantajosa na formulação de resina fenólica com borracha de nitrilo é a melhoria da resistência ao arrancamento sem reduzir significativamente a resistência do adesivo às elevadas temperaturas (Petrie 2000). Esta propriedade conseguida, permite assim a colagem do revestimento de calços de travões, no sector da aviação é aplicado na colagem de painéis de alumínio a estruturas em formato de ninho de abelha, no calçado e montagem de mobília.

Fenólico-vinílico

Este tipo de adesivo apresenta boa resistência química, boa resistência ao corte, ao arrancamento e ao impacto, o que faz deles uns dos mais utilizados adesivos estruturais para a colagem de metais. Apesar destas características, devido aos constituintes termoplásticos presentes na sua composição química, a resistência a elevadas temperaturas é reduzida. A aplicação que se destaca na utilização deste adesivo, é na colagem da folha de cobre a plásticos laminados em placas de circuitos impressos (da Silva et al. 2012).

Fenólico-polícloropreno

Este adesivo apresenta elevada resistência à deformação e à maioria dos ambientes a que é exposto em serviço, o que lhe concede a capacidade de resistir a carregamentos prolongados (Petrie 2000). A nível de esforços cíclicos, este tipo de adesivo é altamente resistente à fadiga e impacto (da Silva et al. 2012). Em contrapartida a sua resistência ao corte é reduzida em relação aos outros adesivos base fenólica.

Poliamidas

As poliamidas são adesivos que se mantêm estáveis a elevadas temperaturas, aproximadamente 200°C (Pinto 2007), apresentando uma elevada rigidez e uma certa fragilidade ao mesmo tempo. A baixa resistência ao choque e vibrações integram as características deste adesivo (Esteves 1990). Apesar disso, têm um custo elevado e a sua cura realiza-se a elevadas temperaturas (da Silva et al. 2012). A sua aplicação é mais direccionada para a indústria aeronáutica.

Poliuretanos

Os adesivos base poliuretanos, têm resistência ao corte e à tracção inferiores relativamente a outros adesivos (Esteves 1990). Exibem boa flexibilidade, bom comportamento à temperatura ambiente, boa resistência ao arrancamento, à abrasão, a choques, a vibrações, boa tenacidade e bom comportamento quando sujeitos à intempérie (Pinto 2007). Este tipo de adesivos apresenta uma resistência de rotura ao corte de 20 MPa, podendo assim, ser usados em aplicações estruturais (Esteves 1990, Pinto 2007). Os principais mercados em que são usados são a indústria têxtil e industria automóvel (Skeist 2012).

Acrílicos

Adesivos estruturais que contêm monómeros de acrílicos, curados pela adição de um radical livre à polimerização à temperatura ambiente (Adams 2005). São adesivos multi-aplicações, capazes de serem aplicados de muitas formas (Skeist 2012). Nesta gama de adesivos fazem parte os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

Anaeróbicos

Este tipo de adesivo, é assim designado devido à sua cura ocorrer após o ar deixar de estar em contacto com a resina. Apresenta uma resistência mecânica bastante variável, podendo ser equivalente à dos epóxis. Este tipo de adesivos tem boa resistência a solventes, e a sua temperatura máxima de utilização situa-se próximo dos 150°C

(Esteves 1990, Pinto 2007). Têm a capacidade de colar todo o tipo de metais, vidros, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis. Apresentam resistência à humidade, a solventes e à água do mar (Petrie 2000). A indústria automóvel é o sector alvo deste tipo de produtos. Outras aplicações incluem montagem de máquinas, manutenção e reparação (Skeist 2012).

Cianoacrilatos

Os adesivos base cianoacrilato, são comercializados pelo conhecido nome de “supercola”. Têm elevada rigidez e menor resistência à humidade em relação aos anaeróbicos, tendo ainda baixa resistência a altas temperaturas, ao corte e arrancamento (Petrie 2000). Os mercados alvo são normalmente a indústria electrónica e dos brinquedos (Skeist 2012).

Acrílicos modificados

Os acrílicos modificados apresentam na sua composição polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo (Pinto 2007). As propriedades mecânicas são, resistência ao arrancamento, cisalhamento, e ao impacto sob temperaturas entre os -100°C e os 120°C (Petrie 2000). Podem ser utilizados para colar metais, plásticos e superfícies oleosas. A sua cura é rápida, e tem resistência à humidade. Na Tabela 3 apresentam-se os tipos e características mais comuns dos adesivos estruturais.

Tabela 3, Base química dos adesivos estruturais (Pinto 2007)

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

2.2 Previsão de resistência

O processo de evolução das juntas adesivas relaciona-se com o desenvolvimento de metodologias de previsão fiáveis, as quais permitem o aumento da eficácia quando

utilizadas, e assim possibilitando ultrapassar alguns problemas relacionados com o sobredimensionamento das juntas. Este sobredimensionamento, provoca um aumento de custo na produção, assim como um aumento no peso, relacionando-se isto com o a falta de modelos de materiais e de critérios de rotura adequados que se notava há algumas décadas atrás. As duas metodologias que podem ser aplicadas para a análise de juntas adesivas são as análises de forma fechada (métodos analíticos) e os métodos numéricos.

Os estudos na década de 30 com o modelo analítico de Volkersen (1938) que parte do princípio que os materiais são inteiramente elásticos e a deformação do adesivo, ocorre apenas em corte, permitiram o avanço no estudo das juntas adesivas. Por outro lado, a formulação analítica tornou-se mais complexa caso o adesivo entre no regime plástico devido à utilização de diferentes materiais ou materiais compósitos com resistência elevada. O MEF (Adams e Peppiatt 1974) é a técnica mais utilizada para a análise das juntas adesivas, tendo sido inicialmente aplicada por Harris e Adams (1984). Harris e Adams (1984) introduziram assim alguns factores como a rotação da junta, a plasticidade dos aderentes, a plasticidade do adesivo e a influência dos filetes. Na previsão da resistência das juntas coladas, recorreu-se à mecânica dos meios contínuos, pois este estudo necessita de um critério adequado e uma distribuição correcta das tensões.

O MEF pode também ser combinado com técnicas da mecânica de fractura para a previsão da resistência, quer pelo factor de intensidade das tensões quer por abordagens energéticas como a técnica do fecho da fenda virtual (TFFV). Contudo, estas técnicas de modelação dificultam o processo de avaliação do crescimento da fenda devido à ao facto de se necessitar de voltar a criar a malha caso a fenda se propague, o que tem repercussão ao nível do esforço computacional (Curiel Sosa e Karapurath 2012). Ao longo das últimas décadas a modelação numérica foi alvo de grandes avanços, sendo um deles a modelação de dano por MDC. Esta técnica acopla a modelação convencional por MEF para as regiões em que não é previsto dano com a mecânica de fractura, através da utilização dos elementos coesivos de forma a proporcionar a propagação de fendas.

Mais recentemente, começou-se a usar outra técnica para modelar o crescimento de fendas com uma tensão, o Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX), que utiliza funções de forma enriquecidas para representar um campo de deslocamento contínuo.

2.2.1 Métodos analíticos

Na análise estrutural de ligações adesivas, os métodos preditivos consistiam em formulações analíticas. Os trabalhos que foram desenvolvidos por Volkersen (1938) e Goland (1944), pioneiros de uma série de estudos teóricos que apresentavam uma elevada simplicidade em determinar as zonas de tensão nas aplicações envolvendo adesivos. O uso destas hipóteses simplificadoras a nível de geometria nas estruturas, no

carregamento e nas condições fronteira, ofereceram soluções mais eficientes de forma fechada. Assim, as estruturas ligadas por adesivos podem ser analisadas rapidamente, embora haja suposições a serem consideradas Panigrahi e Pradhan (2007). Através destes modelos, as tensões e deformações podem ser determinadas, assim como a distribuição do momento flector que actua na estrutura. A resistência era tipicamente prevista por critérios baseados em tensões ou deformações. Nos dias de hoje, estes estudos foram progressivamente substituídos pela análise numérica, embora os estudos analíticos também tenham sido alvo de evolução com o passar dos anos em termos de capacidades de modelação, considerando nas análises a não-linearidade do material empregue na camada adesiva Hart-Smith (1981) ou análises geométricas não-lineares Penado (1998).

2.2.2 Métodos numéricos

Nos dias de hoje estão disponíveis técnicas avançadas de modelação que garantem previsões de rotura bastante precisas, superando limitações dos métodos analíticos. Em geral, os danos estruturais podem ocorrer através de microfissuras ao longo de um volume finito ou região interfacial, que se traduz na redução da capacidade de transferência da carga. Simulações assistidas por computador efectuadas através do método dos Elementos Finitos com base na modelação da mecânica dos meios contínuos assumem erradamente que ocorre plastificação generalizada nos elementos sem evolução do dano, enquanto um modelo tipo mecânica do dano, pode simular o dano nos elementos por redução das cargas transferidas. Assim, como resultado desta análise torna-se possível e viável a simulação do dano e fractura passo-a-passo para um caminho pré-definido ou arbitrariamente estabelecido dentro de uma região finita (Duan et al. 2004). Apesar deste facto, estes métodos teóricos ainda são recentes e estão sob desenvolvimento constante. Em relação a técnicas de modelação mais precisas, métodos de estimativa de parâmetros de materiais mais fiáveis e simples estão disponíveis, com um aumento da robustez e eliminação de problemas de convergência Liljedahl et al. (2006). As técnicas de modelação podem ser de dois tipos, locais ou contínuas. No local de dano, esta ocorre em uma linha ou superfície (análise 2D ou 3D, respectivamente), que simula rotura interfacial entre os materiais, como temos o exemplo prático da ligação do adesivo ao substrato, a fractura interlaminar de compósitos laminados ou a interface entre as fases sólidas de materiais. Através da contínua, o dano estende-se por uma área ou volume finito (análise 2D ou 3D, respectivamente), de forma a simular a rotura ou modelar uma fractura coesiva do adesivo.

2.2.2.1 Mecânica dos meios contínuos

A mecânica dos meios contínuos é numa técnica que pode utilizar modelos analíticos ou numéricos (como o MEF) para obtenção dos valores máximos de tensão, deformação ou

energia de deformação. A previsão é realizada através da utilização de critérios como a tensão ou deformação máxima, tensão ou deformação pontual a uma dada distância, tensão ou deformação média sobre uma dada região ou análise de estado limite. São assim comparados os valores obtidos através dos modelos e os valores permitidos pelos materiais, podendo assim estimar-se a resistência da ligação.

Na previsão da resistência de juntas adesivas de sobreposição através de métodos analíticos, uma solução simples é usar o modelo de Volkersen (1938), que considera que o adesivo deforma apenas ao corte. Assim, pode-se considerar a tensão máxima de corte como um critério de rotura. Adams et al. (1997) usou o critério da tensão principal máxima obtida pelo MEF para prever a resistência de juntas adesivas, com bons resultados. Para os mesmos autores, um aspecto importante na análise das tensões e deformações por métodos numéricos é a dimensão da malha, devido à existência de singularidade das tensões nas extremidades de L_0 . Os critérios de dano baseados na mecânica dos meios contínuos aplicados em modelos analíticos são considerados bastante intuitivos e conseguem em alguns casos reproduzir resultados satisfatórios (Panigrahi e Pradhan 2007). No entanto, estes podem ser bastante complexos sem que a as suas previsões sejam realistas. Estes critérios não levam em conta as concentrações de tensões existentes em entalhes e ranhuras, assim como a presença de defeitos no adesivo. De acordo com Harris e Adams (1984), em situações onde se utilizam adesivos dúcteis, os critérios existentes baseados em tensões não são adequados pois, após o adesivo ceder, ainda suporta deformações elevadas antes da rotura.

2.2.2.2 *Mecânica da fractura*

A mecânica dos meios contínuos estabelece que a estrutura e o seu material são contínuos, o que não se adequa no caso de existirem defeitos no material, para materiais que tenham cantos reentrantes ou outras singularidades de tensão. Por outro lado, a mecânica da fractura assume que a estrutura não é necessariamente um meio contínuo, podendo apresentar defeitos (fendas) causados por processos de fabrico ou por qualquer acidente durante o seu funcionamento. Teoricamente, existe uma singularidade sempre que o ângulo das faces adjacentes é inferior a 180° . Este efeito é extensível para a singularidade de tensões na interface entre dois materiais ligados. Neste caso, a descontinuidade de tensões continua a existir, embora deixem de existir superfícies livres. A mecânica da fractura permite avaliar se estes defeitos são susceptíveis de causar uma rotura catastrófica, ou se, durante o período de vida da estrutura, este se mantém com dimensões inferiores às críticas, embora se possa propagar, de forma a manter a segurança da estrutura. A fractura pela propagação de fissuras pode ser despoletada por diferentes factores, como a aplicação de cargas lentas, de impacto, por fadiga, devido a gradientes de temperatura ou ainda por deformações dependentes do tempo (da Silva et al. 2007). Os princípios básicos da mecânica da fractura devem-se ao estudo pioneiro de Griffith (1921) através do estudo de fracturas

em fibras de vidro, que lhe permitiu concluir que todos os corpos apresentam defeitos, e que a fractura ocorre a partir do mais crítico.

No ramo da indústria aeronáutica foi introduzido o conceito de projecto com tolerância ao dano, que se baseava em conceitos da fractura linear elástica. No caso de materiais dúcteis, uma determinada quantidade de material plastifica antes da iniciação da fenda, e a fenda propaga-se de forma estável, antes da rotura final (Williams 1959). Como a teoria da mecânica da fractura linear elástica não é apropriada para este tipo de materiais, então foi criada a solução de HRR (Hutchinson-Rice-Rosengreen) por Hutchinson (1968) e por Rice (1968) para modelar roturas dúcteis.

A maioria dos estudos em juntas adesivas utilizam a taxa de libertação de energia, G_I ou G_{II} , e o respectivo valor crítico ou resistência à fractura, G_c (Fernlund e Spelt 1991), em vez de factores de intensidade de tensão, porque estes não são facilmente determináveis quando a fenda cresce numa interface ou na sua proximidade. A fractura de juntas adesivas tem lugar em modo misto devido às propriedades distintas dos adesivos em tracção e corte e também pelo efeito dos substratos, pelo que se torna necessário introduzir o conceito de envelope da fractura. Este fornece uma função para a rotura que envolve as componentes de tenacidade de tracção e corte quando as duas estão presentes na solitação.

2.2.2.3 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC teve início com estudos de Barenblatt (1959) e Dugdale (1960), que descreveram o dano na zona de processo da fractura na frente da fenda sob o efeito cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC passaram a permitir analisar o início de uma fenda e a propagação desta no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. A implementação dos métodos de MDC pode ser feita em elementos de mola ou, mais convencionalmente, em elementos coesivos (Duan et al. 2004).

Estes modelos podem ser incorporados em programas de análise por MEF e assim modelar o comportamento de materiais sujeitos à fractura (Ji et al. 2010). O princípio fundamental dos MDC é que é possível introduzir artificialmente zonas de propagação de dano em estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis coesivas (tracção-separação) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são aplicadas entre os nós homólogos dos elementos coesivos (Figura 17), e podem ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou camadas diferentes em compósitos – aproximação local (Turon et al. 2007), ou podem ser aplicados directamente entre dois materiais para simular uma camada fina de material, por exemplo para simular uma ligação adesiva – aproximação contínua (Kafkalidis e Thouless 2002).

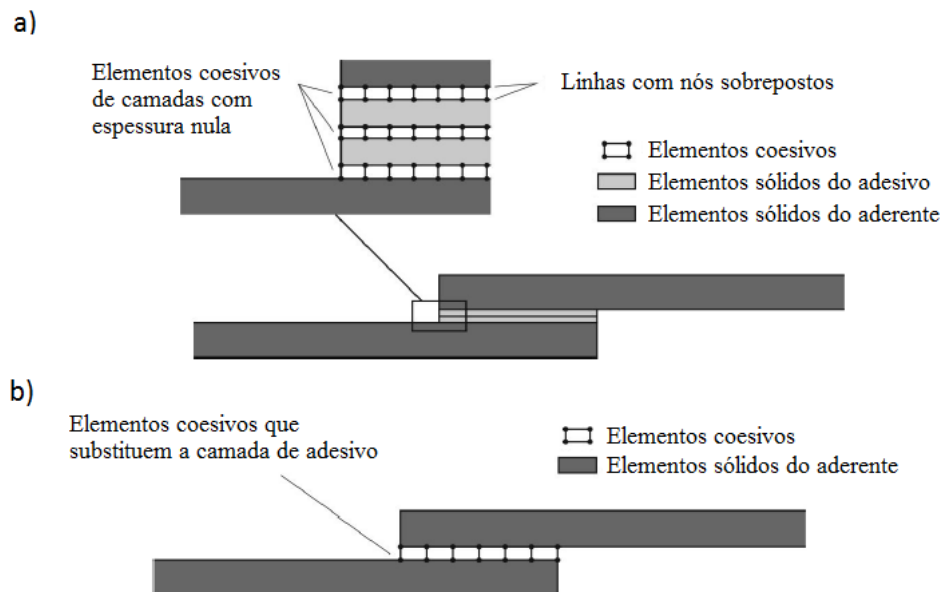


Figura 17 – Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modelação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) (adaptado de (da Silva e Campilho 2011))

Os MDC proporcionam uma propagação macroscópica dos danos existentes ao longo de um percurso, desvalorizando os fenómenos microscópicos presentes no início da fenda, através da implementação das leis de tensão-deslocamento relativo entre os nós emparelhados ao longo do caminho da fenda. Estes modelos são usados para simular a evolução elástica da tensão e conseqüentemente amaciamento até à rotura completa, permitindo desta forma simular a deterioração gradual das propriedades dos materiais. As leis de tracção-separação são normalmente construídas por relações lineares em cada uma das etapas de carregamento, embora possam ser definidas de uma forma distinta, de maneira a possibilitar uma representação mais fiel do comportamento dos materiais (Yang e Thouless 2001). Este modelo está implementado em *softwares*, como o caso do Abaqus®, em duas dimensões (2D) e três dimensões (3D), para uma análise estática. O modelo 3D, relativamente ao 2D apresenta uma componente adicional de corte (Banea et al. 2012).

2.2.2.4 Tipos de leis coesivas

Ao longo dos anos, foram estudados vários métodos MDC, como o modelo linear parabólico (Allix e Corigliano 1996), triangular (Alfano e Crisfield 2001), exponencial (Chandra et al. 2002), polinomial (Chen 2002) e trapezoidal (Kafkalidis e Thouless 2002). Através do comportamento do material ou na interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos (Pinto et al. 2009).

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das

condições reais (Liljedahl et al. 2006). Trata-se de um modelo coesivo baseado no método MEF de interface (de Moura et al. 2000) de seis nós e espessura nula, compatíveis com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do Abaqus®. Neste tipo de modelo de dano são apresentadas duas versões distintas: modo puro e modo misto (Figura 18).

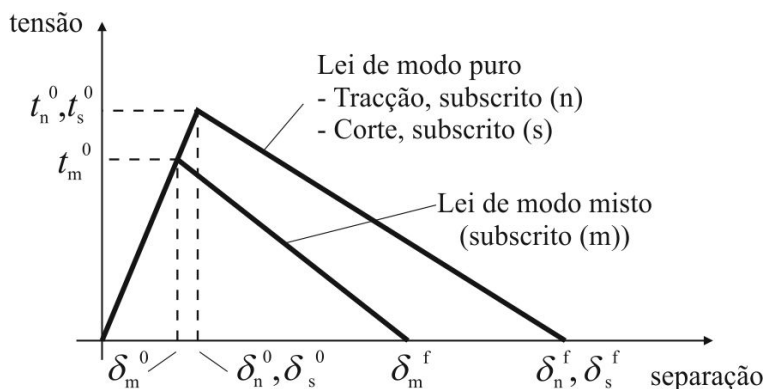


Figura 18 – Modelo coesivo triangular (Campilho et al. 2007)

O modo puro (lei de maiores dimensões) caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo são anulados na lei coesiva correspondente. O modo misto é a lei de menores dimensões e caracteriza-se por utilizar critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tracção e corte (Campilho et al. 2008).

Outro tipo de lei coesiva bastante utilizada é a lei coesiva trapezoidal, que visa a simulação do comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis. Estas leis simulam adequadamente o comportamento de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I (de Moura et al. 2008) e modo II (de Moura et al. 2009).

2.2.2.5 Mecânica do dano

A mecânica do dano que se apresenta neste capítulo diz respeito a métodos alternativos aos MDC, que permitem a introdução de dano nos elementos pela redução dos esforços transmitidos. Os métodos utilizados na mecânica do dano estabelecem um parâmetro de dano para modificar a resposta dos materiais através da redução de resistência ou rigidez. Como exemplos desta metodologia referem-se os trabalhos de Daudeville e Ladevèze (1993) para a delaminação de compósitos ou rotura da matriz, ou de Khoramishad et al. (2010) para camadas finas de adesivo. Como resultado do parâmetro de dano estabelecido, torna-se possível a simulação gradual do dano e da fractura de uma fenda, com trajectória pré-definida ou arbitrária dentro de uma região finita (Duan et al. 2004).

As variáveis de dano podem ser classificadas em dois grupos. No primeiro grupo as variáveis modelam o dano pela redefinição das propriedades constitutivas dos

materiais, embora estas não estejam directamente relacionadas com o mecanismo de dano. No segundo grupo, as variáveis são relacionadas com a definição física de um género específico de dano, como a dimensão das porosidades ou a área relativa de micro-cavidades (Kattan e Voyiadjis 2001). Pela mecânica do dano, o crescimento do dano é definido em função da carga para simulações estáticas (Raghavan e Ghosh 2005) ou do número de ciclos para análises de fadiga (Wahab et al. 2001, Imanaka et al. 2003). Comparativamente aos MDC e, em aplicações específicas, a mecânica do dano pode ser recomendada caso o dano seja generalizado ou caso o caminho de propagação da fenda não seja conhecido já que, pelos MDC, a propagação da fenda é limitada a trajectos pré-definidos (Shenoy et al. 2010).

Hua et al. (2008) propuseram um modelo de mecânica do dano com resultados independentes da malha para a previsão de resistência de juntas adesivas com um adesivo dúctil sujeitas a degradação ambiental. Na modelação numérica, este efeito era alcançado com a introdução de um parâmetro de dano com base no deslocamento na equação constitutiva dos materiais, dependente do grau de humidade. Este parâmetro de dano foi calibrado através de ensaios à fatura em provetes à flexão em modo misto, e permitiu reduzir os valores de tensão na junta dependendo do deslocamento plástico equivalente, o que permitiu obter resultados independentes da malha. As previsões da resistência da junta e do caminho do dano foram coerentes com os resultados experimentais.

Chen et al. (2011) usaram uma técnica da mecânica do dano em JSS baseada na energia de deformação plástica média para a previsão do início e propagação do dano, e também da carga de rotura. A técnica utilizada consistiu em analisar, após obter uma solução convergente num dado incremento de carga, se a condição de rotura tinha sido atingida nalgum elemento da estrutura. Perante estas condições, os valores de E e do coeficiente de Poisson (ν) do material na respectiva zona eram reduzidos quase até zero para simular a existência de rotura. A comparação dos resultados obtidos por esta técnica e os ensaios experimentais revelou resultados bastante positivos.

2.2.2.6 *Método dos Elementos Finitos Extendido*

O MEFX é uma evolução recente do MEF, este método permite realizar análise e modelação do crescimento do dano, de forma a prever a fractura em estruturas, baseada na resistência dos materiais para iniciação de danos e deformações para avaliação da rotura, em detrimento dos valores de t_n^0/t_s^0 ou δ_n^0/δ_s^0 (deslocamentos de tracção e corte correspondentes a $P_{máx}$, respectivamente) utilizados no método MDC, pela mesma ordem. No MEFX, em relação ao MDC, deixa de ser necessário que a fenda siga um caminho pré-definido, constituindo assim uma vantagem significativa. Portanto, a fenda passa a poder propagar-se livremente no interior da estrutura sem que seja necessário que a malha coincida com a geometria das descontinuidades e sem a necessidade de refazer a malha na proximidade da fenda (Mohammadi 2008).

Belytschko e Black (1999), no final dos anos 90, apresentaram as características fundamentais deste método, baseadas no conceito de partição de unidade, e que pode ser implementado no MEF pela introdução de funções de enriquecimento local para os deslocamentos próximos da extremidade da fenda, para assim permitir o crescimento e separação entre as faces da fenda (Moës et al. 1999). Com o crescimento da fenda, a posição e orientação varia continuamente, dependendo da carga e geometria da estrutura. Simultaneamente são criadas funções de enriquecimento necessárias para os pontos nodais dos elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda.

O MEFX considera que os materiais têm inicialmente um comportamento linear elástico, que é representado por uma matriz constitutiva elástica. Esta matriz relaciona tensões com as separações normais e de corte. O dano e a ruptura são simulados pelo método MEFX através de critérios de iniciação de dano e leis de dano entre nós fantasmas e reais de elementos fracturados. Os critérios de iniciação de dano podem assim depender por exemplo das tensões principais máximas ou das deformações principais máximas. Enquanto as leis de tração-separação que simulam a degradação dos materiais até à fractura podem ser lineares ou exponenciais (Abaqus® 2013).

Campilho et al. (2011) utilizou o método MEFX para a previsão da resistência de juntas de sobreposição simples e dupla, coladas com um adesivo dúctil. Comparou-se os resultados entre os dois métodos (MEFX com os MDC) como mostra a Figura 19. Neste estudo os autores concluíram que o MEFX não é o método mais adequado para propagação do dano em modo misto na camada de adesivo, uma vez que a direcção da fenda é perpendicular à tensão principal máxima, o que por sua vez se traduz na propagação do dano na direcção dos substratos ao invés de ao longo da camada de adesivo, o que não é representativo do comportamento real das juntas. Por outro lado, os MDC revelaram previsões bastantes precisas do comportamento da junta.

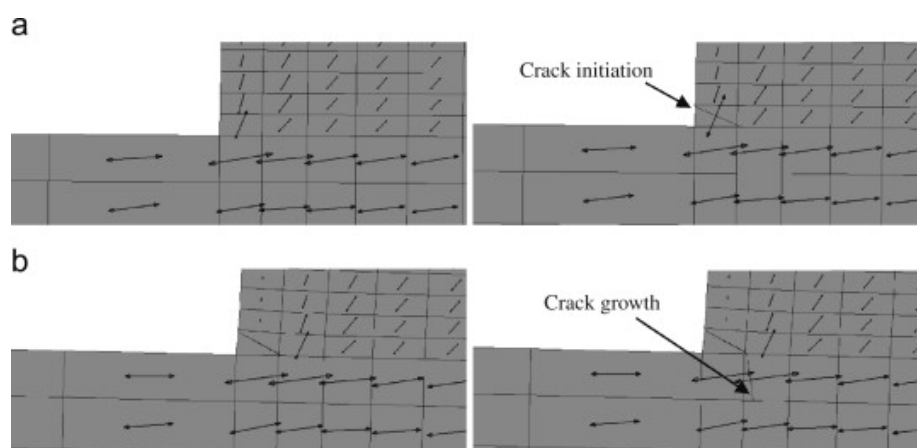


Figura 19 – Representação das tensões usando o MEFX em JSS: iniciação do dano do adesivo nas extremidades de sobreposição (a) e crescimento dano do aderente de alumínio (b) (Campilho et al. 2011)

2.3 Ensaios de caracterização à fractura

A taxa crítica de libertação de energia de um material, caracteriza a sua resistência à propagação da fenda. Num determinado ponto, no qual o material não consegue deformar-se mais, o esforço aplicado leva a uma taxa de libertação de energia a atingir um valor crítico (dado pela taxa crítica de libertação de energia, G_C), nesse ponto inicia-se a propagação da fenda. A origem da fenda e a sua conseqüente propagação, pode ocorrer devido a vários modos de carregamento, dos quais o modo I (sob uma força de tracção), e o modo II (através do corte de um par de forças perpendiculares à frente da fenda). Contudo na realidade existe a simultaneidade de esforços presente na junta, modo I e modo II (tracção e corte) originando uma situação de sollicitação em modo misto. Para além dos dois modos mencionados, existe ainda um modo III representado na Figura 20, que consiste num modo de corte sob a acção de um par de forças paralelas contrárias junto à fenda.

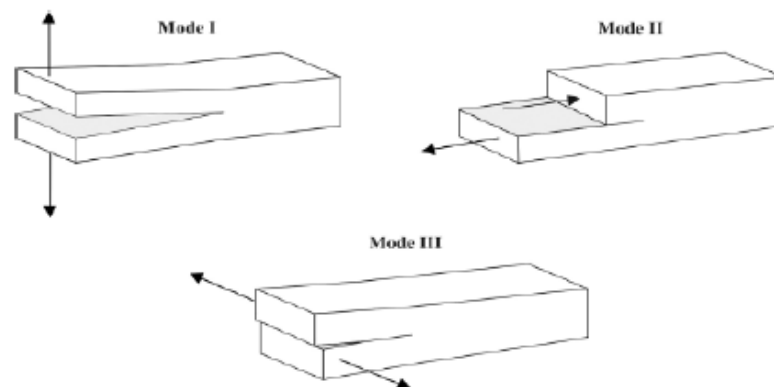


Figura 20. Os três tipos de modos de fractura (Chaves et al. 2014).

Conjugando estes modos de carregamento é possível criar três modos de sollicitação diferentes, originando assim modos mistos. Para cada modo de carga é associada uma taxa crítica de libertação de energia, G_{IC} , G_{IIC} ou G_{IIIC} (da Silva et al. 2007).

2.3.1 Fractura em tracção (modo I)

Na medição do G_{IC} é frequentemente ser utilizado o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) o qual dá origem a um tipo de fractura de modo I. Na utilização deste método, deve ser definido o comprimento do provete sem adesivo, compreendido ao longo de a_0 (Figura 21). O início da fenda será desde a_0 até à extremidade oposta da cola, sendo o seu deslocamento provocado através de duas forças perpendiculares, exercidas no topo do provete como mostra a Figura 21.

