



Estudo numérico da fratura em modo misto de juntas adesivas pelo ensaio single-leg bending

MANUEL ANTÓNIO DA SILVA SANTOS

Outubro de 2016

ESTUDO NUMÉRICO DA FRATURA EM MODO MISTO DE JUNTAS ADESIVAS PELO ENSAIO SINGLE-LEG BENDING

Manuel António da Silva Santos

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



ESTUDO NUMÉRICO DA FRATURA EM MODO MISTO DE JUNTAS ADESIVAS PELO ENSAIO SINGLE-LEG BENDING

Manuel António da Silva Santos

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.

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Ao professor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, Orientador Científico da presente dissertação, pela sua dedicação, disponibilidade e incentivo que apresentou durante o tempo de realização deste trabalho.

À minha família e amigos por todo o apoio e incentivo demonstrados.

PALAVRAS CHAVE

Single-Leg Bending, ligação adesiva, mecânica da fratura, tenacidade à fratura, envelope de fratura, Método de Elementos Finitos, modelo de dano coesivo.

RESUMO

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

Neste trabalho é realizado um estudo experimental e um numérico utilizando o ensaio *Single-Leg Bending* (SLB) em provetes colados com três tipos de adesivos, de forma a estudar e comparar as suas propriedades de fratura. Para tal, são aplicados alguns modelos de redução da taxa de libertação de energia de deformação à tração, G_I , e corte, G_{II} , enquadrados nos modelos que necessitam da medição do comprimento de fenda e nos modelos que utilizam um comprimento de fenda equivalente. Numa fase posterior, procedeu-se à análise e comparação dos resultados adquiridos durante a fase experimental de G_I e G_{II} de cada adesivo. A discussão de resultados foi também feita através da análise dos valores obtidos em diversos envelopes de fratura, no sentido de averiguar qual o critério de rotura mais adequado a considerar para cada adesivo. Em geral, foi obtida uma concordância bastante boa entre métodos de determinação de G_I e G_{II} . Nos ensaios numéricos foi possível retratar o comportamento verificado nos ensaios experimentais, tendo sido validados os critérios de propagação escolhidos através da análise dos resultados experimentais.

KEYWORDS

Single-Leg Bending, adhesive joint, fracture mechanics, fracture toughness, fracture envelope, Finite Element Method, cohesive zone models.

ABSTRACT

The use of adhesive joints in industrial applications has been increasing, replacing traditional methods such as welding, brazing and bolted and riveted joints. This is due to the advantages they offer, such as the fact that they are lighter, behave well under cyclic loads or fatigue, enable the connection of different materials and have lower stress concentrations. To increase the confidence in the design of adhesive structures, it is important to be able to accurately predict their mechanical strength and corresponding fracture properties (critical strain energy release rate in tension, G_{IC} , and shear, G_{IIc}). These properties are directly related to Fracture Mechanics and are estimated through an energetic analysis. To this end, there are three types of models: models that require the measurement of crack length during propagation of the damage, models that use an equivalent crack length and methods based on the J integral. As in most cases loads induce mixed mode (combination of tension with shear), it is of great importance the perception of fracture in these conditions, especially in the energy release rates for different criteria or fracture envelopes. This comparison allows, for example, to find out which is the best energetic criterion of failure to use in numerical models based on cohesive zone models.

This work presents an experimental and numerical study using the Single-Leg Bending (SLB) test on specimens bonded with three types of adhesive, in order to study and compare their fracture properties. For this purpose, some data reduction methods were applied to estimate the strain energy release rate in tension, G_I , and shear, G_{II} , within the scope of the models that require the measurement of crack length and models using an equivalent crack length. At a later stage, the analysis and comparison of results obtained during the experimental phase of G_I and G_{II} of each adhesive were addressed. The discussion of results was also done by the analysis of the values obtained in several fracture envelopes, to ascertain which criteria are more appropriate for each adhesive. Overall, a very good agreement it was obtained 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, with a positive validation of the chosen propagation criteria have been validated propagation criteria obtained from the experimental results.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

4ENF	<i>4- Point End-Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Assymetric Double Cantilever Beam</i>
CBBM	<i>Compliance Based Beam Method</i>
CDI	Correlação Digital de Imagem
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>
LVDT	<i>Linear Variable Differential Transformer</i>
MDC	Modelo de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
RIM	<i>Reaction Injection Molding</i>
SLB	<i>Single Leg Bending</i>
SMC	<i>Sheet Molding Compound</i>
TDCB	<i>Tampered Double-Cantiliver Beam</i>

Lista de Unidades

$^{\circ}\text{C}$	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	variação do comprimento da fenda
E	Módulo de Elasticidade Longitudinal
E_{11}	Módulo de Elasticidade na direção do comprimento do provete
E_{33}	Módulo de Elasticidade na direção da largura do provete
E_f	módulo de elasticidade à flexão
E_x	Módulo de Elasticidade na direção do eixo x