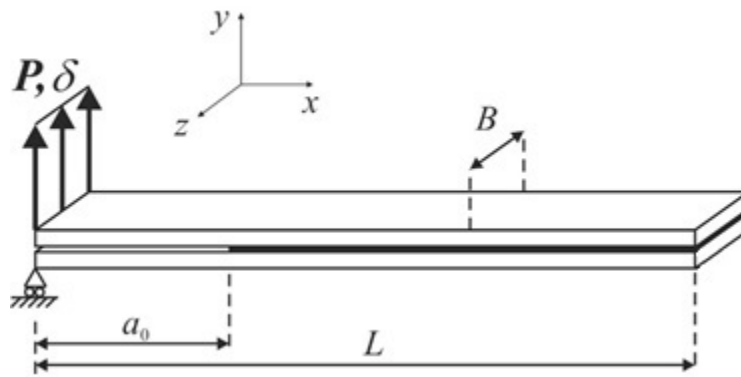


Figura 21. Simbologia utilizada no ensaio DCB (de Moura et al. 2008).

A velocidade de solitação no provete está compreendida normalmente entre o intervalo de 0,5 e 3 mm/min. Os valores registados do ensaio são a carga (P), o deslocamento (δ) e comprimento da fenda (a) (da Silva et al. 2007). Assim, o valor de G_{IC} será obtido através da equação de Irwin-Kies que se apresentada de seguida.

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

Na expressão B representa a largura do provete e

$$C = \frac{\delta}{P} \quad (2)$$

é a flexibilidade. Com base na expressão anterior obtém-se a expressão seguinte, relativamente ao G_{IC} ainda para o ensaio DCB.

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

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



Figura 22. Esquema do ensaio DCB (de Moura et al. 2008).

O ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB), representado na Figura 23, é usado também para se determinar o G_{IC} , pois apresenta a vantagem, em relação ao método mencionado anteriormente, o facto de não necessitar da medição dos valores da constante “ a ” para o tratamento de dados convencional. Este factor importante, pois na medição ocorrem sempre erros de imprecisão e / ou de leitura, cuja sua influência

no resultado final se mostra significativa. A expressão de G_{IC} é expressa na norma ASTM D3433-99.

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

A constante m relaciona h através da equação que se apresenta de seguida:

$$m = \frac{1}{h} + \frac{3a^2}{h^3} \quad (5)$$

Sendo importante utilizar-se a equação (6), para assim possibilitar a aquisição dos resultados com a exactidão pretendida.

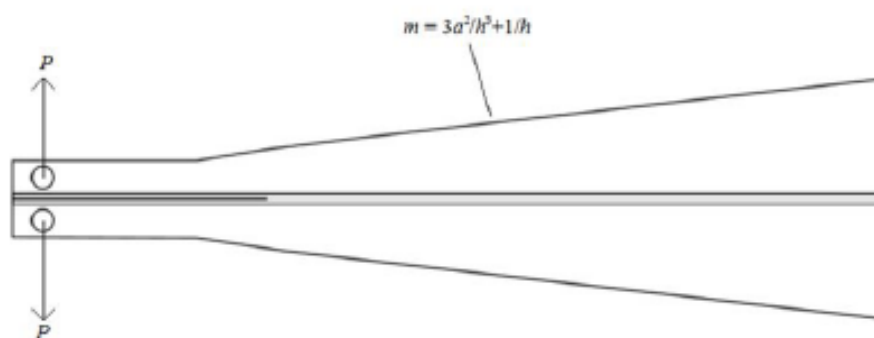


Figura 23. Ensaio TDCB (da Silva et al. 2007).

2.3.2 Fractura em corte (modo II)

O esforço adjacente ao modo II como já mencionado, é o corte puro, e nesse sentido desenvolveram-se testes específicos para o efeito, entre eles o *End-Notched Flexure* (ENF) e o *End-Loaded Split* (ELS), contudo até à data nenhum deles revelou ser preciso (da Silva et al. 2011). O ensaio que mais se utiliza é o ENF, pela sua simplicidade de ensaio e de fabrico de provetes relativamente a outros. A dificuldade mais evidente deste modelo, é na medição da propagação da fenda na junta, pois não se dá a abertura do provete ensaiado. A fractura em modo de corte propaga-se de uma forma complexa, seguindo frequentemente um mecanismo de microfratura (da Silva et al. 2011, da Silva et al. 2012). Os outros ensaios apresentam certas limitações, como o ELS oferece dificuldades na obtenção de G_{IIC} devido às condições de aperto (de Moura et al. 2008). O 4ENF requer um equipamento de ensaio mais sofisticado, e o atrito na região da pré-fenda tem influência nos resultados (Schuecker e Davidson 2001).

Actualmente não existe um teste normalizado em Modo II para adesivos, existindo apenas algumas normas no teste ENF aplicadas a materiais compósitos que têm sido aplicadas a adesivos (da Silva et al. 2012).

ENF

O ensaio ENF consiste na aplicação de uma carga P no centro de uma viga, que está apoiada em ambas as extremidades. De seguida, numa das extremidades é feita uma pré-fenda de forma a promover o início e consequente propagação. Este ensaio é o mais utilizado na determinação da variável G_{IIC} apesar de apresentar como problema o facto da propagação da fenda não ser constante. A Figura 24 apresenta o esquema do ensaio ENF.

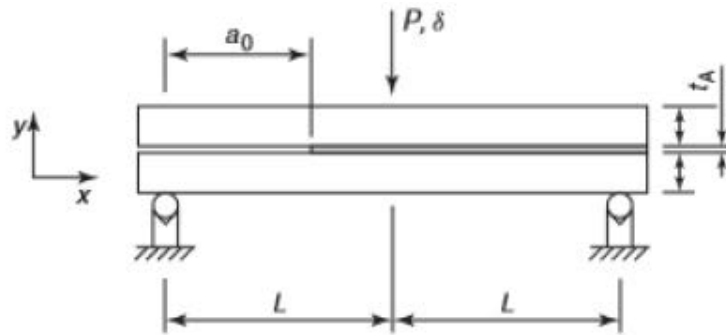


Figura 24. Esquema do ensaio ENF (da Silva et al. 2012).

4ENF

O ensaio 4ENF é diferente do ensaio ENF apenas pelo facto de lhe ser adicionada uma viga de solicitação sem qualquer restrição de movimentos de modo a equilibrar as reacções presentes nos 2 cilindros que transmitem os esforços ao provete. Apesar disso, o *set up* deste ensaio é mais complexo e demorado, necessitando que sejam contabilizados os efeitos de fricção entre os seus constituintes. Na Figura 25 é apresentado o esquema do ensaio 4ENF.

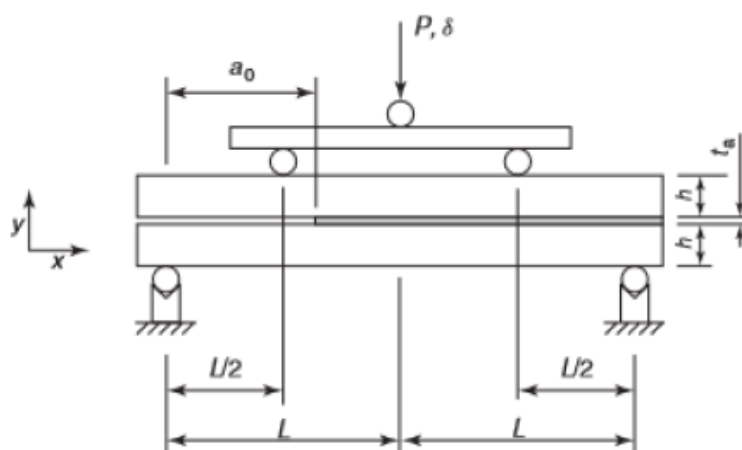


Figura 25. Esquema do ensaio 4ENF (da Silva et al. 2012).

ELS

O ensaio ELS é desenvolvido com a finalidade de resolver o problema de propagação instável do teste ENF, tendo assim o ELS a propagação desejável, ou seja, estável. Contudo esta solução requer a fixação do provete numa plataforma plana com rolamentos, livre de movimentos no sentido horizontal como mostra a Figura 26 (da Silva et al. 2011).

As condições de aperto entre provetes não são constantes, sendo necessário adicionar-se uma forma de correcção. Contudo existe outro problema associado à deformação transversal dos provetes durante a propagação da fenda, tornando assim a análise dos dados mais complexa (da Silva et al. 2011). Apesar destas dificuldades segundo Wang e Vu-Khanh (1996) este método é o mais indicado para obtenção da curva R, pelo facto de possuir um comprimento maior de provete para propagação da fenda e assim ser mais estável relativamente ao ENF.

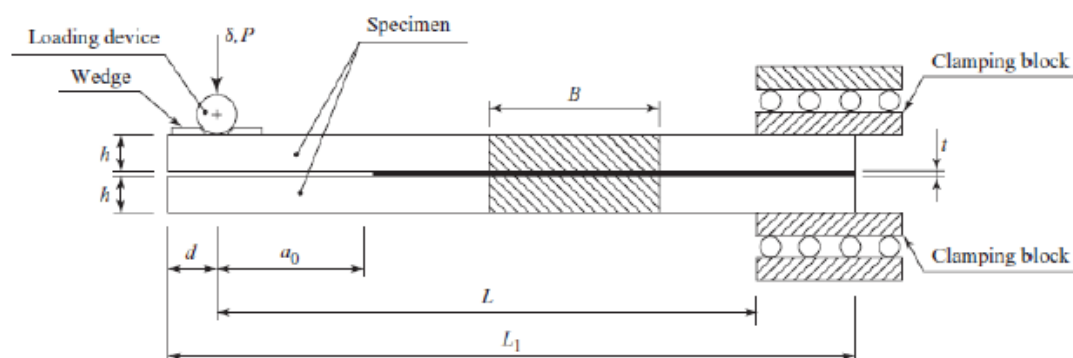


Figura 26. Esquema do ensaio ELS (da Silva et al. 2011).

2.3.3 Fractura em modo misto (modo I+II)

Na realidade, as juntas adesivas estão em grande parte do tempo em carregamento de modo misto. A configuração da junta, se for por exemplo sobreposição simples, coloca o adesivo sujeito a cargas de tracção e corte (modo misto) (Fernández et al. 2013). Os materiais anisotrópicos ou provenientes de laminagem, tendem a forçar o início e a propagar a fractura através de vários planos (da Silva et al. 2012).

Foram desenvolvidos vários métodos para testar as juntas adesivas sujeitas a este modo de carregamento. Estes são similares aos vistos em modo I e II, sendo apenas diferentes na forma de aplicação da força ou na simetria e assimetria dos provetes, para se poder combinar os dois tipos de esforços. Alguns destes testes permitem a variação da sollicitação (entre corte e tracção), permitindo assim estudar esses efeitos na junta adesiva. Estudos já efectuados nesse sentido verificaram que o aumento da sollicitação em corte aumentam também a resistência à fractura da junta (da Silva et al. 2011).

ADCB é um ensaio que deriva do DCB para a caracterização dos materiais no modo misto, os braços do provete, como mostra a Figura 27, são feitos através de diferentes materiais e/ou com espessuras diferentes (Bennati et al. 2009).

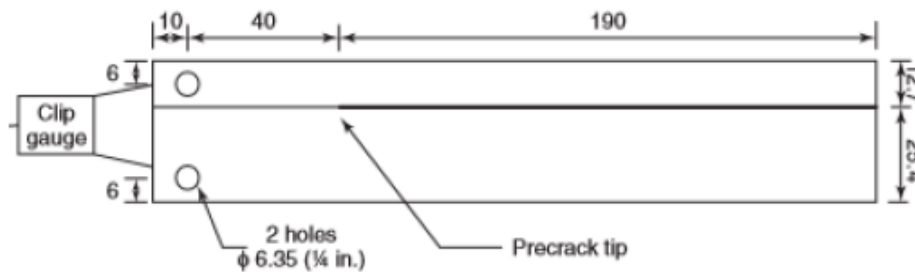


Figura 27. Provete do ensaio ADCB com espessura diferentes (da Silva et al. 2012).

O ensaio CLS tornou-se num ensaio comum para os testes de fractura em juntas adesivas devido à sua facilidade de montagem e realização do ensaio (Figura 28), assim como a predominância de esforços de corte, assemelhando-se a condições reais existentes na indústria aeronáutica (da Silva et al. 2007).



Figura 28. Representação do ensaio CLS (da Silva et al. 2012).

O ensaio FRMM, assim como ensaio ELS, têm a vantagem de utilizar equipamentos de montagem, que normalmente se encontram nos laboratórios de ensaios mecânicos, pelo que é um factor preponderante na sua escolha. A diferença entre ambos, é que a aplicação da carga no ensaio ELS é no substrato inferior fazendo com que os dois aderentes se deformem de forma compatível. No teste FRMM, força é aplicada no aderente superior fazendo com que as extremidades do substrato inferior se mova livremente (da Silva et al. 2012).

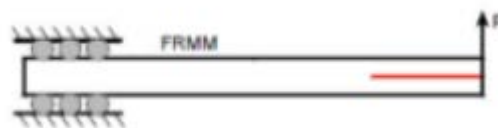


Figura 29. Ensaio FRMM (Constante 2014).

O teste SLB combina os modos I e II, sendo um mais limitado que o MMB a nível da variação possível do rácio corte e tracção, no entanto o SLB é mais fácil, e necessita de menos equipamento para a realização experimental (Fernández et al. 2013, Chaves et al. 2014). No ensaio pode ocorrer flexão do aderente, sobretudo com aderentes mais flexíveis, e com isso aconselha-se a usar-se roletes em vez de apoios fixos. Com os apoios moveis, evita-se o deslizamento e a fricção nas fixações que poderia resultar em

incertezas nos dados recolhidos do ensaio (da Silva et al. 2012). A representação esquemática assemelha-se ao ENF, com a diferença do substrato inferior ser mais curto sem apoio junto à pré-fenda Figura 30. O formato dos substratos, assim como o comprimento e a disposição dos apoios provoca uma sollicitação no adesivo que conjuga corte e tracção (modo I e II).

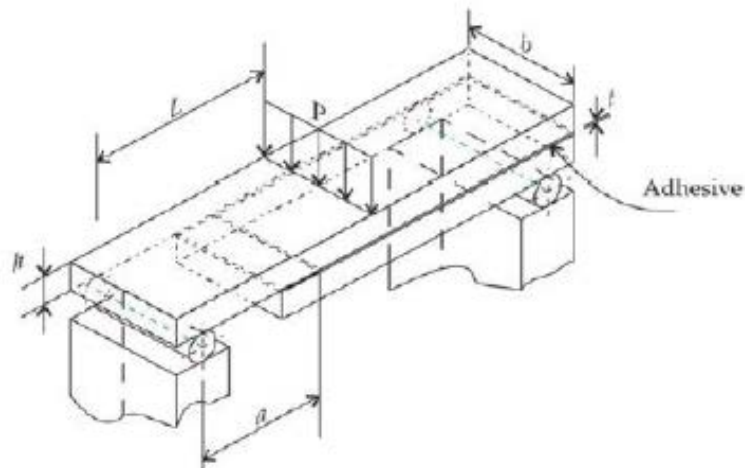


Figura 30. Representação do ensaio SLB (Chaves et al. 2014).

2.4 Ensaio Single-Leg Bending (SLB)

2.4.1 Caracterização do ensaio

O ensaio SLB, resulta de uma alteração do ENF, no qual, o aderente superior está apoiado e apresenta um comprimento superior relativamente ao substrato inferior. Devido a esta diferença de geometria, a carga aplicada sobre o provete origina uma sollicitação combinada do tipo modo I e modo II, como se verifica na Figura 30 sem carregamento, e na Figura 31 sob esforço. A representação esquemática deste ensaio está representada na Figura 31 (da Silva et al. 2012).

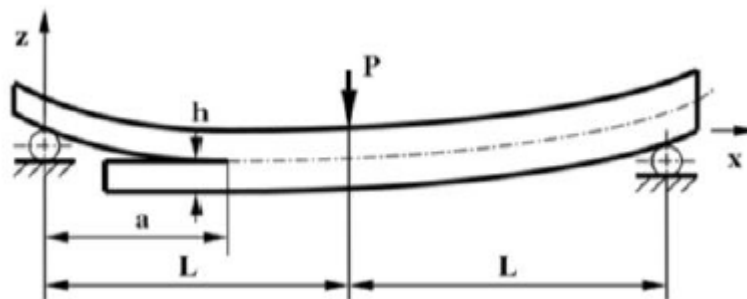


Figura 31. Representação do ensaio SLB (Soares 2015).

Na execução deste ensaio, é necessário fazer uma pré-fenda no adesivo do provete, sendo que a_0 é o comprimento inicial entre o apoio que suporta o aderente superior e

a extremidade da pré-fenda. A medição das variáveis G_I e G_{II} é conseguida quando no decorrer do ensaio, a fenda se aproximar do punção de solicitação, de forma a obter-se uma medição mais correcta. Quando a fenda atinge a zona do punção, podem-se verificar esforços de compressão que são provocados pelo punção (Soares 2015).

Os provetes para o ensaio SLB podem sofrer alterações, sem modificação significativa da sua geometria usual, sendo elas a variação da espessura dos substratos e dos adesivos. Outra alteração, é a variação do comprimento e a largura dos substratos a utilizar.

Contudo, a relação 7/10 entre as variáveis a_0 e L devem ser respeitadas, não sendo indicado usar um rácio inferior a estes valores, de forma a permitir uma área para o estudo suficiente, e obtendo assim resultados mais concretos evitando que a fenda se vá propagando de forma instável (de Moura et al. 2008). Não sendo necessárias ferramentas ou cuidados especiais, salienta-se apenas neste ensaio a importância da recolha de imagens de boa resolução para a medição da fenda.

2.4.2 Métodos para determinação da energia de fractura

Na secção seguinte, são explicados os métodos utilizados para calcular as taxas críticas de libertação de energia. São apresentados cinco modelos que requerem a monitorização do comprimento da fenda ao longo do tempo, e dois adicionais que se baseiam na fenda equivalente, o método CBBM e o integral-J.

2.4.2.1 Métodos que requerem a monitorização do comprimento de fenda

2.4.2.1.1 Modelo 1 - (Oliveira et al. 2009)

O método descrito de seguida baseia-se na teoria das vigas, e permite a obtenção das curvas R.

O método apresentado baseia-se na teoria das vigas e no conceito da fenda equivalente, no qual é possível conseguir a curva R, evitando assim a monitorização da fenda durante a sua propagação (Oliveira et al. 2009). Contudo é necessário determinar a flexibilidade de acordo com a teoria de Timoschenko, obtém-se através da equação seguinte:

$$U = \int_0^L \frac{M_f^2}{2E_L I} dx + \int_0^L \int_{-h}^h \frac{\tau^2}{2\mu_{RL}} B dy dx \quad (6)$$

onde a variável M_f é o momento de flexão, e I o segundo momento de área e

$$\tau = \frac{3 V_i}{2 A_i} \left(1 - \frac{y^2}{c_i^2} \right) \quad (7)$$

Em que A_i é a área de secção transversal, C é metade da espessura da viga e V o carregamento transversal do segmento i ($0 \leq x \leq a$, $a \leq x \leq L/2$ ou $L/2 \leq x \leq L$ no ensaio SLB). De acordo com o Teorema de Castigliano, surge a equação no ponto de carregamento para um comprimento de fenda a é:

$$C = \frac{28a^3 + L^3}{32E_L B h^3} + \frac{3(a+L)}{20\mu_{LR} B h} \quad (8)$$

O comprimento inicial da fenda (a_0) e a flexibilidade inicial (C_0) podem ser utilizados na equação seguinte (equação (9)) para se estimar o módulo de flexão E_f :

$$E_f = \left(C_0 - \frac{3(a_0 - L)}{20\mu_{RL} B h} \right)^{-1} \frac{28a_0^3 + L^3}{32B h^3} \quad (9)$$

Segundo este método, a medição para cada provete do módulo de flexão longitudinal é desnecessária, pelo que esta é uma vantagem do ensaio SLB em relação ao ELS. A tenacidade à fractura do adesivo em modo misto, pode ser adquirida pela equação seguinte de Irwin-Kies:

$$G_T = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da} \quad (10)$$

Esta equação aplicada ao provete SLB fica:

$$G_T = \frac{21P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{10\mu_{RL} B^2 h} \quad (11)$$

Pelo método da partição, que se baseia na teoria das vigas proposto por Szekrényes e Uj (Szekrényes e Uj 2004), as equações para a taxa de libertação de energia em modo I e modo II são:

$$G_I = \frac{12P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{10\mu_{RL} B^2 h} \quad (12)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} \quad (13)$$

2.4.2.1.2 Modelo 2 - (Szekrényes e Uj 2004)

Na aplicação deste modelo é necessário analisar a flexibilidade entre os braços do provete. Este factor de flexibilidade pode ser obtido através do trabalho de (Ozdil et al.

1998), em que a seguinte expressão foi conseguida a partir do ensaio ENF usando a teoria das vigas de Timoshenko:

$$C = \left[\frac{2L^3 d_{11,2} + a^3 (d_{11,2})}{12} + \frac{2La_{55,2} + a(a_{55,1} - a_{55,2})}{4k} \right] \quad (14)$$

No qual $k=5/6$ é o factor e correcção de corte. A resistência à fractura pode ser expressa de acordo com o comprimento da fenda:

$$G_{I/II} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da} \quad (15)$$

Fazendo a ligação das equações (14) e (15), pode-se assim obter:

$$G_{I/II} = \frac{P^2}{8b} \left(a^2 (d_{11,1} - d_{11,2}) + \frac{(a_{55,1} - a_{55,2})}{4} \right) \quad (16)$$

As diferenças entre os provetes dos ensaios ENF e SLB são no corte e na flexibilidade da região de divisão dos dois provetes. As flexibilidades de corte e a flexão das zonas com e sem corte nos provetes SLB unidireccionais e simétricos apresentam-se nas seguintes equações:

$$d_{11,1} = \frac{12}{bh^3 E_{11}} \quad (17)$$

$$d_{11,2} = \frac{12}{2bh^3 E_{11}} \quad (18)$$

$$a_{55,1} = \frac{1}{bhG_{13}} \quad (19)$$

$$a_{55,2} = \frac{1}{2bhG_{13}} \quad (20)$$

Relacionando as equações anteriores, e considerando os efeitos elásticos e de corte, a flexibilidade do provete SLB fica da seguinte forma:

$$C^{SLB} = \frac{7a^3 + 2L^3}{8bh^3 E_{11}} + \frac{a + 2L}{8bhkG_{13}} + \frac{a^3}{8bh^3 E_{11}} \quad (21)$$

$$x \left[\begin{array}{l} 2.71 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/4} + 2.45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} \\ + 1.11 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{3/4} \end{array} \right]$$

A resistência à fractura pode ser calculada usando a equação seguinte:

$$C^{SLB} = \frac{21P^2 a^2}{16b^2 h^3 E_{11}} + \frac{P^2}{16b^2 h k G_{13}} + \frac{P^2 a^2}{16b^2 h^3 E_{11}} \times \left[5.42 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/4} + 2.45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} \right] \quad (22)$$

No sentido de realizar a partição dos modos de carregamento, utiliza-se o método de Williams com melhorias no efeito do corte transversal e a análise da fundação Winkler (Szekrényes e Uj 2004).

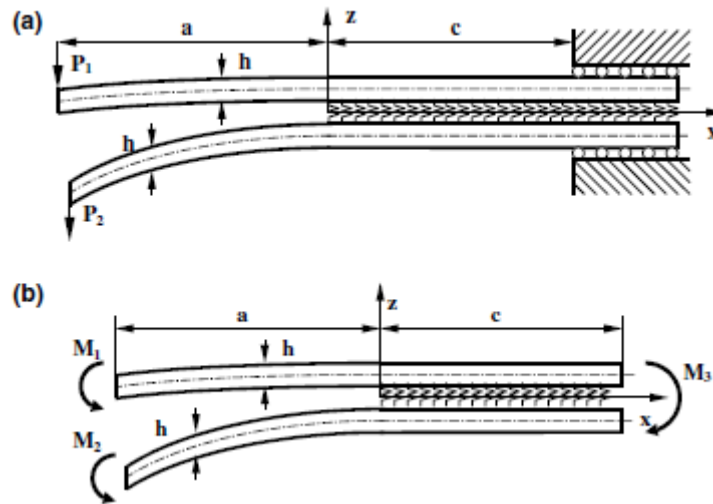


Figura 32. Esquema de redução para partição em modo misto (Szekrényes e Uj 2004).

De seguida, quando sobreposto os efeitos do corte transversal e dos efeitos elásticos na flexibilidade do aderente superior e inferior obtém-se a seguinte equação:

$$C_1 = \frac{7a^3 + L^3}{2bh^3 E_{11}} + \frac{(L^3 - a^3)P_2}{2bh^3 E_{11}P_1} + \frac{L(P_1 + P_2) + a(P_1 - P_2)}{bhkG_{13}P_1} + \frac{a^3(P_1 - P_2)}{2bh^3 E_{11}P_1} f_{w1} \quad (23)$$

$$C_2 = \frac{7a^3 + L^3}{2bh^3 E_{11}} + \frac{(L^3 - a^3)P_1}{2bh^3 E_{11}P_2} + \frac{L(P_1 + P_2) + a(P_2 - P_1)}{bhkG_{13}P_1} + \frac{a^3(P_2 - P_1)}{2bh^3 E_{11}P_2} f_{w1} \quad (24)$$

Onde f_{w1} é dado pela expressão:

$$f_{w1} = 2.71 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/4} + 2.45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} + 1.11 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{3/4} \quad (25)$$

A energia de fractura pode ser calculada através das equações seguintes:

$$G_1 = \frac{21P_1^2 a^2}{4b^2 h^3 E_{11}} - \frac{3P_1 P_2 a^2}{4b^2 h^3 E_{11}} + \frac{P_1(P_1 - P_2)}{4b^2 h k G_{13}} + \frac{P_1(P_1 - P_2) a^2}{4b h^3 E_{11}} f_{w2} \quad (26)$$

$$G_2 = \frac{21P_2^2 a^2}{4b^2 h^3 E_{11}} - \frac{3P_1 P_2 a^2}{4b^2 h^3 E_{11}} + \frac{P_2(P_2 - P_1)}{4b^2 h k G_{13}} + \frac{P_2(P_2 - P_1) a^2}{4b h^3 E_{11}} f_{w2} \quad (27)$$

No qual f_{w2} pode ser calculado através da expressão seguinte:

$$f_{w1} = 5,42 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/4} + 2,45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} \quad (28)$$

De acordo com a Figura 32, reduz-se o problema (a) no problema (b), onde $M_1 = P_1 a$, $M_3 = M_1 + M_2$ são momentos de flexão no local da fenda. A soma das equações (26) e (27) originam a seguinte expressão:

$$G_T = \frac{21(M_1^2 + M_2^2) - 6M_1 M_2 + (M_1 - M_2)^2 (f_T + f_{w2})}{4b^2 h^3 E_{11}} \quad (29)$$

A variável f_T pode ser calculada através da expressão seguinte:

$$f_T = \frac{1}{k} \frac{E_{11}}{G_{13}} \left(\frac{h}{a} \right)^2 \quad (30)$$

E de acordo com Ducept et al. (1999), os momentos equivalentes podem decompor-se como:

$$M_1 = M_I + M_{II} \quad (31)$$

$$M_2 = \alpha M_I + \varphi M_{II} \quad (32)$$

Na eventualidade de ser modo II puro os aderentes superiores e inferiores têm a mesma curvatura:

$$\frac{12M_{II}}{b h^3 E_{11}} = \frac{12\varphi M_I}{b h^3 E_{11}} \quad (33)$$

No qual $\varphi=1$. Substituindo as equações (31) e (32) na equação (29) permite obter o produto entre $M_I M_{II}$.

$$G_{I/II} = \frac{9M_I M_{II} (1 + \alpha)}{b^2 h^3 E_{11}} \quad (34)$$

De forma a cancelar o termo escolhe-se $\alpha=-1$. Então os termos do modo I e do modo II ficam:

$$G_I = \frac{M_1^2(12 + f_T + f_{w2})}{b^2 h^3 E_{11}} \quad (35)$$

$$G_{II} = \frac{9M_{II}^2}{b^2 h^3 E_{11}} \quad (36)$$

Reajustando as equações (31) e (32) obtém-se:

$$M_1 = \frac{(M_1 - M_2)}{2} \quad (37)$$

$$M_{II} = \frac{(M_1 + M_2)}{2} \quad (38)$$

De acordo com as equações (35) e (36) o corte transversal e o comportamento elástico, contribuem apenas para a componente de modo-I. Este facto pode ser explicado pela não alteração da curva unidireccional dos braços do provete não ser alterada pela tensão de corte transversal.

No caso específico do provete SLB, a redução dos momentos de curvatura no início da fenda são:

$$M_1 = 0 \quad (39)$$

$$M_2 = \frac{Pa}{2} \quad (40)$$

Utilizando as equações (35) e (36) as taxas de energia libertada são:

$$G_{II}^{SLB} = \frac{9P^2 a^2}{16b^2 h^3 E_{11}} \quad (41)$$

$$G_I^{SLB} = \frac{12P^2 a^2}{16b^2 h^3 E_{11}} + \frac{P^2}{16b^2 h k G_{13}} + \frac{P^2 a^2}{16b^2 h^3 E_{11}} \quad (42)$$

$$* \left[5.42 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/4} + 2.45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} \right]$$

2.4.2.1.3 Modelo 3 - (Zhu 2008)

Szekrényes e Uj (2004) aplicaram a teoria das vigas de Euler-Bernoulli e Timoshenko em conjunto com a análise de Winkler-Pasternak, a análise do efeito da fenda no início de Saint-Venant e a deformação da fenda por tensão de corte.

$$C = \frac{7a^3 + 2L^3}{8bh^3E_{11}} + \frac{a + 2L}{8bhkG_{13}} + \frac{a^3}{8bh^3E_{11}} \left[0.98 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right) \right] + \frac{1}{\pi} \frac{3a^2}{4bh^2E_{11}} \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} + \frac{a^3}{8bh^3E_{11}} \left[\begin{array}{l} 5.07 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/4} + 8.5 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} \\ + 2.08 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{3/4} \end{array} \right] \quad (43)$$

Enquanto as equações da taxa de libertação de energia em modo I e II apresentam-se de seguida:

$$G_I = \frac{12P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} \left[\begin{array}{l} 1 + 0.85 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} + 0.71 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} \\ + 0.32 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right) + 0.1 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right) \end{array} \right] \quad (44)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} \left[1 + 0.22 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{1/2} + 0.048 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right) \right] \quad (45)$$

Em que k é o factor de correcção da tensão de corte, $k=5/6$, E_{11} é o módulo de flexão, E_{33} é o módulo de espessura.

2.4.2.1.4 Modelo 4 - Kim et al. (2011)

Em vez de utilizar o método da teoria das vigas para derivar a relação $C=f(a)$, a determinação experimental da relação entre a flexibilidade e o comprimento da fenda permite considerar os efeitos de flexão e corte próximo do início da fenda. A flexibilidade e o comprimento da fenda foram normalizados como E_1BC e a/t_1 respectivamente, e a forma normal $C=f(a)$ relacionada com $C=K(a+\Delta a)^3$ foram reformuladas com:

$$\frac{a}{t_1} = \alpha(E_1BC)^{1/3} + \beta \quad (46)$$

Onde α e β são constantes que podem ser determinadas experimentalmente. Assim substituindo a equação (15) na equação (45) a força na interface pode ser calculada através da medição da fenda no início do carregamento.

$$G_c = \frac{3}{2t_1} \left(\frac{P_c}{B} \right)^2 \frac{(E_1BC)^{2/3}}{\alpha E_1} \quad (47)$$

No entanto quando materiais diferentes são colados a elevadas temperaturas, os coeficientes de dilatação térmica diferentes provocam tensões térmicas residuais. Portanto, tensões residuais levam a uma taxa de energia libertada (G_T) pode ser incluída na taxa de energia total libertada como na seguinte:

$$G = G_{mech} + G_T + G_{int} \quad (48)$$

Onde G_{int} é outro termo resultante da interação do carregamento térmico e mecânico. Nairn (2006) calculou os dois termos adicionais no teste *SLB*, baseado na teoria das vigas e na mecânica fractura linear elástica, como apresentado de seguida.

$$G_{int} = \frac{3Pa\Delta T\Delta\alpha(R\lambda^2(1+\lambda))}{Bt_1 + (1 + R\lambda(4 + \lambda(6 + \lambda(4 + R\lambda))))} \quad (49)$$

$$G_T = \frac{1}{2} \frac{E_1 t_1 \Delta\alpha^2 \Delta T^2 (1 + R\lambda^a)}{1 + R\lambda(4 + \lambda(6 + \lambda(4 + R\lambda)))} \quad (50)$$

Onde $\Delta\alpha = \alpha_1 - \alpha_2$, $R = E_1/E_2$, $\lambda = t_1/t_2$.

A taxa de energia total, $G = G_I + G_{II}$, foi decomposta pela decomposição dos três pontos de carga de flexão aplicada no início da fenda do provete *SLB* em modo I e II puros como se verifica na Figura 33.

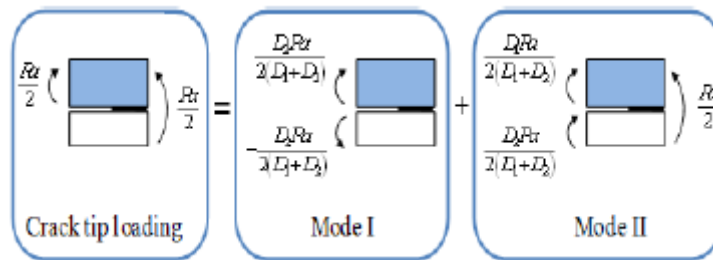


Figura 33. Divisão do carregamento no topo da fenda no provete *SLB* (Kim et al. 2011).

A taxa de libertação de em cada modo de carregamento pode ser calculada através da teoria das vigas, utilizando as equações seguintes.

$$G_I = \frac{P^2 a^2}{8B} \left(\frac{D_2^2}{(D_1 + D_2)^2} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) \right) \quad (51)$$

$$G_{II} = \frac{P^2 a^2}{8B} \left(\frac{1}{(D_1 + D_2)^2} - \frac{1}{D} \right) \quad (52)$$

Onde $D_1 = E_1/1$ para a viga superior, $D_2 = E_2/2$ para a viga inferior, e $D = (EI)_{eff}$ para a secção de viga ligada.

2.4.2.1.5 Modelo 5 - (Chaves et al. 2014)

As equações que se seguem, foram propostas por Szekrényes e Uj (2004) baseado na teoria das vigas. Assim as equações que se seguem permitem o cálculo da taxa de libertação de energia em modo I e em modo II puros.

$$G_I = \frac{9P^2a^2}{16b^2h^3E} \left[1 + 0.218 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{G_s} \right)^{1/2} + 0.048 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{G_s} \right) \right] \quad (53)$$

$$G_{II} = \frac{12P^2a^2}{16b^2h^3E} \left[1 + 0.55 \left(\frac{h}{a} \right) + 0.31 \left(\frac{h}{a} \right)^2 + 0.32 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E}{G_s} \right)^{1/2} + 0.1 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E}{G_s} \right) \right] \quad (54)$$

Os modos relacionam-se através da expressão $G_I/G_{II}=4/3$. Sendo o carregamento e o comprimento da fenda necessários para a determinação de ambas as taxas de libertação de energia.

2.4.2.2 Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente

2.4.2.2.1 Compliance-Based Beam Method (CBBM) (Fernández et al. 2013)

O CBBM utiliza o comprimento da fenda equivalente, em vez do comprimento medido experimentalmente na realização do ensaio. Este método torna-se bastante útil, pois as grandes dificuldades no estudo da tenacidade do adesivo são no acompanhamento da propagação da fenda durante o ensaio. Este método é ainda vantajoso, pois considera a zona que entra em regime plástico devido à propagação da fenda.

Baseado na Teoria das vigas de Timochenko, a equação para a flexibilidade entre o comprimento da fenda e o ponto de aplicação do carregamento é dado pela expressão:

$$C = \frac{7a^3 + (2L)^3}{8E_1bh^3} + \frac{3(a+2L)}{20G_{13}Bh} \quad (55)$$

Para estimar o Modulo de Young à flexão E_f , que substitui E_1 , são utilizados o comprimento de fenda inicial e a flexibilidade no momento da criação da fenda, representando-se pela equação:

$$E_f = \left(C_0 - \frac{3(a_0+2L)}{20G_{13}Bh} \right) \frac{7a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3} \quad (56)$$

Utilizando a equação (56), pode-se obter o comprimento de fenda equivalente durante a propagação utilizando ainda a função da flexibilidade ($a_e=f(C)$), que calcula valores mais elaborados, resultando assim a equação:

$$a_{eq} = \left(\frac{1}{6B} \right) * A - \frac{2h}{A} \quad (57)$$

Em que A é dado pela expressão seguinte:

$$A = \left(\left(-108C + 12 \sqrt{3 \left(\frac{4h^3 + 27C_3^2 B}{B} \right)} \right) B^2 \right)^{1/3} \quad (58)$$

O valor de C_3 pode ser determinado pela expressão seguinte:

$$C_3 = \frac{21^3}{32E_f B h^3} + \frac{6L}{20G_{13} B h} - C \quad (59)$$

Recorrendo à equação de Irwin-Kies, a tenacidade à fractura obtém-se pela expressão seguinte:

$$G_T = \frac{21P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{40G_{13} B^2 h} \quad (60)$$

Seguindo o método de Szekrényes, as componentes da taxa de libertação de energia à fractura para os modos I e II são:

$$G_I = \frac{3P^2 a_{eq}^2}{4E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{40G_{13} B^2 h} \quad (61)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} \quad (62)$$

2.4.2.3 Método do integral-J

Este método foi desenvolvido pelo Rice (1968) em 1968, para realizar a caracterização das concentrações de tensões na região envolvente de fendas e entalhes. A expressão para este cálculo é:

$$J = \int_C (W_{n_k} - \sigma_{ij} u_{i,j} n) ds \quad (63)$$

No qual W_{n_k} é a densidade de energia de deformação, u_i é o vector de deslocamento, n_j é o vector centrífugo do contorno C e σ_{ij} é o tensor de carga.

Na definição inicial, apresentaram-se cenários em 2D que incluía a zona elástica e o elasto-plástica. De seguida aplicou-se a materiais compósitos ortotrópicos e a casos em 3D. Na utilização em casos 3D foi exposto o vector J_k , sendo definido pela seguinte expressão:

$$J_k = \int_C (W_{n_k} - \sigma_{ij} u_{i,k} n_j) ds + \int_A (W \delta_{ka} - \sigma_{ia} u_{i,k})_{,a} dA, k = 1, 2 \quad (64)$$

$$J_a = \int_C (W_a n_1 - \sigma_{aj} u_{a,1} n_j) ds \quad (65)$$

Na Figura 34 n_j é o vector centrífugo do contorno C , δ_{ij} é o tensor Kronecker, o σ_{ij} é o tensor de carga, o produto das variáveis $\delta_{ij} n_j$ é o vector de tracção. A variável u_i é o vector deslocamento, A é a área delimitada pelo contorno C . A variável C engloba o início da fenda, e a integração é feita no sentido contrário ao dos ponteiros do relógio, conforme representado na Figura 34. Na análise estática, o integral J pode ser equivalente à taxa de libertação de energia G .

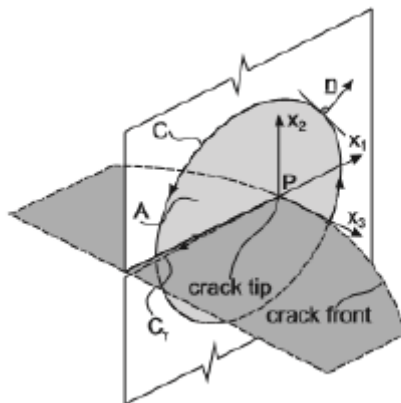


Figura 34. Referencial de referência para o integral J 3D (Adams e Comyn 2000).

O cálculo da taxa de libertação de energia pode ser efectuado através do modelo da fractura frágil de Griffith. A expressão para este modelo é apresentada de seguida:

$$G = \frac{\partial U}{\partial U} - \frac{\partial W_f}{\partial A} \quad (66)$$

A expressão apresentada é bastante útil caso exista uma dependência entre a energia libertada (U) as forças externas (W_f), dependentes do comprimento da fenda a ($dA = bda$, onde b é a largura). Contudo, na eventualidade da elevada dificuldade na obtenção das expressões anteriores, pode-se utilizar o método J como auxílio ao comprimento da fenda. Sendo assim, os estados de tensão são calculados analítica e numericamente.

No caso do ensaio SLB, que alberga a propagação da fenda em modo misto, o braço inferior do provete não é sujeito a um carregamento, sendo este efectuado a uma distância a_0 do topo do provete.

Assim sendo, é recomendado o calculo das taxas de libertação de energia em modo I e modo II em separado. Este metodo foi proposto por Shivakumar e Raju (1992) e basea-se na separação dos componentes de deslocamentos e tensores simétricos e assimetricos. Rigby e Aliabadi (1998) mostram posteriormente que a decomposição de tensor era em parte incorrecta e o método foi portanto revisto, sendo aplicado mais tarde por outros autores.

Através da sobreposição de um ensaio DCB com um momento fletor de $Pa/2$ e pelo ensaio ENF, o tensor de carga poderá ser decomposto. Assim, para o ensaio em questão, o método de Shivakumar e Raju (1992) será equivalente ao método global de Williams

(1988), e portanto, as taxas de energia libertada podem ser obtidas através das seguintes expressões:

$$J_I = \frac{12P^2 a^2}{16b^2 h^3 E} \quad (67)$$

$$J_{II} = \frac{9P^2 a^2}{16b^2 h^3 E} \quad (68)$$

$$J_{I/II} = \frac{21P^2 a^2}{16b^2 h^3 E} \quad (69)$$

2.5 Efeito da espessura do adesivo em juntas adesivas

O efeito da espessura (t_A) de adesivo em ligações coladas é muito importante, pois esse valor tem influência na resistência mecânica da ligação. Portanto, é necessário perceber o processo de fractura da ligação adesiva e a influência espessura e da interface com os materiais Duan et al. (2004). É assim do conhecimento geral que as propriedades mecânicas de uma camada fina de adesivo, como os valores de σ_u e J_c , variam com t_A e as características do material envolvente, diverge também nas propriedades adesivas (Andersson e Stigh 2004). Actualmente as propriedades das camadas de adesivo dependem largamente da capacidade de deformação em torno da fenda (Andersson e Stigh 2004, Högberg e Stigh 2006, Leffler et al. 2007). Nas ligações adesivas, o adesivo é normalmente mais fraco do que a estrutura colada. Como resultado disso, a falha é normalmente coesiva, resultado de um carregamento em modo misto (Campilho et al. (2005). Em meios contínuos de adesivo, a fissura tende a propagar-se perpendicularmente à tensão principal máxima (Chai 1992). Kin Loch e Shaw (1981), analisaram o comportamento de fractura de camadas adesivas num adesivo base epóxi modificado. Analisaram os efeitos da temperatura, a espessura dos aderentes e do t_A . O efeito da espessura de adesivo estabiliza a partir de 25 mm. Vários estudos referem uma dependência entre as camadas de adesivo e a variável J_c com a espessura t_A , a geometria e a rigidez dos aderentes (Bascom et al. 1975, Bascom e Cottington 1976, Chai 1986, Hunston et al. 1989, Bell e Kinloch 1997, Lee et al. 2003, Lee et al. 2004). Normalmente o valor de J_c aumenta com o aumento de t_A até um valor de pico maior que a quantidade de adesivo (Kinloch 1987, Crews et al. 1988). Depois J_c decresce e t_A atinge um valor constante, correspondendo ao J_c do adesivo (Bascom e Cottington 1976, Hunston et al. 1989, Ikeda et al. 2000, Duan et al. 2003). Esta tendência está de acordo com o trabalho de Yan et al. (2001a, 2001b) que estudou a influência de t_A nas propriedades de fractura nas juntas DCB e CT com aderentes em alumínio um adesivo base epóxi modificado. Utilizando uma elevada deformação na técnica MEF e os picos de carga medidos na experimentalmente, o valor crítico de J-integral foi calculado para diferentes valores de t_A . Gardon (1963) realizou estudos onde variou os valores de t_A , e retirou valores da força de arranque, que era proporcional ao JIC que ia decrescendo com a redução do valor óptimo de t_A . Duan et al. (2004) referiu o efeito da espessura adesiva nas ligações

coladas, adaptando o Modelo da condição fronteira de Hu e Wittmann (1992) e o Trabalho Essencial do Modelo de Fractura de Cotterell e Reddel (1977), Mai e Cotterell (1980). Os resultados mostram que o peso na *Fracture Process Zone* (FPZ) e a variação da extensão está directamente relacionado com as mudanças no J_C . Estes valores diminuem quando a fenda se aproxima da fronteira traseira do provete, devido às limitações no desenvolvimento da FPZ. Para ligações adesivas, a relação entre t_A e o J_C foi estabelecida acima do valor pico de J_C , devido à limitação da FPZ entre aderentes.

Em trabalhos como o de Campilho et al. (2011), é descrito que factores como o valor da espessura de ligação, o comprimento e a geometria da junta reduz as concentrações de tensões sofridas pelo adesivo. Estudos efectuados neste campo mostram que a resistência mecânica da junta diminui com o aumento de espessura. Adams e Peppiatt (1974) mencionaram no seu trabalho que, para ligações com adesivo base epóxi a espessura óptima situa-se entre os 0,1 e 0,2 mm. Espessuras acima de 0,2 mm têm maior probabilidade de conter imperfeições na junta (como espaços vazios e microfissuras), que podem levar a uma falha prematura da junta. Segundo Crocombe (1989) uma espessura reduzida de junta tem uma resistência menor devido à plastificação do adesivo quando sujeito a um determinado esforço.

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

No presente capítulo será realizada uma descrição pormenorizada do procedimento e testes experimentais realizados com os diversos provetes. Os provetes produzidos utilizaram aderentes de CFRP.

O adesivo utilizado para o ensaio foi o SikaForce-7752, e foram produzidos provetes com diversas espessuras de adesivo por forma a permitir a análise do comportamento em ensaios estáticos.

3.1 Trabalho experimental

3.1.1 Materiais utilizados

As juntas adesivas foram realizadas utilizando aderentes de CFRP, sendo que o adesivo utilizado foi o Sikaforce®-7752.

O ciclo de cura foi de 1h e 30 minutos a uma temperatura de 130°C, e utilizou-se uma prensa de pratos quentes para esse efeito. Após o ciclo de cura, a temperatura da prensa foi reduzida para os 30°C, e aguardou-se pela descida de temperatura até aproximadamente 90°C, sendo o tempo de espera de aproximadamente 1h. Atingidos os 90°C, ligou-se a água por forma a se obter um arrefecimento mais rápido. Terminado o ciclo de cura, as placas de CFRP eram retiradas da prensa, e de seguida cortadas em tiras com uma serra com disco de diamante. O acabamento foi realizado através de uma lixa de 120-grit, despolindo toda a superfície de forma a tornar a mesma mais uniforme e livre de contaminantes.

3.1.1.1 Substratos

Os provetes utilizados neste ensaio consistem em placas de um compósito de matriz polimérica de resina reforçada com fibra de carbono pré-impregnadas unidireccionalmente (SEAL® Texipreg HS 160 RM). As camadas para dar forma às placas foram cortadas à mão a partir de um rolo e curadas no interior de uma prensa com placas aquecidas. As placas laminadas tinham as dimensões de 300x300x0,15 mm³, tendo sido produzidas através do empilhamento com 0° e unidireccionalmente (obtendo-se melhores propriedades na direcção de carregamento) num total de 20 camadas de carbono / epóxi pré-impregnadas com um total de 3 mm cada placa.

As propriedades mecânicas do aderente com fibras de carbono pré-impregnado, que foram previamente determinadas no trabalho do (Campilho et al. 2008), são apresentadas na Tabela 4 (Campilho 2009). Apresentam-se as propriedades do Módulo de

Elasticidade (E), do módulo de cisalhamento (G) e do coeficiente de Poisson (ν), em três direcções distintas (x, y, z).

Tabela 4. Propriedades elásticas do composto reforçado a fibras de carbono, com alinhamento unidirecional Campilho et al. (2005), Soares (2015).

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

3.1.1.2 Adesivo Sikaforce® 7752

O adesivo utilizado para a realização do trabalho experimental foi o Sikaforce®-7752. Este produto é bi-componente (resina e endurecedor), sendo a sua formulação base um poliuretano. A sua aplicação é acessível, sem ter de recorrer a equipamentos especializados. A sua viscosidade é baixa, permitindo assim poder ser aplicado directamente nos provetes. Ao ser componentes por dois componentes, ele cura independentemente da humidade em aproximadamente 3h na prensa. Deste modo, pode-se variar a espessura de adesivo dos provetes, e compensar eventuais irregularidades da superfície dos mesmos, devendo a superfície ser o mais lisa possível. Este produto apresenta uma elevada ductilidade permitindo assim caracterizar várias propriedades (Soares 2015).

Adesivo Sikaforce®-7752

O Sikaforce-7752 L60 (Figura 35) é um adesivo estrutural tendo por base um poliuretano tixotrópico (não escorre na vertical) bicomponente, em que o componente A é formado por cargas de polioli, e o componente B (Sikaforce-7010) é o endurecedor base isocianato, com baixa emissão de gases voláteis.



Figura 35. Adesivo SikaForce-7752 L60.

O adesivo cura à temperatura ambiente, e apresenta boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, também oferece uma boa resistência ao impacto e a elevadas temperaturas. O ligante é bastante flexível a baixas temperaturas e pode ser aplicado em metais, cerâmicos, madeiras e derivados de madeiras (Soares 2015).

Na Tabela 5 pode-se verificar algumas propriedades do adesivo Sikaforce-7752, retiradas da ficha de dados do fabricante disponível online (Sika AG).

Tabela 5. Propriedades do adesivo Sikaforce®-7752 (Campilho et al. 2013).

Propriedades	Sikaforce®-7752
Módulo de Young, E (GPa)	0,49±0,09
Coefficiente de Poisson, ν	0,30*
Tensão de cedência à tracção σ_y [MPa]	3.24±0.48
Tensão de rotura à tracção, σ_f [MPa]	11.48±0.25
Deformação de rotura à tracção, 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 tracção, G_{IC} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41±0,47
*Valor do Fabricante	

3.1.2 Geometria das juntas

O material escolhido para o fabrico dos provetes foi o compósito reforçado com fibra de carbono, em detrimento de outros materiais como, por exemplo, o alumínio. Este material foi escolhido de modo a que os substratos não sofram qualquer tipo de deformação plástica durante os ensaios, que iria afectar os resultados obtidos.

Tendo em consideração que deve haver uma relação entre a_0 e L de aproximadamente de 50/100, assim como as limitações dimensionais de fabrico (molde), foram utilizadas as seguintes dimensões:

$$L = 125 \text{ mm}$$

$$a_0 \sim 70 \text{ mm (do apoio até ao início da fenda)}$$

O valor de h_t será variável devido às diferentes espessuras de adesivo a testar, elas são mencionadas a seguir.

$h_{t1} = 6,1$ mm (3 mm de espessura de cada substrato e neste caso 0,1 mm de espessura de adesivo)

$h_{t2} = 6,2$ mm

$h_{t3} = 6,5$ mm

$h_{t4} = 7$ mm

$h_{t5} = 8$ mm

Na Figura 36 está representada a geometria do provete SLB.

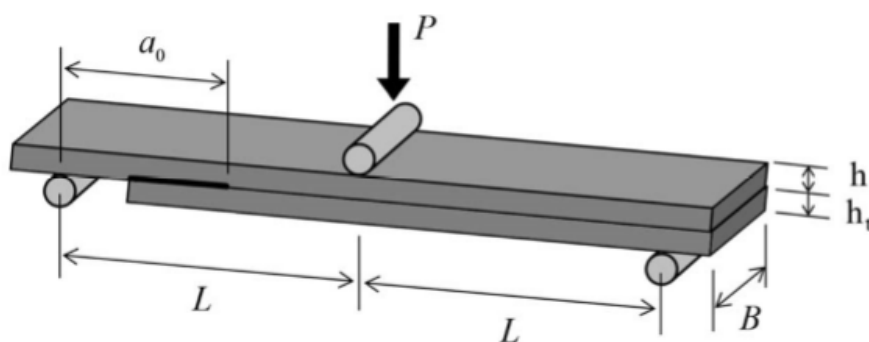


Figura 36- Geometria do provete SLB (Soares 2015)

O substrato superior tem o comprimento de 280 mm e o substrato inferior de 245 mm. A largura (B) de ambos os substratos é de 15 mm.

3.1.3 Processo de fabrico

O processo de fabrico dos substratos de CFRP consistiu no empilhamento manual de uma camada pré-impregnada de CFRP sobre outra até que a espessura desejada fosse atingida. O procedimento de produção foi o seguinte:

- Retirar o rolo de CFRP do congelador, e aguardar uns minutos para este atingir a temperatura ambiente;
- Cortou-se tiras do rolo com 300×300 mm² usando uma lâmina de corte;
- A tira de teflon que o material possui, foi retirada para cada placa.
- As placas foram posicionadas e sobrepostas manualmente em sequência, sendo pressionadas de forma a retirar eventuais bolhas de ar. A direção das fibras (orientação 0°) foi assegurada.

- Na última camada e assim como na primeira, manteve-se o papel de protecção já para o processo de cura.

A preparação do molde de alumínio cru realizou-se através do despolimento e limpeza da superfície com acetona. De seguida aplicou-se desmoldante de forma a proporcionar uma fácil remoção da placa compósita após cura. A Figura 37 mostra o equipamento utilizado para aquisição do produto final.



Figura 37. Prensa de pratos aquecidos.

Uma vez na prensa, a placa passa um ciclo térmico que inclui 3 estágios distintos. Este ciclo é representado pela Figura 38.

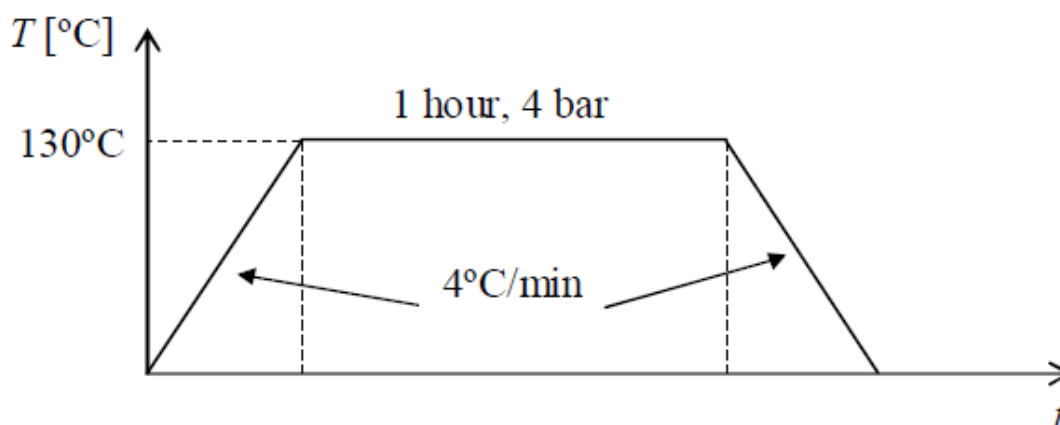


Figura 38. Ciclo térmico das placas na prensa (Campilho 2009).

Após o término do ciclo de cura retira-se a placa de CFRP do molde. As folhas de teflon (cobertura da placa) são retiradas, e as placas passam assim para a fase seguinte, que será o corte com as medidas pretendidas. O corte é efectuado numa máquina de corte

com disco diamantado e arrefecido a água, de modo a evitar a suspensão de partículas nocivas.



Figura 39. Máquina de corte com disco diamantado, para corte das placas de carbono.

Assim que o corte das placas é finalizado, os substratos são secos e procede-se à preparação superficial dos substratos para a próxima fase, traduzindo-se no despolimento superficial, traduzindo-se no despolimento superficial. No despolimento utiliza-se uma lixa de grão P80, com o objectivo retirar o desmoldante e outras sujidades que possam ter ficado na superfície, e assim proporcionar uma boa aderência do adesivo à superfície. Após o despolimento, as superfícies são bem limpas com acetona de modo a eliminar a presença de agentes externos na ligação (Soares 2015).

De seguida, preparam-se os espaçadores com várias espessuras (0,1;0,2;0,5;1;2), que são responsáveis por garantir a espessura de adesivo pretendido. Em cada provete são colados dois espaçadores, como mostra a Figura 40.

Na extremidade com o braço mais curto, criou-se uma pré-fenda por onde se iniciará a propagação da fenda durante o ensaio, devido à presença de uma lâmina no centro de um espaçador.

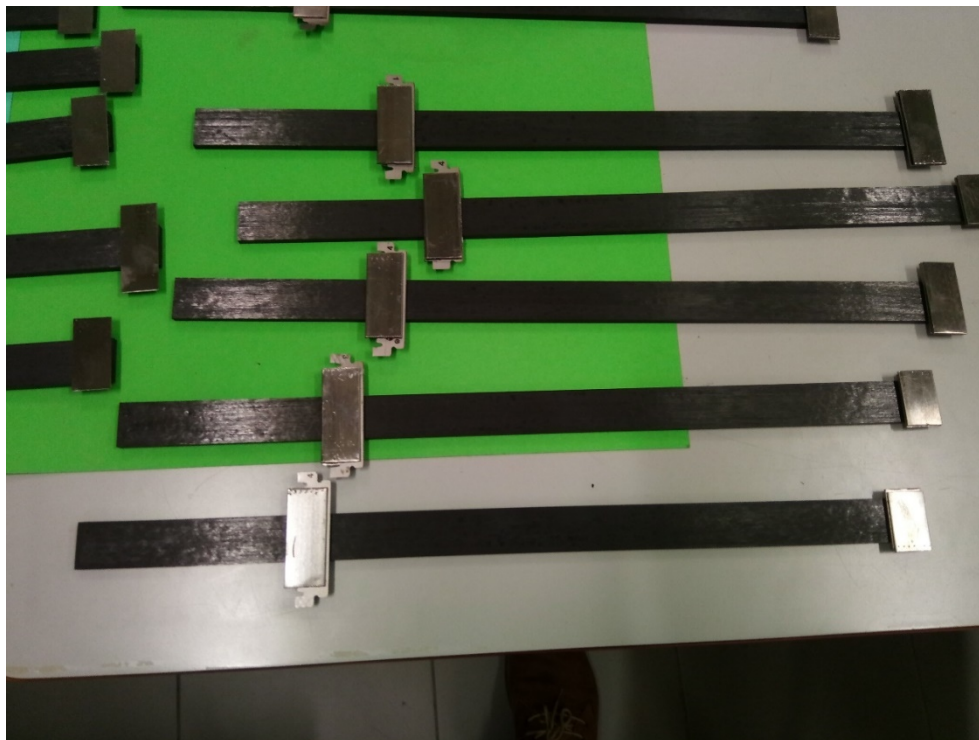


Figura 40. Provetes de compósito com os espaçadores metálicos colados.

Para a preparação dos espaçadores, foram necessárias várias lâminas de 0,1 mm, assim como fita calibrada de alumínio, que foram sendo colados de forma a obter-se as espessuras pretendidas. Antes da colagem das laminas ao alumínio, estes foram limpos com acetona de forma retirar-se a sujidade à superfície. No passo seguinte, colou-se com supercola as laminas aos pequenos pedaços de alumínio, de forma a conseguir as várias espessuras. Após isso, estes são aquecidos num forno eléctrico de modo a elevar e sua temperatura para ser aplicado o desmoldante (esta elevação de temperatura facilita o processo de aderência). O desmoldante é aplicado 3 vezes sobre cada superfície do espaçador com o cuidado de deixar que cada aplicação seque antes da seguinte (Soares 2015).

Finalizada a preparação dos substratos e dos espaçadores, é possível prosseguir para a colagem dos provetes. Para tal, utilizaram-se grampos para pressionar as superfícies e conseguir a espessura pretendida. Na superfície onde se posicionaram os provetes colocados, utilizou-se uma película de Teflon® para prevenir que, em caso de vazamento, o adesivo ficasse colado à película antiaderente. De seguida, foi aplicado o adesivo na área de contacto pretendida e posicionado o substrato menor, sendo posteriormente aplicada alguma pressão manual de modo a escoar o excesso de adesivo e assegurar o contacto entre os espaçadores e o substrato Figura 41.



Figura 41. Aplicação do adesivo Sikaforce-7752 no provete de compósito.