E_y	Módulo de Elasticidade na direção do eixo y
E_z	Módulo de Elasticidade na direção do eixo z
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 tração
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
\hat{G}_{int}	Fator térmico e mecânico relativo à taxa de libertação de energia
G_{mech}	Fator mecânico relativo à taxa de libertação de energia
G_T	Fator referente às tensões internas na análise da taxa de libertação de energia
G_{xy}	Módulo de elasticidade transversal
h	espessura
h_t	Espessura total do provete
I	Segundo 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	Fator de correção, Fator intensidade de tensão
K_C	tenacidade à fratura
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	vetor 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	fator adimensional dependente da geometria e distribuição de carga
α	Coeficiente de expansão térmica
γ_f	Deformação de rotura ao corte
δ	Deslocamento
δ_{ij}	tensor Kronecker
δ_{ij}	tensor de carga
$\delta_{ij}n_j$	vetor de tração
ε	deformação
ε_f	Deformação de rotura à tração
λ	relação entre a tensão de cedência à compressão e a tensão de cedência à tração
ν	Coeficiente de Poisson
ν_{xy}	Coeficiente de Poisson no plano xy
ν_{xz}	Coeficiente de Poisson no plano xz
ν_{yz}	Coeficiente de Poisson no plano yz
σ	tensão
σ_c	Tensão de cedência
σ_f	Tensão de rotura à tração
σ_{ij}	Tensor de carga
σ_R	tensão remota aplicada
σ_u	Tensão de cedência
σ_y	Tensão de cedência à tração
σ_Y	Tensão de cedência à tração

σ_{yc}	tensão de cedência à compressão
---------------	---------------------------------

σ_{yt}	tensão de cedência à tração
---------------	-----------------------------

τ_f	Tensão de rotura ao corte
----------	---------------------------

τ_y	Tensão de cedência ao corte
----------	-----------------------------

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1- CONSTITUINTES DE UMA JUNTA ADESIVA [1]	6
FIGURA 2 - LOTUS ELISE [3]	8
FIGURA 3- INTERIOR DE UM VEICULO EM QUE NAS SUPERFÍCIES TÊXTEIS RECORREM A ADESIVOS PARA A MONTAGEM [5]	8
FIGURA 4 - CURVA DE TRAÇÃO TENSÃO-DEFORMAÇÃO DE UM ADESIVO DÚCTIL [2]	14
FIGURA 5- ESFORÇO DE TRAÇÃO (A) E COMPRESSÃO (B) E CORRESPONDENTE DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO [13].....	17
FIGURA 6-ESFORÇO DE CORTE E DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE[13]	18
FIGURA 7 - TIPOS DE JUNTAS ADESIVAS [13]	20
FIGURA 8 - MODOS DE ROTURA DE UMA JUNTA ADESIVA [2].....	28
FIGURA 9- EXEMPLO DE UM ENVELOPE DE FRATURA [21]	29
FIGURA 10- CURVAS R [21].....	29
FIGURA 11- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ENSAIO DCB[22]	30
FIGURA 12 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DE UM ENSAIO CT [21]	30
FIGURA 13 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO ENSAIO ENF [21]	31
FIGURA 14- REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO TENSAIO4ENF [21]	31
FIGURA 15- REPRESENTAÇÃO DE UM ENSAIO ELS [21].....	32
FIGURA 16 - REPRESENTAÇÃO DE UM PROVETE ADCB, COM UM RÁCIO ENTRE ESPESSURAS DOS SUBSTRATOS DE 2 [21].....	33
FIGURA 17 - REPRESENTAÇÃO DE UM ENSAIO CLS [21].....	33
FIGURA 18 - REPRESENTAÇÃO DE UM ENSAIO FRMM [20]	33
FIGURA 19 - REPRESENTAÇÃO DE UM ENSAIO SLB [26].....	34
FIGURA 20-ESQUEMA DE REDUÇÃO PARA A PARTIÇÃO DOS MODOS [28]	37
FIGURA 21- DECOMPOSIÇÃO DOS MODOS DE ROTURA NA EXTREMIDADE DA FENDA	42
FIGURA 22- SISTEMA DE REFERÊNCIA PARA O INTEGRAL J 3D	45
FIGURA 23- DECOMPOSIÇÃO DOS ESFORÇOS NO ENSAIO SLB	46
FIGURA 24 - EXEMPLO DE UTILIZAÇÃO DE LVDTs [40].....	47