A colagem dos substratos termina quando são colocados grampos exercendo pressão na zona onde se situam os espaçadores. Os grampos são deixados durante a cura do adesivo de modo a assegurar um correcto posicionamento entre os substratos e garantir a espessura desejada, Figura 42 (Soares 2015).



Figura 42. Colocação do braço menor do provete, com grampos para assegurar a espessura final desejada.

Após a colagem dos provetes, existe a necessidade de se efectuar algumas operações antes de acabamento antes da realização dos ensaios. Estas operações de acabamento, apenas podem ser efectuadas após cura do adesivo. Desta forma, as juntas permaneceram em repouso de aproximadamente 7 dias, antes de iniciar a fase seguinte.

Finalizado o tempo de repouso, removeram-se os espaçadores recorrendo-se a um alicate sendo uma operação facilitada devido à aplicação de desmoldante nos espaçadores. De seguida remove-se o excesso de adesivo nos bordos dos provetes. Nesta operação recorreu-se a um alicate para remover o máximo possível de adesivo sem que fosse danificado o provete, e retirado adesivo entre os substratos. No final os provetes ficaram como na imagem seguinte.



Figura 43. Provete após o processo de acabamento.

Para um acabamento mais preciso na remoção dos excessos de adesivo, utilizou-se uma mó com rugosidade reduzida de modo a desbastar mais excesso de produto sem danificar o provete.

Numa fase posterior, após a remoção dos excessos de adesivo, os provetes foram limpos com acetona e registou-se numa das faces a espessura de adesivo e o número do provete. De seguida pintou-se a face que iria ser alvo do registo fotográfico com corrector, de modo a melhorar a identificação da fenda na análise das imagens. Iniciou-se ainda uma pré-fenda em cada provete antes de se colar a escala. As distâncias entre a pré-fenda e o apoio esquerdo (a_0) dos vários provetes foram registadas e são apresentadas na Tabela 6.

Tabela 6. Valores de a_0 dos vários provetes.

Adesivo SikaForce®-7752					
Provete/Espessura	0,1 mm	0,2 mm	0,5 mm	1,0 mm	2,0 mm
1	91,87	67,68	79,69	78,90	70,81
2	69,42	72,24	67,84	70,43	65,16
3	83,85	68,98	67,16	71,14	68,06
4	68,29	68,37	69,89	70,18	70,90
5	70,16	67,72	66,92	64,46	75,06

Para finalizar, é colada uma escala em cada um dos provetes, na face onde são captadas as fotografias, como mostra a Figura 44.

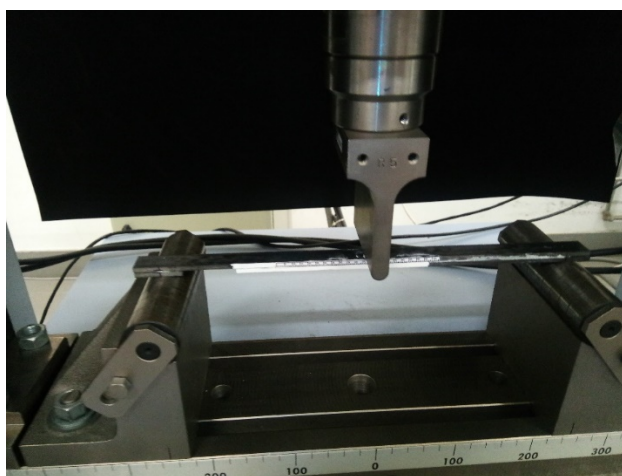


Figura 44. Provete colocado para ensaio, com respectiva escala.

3.1.4 Ensaio das juntas

Na realização ensaios, utilizou-se um equipamento electromecânico da marca Shimadzu AG-X 100. Este equipamento estava previamente conectado a um computador, cuja função se reduzia à recolha e processamento dos dados do ensaio. O programa do computador apresentou os dados no formato de gráfico $P(N)$ vs. Deslocamento δ (mm), como mostra o exemplo da Figura 45.

Palavra-chave		Nome do produto	
Nome do arquivo do ensaio	raul ENF_20180820_1817.xtak	Nome do arquivo do método	raul ENF.xmak
Data do relatório	20-08-2018	Data do ensaio	20-08-2018
Modo de ensaio	Simple	Tipo de ensaio	Dobr.3ptos
Velocidade	1,5mm/min	Placa	Placa
Lote No:	1	Sub-Lote No:	1

Nome Parâmetros	Máx_Força Cálculo de áreas completas	Máx_Deslocamento Cálculo de áreas completas
Unidade	N	mm
placa1	415,595	7,76792
Média	415,595	7,76792
DesvioPadrão	--	--

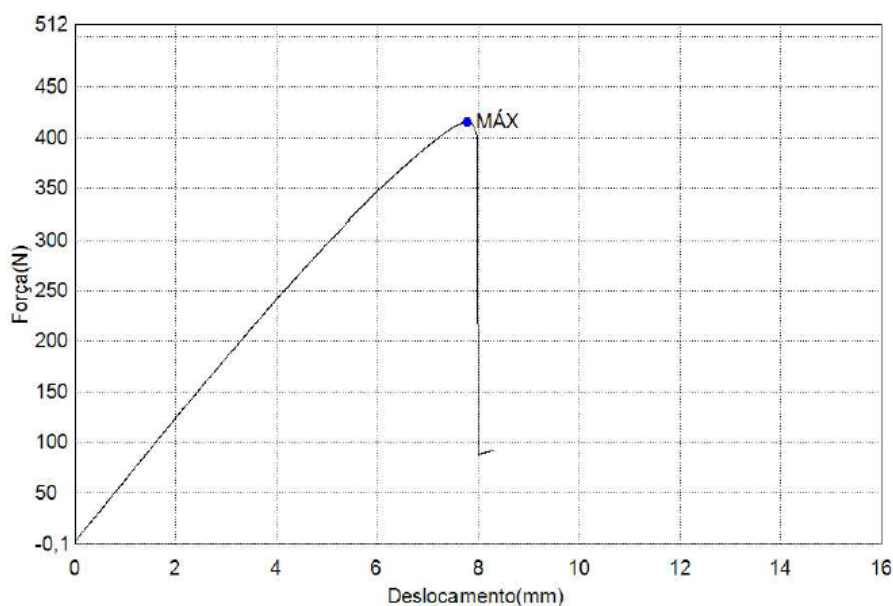


Figura 45. Exemplo da forma como os dados são fornecidos pelo programa.

Na captação e controlo da evolução do comprimento da fenda, utilizou-se uma máquina fotográfica Canon EOS 70D de 20 megapixéis (Figura 46). No sentido de fixar a máquina fotográfica, colocaram-se placas de metal (como calços) presentes no laboratório, impedindo assim a sua movimentação no acto da captação das imagens. Paralelamente à captação das imagens e ao ensaio, cronometrou-se o tempo, para que de 5 em 5 segundos fossem sendo captada a imagem correspondentes à movimentação da fenda.

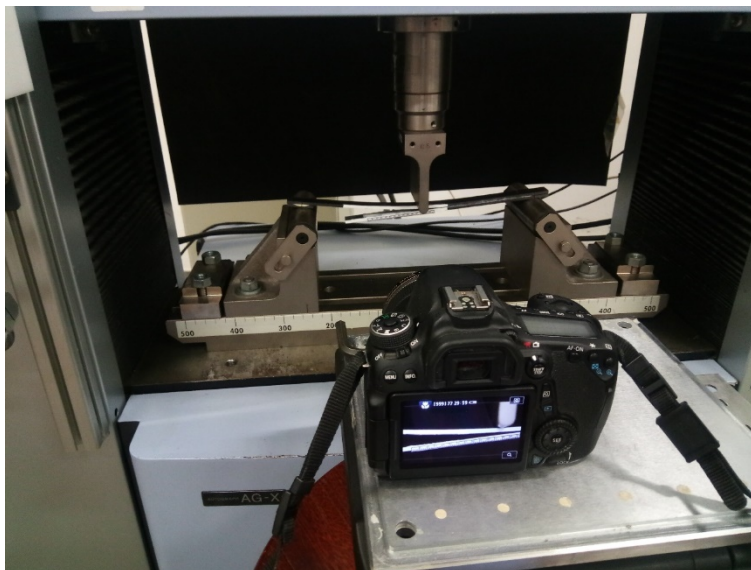


Figura 46. Posicionamento dos equipamentos para ensaio.

Na execução do ensaio, colocou-se o provete na posição pretendida. A sua colocação era efectuada através do alinhamento do provete com as linhas paralelas marcadas em ambos os apoios do ensaio, com o objectivo de indicar a perpendicularidade da força aplicada com o comprimento dos provetes. De seguida, procede-se à regulação do punção, que é feita manualmente de modo a que este seja posicionado muito próximo do provete, pois assim que o equipamento for accionado, entre em contacto com a superfície do provete, iniciando-se desta forma o ensaio. Finalizada a regulação do punção de solicitação, posicionou-se a máquina fotográfica para que fosse possível registar todo o processo de propagação da fenda, sem que o provete ficasse fora da área de captação, devido à flexão do provete.

Após montagem das ferramentas, deu-se início ao ensaio dos provetes, tendo cada espessura de adesivo uma velocidade de ensaio adaptada à mesma e enquadrada na suposição de ensaio quase-estático (de modo a que não haja influencia de efeitos viscoelásticos). Portanto as velocidades de ensaio dos provetes são as seguintes:

- No intervalo [0,1 a 0,5] - 1,5 mm/min;
- No intervalo [1 e 2] - 3 mm/min.

No decorrer do ensaio, foram captadas fotografias de 5 em 5 segundos até ao fim do ensaio. O ensaio termina quando a propagação da fenda atinge a zona próxima ao punção (central dos provetes), ou a ruptura final do adesivo (Soares 2015).

3.1.5 Resultados obtidos

Nos tópicos seguintes serão apresentados, após tratamento, os resultados experimentais dos ensaios efectuados. Menciona-se os modos de ruptura, os valores das curvas $P-\delta$ correspondentes aos provetes das várias espessuras de adesivo, e os valores de G_I e G_{II} através das curvas R.

No final, é realizada uma análise dos resultados obtidos, em função da espessura de adesivo, e do tipo de adesivo utilizado.

3.1.5.1 Modos de rotura

O modo de ruptura obtida nos ensaios experimentais foi do tipo coesivo, como se pretendia. A preparação de superfície dos provetes que passou pelo despolimento através de uma lixa, e a limpeza com acetona, obteve bons resultados de aderência pelo adesivo. A Figura 47 mostra o tipo de rotura obtido nos provetes ao longo dos ensaios.

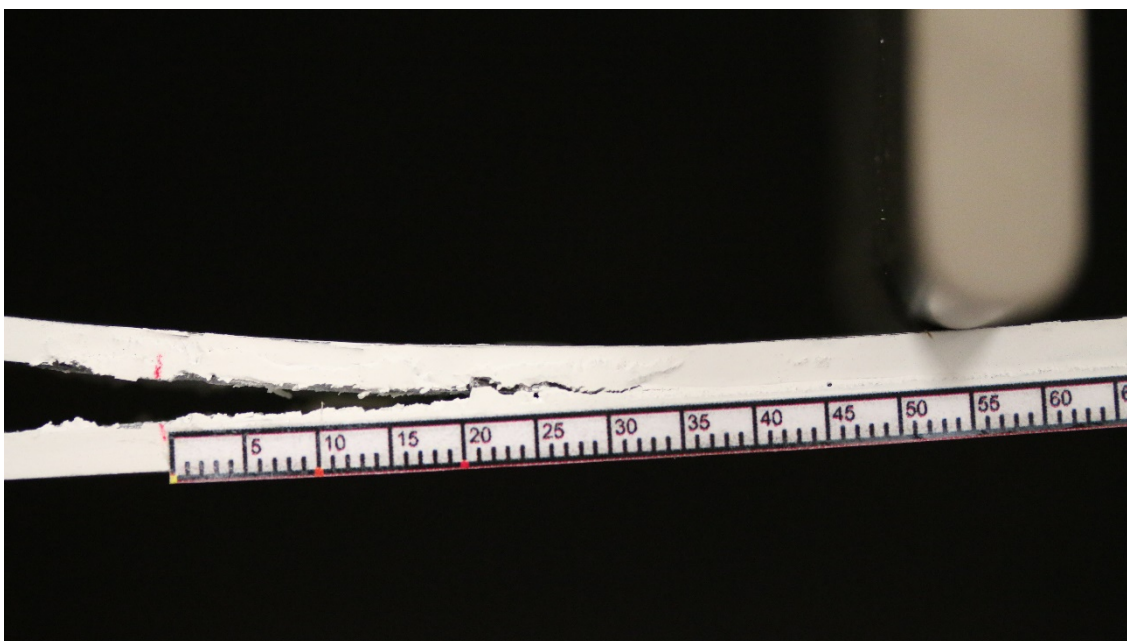
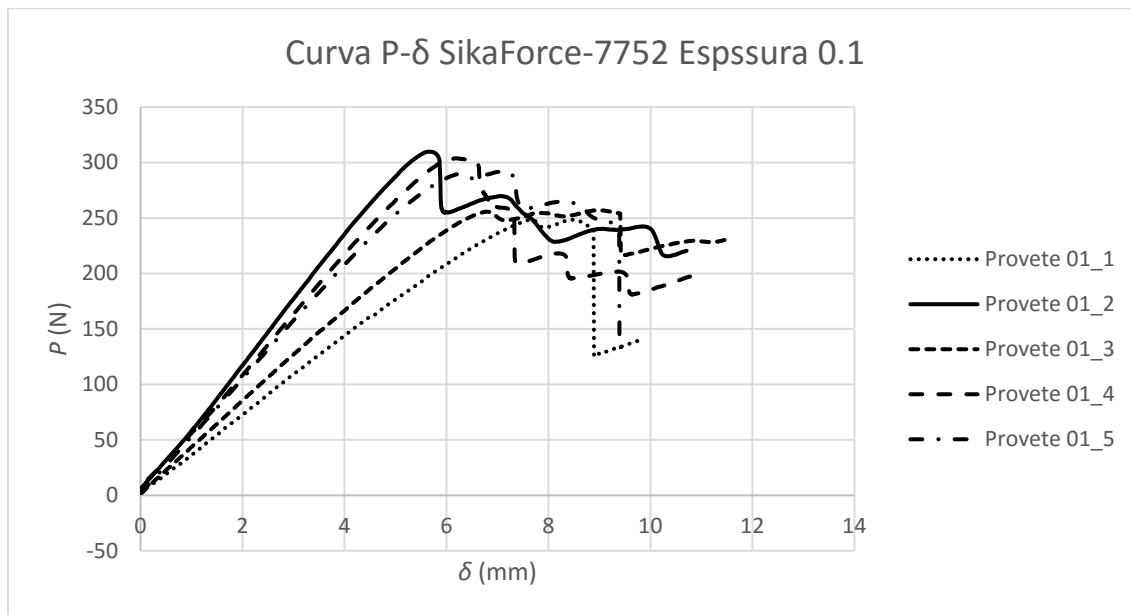
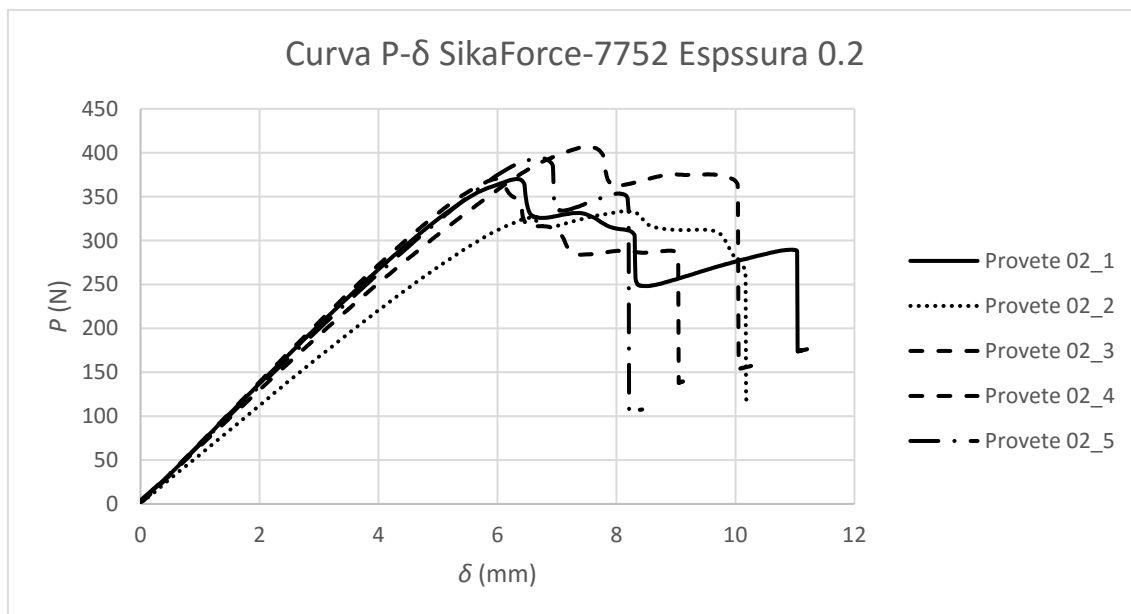
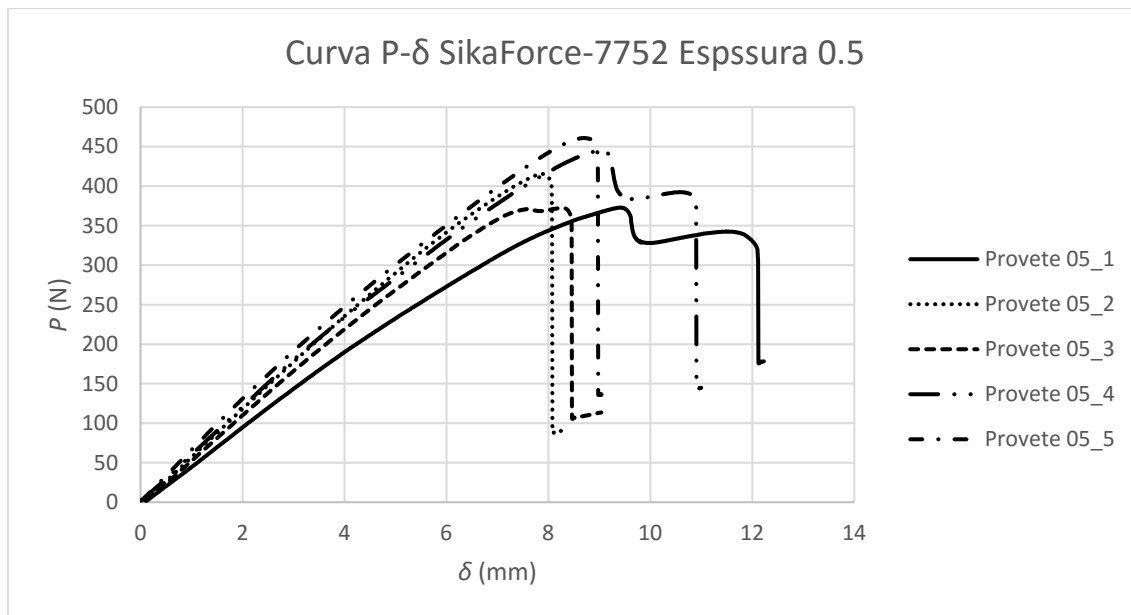
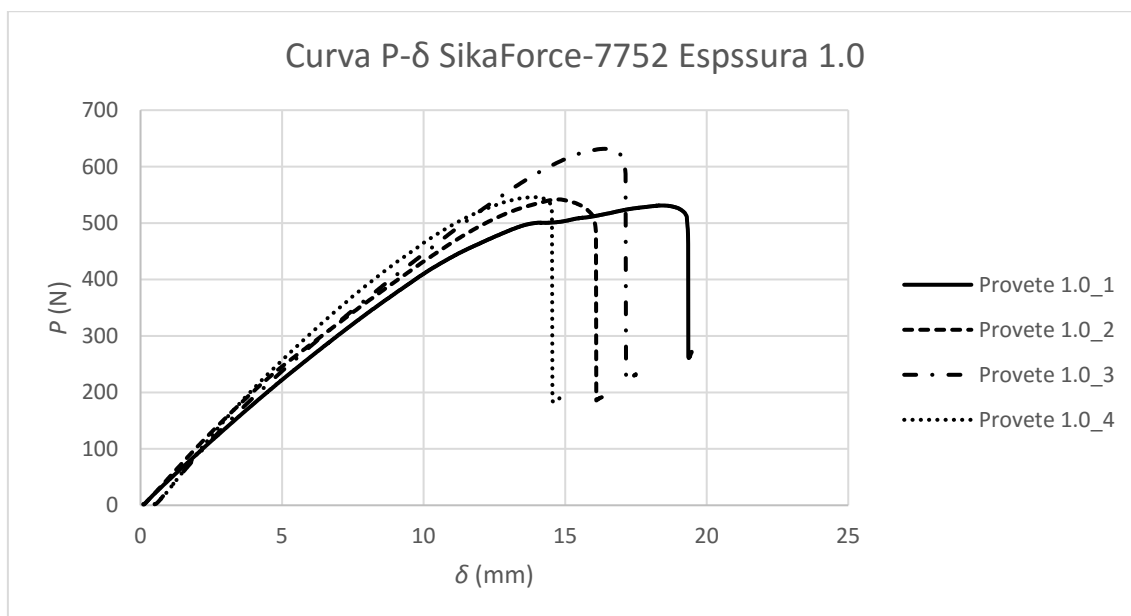


Figura 47. Ruptura coesiva do adesivo Sikaforce®-7752 no ensaio SLB.

3.1.5.2 Curvas $P-\delta$

Na realização dos ensaios, foram produzidos 25 provetes, sendo 5 provetes para cada espessura (0,1, 0,2, 0,5, 1 e 2 mm). Obtiveram-se assim as curvas $P-\delta$ para cada 5 provetes de cada espessura representadas nas Figura 48, Figura 49, Figura 50, Figura 51, e na Figura 52. Existiu a necessidade de não se considerar o provete 5 para a espessura de 1 mm e o provete 3 para a espessura de 2 mm. A anulação desses provetes para a análise dos resultados deveu-se à dispersão elevada desses valores em relação aos outros provetes com variabilidade entre eles reduzidos.

Figura 48. Curvas P- δ dos provetes com espessura de 0.1 mm.Figura 49. Curvas P- δ dos provetes com espessura de 0.2 mm.

Figura 50. Curvas P - δ dos provetes com espessura de 0.5 mm.Figura 51. Curvas P - δ dos provetes com espessura de 1 mm.

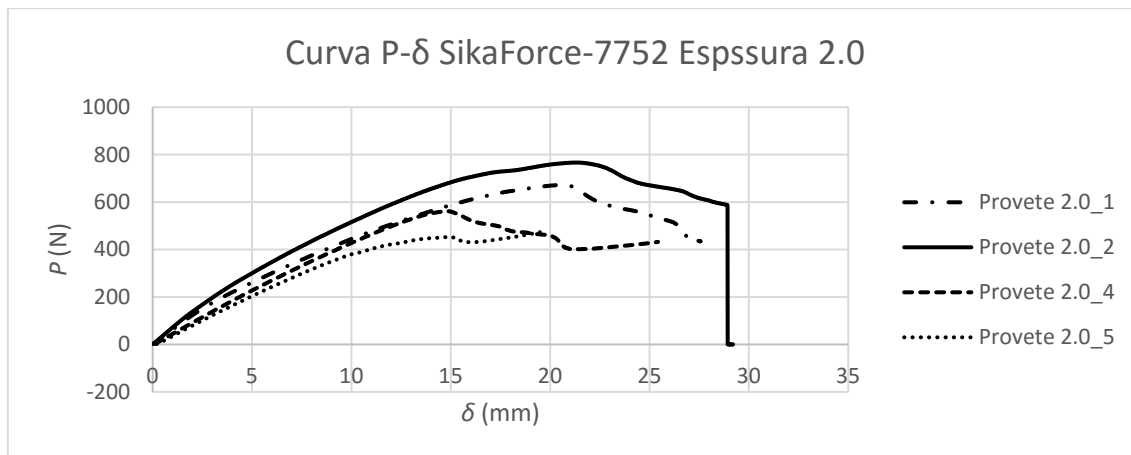


Figura 52. Curvas P - δ dos provetes com espessura de 2 mm.

Pela observação efectuada às curvas P - δ previamente apresentadas, pode-se concluir que o adesivo apresentou uma rigidez semelhante nos vários ensaios, como se verifica pelo declive das curvas até ao ponto de força máxima. O comportamento durante a propagação da fenda esteve também consistente com os provetes (Santos e Campilho 2017). Observa-se ainda que, após a ruptura, os adesivos apresentaram comportamentos idênticos, dado que em todos a força registou uma diminuição brusca. As curvas revelam ainda uma consistência entre os provetes de cada espessura considerando a rigidez na fase elástica das curvas. No sentido de complementar a informação dos gráficos com as curvas P - δ , são apresentadas a Tabela 7, Tabela 8, Tabela 9, Tabela 10 e Tabela 11 com os valores de força e deslocamento máximos atingidos por cada espessura de adesivo.

Tabela 7. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 0,1 mm.

Espessura (mm)	Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
0,1	1	9,757	248,6
	2	10,709	309,9
	3	11,554	257,1
	4	10,953	303,9
	5	9,652	292,3
Média		10,525	282,3
Desvio Pad.		0,811	27,8

Tabela 8. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 0,2 mm.

Espessura (mm)	Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
0,2	1	11,204	370,0
	2	10,282	333,5
	3	10,291	406,5
	4	9,180	370,5
	5	8,433	393,8
Média		9,878	374,9
Desvio. Pad.		1,080	27,9

Tabela 9. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 0,5 mm.

Espessura (mm)	Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
0,5	1	12,227	372,9
	2	8,390	415,6
	3	9,039	372,3
	4	10,998	444,7
	5	9,044	460,9
Média		9,940	413,3
Desvio Pad.		1,610	40,5

Tabela 10. Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 1 mm.

Espessura (mm)	Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
1	1	19,470	531,2
	2	16,401	541,9
	3	17,496	631,6
	4	15,015	546,0
	5	14,065	525,6
Média		16,489	555,2
Desvio Pad.		2,119	43,4

Tabela 11. . Valores de força e deslocamento máximos para a espessura de 2 mm.

Espessura (mm)	Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
2	1	27,560	672,4
	2	29,203	766,5
	3	21,726	536,7
	4	25,430	561,8
	5	19,721	476,4
Média		24,728	602,8
Desvio Pad.		3,957	115,8

Na análise das tabelas é possível verificar-se que a força e deslocamento vão aumentando ligeiramente, com o aumento de espessura. Com uma espessura de 0,1 mm tem-se um valor médio de 282 N, comparando com 2 mm que se obtêm 602 N.

Pode-se concluir que as cargas necessárias para efectuar os ensaios com diferentes espessuras não são lineares, existindo sempre factores como defeitos na junta/fabrico que podem afectar estes valores. Sendo que quanto maior for a espessura de adesivo, mais força é necessária se aplicar ao provete para se conseguir a fractura.

3.1.5.3 Curvas-R

Na parte experimental recolheram-se os dados, e de seguida procedeu-se à sua análise de forma a obter-se os valores de G_I e G_{II} resultantes dos vários provetes testados. Nas Figura 71 e Figura 72 é possível verificar-se os valores obtidos de G_I e G_{II} ilustrados nas curvas-R, dos vários modelos para as várias espessuras de adesivo.

Na Figura 53 é possível observar que a curva-R recorrendo ao método CBBM se desloca para a direita, não se aproximando assim dos comprimentos reais da fenda. Relativamente às curvas, identifica-se um pequeno patamar com declive, indicando que a propagação da fenda não ocorreu com valores constantes de G_I e G_{II} . Este facto ocorre devido à elevada ductilidade do adesivo que origina zonas afectadas plasticamente pela propagação da fenda, o que faz com que os efeitos do punção de carregamento artificialmente aumentem os valores medidos de G_I e G_{II} .

Nas Figura 53, Figura 54, Figura 55, Figura 56 e Figura 57 é possível verificar que as curvas obtidas recorrendo ao método CBBM estão sempre deslocadas para a direita. Isto deve-se ao facto de que este método considera a_{eq} ao invés do valor do a medido. O a considera a região que entra no regime plástico na propagação da fenda. Verifica-se ainda que, os valores de fenda correspondentes a G_I aumentam em regime constante, à excepção da espessura de 0,1 que tem um pequeno patamar de crescimento e depois decresce. Estes crescimentos são para o intervalo $65 \leq a \leq 145$. No sentido de estimar o valor de G_I e G_{II} para cada espessura e modelo, apenas foi considerada a zona constante de propagação. É ainda do conhecimento geral que, quando FPZ do adesivo alcança o punção de carregamento, os valores de resistência aumentam artificialmente devido à compressão aplicada no provete (Leitão et al. 2016). As curvas-R do adesivo Sikaforce®-7752, tiveram uma tendência de aumento à medida que o valor de a , devido às elevadas dimensões do FPZ.

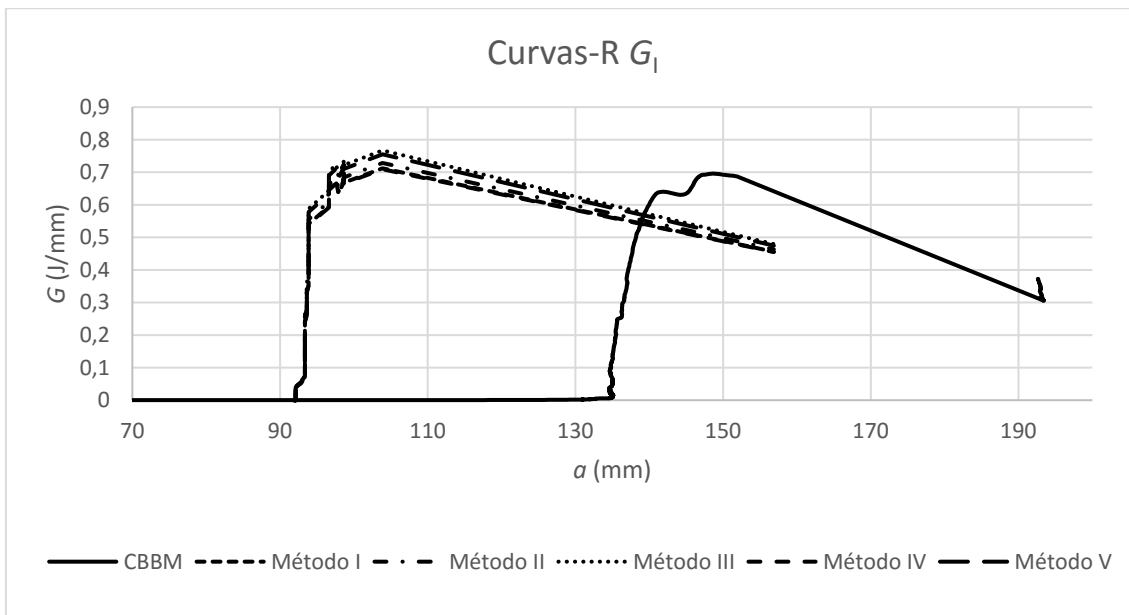


Figura 53. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,1 mm.

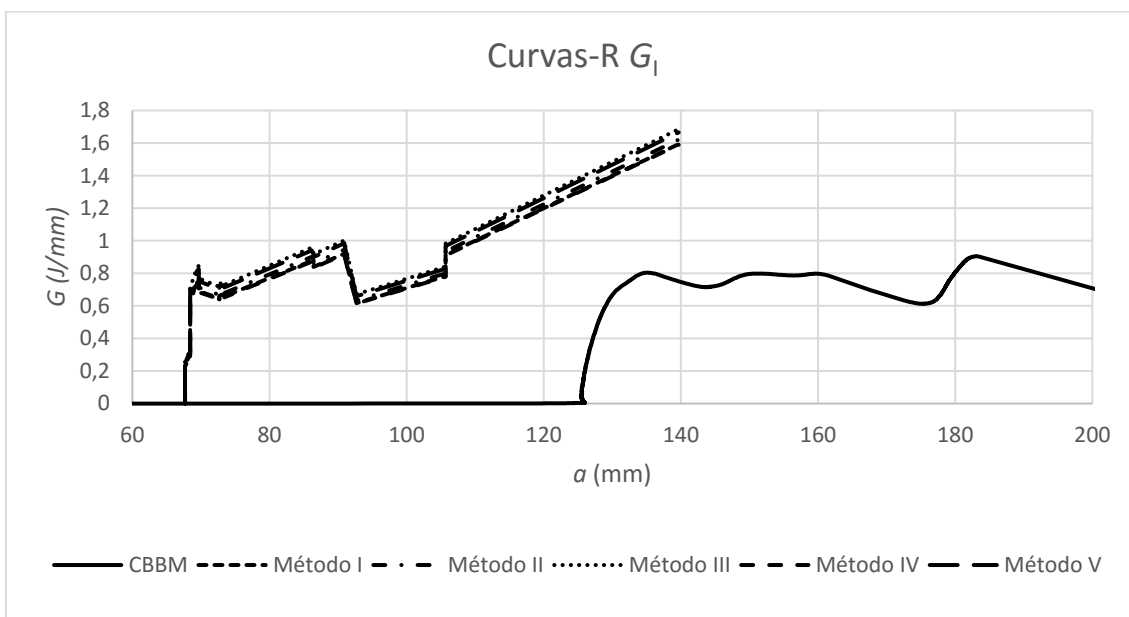


Figura 54. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,2 mm.

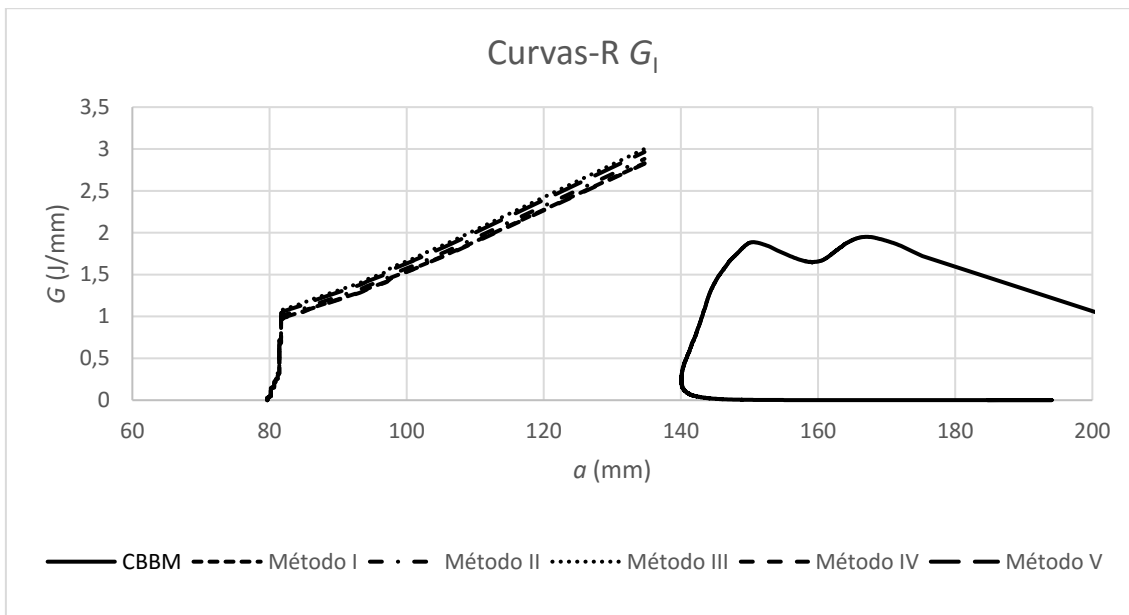


Figura 55. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,5 mm.

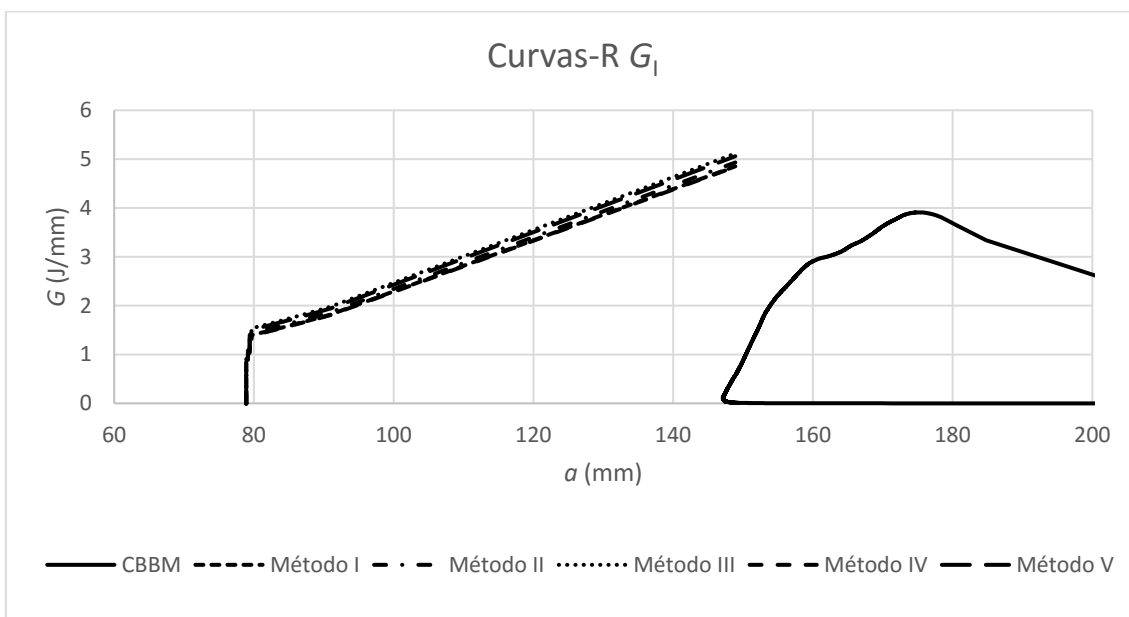


Figura 56. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 1 mm.

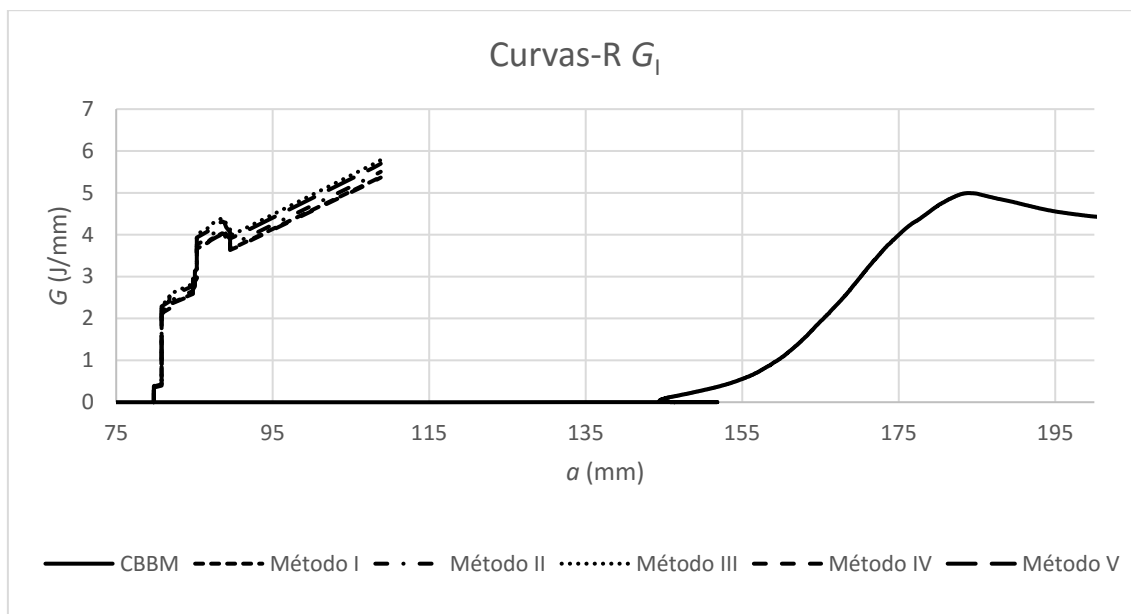


Figura 57. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 2 mm.

As curvas-R referentes a G_{II} mostram, que a curva com os valores de G_{II} calculados pelo método 4 está mais acima dos outros métodos, em todas as espessuras verifica-se esse facto. Relativamente aos outros métodos, como se pode observar pela Figura 58, Figura 59, Figura 60, Figura 61 e Figura 62, que concordam mutuamente. É também visível em todas as curvas-R que, em ambos os métodos, a fenda cresce até a fractura ocorrer. Na Figura 58 é visível que após um aumento dos valores da fenda, dá-se uma queda nos valores de G_{II} , o que indica a fractura total do provete.

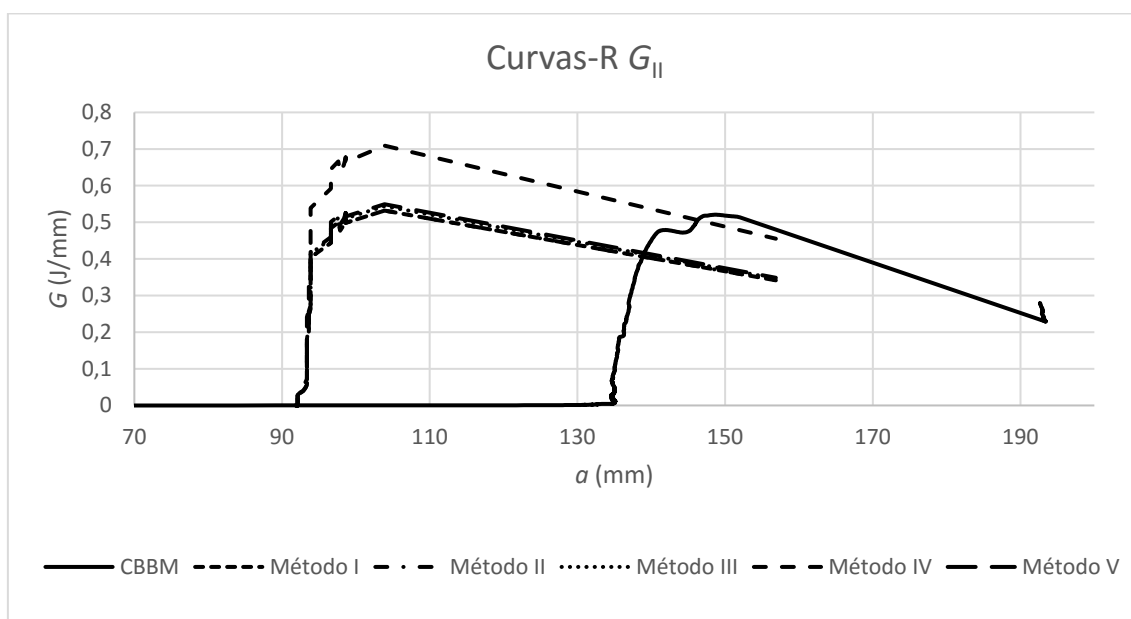


Figura 58. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,1 mm.

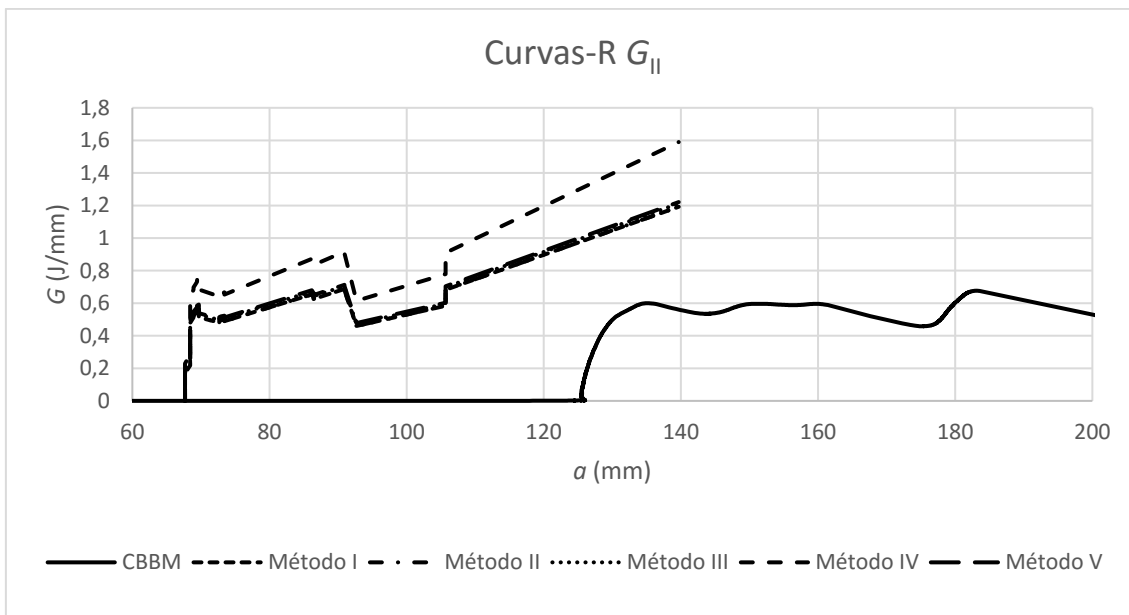


Figura 59. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,2 mm.

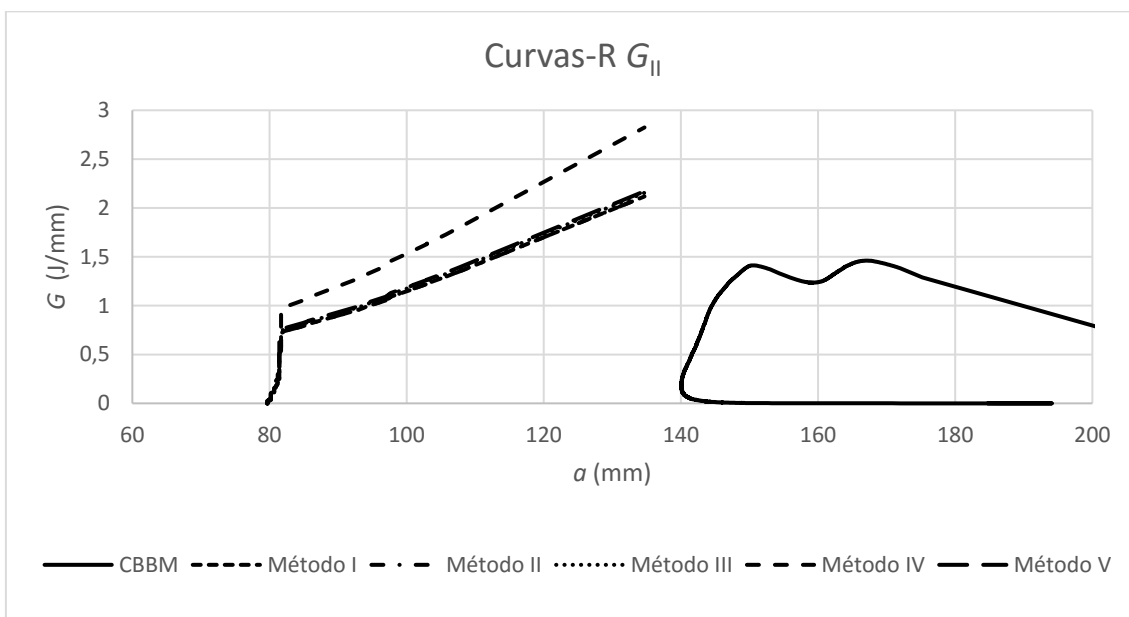


Figura 60. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 0,5 mm.

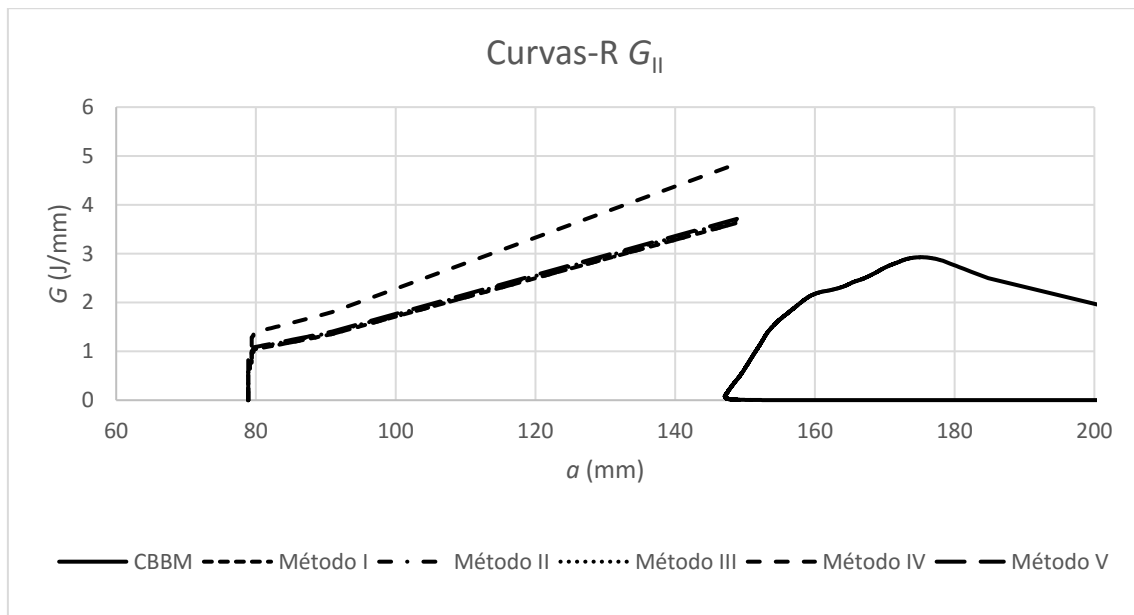


Figura 61. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 1 mm.

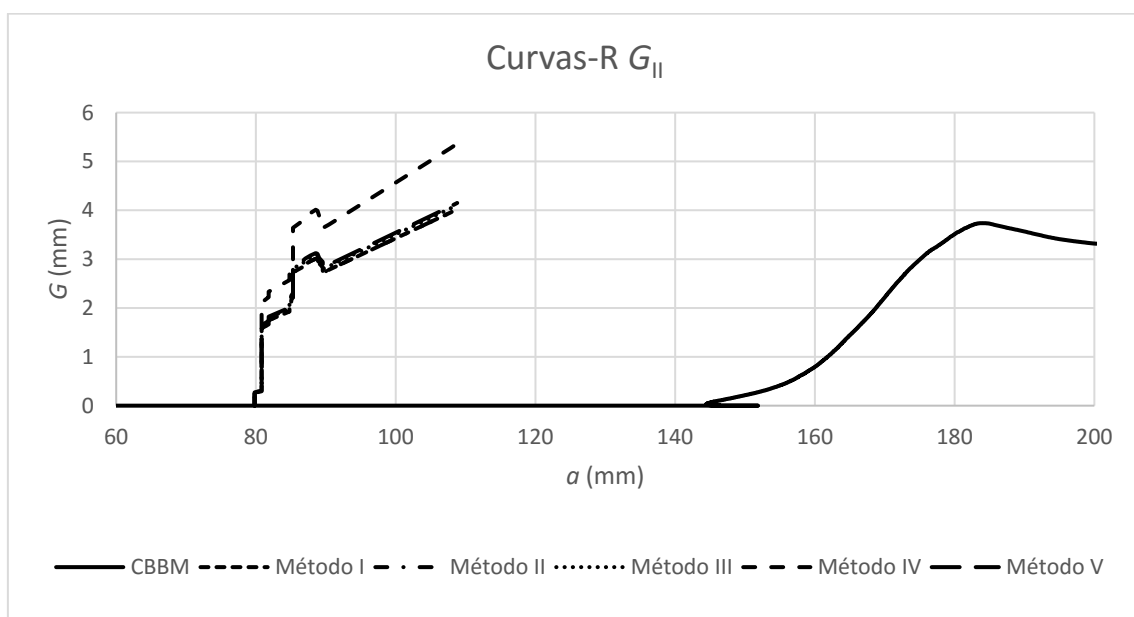


Figura 62. Curvas-R, para o provete 1 e espessura 2 mm.

3.1.5.4 Análise dos resultados obtidos

Na análise das várias espessuras de adesivo pode-se observar que os vários modelos estudados apresentam resultados semelhantes dentro de cada espessura, com exceção do método 4 de cálculo do G , que apresentou quase sempre valores de G_{II}

superiores aos outros métodos. No caso do G_I , os resultados dos métodos obtidos para as várias espessuras têm uma variação reduzida entre provetes. Comparando com trabalhos anteriores onde também foi utilizado o mesmo adesivo, mas para uma espessura de 1 mm, os valores de CBMM são semelhantes (Santos e Campilho 2017). Na Tabela 12 apresentam-se os valores máximos obtidos nos ensaios experimentais para as cinco espessuras adesivas estudadas. Pela análise dos resultados obtidos pode-se verificar que à medida que a espessura vai aumentando, existe uma maior necessidade de energia de deformação para ocorrer a propagação da fenda. O Sikaforce® 7752 apresentou uma variação entre provetes de aproximadamente 2%. Para G_{II} a variação obtida entre os vários resultados foi aproximadamente de 1,5%. A reduzida variação verificada, muito inferior a 10%, indica uma boa repetibilidade dos ensaios que se obteve durante os ensaios.

Tabela 12. Resumo dos valores obtidos para as espessuras de adesivo estudadas.

Sikaforce®-7752					
	0,1	0,2	0,5	1	2
G_I	0,760	1,108	1,998	3,591	4,846
G_{II}	0,703	1,028	1,846	3,324	4,127

Nos resultados obtidos para as cinco t_A de adesivo, conclui-se que o SikaForce®-7752 é muito dúctil, relativamente a outros adesivos estudados em outros trabalhos. Como é sabido, as propriedades dos adesivos influenciam altamente a resistência da junta. Na realidade, um adesivo muito rígido atinge localmente nos bordos da junta uma tensão elevada e não permite a redistribuição do esforço pela restante área. O resultado deste facto é a tensão de corte média de ruptura baixa, sendo este o comportamento normal de um adesivo muito rígido.

No caso em estudo, um adesivo dúctil e com baixo módulo, tem uma baixa resistência, contudo são capazes de distribuir melhor e mais uniformemente as tensões ao longo da junta por deformação elástica. Assim, estes adesivos tornam as juntas mais resistentes mecanicamente do que os adesivos mais rígidos mas frágeis (Troughton 2008).

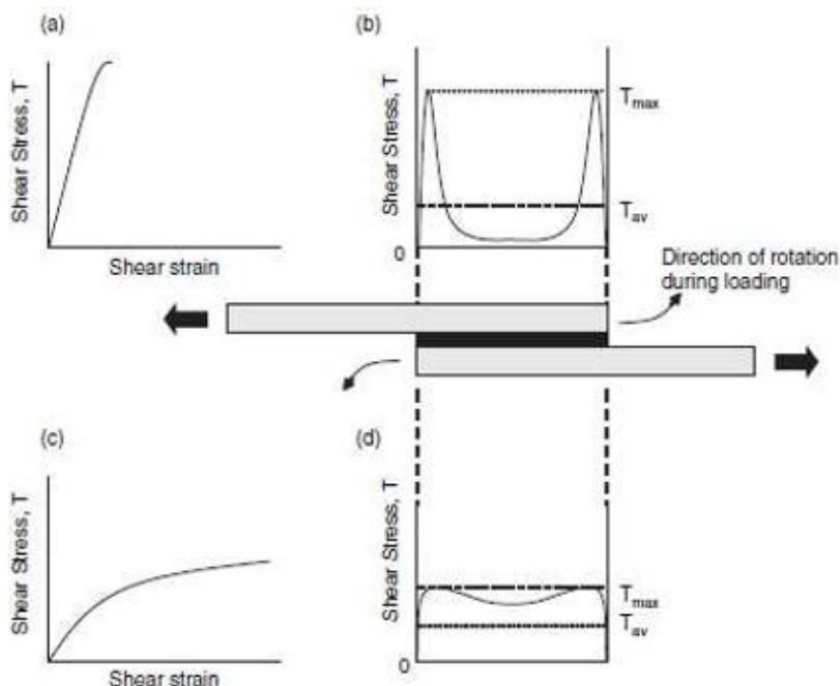


Figura 63. Distribuição de tensões de corte em adesivos frágeis e dúcteis (Troughton 2008).

Na Figura 63 pode-se verificar que para adesivos frágeis, com uma curva típica tensão vs. deformação como indicado em (a), a rotura dá-se quando as tensões máximas nas extremidades de sobreposição atingem os valores limites do adesivo (b). Em adesivos dúcteis, caso em estudo, com uma curva típica de tensão vs. deformação como mostrado em (c), a rotura tem lugar após dar-se a plastificação do adesivo nas extremidades de sobreposição e o aumento das tensões de corte na região intermédia (d), o que permite uma tensão de corte média superior no adesivo e uma resistência global da junta também superior. A flexibilidade de um adesivo mais dúctil como o Sikaforce®-7752 permite à junta acomodar as movimentações dos substratos quando sujeitos a um carregamento, e a tensão é distribuída ao longo de uma área maior. Conclui-se que adesivos frágeis são mais sensíveis à propagação da fenda enquanto os dúcteis resistem mais à sua propagação, o que se reflecte numa maior resistência (Henkel 2011).

O SikaForce®-7752, uma vez que combina elevada resistência com grande ductilidade, está em vantagem em relação a adesivos mais rígidos na aplicação em juntas adesivas, pois atinge tensões de corte elevadas na junta e apresenta uma capacidade superior de redistribuição de tensões na camada de adesivo após o seu limite elástico ser atingido. Por outro lado, a resistência à fadiga de juntas coladas é tipicamente menor para adesivos frágeis. Esta diferença é justificada pela distribuição de tensões mais uniformes e maior energia de amortecimento dos adesivos dúcteis. Os adesivos frágeis são muito sensíveis a defeitos, tais como espaços vazios e microfissuras (Da Silva et al. 2006). Os adesivos dúcteis têm uma maior capacidade para suportar esforços de clivagem e de arrancamento, daí a preferência do seu uso para unir chapas finas.

Os valores máximos de G_I e G_{II} obtidos experimentalmente são apresentados na Tabela 13 e Tabela 14. Na análise de cada espessura, verifica-se que para cada método os valores conseguidos são aproximados.

Tabela 13. Valores máximos de G_I obtidos experimentalmente.

Método/ Espessura	0,1	0,2	0,5	1	2	Média	Desvio P.
1	0,706	1,034	1,855	3,334	4,148	2,215	1,482
2	0,722	1,062	1,897	3,397	4,251	2,266	1,516
3	0,760	1,044	1,998	3,545	4,503	2,370	1,614
4	0,703	1,028	1,846	3,324	4,127	2,206	1,476
5	0,748	1,108	1,967	3,499	4,422	2,349	1,571
6	0,758	1,057	1,964	3,591	4,846	2,443	1,738

Tabela 14. Valores máximos de G_{II} obtidos experimentalmente

Método/ Espessura	0,1	0,2	0,5	1	2	Média	Desvio P.
1	0,527	0,771	1,456	2,493	3,688	1,787	1,308
2	0,527	0,771	1,456	2,493	3,688	1,787	1,308
3	0,539	0,792	1,491	2,540	3,772	1,827	1,335
4	0,703	1,028	1,846	3,324	4,127	2,205	1,476
5	0,544	0,801	1,506	2,559	3,808	1,844	1,347
6	0,568	0,870	1,470	2,702	3,626	1,847	1,288

3.1.5.5 Envelope de fractura

Com base no método CBBM, a Figura 64 representa o envelope de fractura para $t_a=1$ mm do adesivo Sikaforce®-7752. Os envelopes de fractura deste adesivo apresentado

na Figura 64 foram construídos a partir dos testes em modo puro (tracção e corte), os quais se situam nos eixos verticais e horizontais da figura, e dos resultados em modo misto dos testes *SLB*. No envelope, foi utilizado o método CBBM, uma vez que já foi provada a sua fiabilidade para o comportamento de uma série de adesivos, incluindo adesivos dúcteis. O método CBBM como utiliza o a_{eq} , tem em conta os efeitos da FPZ. A Figura 64 representa quatro envelopes teóricos de fractura, calculados através da aplicação dos critérios energéticos (Santos e Campilho 2017), considerando $\alpha=1/2, 1, 3/2, e 2$, de forma a enquadrar o comportamento da espessura de 1 mm de adesivo no critério mais apropriado. Estas curvas para o envelope foram determinadas para a espessura de 1 mm de adesivo, sendo apenas possível efectuar a análise para esta espessura.

Na análise da Figura 64 pode-se constatar que os resultados dos vários provetes ensaiados apresentaram alguma dispersão, à excepção do provete 5 que não foi considerado nesta análise. Os resultados obtidos aproximam-se da curva relativa ao expoente $3/2$ que, apesar da dispersão verificada, permite concluir que é o critério que melhor representa o comportamento do adesivo. Observa-se também, que existe um ponto que se adequa melhor com um valor de expoente 2.

Estes expoentes, e as respectivas curvas do envelope, permitem efectuar previsões sobre como o adesivo se irá comportar sob cargas em modo misto. Para um expoente de $3/2$, no caso do adesivo Sikaforce® 7752, existe uma menor diminuição dos valores de G_I e de G_{II} em relação aos valores de modo puro. Também é possível observar que, para adesivo Sikaforce® 7752, os valores de G_{II} obtidos são aproximados dos valores de referência para o modo II puro, o que permite constatar que este adesivo apresenta um excelente comportamento quando sujeito a esforços de corte.

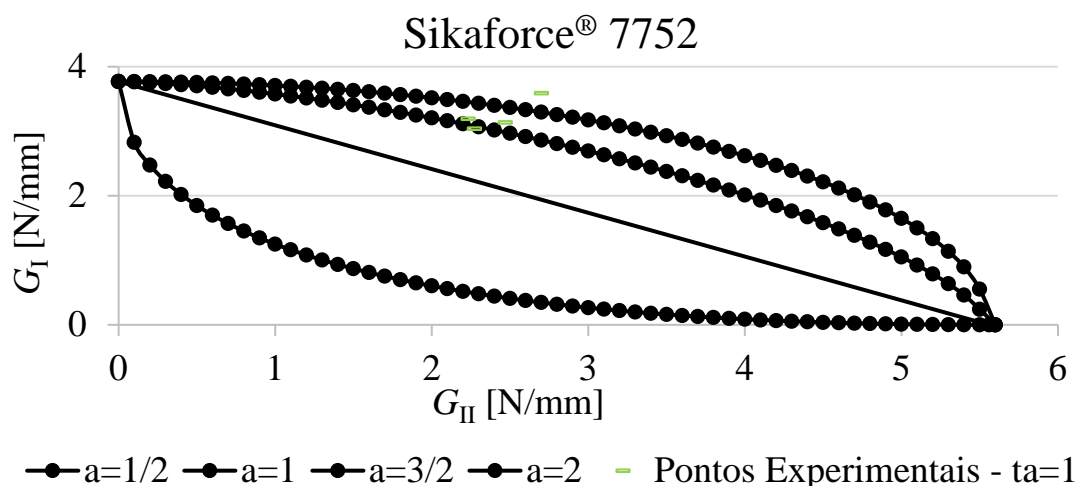


Figura 64. Envelope de fractura para um t_a de 1 mm.

Na Figura 65, representam-se os valores de G para as restantes espessuras. Pode-se observar a influência da espessura nos valores de G , já que estes aumentam com gradualmente.

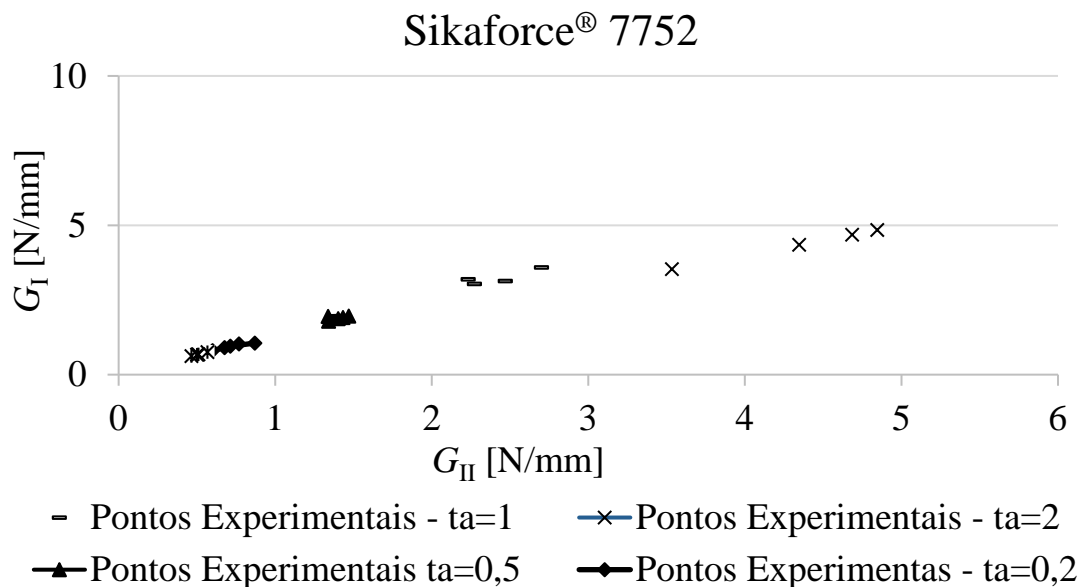


Figura 65. Gráfico com os valores de G para as várias espessuras.

3.1.5.6 Efeito da espessura

O desvio padrão para os valores de espessura experimentais de 0,1, 0,2 e 0,5, 1 e 2 mm são aceitáveis do ponto de vista de dispersão. Verifica-se também que o método 4 de cálculo do G difere dos outros modelos, indicando assim valores de G_I e G_{II} muito próximos, o que não representa um comportamento real do adesivo. Os dados apresentados nas figuras infra, representam o comportamento de um adesivo dúctil (Santos e Campilho 2017). As Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70 representam o resumo gráfico dos valores médios obtidos experimentalmente para o G_I e G_{II} para as cinco espessuras e seis modelos.

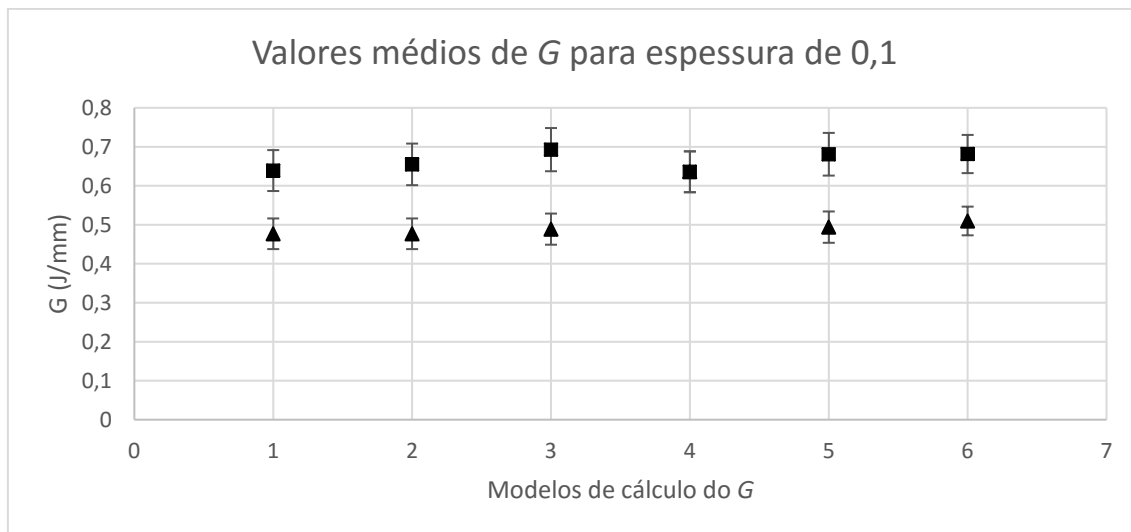


Figura 66. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 0,1 mm no diferentes modelos estudados.

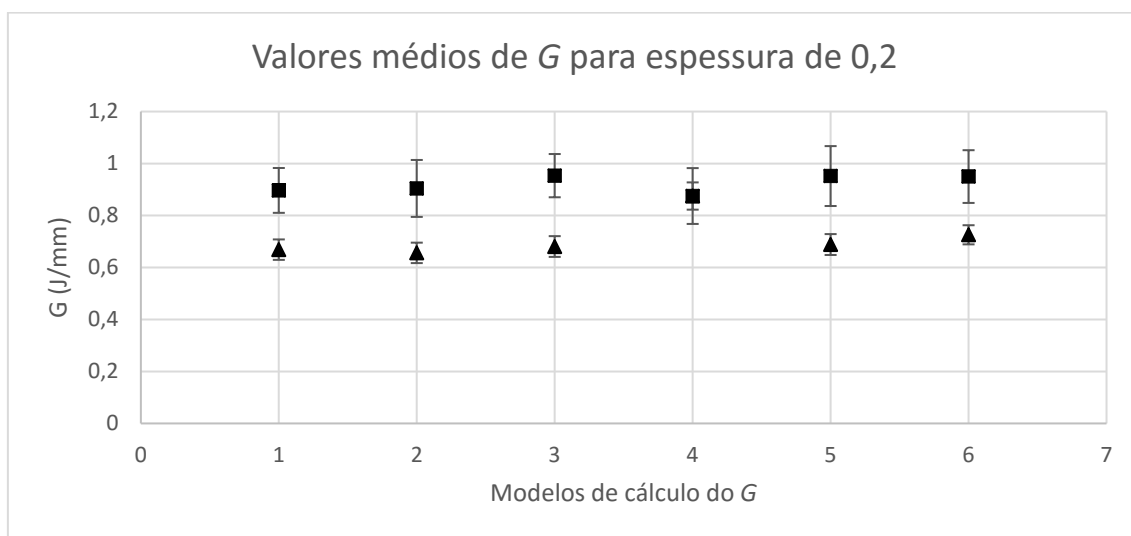


Figura 67. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 0,2 mm no diferentes modelos estudados.

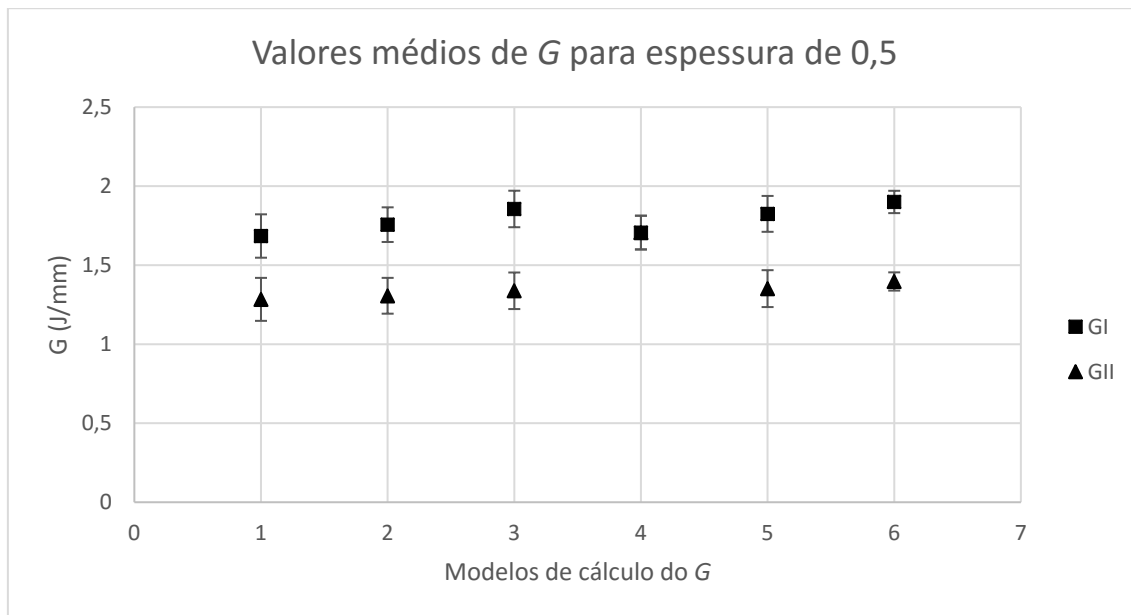


Figura 68. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 0,5 mm no diferentes modelos estudados.

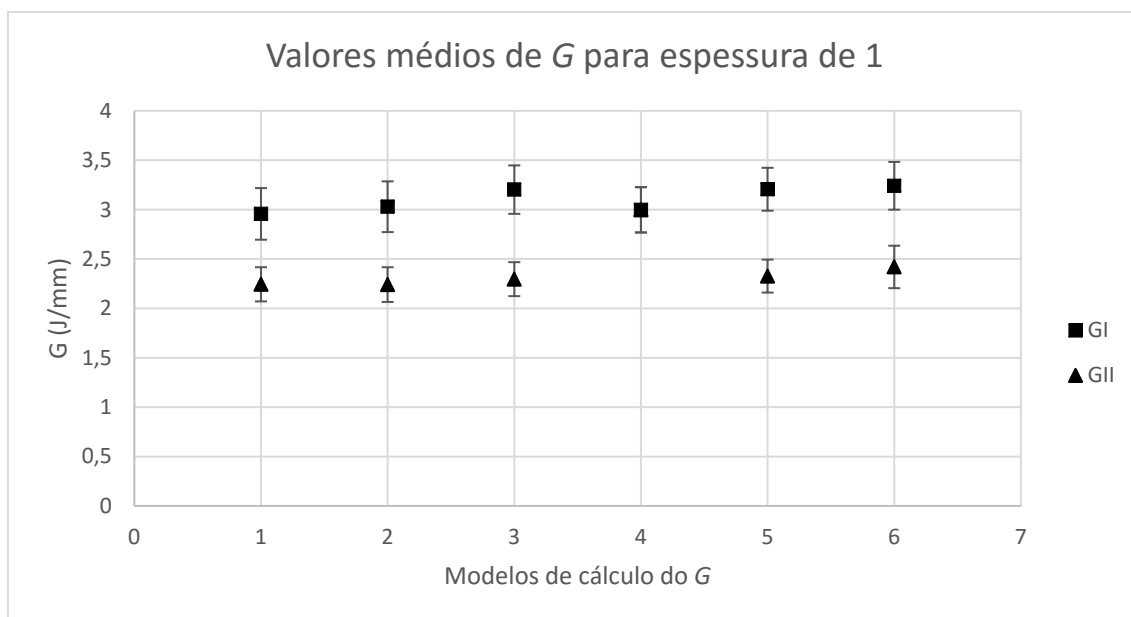


Figura 69. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 1 mm no diferentes modelos estudados.

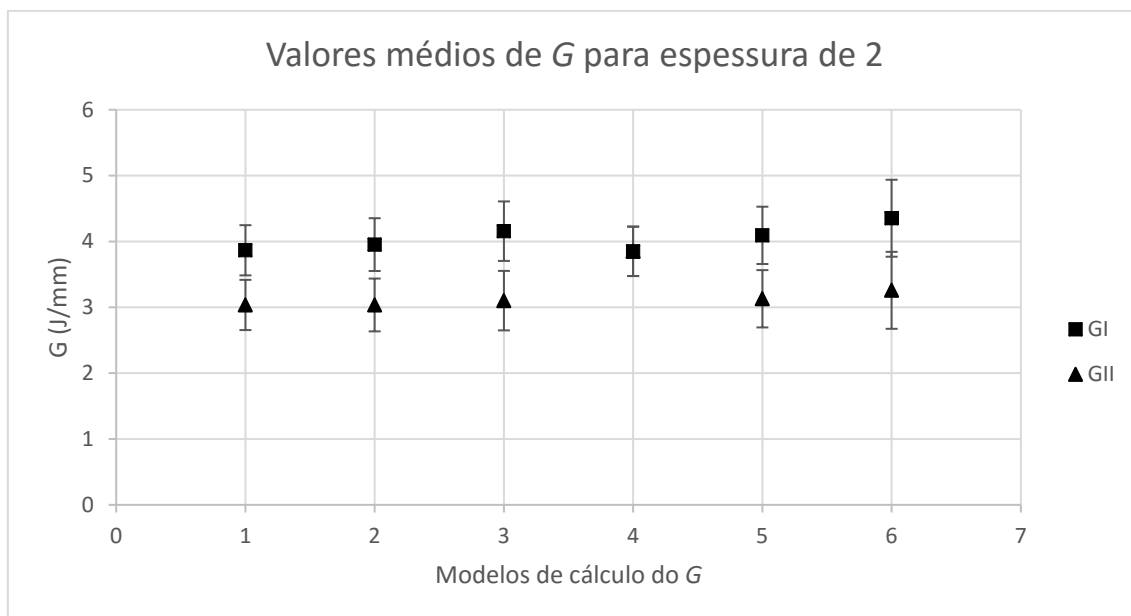


Figura 70. Valores médios de G_I e G_{II} , e desvio padrão para a espessura de 2 mm no diferentes modelos estudados.

A Figura 71 e Figura 72 apresentam a comparação dos valores médios de G_I e G_{II} , para as várias espessuras.

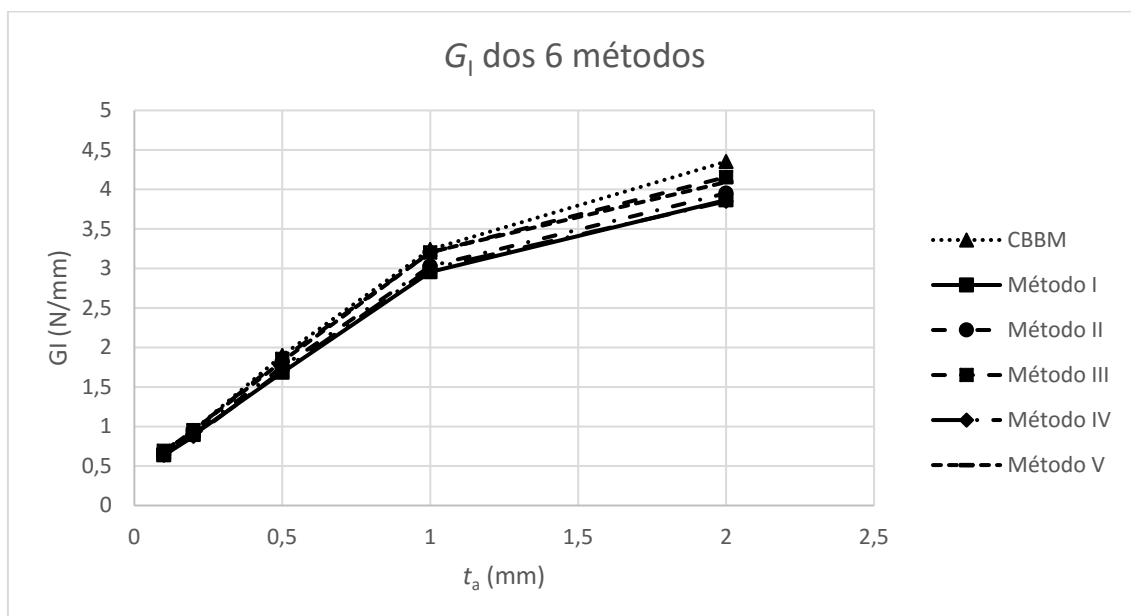


Figura 71. Curvas-R dos valores médios de G_I obtidos pelos 6 métodos através dos provetes com as várias espessuras de adesivo.

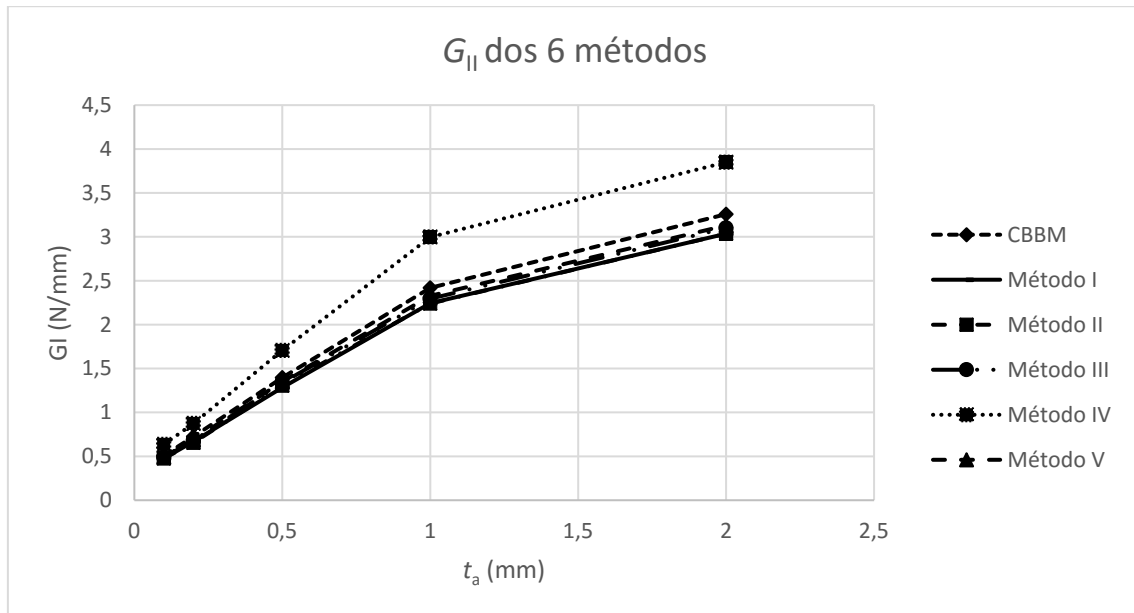


Figura 72. Curvas-R dos valores médios de G_{II} obtidos pelos 6 métodos através dos provetes com as várias espessuras de adesivo.

As Figura 71 e Figura 72 mostram a evolução de G_I e G_{II} (N/mm) respectivamente com t_a . Existe uma tendência evidente do aumento de G com t_a desde 0,1 até 2 mm, com um aparenta aumento para os menores t_a . Para a espessura de 0,1, pode-se retirar do gráfico para G_I de 0,6809 (N/mm) e G_{II} de 0,4939 (N/mm), o aumento para $t_a=0,2$, é de aproximadamente 40% para ambos os G , para $t_a=0,5$ de 96%, cerca 72% para $t_a=1$ mm e $t_a=2$ mm de 30%. Esta tendência é responsável pelo aumento do carregamento sobre as juntas à medida que t_a diminui (Campilho et al. 2015).

3.2 Trabalho numérico

A parte numérica, realizada no programa Abaqus®, tem o objectivo principal de reproduzir os resultados experimentais através da utilização das leis de dano coesivo e dos critérios de modo misto que sejam representativos do comportamento dos adesivos utilizados. Estas leis aplicam-se posteriormente para efeitos de previsão da resistência das juntas adesivas com este adesivo. As simulações foram realizadas recorrendo ao Método de Elementos Finitos (MEF), e utilizam o modelo de dano coesivo (MDC) apresentado na secção 3.2.2.

3.2.1 Condições da análise numérica

A simulação foi feita recorrendo ao *software* ABAQUS® versão 2017. O *software* baseia-se no MEF e tem a possibilidade da utilização do módulo integrado de MDC na previsão do comportamento das juntas em ensaios SLB. A modelação das juntas foi feita em duas dimensões, com elementos sólidos de estado plano de deformação para a modelação dos aderentes (CPE4 do ABAQUS®). Para simular a camada de adesivo foi usado um

elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS®), que já se utilizou em estudos anteriores e que utilizou o MDC com lei triangular de amaciamento (Campilho et al. 2011). Para os elementos MDC na camada do adesivo, apenas foi considerado um elemento na direcção da espessura do adesivo. Para a análise de rotura pelo MDC foram consideradas não linearidades geométricas. As malhas utilizadas na interface dos apoios e no carregamento do provete foi mais refinada. A Figura 73 apresenta-se uma visão geral do refinamento da malha utilizada nos provetes SLB.

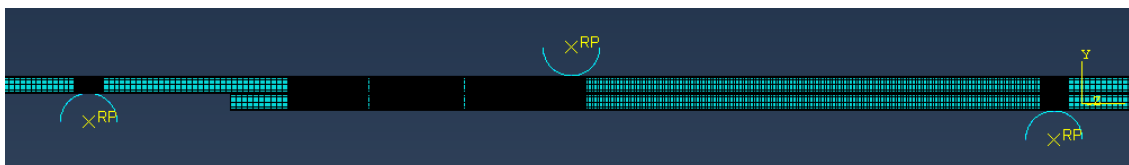


Figura 73. Refinamento geral da malha do provete em Abaqus.

Na Figura 74 mostra-se em detalhe a malha na proximidade da extremidade da fenda, onde se pode observar os elementos coesivos representativos do adesivo com dimensões de 0,2 mm x 0,2 mm. Na zona correspondente à pré-fenda, a malha não é tão refinada no sentido do comprimento dos provetes, uma vez que esta zona não estará sujeita a grandes gradientes de tensões. Na direcção da espessura dos provetes foi utilizada uma gradação do tamanho dos elementos (efeito *bias*), no sentido de obter um maior refinamento na proximidade do adesivo, devido à necessidade de modelação do adesivo com precisão.

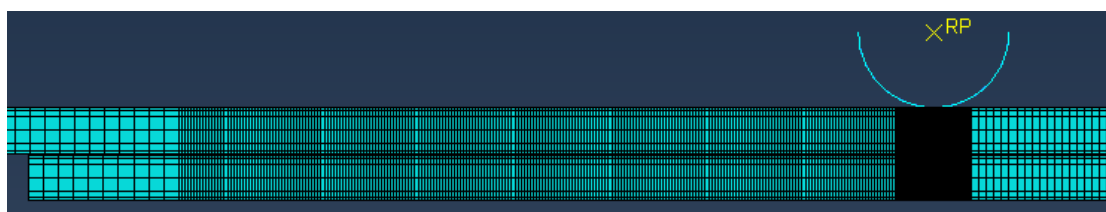


Figura 74. Refinamento da malha dos provetes em Abaqus.

Na Figura 75 representa-se em detalhe a malha na zona de contacto entre o provete e o punção de carregamento. Observa-se um maior refinamento de malha, sendo utilizados elementos com largura de 0,05 mm, e também se utiliza uma malha mais grosseira na zona de propagação de dano à direita do cilindro de solicitação, uma vez que esta região já excede os limites de análise do ensaio SLB. Nas zonas de contacto entre o provete e os cilindros de suporte foi utilizada uma malha idêntica à utilizada na zona de contacto com o punção de carregamento.

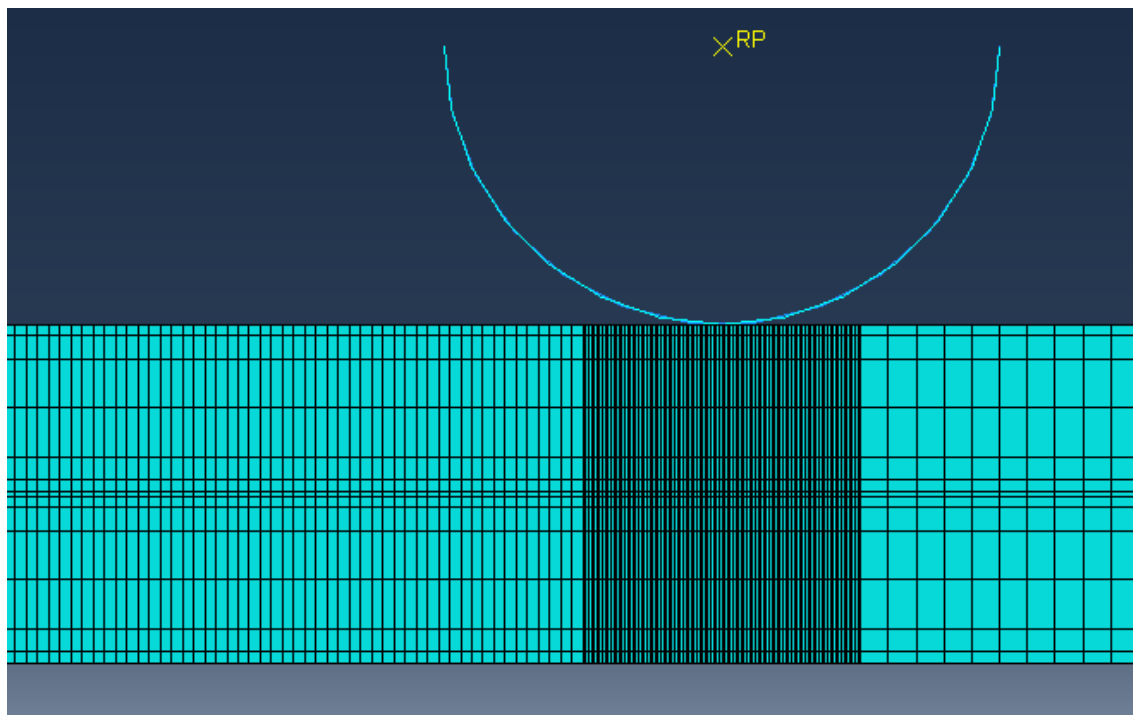


Figura 75. Refinamento da malha na zona de interação do punção com o provete.

As variações do tamanho da malha têm como intuito diminuir o esforço computacional, e obter uma redução do tempo na obtenção dos resultados, sem comprometer a precisão dos resultados nas zonas com grandes variações de tensões. No que diz respeito às condições fronteira (Figura 76), de forma a reproduzir as condições reais dos ensaios experimentais, restringiram-se os cilindros de suporte nas duas direcções (vertical e horizontal), e a rotação no plano. No punção restringiu-se o carregamento na direcção horizontal e aplicou-se um deslocamento vertical com sentido descendente. Finalmente, restringiu-se um nó a meio do comprimento do provete na direcção horizontal para evitar o deslocamento horizontal do mesmo.

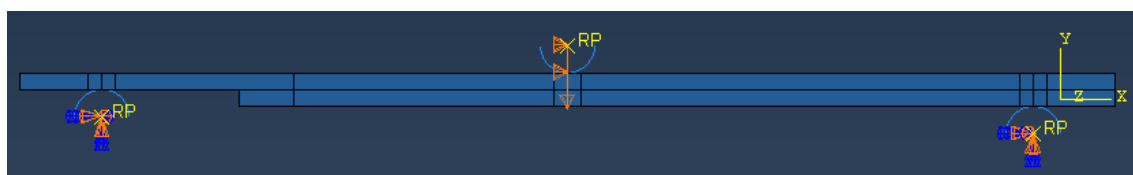


Figura 76. Condições fronteira do provete em Abaqus®.

Na construção do provete, foi ainda necessário introduzir condições de contacto entre cada um dos três cilindros e o provete, e também entre os dois substratos na zona da pré-fenda, para garantir o deslizamento sem atrito e para evitar a interpenetração entre eles. Utilizou-se uma formulação com pequeno deslizamento do tipo *surface to surface* no programa.

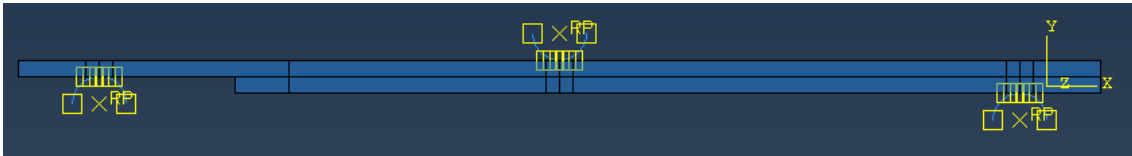


Figura 77. Interação entre os apoios, o punção e a superfície do provete.

3.2.2 Modelo de dano coesivo triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter-se resultados mais precisos (Pinto et al. 2009). Com o passar dos anos foram desenvolvidos modelos, dos quais se destacam o modelo triangular (Alfano e Crisfield 2001), o modelo linear parabólico (Allix e Corigliano 1996), o modelo exponencial (Chandra et al. 2002), o modelo polinomial (Chen 2002) e o modelo trapezoidal (Kafkalidis e Thouless 2002). A lei ou modelo triangular é a mais utilizada não só devido à sua simplicidade na aplicação, mas também pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pela sua precisão nos resultados para uma grande parte de condições reais (Liljedahl et al. 2006). A lei triangular possui dois modos distintos, o modo pro e o modo misto. O modo puro caracteriza-se pela propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respectivo forem anulados na lei coesiva respectiva. O modo misto utiliza critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e corte (Campilho et al. 2008). Os elementos coesivos estão sujeitos a componentes de deformação normal e de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas entre substratos rígidos as tensões de membrana são desprezadas.

Os elementos coesivos são submetidos duas componentes de deformação, sendo uma normal e a outra de corte, que são determinadas recorrendo-se à cinemática do elemento. Nas camadas de menor espessura entre substratos rígidos, as tensões de membrana são desprezadas.

A Figura 78 mostra o modelo triangular 2D implementado no *software* de simulação ABAQUS®, no qual a lei de maior dimensão representa as leis em modo puro e a lei de menores dimensões representa a lei de modo misto.

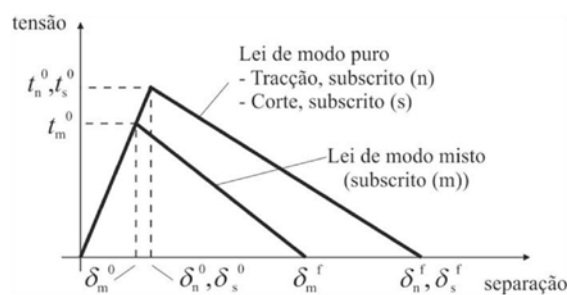


Figura 78. Lei coesiva triangular do Modelo de Dano Coesivo implementado no software de simulação ABAQUS®.

Nos momentos antes à existência da fractura, a relação entre tensões e deformações do adesivo é definida pela matriz K_{COH} , que relaciona assim as tensões e deformações em tracção e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz define-se como:

$$t = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{pmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{pmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} - \\ - \end{Bmatrix} = K_{COH} \quad (70)$$

A matriz contém parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja sua definição depende da formulação utilizada. Na eventualidade de ser considerada uma formulação em uma região local, normalmente utiliza-se para simular fracturas de espessura nula, os parâmetros da matriz têm valores elevados, com objectivo de existir deformações na estrutura, que é induzida pela presença de elementos coesivos (Campilho et al. 2005).

Numa formulação contínua de camadas com menor espessura, especificamente para camadas adesivas, consegue-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez, admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad (71)$$

Onde o E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando-se estes parâmetros, o módulo reproduz de forma fidedigna a deformação de adesivo (Campilho et al. 2008). Em modo misto, o início do dano pode ser definido por diferentes critérios, como por exemplo, o critério quadrático de tensões apresentado de seguida (equação (72)).

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1 \quad (72)$$

Onde $\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, mostram que uma tensão de compressão não provoca dano. O critério caracteriza-se pela sua precisão, já testada em trabalhos prévios (Campilho et al. 2009). Quando t_m^0 é alcançado, Figura 78, baseado na equação (72), pode-se afirmar que a rigidez do material sofre o processo de amaciamento. A separação completa de um par de homólogos (δ_m^f Figura 78) é dada por critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC} (equação (73)).

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1 \quad (73)$$

3.2.3 Estimativa da lei coesiva em modo misto

Neste capítulo, apresenta-se a forma de como foi efectuada a análise das leis coesivas aplicadas às simulações numéricas do adesivo Sikaforce®-7752. As simulações numéricas feitas com base no MDC visam validar os critérios de propagação energéticos determinados experimentalmente, e assim obter as leis do MDC e respectivos critérios em modo misto, para permitir a obtenção de dados que permite efectuar uma previsão da resistência das juntas adesivas. Nesse sentido foram efectuados numericamente para

o ensaio SLB, os ensaios de vários provetes para as várias espessuras de adesivo considerando as dimensões do aderente e do a_0 . Embora fossem efectuados vários ensaios, apenas existem dados para termo de comparação para 1 mm do envelope de fractura. Os modelos foram aplicados individualmente às curvas P - δ numéricas para cada provete. As curvas-R foram obtidas através da aplicação dos 6 modelos de redução, aplicadas aos dados dos provetes de cada ensaio com o teste SLB. A concordância entre os diversos modelos (que requerem a medição do valor de a e do CBBM) é evidente (ex: Figura 61), com excepção das curvas-R dos valores de G_{II} que usam o modelo 4. Comparando as curvas-R, verificam-se variações menores para G_I e G_{II} no estudo numérico, pelo facto de este estudo não estar sujeito à interferência de problemas associados à parte experimental, como defeitos na junta, fenda instável e baixa aderência. Após a análise numérica dos provetes de 1 mm, obteve-se os pontos G_I/G_{II} no gráfico de envelope de fractura para o modelo CBBM (Figura 91). Comparando os quatro pontos numéricos com os experimentais, é visível uma dispersão dos pontos, que é justificada pela ausência de efeitos experimentais (Santos e Campilho 2017).

O comportamento do adesivo mantém-se consiste para os expoentes escolhidos (Figura 91), contudo verifica-se um ligeiro afastamento dos pontos em relação à curva α de 2, devido à ductilidade do adesivo (Santos e Campilho 2017).

Actualmente, a modelação de adesivos dúcteis através das leis do MDC está intrinsecamente associada à previsão de carga (P) durante a propagação da fenda, devido ao facto de as leis triangulares incorrectamente provocarem uma queda na tensão durante o dano, quando os adesivos dúcteis tipicamente plastificam quando sujeitos a uma tensão constante (Kafkalidis e Thouless 2002). A excepção é para o modelo 4, que indica um elevado afastamento para o valor de G_{II} . Os outros modelos, incluindo o CBBM, são muito fiáveis no estudo numérico do comportamento da junta em modo misto (Santos e Campilho 2017).

3.2.4 Previsão do comportamento das juntas

Os valores de força máxima e respectivos deslocamentos obtidos para os provetes de 1 mm são apresentados na Tabela 15, para o adesivo em estudo.

Na análise que se vai efectuar neste capítulo, apenas se vão comparar os dados obtidos para a espessura de 1 mm, pelo facto de apenas existirem dados para o envelope de fractura de 1 mm. Verifica-se que os valores de força obtidos são ligeiramente mais elevados em relação ao experimental, pelo que se pode verificar a elevada resistência do adesivo.

Tabela 15. Valores de $P_{m\acute{a}x}$ e respectivo δ obtidos da análise numérica para a espessura de 1 mm.

Dados Numéricos		
Provetes	$P_{m\acute{a}x}$ (N)	δ (mm)
1.0_P1	692,60	19,42
1.0_P2	707,88	18,01
1.0_P3	707,55	18,01
1.0_P4	736,49	17,61
Média	711,12	18,26
Desv. Pad.	18,32	0,80

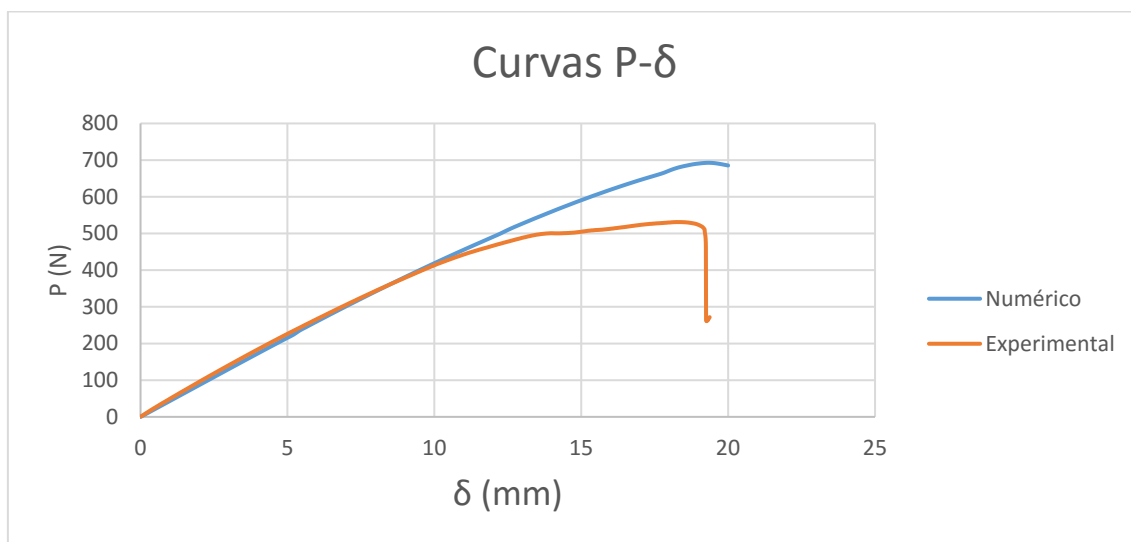
Na Figura 79, Figura 80, Figura 81 e Figura 82 estão representadas as curvas P - δ experimentais e numéricas. Foi efectuado o estudo numérico em condições idênticas aos provetes representados no envelope de fractura para 1 mm. Os provetes 1.0_P2, 1.0_P3 e 1.0_P4 utilizou-se 3,77 e 5,56 de G_{IC} e G_{IIC} de propagação, e foi usado expoente em modo misto de 1,5, visto que os valores experimentais se situarem no respectivo critério do envelope de fractura. Relativamente ao valor de α utilizado nos ensaios numéricos, estes são apresentados na Tabela 16, sendo que o α do provete ensaiado numericamente corresponde ao α do provete 1 do experimental, e assim sucessivamente. No caso do provete 1, utilizou-se um expoente de modo misto de 2 ao invés de 1,5, pois o cruzamento do G aproxima-se mais desse expoente. O provete 5, mencionado anteriormente, foi excluído devido aos resultados que apresentou.

Pela observação da Figura 79, Figura 81 e Figura 82, verifica-se que as curvas numéricas seguem uma tendência semelhante às curvas experimentais, pelo que existiu neste caso uma boa repetibilidade do comportamento dos adesivos entre os provetes experimental para o numérico. No entanto, existiram algumas diferenças nos ensaios numéricos relativamente aos experimentais, como é possível verificar na Figura 79, Figura 81 e Figura 82. A força máxima atingida pelos ensaios numéricos foi superior à atingida pelos ensaios experimentais.

Tabela 16. Valores de a utilizados nos ensaios numericos.

Provetes	Dados Numéricos
	a (mm)
1.0_P1	78,90
1.0_P2	80,50
1.0_P3	77,14
1.0_P4	80,18

O ensaio correspondente à curva da Figura 80 não representa uma boa repetibilidade, estando a curva numérica afastada da experimental. Este facto é explicado pela rápida fractura do provete experimental, impedindo a aplicação de mais incrementos e assim a recolha de mais dados relativos à propagação da fenda.

Figura 79. Comparação da curva P - δ dos provetes 1, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.

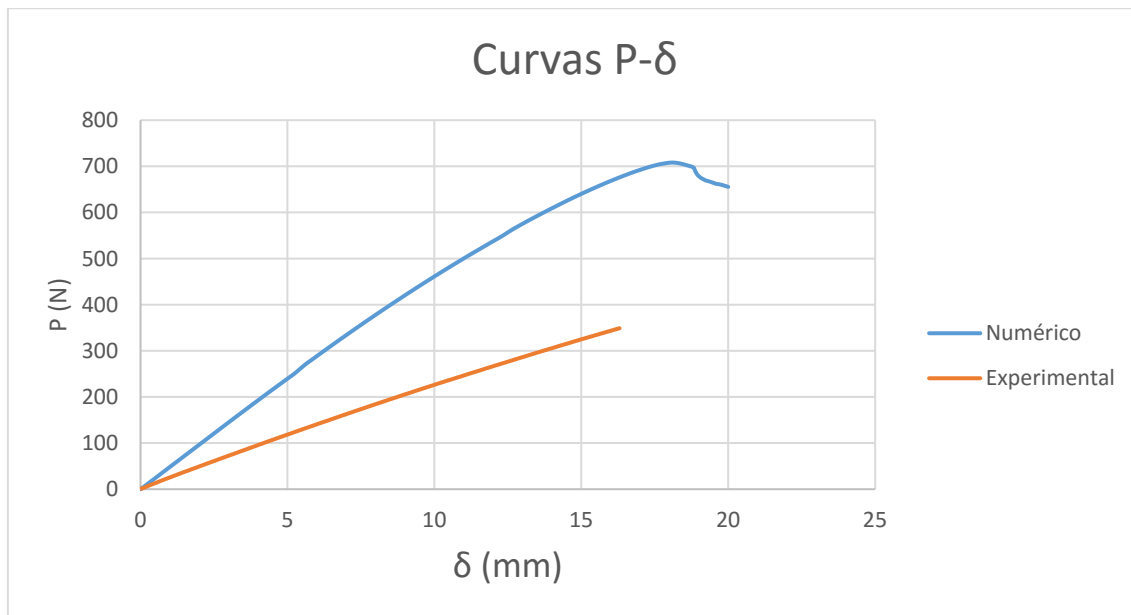


Figura 80. Comparação da curva P - δ dos provetes 2, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.

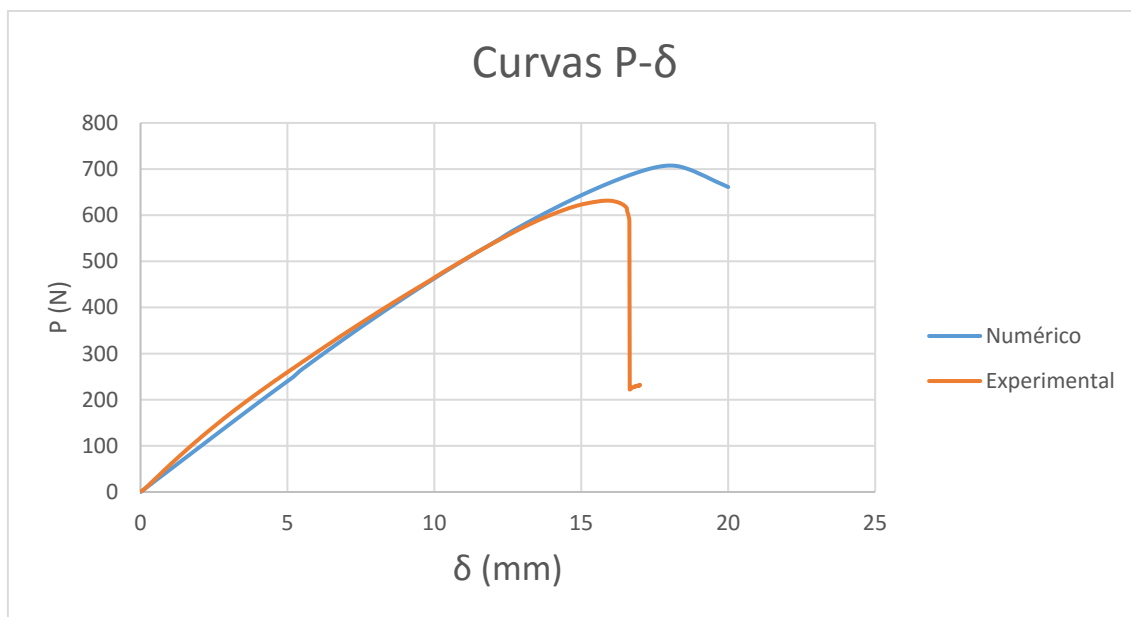


Figura 81. Comparação da curva P - δ dos provetes 3, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.

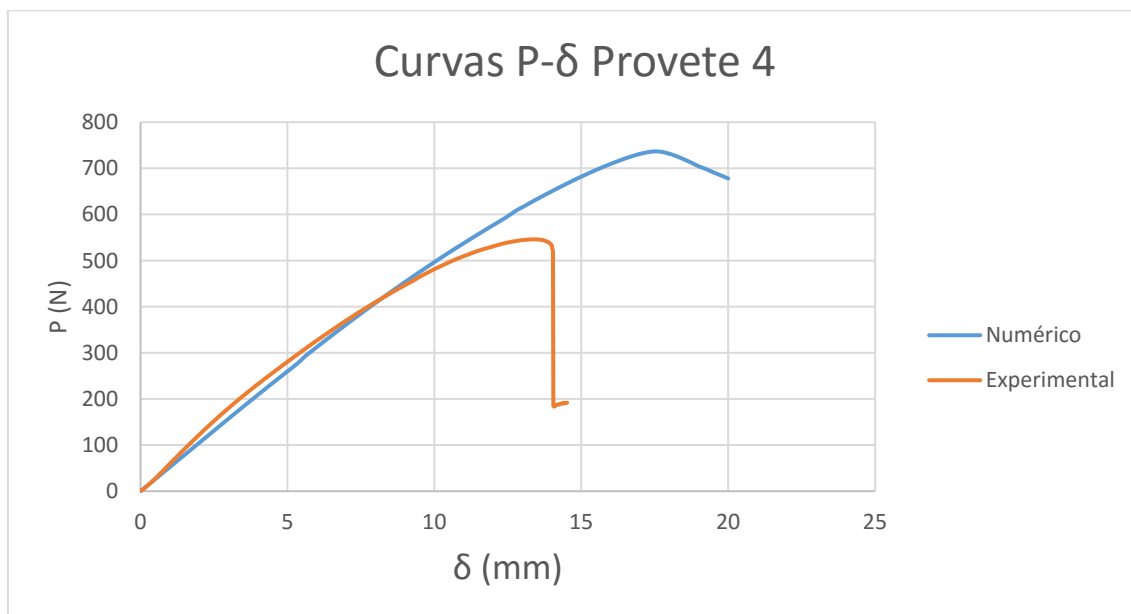


Figura 82. Comparação da curva P - δ dos provetes 4, numérica e experimental respectivamente para uma espessura de 1 mm.

Na Figura 83, Figura 84, Figura 85 e Figura 86 podem-se observar as curvas-R numéricas de G_I , para os quatro provetes. É evidente um aumento dos valores de G_I à medida que a fenda se propaga, pelo facto da ductilidade deste adesivo ser elevada e assim originar uma zona afectada plasticamente, fazendo com que os efeitos de carga aplicada aumente artificialmente os valores medidos de G_I como verificado nas curvas experimentais. Na Figura 85 e Figura 86 é visível que os valores do modelo CBBM são ligeiramente superiores, pois este modelo utiliza um a_{eq} que é superior (contabiliza também a zona afectada plasticamente durante a propagação da fenda) ao valor de a utilizado nos outros modelos (Santos e Campilho 2017).

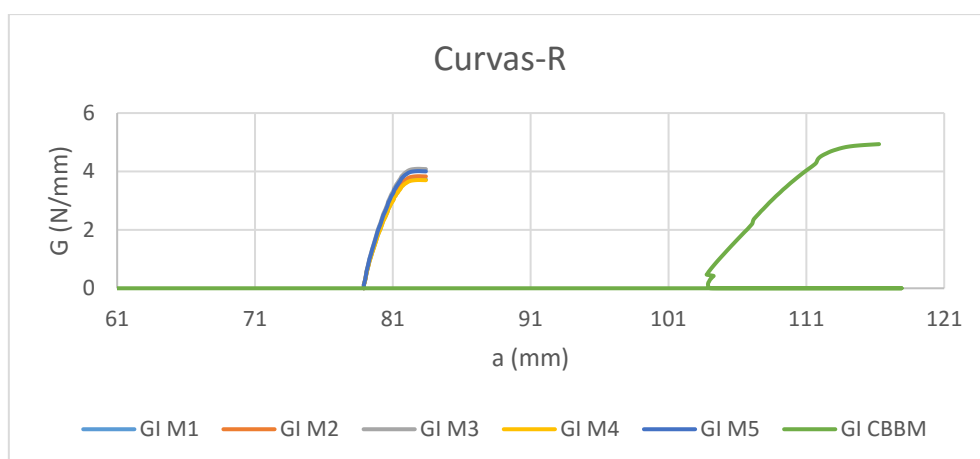


Figura 83. Curvas-R de G_I do provete 1 para uma espessura de 1 mm.

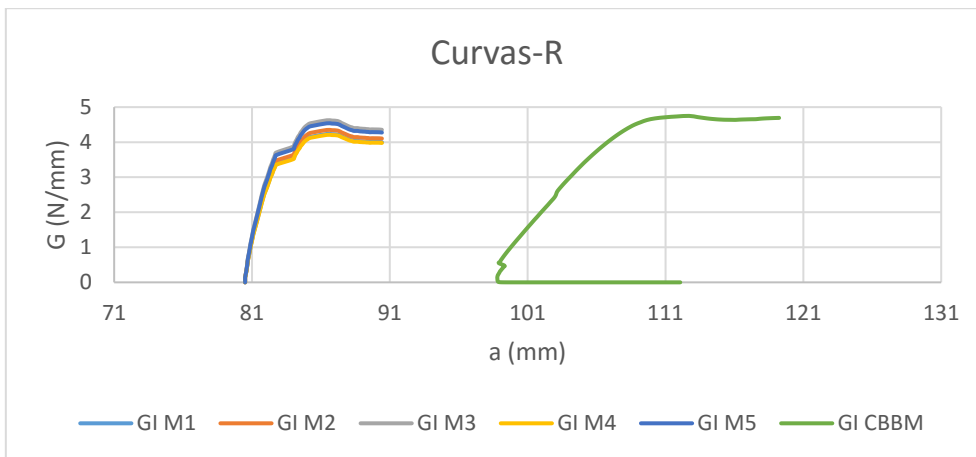


Figura 84. Curvas-R de G_i do provete 2 para uma espessura de 1 mm.

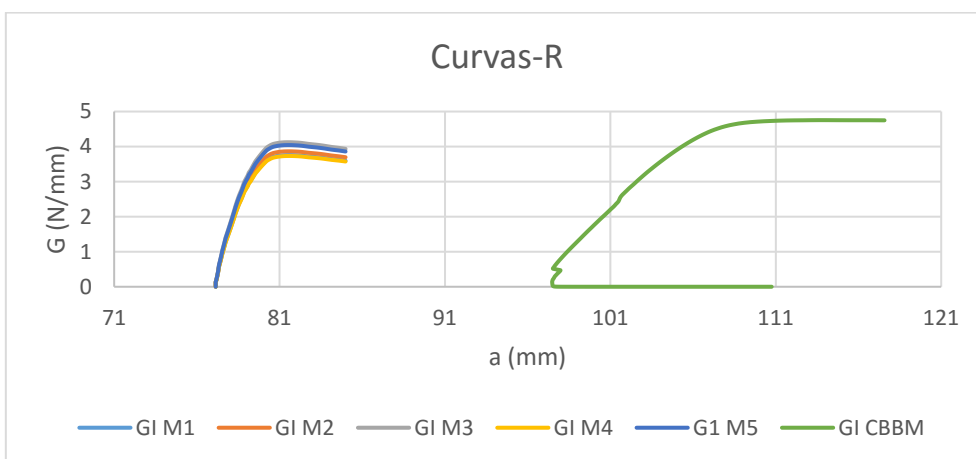


Figura 85. Curvas-R de G_i do provete 3 para uma espessura de 1 mm.

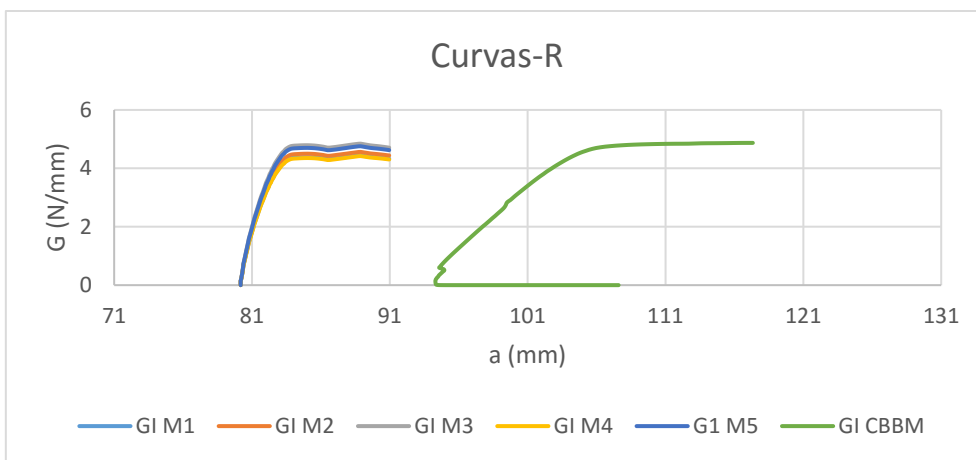


Figura 86. Curvas-R de G_i do provete 4 para uma espessura de 1 mm.

Na Figura 87, Figura 88, Figura 89 e Figura 90 podem-se observar as curvas-R obtidas numericamente de G_{II} . Assim como nas curvas de G_I , é também visível nos valores de G_{II} um aumento dos valores energéticos à medida que a fenda se propaga, como já explicado previamente. O modelo 4, como já observado nas curvas experimentais, obtém valores muito superiores em relação aos outros modelos.

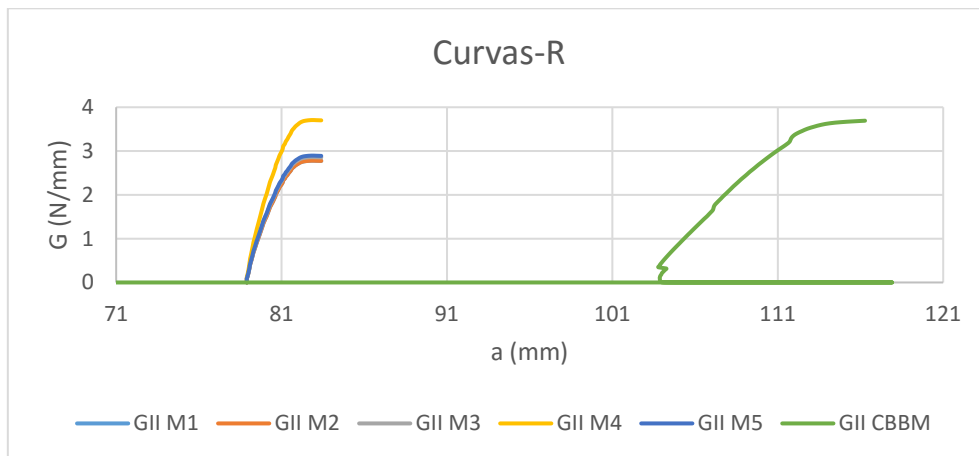


Figura 87. . Curvas-R de G_{II} do provete 1 para uma espessura de 1 mm.

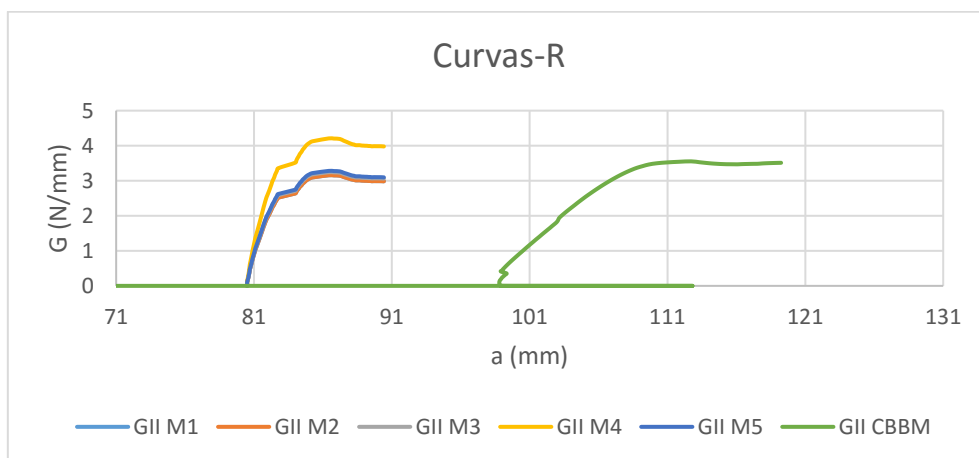


Figura 88. Curvas-R de G_{II} do provete 2 para uma espessura de 1 mm.

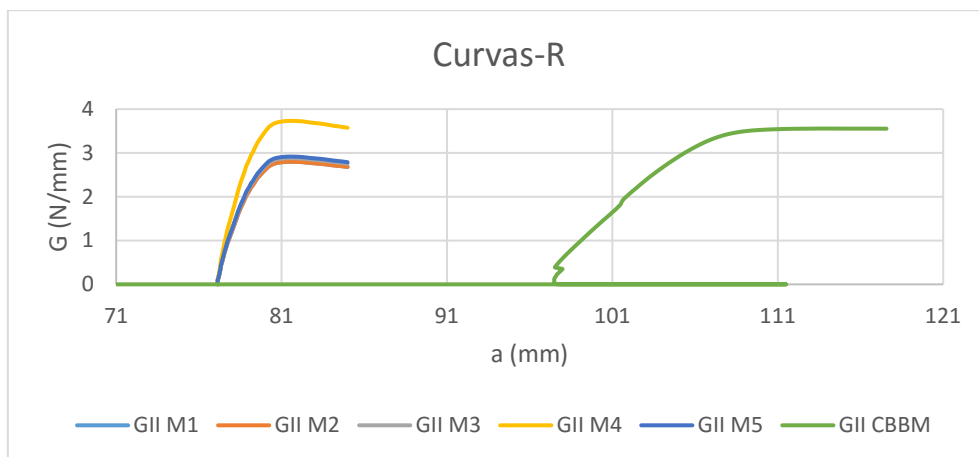


Figura 89. Curvas-R de G_{II} do provete 3 para uma espessura de 1 mm.

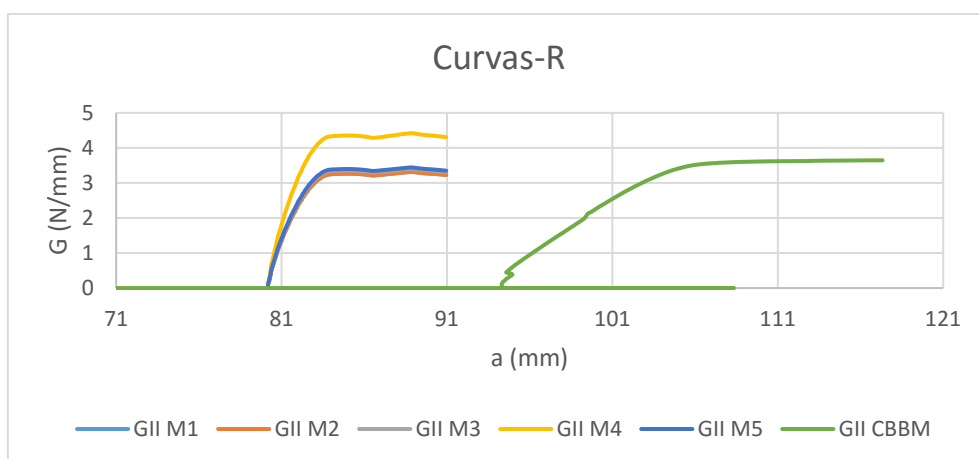


Figura 90. Curvas-R de G_{II} do provete 4 para uma espessura de 1 mm.

Na Tabela 17 e Tabela 18 são apresentados os valores de G_I e G_{II} , respectivamente, obtidos nos ensaios numéricos realizados no *software* Abaqus®. Os valores apresentam alguma variabilidade, nomeadamente os modelos 3 e 5, que obtiveram valores de G_I superiores ao CBBM. Nos valores de G_{II} , o modelo 4 foi o que obteve resultados superiores, em relação aos outros modelos, situação que já se verificou em trabalhos realizados com o mesmo adesivo e respectiva espessura (Santos e Campilho 2017).

Tabela 17. Valores de G_I obtidos numericamente para o adesivo SikaForce® 7752.

Ensaio Numérico com Sikaforce®-7752						
Método/Provete	1.0_P1	1.0_P2	1.0_P3	1.0_P4	Média	Desv. Pad
1	3,35	3,48	3,21	3,56	3,40	0,15
2	3,45	3,58	3,30	3,66	3,50	0,16
3	3,68	3,81	3,53	3,91	3,73	0,16
4	3,33	3,46	3,19	3,54	3,38	0,15
5	3,61	3,74	3,46	3,83	3,66	0,16
CBBM	3,57	3,50	3,48	3,69	3,56	0,09

Tabela 18. Valores de G_{II} obtidos numericamente para o adesivo SikaForce® 7752.

Ensaio Numérico com Sikaforce®-7752						
Método/Provete	1.0_P1	1.0_P2	1.0_P3	1.0_P4	Média	Desv. Pad
1	2,50	2,59	2,39	2,65	2,54	0,12
2	2,50	2,59	2,39	2,65	2,54	0,12
3	2,57	2,67	2,46	2,73	2,61	0,12
4	3,33	3,46	3,19	3,54	3,38	0,15
5	2,60	2,70	2,49	2,76	2,64	0,12
CBBM	2,67	2,62	2,60	2,76	2,66	0,07

Na Figura 91 apresenta-se o envelope de fractura obtido através dos valores de G_I e G_{II} numéricos para o adesivo Sikaforce® 7752, utilizando um expoente de 2 para o provete 1.0_P1 e um expoente de 1,5 para os restantes provetes ensaiados. Pode-se observar que os valores obtidos em uma dispersão reduzida. Os ensaios numéricos apresentaram uma repetibilidade boa variável, sendo que os pontos obtidos apresentam uma maior

proximidade da curva com expoente 2. Pode-se justificar esta proximidade pelo facto de se considerar uma lei triangular em vez de uma lei trapezoidal. Embora exista um afastamento progressivo dos pontos da curva de expoente 2, esta é a que melhor se adequa para caracterizar o comportamento do adesivo.

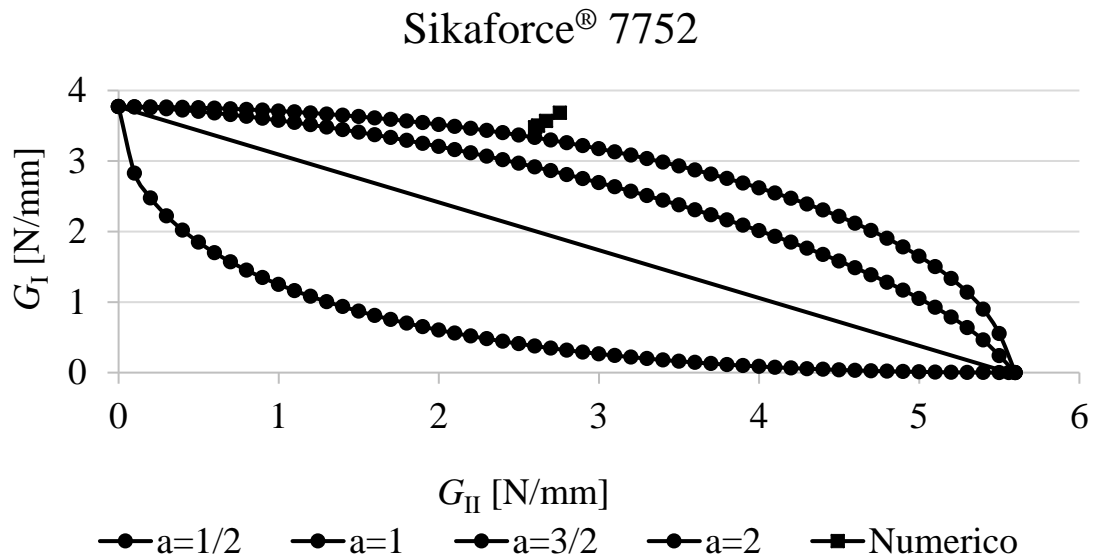


Figura 91. Envelope de fratura obtido numericamente para a espessura de 1 mm.

Na Figura 92 é possível observa-se a aproximação às curvas, dos valores experimentais e números de G_I e G_{II} .

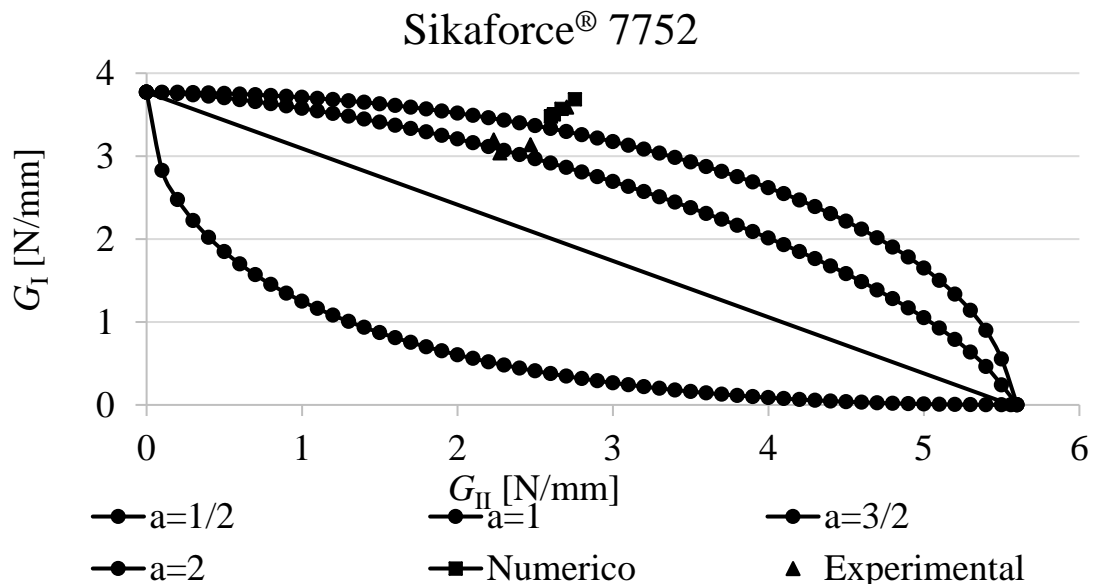


Figura 92. Comparação dos valores de G_I e G_{II} experimentais e numericos para 1 mm.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES E PROPOSTAS DE TRABALHOS FUTUROS

Em jeito de conclusão, pode-se afirmar que os vários ensaios, experimentais e numéricos, para este adesivo apresentaram uma baixa concordância, uma vez que se pode observar através das Figura 66, Figura 67, Figura 68, Figura 69 e Figura 70. É possível observa-se um aumento do desvio padrão com o aumento de espessura. Observa-se ainda, e como já estudado em outros trabalhos para um $t_a=1$ mm, que o adesivo Sikaforce® 7752 obteve os valores de G_I e de G_{II} elevados, verificando-se desta forma o seu comportamento dúctil quando sujeito a esforços em modo misto.

A determinação dos valores G_I os 6 modelos de redução de dados apresentaram resultados similares, apresentando uma variação reduzida entre os valores médios dos modelos. Nos ensaios experimentais excluiu-se o provete 5 para a $t_a=1$ mm e provete 3 para o $t_a= 2$ mm, devido ao afastamento dos resultados em relação aos outros provetes com t_a idêntico. Na determinação dos valores G_{II} , o modelo 4 apresentou valores superiores aos restantes métodos, contudo, esta discrepância não foi suficiente para excluir os resultados deste modelo.

Na análise da marcação dos pontos nos respectivos envelopes de fractura, é notória alguma dispersão dos valores para o adesivo Sikaforce®-7752 divergindo o numérico relativamente ao experimental. Os quatros pontos experimentais correspondentes aos valores de G_{IC} e de G_{IIC} marcados no envelope apresenta uma aproximação a α de 1,5 e 2, em relação aos quatro provetes do ensaio numérico que mais se aproximam de α é 2.

Nos ensaios numéricos efectuados através do comprimento de fenda inicial observada em cada provete, pode-se observar uma tendência entre os vários modelos, semelhante aos experimentais. O modelo 4, para valores de G_{IIC} apresentou resultados mais elevados relativamente aos outros modelos. Numericamente também se pode observar que as curvas-R apresentaram uma maior estabilidade durante a propagação da fenda. A adequabilidade os expoentes não foi verifica, pois três dos provetes experimentais apresentaram expoentes de fractura próximos de 1,5 relativamente aos numéricos, cujo valor de α se aproximou de 2.

As propostas para trabalhos futuros:

- Realizar estudos e ensaios de forma a obter expoentes de propagação de fenda para outras espessuras de adesivos dúcteis como o Sikaforce® 7752;
- Utilizando uma lei trapezoidal e comparar com os resultados obtidos através da lei triangular.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

- Abaqus® (2013). Documentation. D. Systèmes, Vélizy-Villacoublay.
- Adams, R. and J. Comyn (2000). "Joining using adhesives." Assembly Automation **20**(2): 109-117.
- Adams, R. D. (2005). Adhesive bonding: science, technology and applications, Elsevier.
- Adams, R. D., J. Comyn and W. C. Wake (1997). Structural adhesive joints in engineering, Springer Science & Business Media.
- Adams, R. D. and N. A. Peppiatt (1974). "Stress analysis of adhesive-bonded lap joints." The Journal of Strain Analysis for Engineering Design **9**(3): 185-196.
- Alfano, G. and M. A. Crisfield (2001). "Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues." International Journal for Numerical Methods in Engineering **50**(7): 1701-1736.
- Allix, O. and A. Corigliano (1996). "Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens." International Journal of Fracture **77**(2): 111-140.
- Andersson, T. and U. Stigh (2004). "The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces." International Journal of Solids and Structures **41**(2): 413-434.
- Automotive, S. (2010). "Windshield replacement."
- Banea, M. D., L. F. M. d. Silva and R. D. S. G. Campilho (2012). "Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive." Journal of Adhesion Science and Technology **26**(7): 939-953.
- Barenblatt, G. I. (1959). "The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypotheses. Axially-symmetric cracks." Journal of Applied Mathematics and Mechanics **23**(3): 622-636.
- Bascom, W., R. Cottingham, R. Jones and P. Peyser (1975). "The fracture of epoxy-and elastomer-modified epoxy polymers in bulk and as adhesives." Journal of Applied Polymer Science **19**(9): 2545-2562.
- Bascom, W. D. and R. L. Cottingham (1976). "Effect of temperature on the adhesive fracture behavior of an elastomer-epoxy resin." The Journal of Adhesion **7**(4): 333-346.
- Bell, A. and A. Kinloch (1997). "The effect of the substrate material on the value of the adhesive fracture energy, G_c ." Journal of materials science letters **16**(17): 1450-1453.
- Belytschko, T. and T. Black (1999). "Elastic crack growth in finite elements with minimal remeshing." International Journal for Numerical Methods in Engineering **45**(5): 601-620.
- Bennati, S., M. Colleluori, D. Corigliano and P. S. Valvo (2009). "An enhanced beam-theory model of the asymmetric double cantilever beam (ADCB) test for composite laminates." Composites Science and Technology **69**(11-12): 1735-1745.
- Campilho, R., M. De Moura and J. Domingues (2007). "Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model." Journal of Adhesion science and technology **21**(9): 855-870.

Campilho, R., A. Pinto, M. D. Banea, R. Silva and L. F. da Silva (2011). "Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry." Journal of Adhesion Science and Technology **25**(18): 2351-2368.

Campilho, R. D., M. D. Banea, J. Neto and L. F. da Silva (2013). "Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer." International journal of adhesion and adhesives **44**: 48-56.

Campilho, R. D., M. D. Banea, A. M. Pinto, L. F. da Silva and A. De Jesus (2011). "Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling." International Journal of Adhesion and Adhesives **31**(5): 363-372.

Campilho, R. D., M. De Moura and J. Domingues (2005). "Modelling single and double-lap repairs on composite materials." Composites Science and Technology **65**(13): 1948-1958.

Campilho, R. D. S. G. (2009). "Repair of composite and wood structures."

Campilho, R. D. S. G., M. D. Banea, F. J. P. Chaves and L. F. M. d. Silva (2011). "eXtended Finite Element Method for fracture characterization of adhesive joints in pure mode I." Computational Materials Science **50**(4): 1543-1549.

Campilho, R. D. S. G., M. F. S. F. de Moura and J. J. M. S. Domingues (2007). "Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model." Journal of Adhesion Science and Technology **21**(9): 855-870.

Campilho, R. D. S. G., M. F. S. F. de Moura and J. J. M. S. Domingues (2008). "Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs." International Journal of Solids and Structures **45**(5): 1497-1512.

Chai, H. (1986). Bond thickness effect in adhesive joints and its significance for mode I interlaminar fracture of composites. Composite Materials: Testing and Design (Seventh Conference), ASTM International.

Chai, H. (1992). "Experimental evaluation of mixed-mode fracture in adhesive bonds." Experimental Mechanics **32**(4): 296-303.

Chandra, N., H. Li, C. Shet and H. Ghonem (2002). "Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces." International Journal of Solids and Structures **39**(10): 2827-2855.

Chaudhury, M. and A. Pocius (2002). Surfaces, chemistry and applications: adhesion science and engineering, Elsevier Science BV, The Netherlands.

Chaves, F. J., L. Da Silva, M. De Moura, D. Dillard and V. Esteves (2014). "Fracture mechanics tests in adhesively bonded joints: a literature review." The Journal of Adhesion **90**(12): 955-992.

Chen, J. (2002). "Predicting Progressive Delamination of Stiffened Fibre-Composite Panel and Repaired Sandwich Panel by Decohesion Models." Journal of Thermoplastic Composite Materials **15**(5): 429-442.

Chen, Z., R. D. Adams and L. F. M. da Silva (2011). "Prediction of crack initiation and propagation of adhesive lap joints using an energy failure criterion." Engineering Fracture Mechanics **78**(6): 990-1007.

Cognard, P. (2005). Handbook of adhesives and sealants: basic concepts and high tech bonding, Elsevier.

Constante, C. J. (2014). Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais, Instituto Politécnico do Porto. Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Cotterell, B. and J. Reddel (1977). "The essential work of plane stress ductile fracture." International journal of fracture **13**(3): 267-277.

Crews, J. H., K. Shivakumar and I. Raju (1988). Factors influencing elastic stresses in double cantilever beam specimens. Adhesively bonded joints: Testing, analysis, and design, ASTM International.

Croccolo, D., M. De Agostinis and N. Vincenzi (2012). "Design of hybrid steel-composite interference fitted and adhesively bonded connections." International Journal of Adhesion and Adhesives **37**: 19-25.

Crocombe, A. (1989). "Global yielding as a failure criterion for bonded joints." International Journal of Adhesion and Adhesives **9**(3): 145-153.

Curiel Sosa, J. L. and N. Karapurath (2012). "Delamination modelling of GLARE using the extended finite element method." Composites Science and Technology **72**(7): 788-791.

da Silva, L. F. and R. Adams (2007). "Adhesive joints at high and low temperatures using similar and dissimilar adherends and dual adhesives." International Journal of Adhesion and Adhesives **27**(3): 216-226.

da Silva, L. F. and R. Adams (2007). "Techniques to reduce the peel stresses in adhesive joints with composites." International Journal of Adhesion and Adhesives **27**(3): 227-235.

da Silva, L. F., D. A. Dillard, B. Blackman and R. D. Adams (2012). Testing adhesive joints: best practices, John Wiley & Sons.

da Silva, L. F., A. Öchsner and R. D. Adams (2011). Handbook of adhesion technology, Springer Science & Business Media.

Da Silva, L. F., T. Rodrigues, M. Figueiredo, M. De Moura and J. Chousal (2006). "Effect of adhesive type and thickness on the lap shear strength." The journal of adhesion **82**(11): 1091-1115.

da Silva, L. F. M. and R. D. S. G. Campilho (2011). Advances in Numerical Modeling of Adhesive Joints, Springer.

da Silva, L. F. M., A. G. de Magalhaes and M. F. S. de Moura (2007). Juntas adesivas estruturais, Publindústria.

Daudeville, L. and P. Ladevèze (1993). "A damage mechanics tool for laminate delamination." Composite Structures **25**(1-4): 547-555.

de Moura, M., R. Campilho and J. Gonçalves (2008). "Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading." Composites Science and Technology **68**(10-11): 2224-2230.

de Moura, M., J. Gonçalves, A. Marques and P. De Castro (2000). "Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model." Composite Structures **50**(2): 151-157.

de Moura, M. F. S. F., R. D. S. G. Campilho and J. P. M. Gonçalves (2009). "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints." International Journal of Solids and Structures **46**(6): 1589-1595.

Duan, K., X. Hu and Y.-W. Mai (2004). "Substrate constraint and adhesive thickness effects on fracture toughness of adhesive joints." Journal of Adhesion Science and Technology **18**(1): 39-53.

Duan, K., X. Hu and F. H. Wittmann (2003). "Boundary effect on concrete fracture and non-constant fracture energy distribution." Engineering Fracture Mechanics **70**(16): 2257-2268.

Ducept, F., D. Gamby and P. Davies (1999). "A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens." Composites Science and Technology **59**(4): 609-619.

Dugdale, D. S. (1960). "Yielding of steel sheets containing slits." Journal of the Mechanics and Physics of Solids **8**(2): 100-104.

Esteves, J. L. S. (1990). "Estudo do comportamento de adesivos estruturais."

Fernández, M., M. De Moura, L. Da Silva and A. Marques (2013). "Mixed-mode I+ II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **44**: 63-69.

Fernlund, G. and J. K. Spelt (1991). "Failure load prediction of structural adhesive joints." International Journal of Adhesion and Adhesives **11**(4): 221-227.

Goland, M. (1944). "The stresses in cemented joints." J. Applied Mechanics, Trans. ASME **66**: A-17-A-27.

Griffith, A. A. (1921). "The Phenomena of Rupture and Flow in Solids." Philosophical Transactions of the Royal Society of London A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences **221**(582-593): 163-198.

Harris, J. A. and R. A. Adams (1984). "Strength prediction of bonded single lap joints by non-linear finite element methods." International Journal of Adhesion and Adhesives **4**(2): 65-78.

Hart-Smith, L. (1981). "Stress analysis- A continuum mechanics approach(in adhesive bonded joints)." Developments in adhesives- 2.(A 82-28576 13-39) London, Applied Science Publishers, 1981: 1-44.

Henkel, C. (2011). "Design Guide for Bonding Plastics." Henkel Corporation.

Her, S.-C. (1999). "Stress analysis of adhesively-bonded lap joints." Composite structures **47**(1-4): 673-678.

Högberg, J. L. and U. Stigh (2006). "Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer." Engineering Fracture Mechanics **73**(16): 2541-2556.

Hu, X.-Z. and F. Wittmann (1992). "Fracture energy and fracture process zone." Materials and Structures **25**(6): 319-326.

Hua, Y., A. D. Crocombe, M. A. Wahab and I. A. Ashcroft (2008). "Continuum damage modelling of environmental degradation in joints bonded with EA9321 epoxy adhesive." International Journal of Adhesion and Adhesives **28**(6): 302-313.

Hunston, D., A. Kinloch and S. Wang (1989). "Micromechanics of fracture in structural adhesive bonds." The Journal of Adhesion **28**(2-3): 103-114.

Hutchinson, J. (1968). "Plastic stress and strain fields at a crack tip." Journal of the Mechanics and Physics of Solids **16**(5): 337-342.

Ikeda, T., A. Yamashita, D. Lee and N. Miyazaki (2000). "Failure of a ductile adhesive layer constrained by hard adherends." Journal of engineering materials and technology **122**(1): 80-85.

Imanaka, M., T. Hamano, A. Morimoto, R. Ashino and M. Kimoto (2003). "Fatigue damage evaluation of adhesively bonded butt joints with a rubber-modified epoxy adhesive." Journal of Adhesion Science and Technology **17**(7): 981-994.

Ji, G., Z. Ouyang, G. Li, S. Ibekwe and S.-S. Pang (2010). "Effects of adhesive thickness on global and local Mode-I interfacial fracture of bonded joints." International Journal of Solids and Structures **47**(18-19): 2445-2458.

Kafkalidis, M. S. and M. D. Thouless (2002). "The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints." International Journal of Solids and Structures **39**(17): 4367-4383.

Kattan, P. I. and G. Z. Voyiadjis (2001). Damage Mechanics with Finite Elements: Practical Applications with Computer Tools, Springer Berlin Heidelberg.

Khoramishad, H., A. D. Crocombe, K. B. Katnam and I. A. Ashcroft (2010). "Predicting fatigue damage in adhesively bonded joints using a cohesive zone model." International Journal of Fatigue **32**(7): 1146-1158.

Kim, W., D. Hwang, C. Jang and C. Lee (2011). Enhancement of composite-metal adhesion strength by micro-patterning of metal surfaces. 18th International Conference On Composite Materials, Daejeon.

Kinloch, A. and S. Shaw (1981). "The fracture resistance of a toughened epoxy adhesive." The Journal of Adhesion **12**(1): 59-77.

Kinloch, A. (1987). "Adhesion and adhesives: science and technology. 1987." City: London, Chapman and Hall.

Lee, D.-B., T. Ikeda, N. Miyazaki and N.-S. Choi (2003). "Fracture behavior around a crack tip in rubber-modified epoxy adhesive joint with various bond thicknesses." Journal of materials science letters **22**(3): 229-233.

Lee, D.-B., T. Ikeda, N. Miyazaki and N.-S. Choi (2004). "Effect of bond thickness on the fracture toughness of adhesive joints." Journal of engineering materials and technology **126**(1): 14-18.

Leffler, K., K. S. Alfredsson and U. Stigh (2007). "Shear behaviour of adhesive layers." International Journal of Solids and Structures **44**(2): 530-545.

Leitão, A., R. Campilho and D. Moura (2016). "Shear characterization of adhesive layers by advanced optical techniques." Experimental Mechanics **56**(3): 493-506.

Li, G., G. Ji and O. Zhenyu (2012). "Adhesively bonded healable composite joint." International Journal of Adhesion and Adhesives **35**: 59-67.

Liljedahl, C., A. Crocombe, M. Wahab and I. Ashcroft (2006). "Damage modelling of adhesively bonded joints." International journal of fracture **141**(1-2): 147-161.

Mai, Y. and B. Cotterell (1980). "Effects of pre-strain on plane stress ductile fracture in α -brass." Journal of materials science **15**(9): 2296-2306.

Moës, N., J. Dolbow and T. Belytschko (1999). "A finite element method for crack growth without remeshing." International Journal for Numerical Methods in Engineering **46**(1): 131-150.

Mohammadi, S. (2008). Extended Finite Element Method: for Fracture Analysis of Structures, Wiley.

Nairn, J. (2006). "On the calculation of energy release rates for cracked laminates with residual stresses." International Journal of Fracture **139**(2): 267.

Oliveira, J. M., M. F. de Moura and J. J. Morais (2009). "Application of the end loaded split and single-leg bending tests to the mixed-mode fracture characterization of wood." Holzforschung **63**(5): 597-602.

Ozdil, F., L. Carlsson and P. Davies (1998). "Beam analysis of angle-ply laminate end-notched flexure specimens." Composites Science and Technology **58**(12): 1929-1938.

Panigrahi, S. K. and B. Pradhan (2007). "Three Dimensional Failure Analysis and Damage Propagation Behavior of Adhesively Bonded Single Lap Joints in Laminated FRP Composites." Journal of Reinforced Plastics and Composites **26**(2): 183-201.

Penado, F. E. (1998). "A simplified method for the geometrically nonlinear analysis of the single lap joint." Journal of Thermoplastic Composite Materials **11**(3): 272-287.

Petrie, E. M. (2000). Handbook of adhesives and sealants, McGraw-Hill.

Pinto, A. M. G. (2007). "Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos."

Pinto, A. M. G., A. G. Magalhães, R. D. S. G. Campilho, M. F. S. F. de Moura and A. P. M. Baptista (2009). "Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive." The Journal of Adhesion **85**(6): 351-376.

Pocius, A. V. and D. A. Dillard (2002). Adhesion science and engineering: surfaces, chemistry and applications, Elsevier.

Raghavan, P. and S. Ghosh (2005). "A continuum damage mechanics model for unidirectional composites undergoing interfacial debonding." Mechanics of Materials **37**(9): 955-979.

Rice, J. R. (1968). "A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks." Journal of applied mechanics **35**(2): 379-386.

Rigby, R. and M. Aliabadi (1998). "Decomposition of the mixed-mode J-integral—revisited." International Journal of Solids and Structures **35**(17): 2073-2099.

Santos, M. and R. Campilho (2017). "Mixed-mode fracture analysis of composite bonded joints considering adhesives of different ductility." International Journal of Fracture **207**(1): 55-71.

Schuecker, C. and B. D. Davidson (2001). 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, ASTM International.

Shenoy, V., I. A. Ashcroft, G. W. Critchlow and A. D. Crocombe (2010). "Fracture mechanics and damage mechanics based fatigue lifetime prediction of adhesively bonded joints subjected to variable amplitude fatigue." Engineering Fracture Mechanics **77**(7): 1073-1090.

Shivakumar, K. and I. Raju (1992). "An equivalent domain integral method for three-dimensional mixed-mode fracture problems." Engineering fracture mechanics **42**(6): 935-959.

Skeist, I. (2012). Handbook of adhesives, Springer Science & Business Media.

Soares, A. P. O. A. L. (2015). Determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto pelo ensaio Single-Leg Bending, Instituto Superior de Engenharia do Porto.

Szekrényes, A. and J. Uj (2004). "Beam and finite element analysis of quasi-unidirectional composite SLB and ELS specimens." Composites Science and Technology **64**(15): 2393-2406.

Troughton, M. J. (2008). Handbook of plastics joining: a practical guide, William Andrew.

Turon, A., J. Costa, P. P. Camanho and C. G. Dávila (2007). "Simulation of delamination in composites under high-cycle fatigue." Composites Part A: Applied Science and Manufacturing **38**(11): 2270-2282.

Volkersen, O. (1938). "Die nietkraftverteilung in zubeanspruchten nietverbindungen konstanten loschonquerschnitten." Luftfahrtforschung **15**: 41-47.

Wahab, M. M. A., I. A. Ashcroft, A. D. Crocombe and S. J. Shaw (2001). "Prediction of fatigue thresholds in adhesively bonded joints using damage mechanics and fracture mechanics." Journal of Adhesion Science and Technology **15**(7): 763-781.

Wang, H. and T. Vu-Khanh (1996). "Use of end-loaded-split (ELS) test to study stable fracture behaviour of composites under mode II loading." Composite Structures **36**(1-2): 71-79.

Williams, J. (1988). "On the calculation of energy release rates for cracked laminates." International Journal of Fracture **36**(2): 101-119.

Williams, M. L. (1959). "The stresses around a fault or crack in dissimilar media." Bulletin of the Seismological Society of America **49**(2): 199-204.

Yang, Q. D. and M. D. Thouless (2001). "Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints." International Journal of Fracture **110**(2): 175-187.

Yeh, H.-Y. and D. Tandjung (2005). "Mixed mode fracture analysis of the lap shear specimen test per ASTM D1002." Journal of reinforced plastics and composites **24**(8): 839-853.

Zhu, Y. (2008). "Characterization of interlaminar fracture toughness of a carbon/epoxy composite material."