FIGURA 25 - EXEMPLO DE UM <i>SETUP</i> QUE PERMITE A CDI [41]	48
FIGURA 26 - ADESIVO EPÓXIDO ARALDITE® AV138/HV998 [26].....	53
FIGURA 27 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [26].....	53
FIGURA 28 - ADESIVO EPÓXIDO ARALDITE® 2015 [26].....	55
FIGURA 29- CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [26]	55
FIGURA 30 - ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [26]	57
FIGURA 31 - CURVAS Σ -E DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [26]	57
FIGURA 32- GEOMETRIA DO PROVETE SLB [26].....	59
FIGURA 33- APLICAÇÃO DE CALOR NAS CAMADAS DE PRÉ-IMPREGNADO [26].....	60
FIGURA 34- PRENSA DE PRATOS QUENTES [26].....	61
FIGURA 35- CICLO TÉRMICO APLICADO ÀS PLACAS DE COMPÓSITO [26].....	61
FIGURA 36 - POSICIONAMENTO DOS ESPAÇADORES, CALÇO E GRAMPOS, DURANTE A APLICAÇÃO DE PRESSÃO NOS PROVETES [26].....	63
FIGURA 37- PROVETE SLB, APÓS REMOÇÃO DE PARTE DO EXCESSO DE ADESIVO [26].....	64
FIGURA 38 - ASPETO FINAL DE UM PROVETE PARA ENSAIO [26].....	65
FIGURA 39- SETUP DO ENSAIO SLB [26]	66
FIGURA 40 - CURVAS P - Δ OBTIDAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	67
FIGURA 41 - CURVAS-R RELATIVAS A G_I , OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #3 DO ADESIVO ARALDITE® AV138	69
FIGURA 42-CURVAS-R RELATIVAS A G_{II} , OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #3 DO ADESIVO ARALDITE® AV138	69
FIGURA 43 - RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS G_I E G_{II} OBTIDOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138	72
FIGURA 44 - ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® AV138	73
FIGURA 45 - CURVAS P - Δ OBTIDAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015	74
FIGURA 46 - CURVAS-R RELATIVAS A G_I , OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #7 DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	75
FIGURA 47 - CURVAS-R RELATIVAS A G_{II} , OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #7 DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	76
FIGURA 48 - RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138	78
FIGURA 49 - ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015	79

FIGURA 50--CUVAS $P-\Delta$ OBTIDAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	79
FIGURA 51 - CURVAS-R RELATIVAS A G_I , OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #6 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	81
FIGURA 52 - CURVAS-R RELATIVAS A G_{II} , OBTIDAS UTILIZANDO OS DIVERSOS MODELOS, REFERENTES AO PROVETE #6 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	81
FIGURA 53 - RESUMO DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS OBTIDOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	84
FIGURA 54 - ENVELOPE DE FRATURA EXPERIMENTAL DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	85
FIGURA 55 - DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO DE CORTE EM ADESIVOS FRÁGEIS E DÚCTEIS [46]	87
FIGURA 56-REFINAMENTO GERAL DE MALHA DO MODELO UTILIZADO NOS PROVETES SLB	88
FIGURA 57-DETALHE DO REFINAMENTO DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS NA PROXIMIDADE DA EXTREMIDADE DA FENDA	89
FIGURA 58- DETALHE DO REFINAMENTO DE MALHA DE ELEMENTOS FINITOS NA ZONA DE CONTATO ENTRE O PROVETE E O PUNÇÃO DE CARREGAMENTO	89
FIGURA 59- CONDIÇÕES FRONTEIRA DEFINIDAS PARA O ENSAIO NUMÉRICO	89
FIGURA 60 - CONDIÇÕES DE CONTACTO PARA O ENSAIO NUMÉRICO	90
FIGURA 61 -MDC TRIANGULAR IMPLEMENTADO NO <i>SOFTWARE</i> ABAQUS®.....	91
FIGURA 62 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA $P-\Delta$ NUMÉRICA COM A EXPERIMENTAL DO PROVETE 3 DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	94
FIGURA 63 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA $P-\Delta$ NUMÉRICA COM A EXPERIMENTAL DO PROVETE 5 DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	94
FIGURA 64 - CURVA R PARA G_I OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 3 DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	95
FIGURA 65 - CURVA R PARA G_{II} OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 3 DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	95
FIGURA 66 - CURVA R PARA G_I OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 5 DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	96
FIGURA 67 - CURVA R PARA G_{II} OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 5 DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	96
FIGURA 68 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA $P-\Delta$ NUMÉRICA COM A EXPERIMENTAL DO PROVETE 1 DO ADESIVO ARALDITE® 2015	99
FIGURA 69 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA $P-\Delta$ NUMÉRICA COM A EXPERIMENTAL DO PROVETE 2 DO ADESIVO ARALDITE® 2015	99

FIGURA 70 – CURVA R PARA G_I OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 1 DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	100
FIGURA 71 - CURVA R PARA G_{II} OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 2 DO ADESIVO ARALDITE® AV2015.....	100
FIGURA 72 - CURVA R PARA G_I OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 2 DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	101
FIGURA 73 - CURVA R PARA G_{II} OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 2 DO ADESIVO ARALDITE® AV2015.....	101
FIGURA 74 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA $P-\Delta$ NUMÉRICA COM A EXPERIMENTAL DO PROVETE 2 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	104
FIGURA 75 - COMPARAÇÃO ENTRE A CURVA $P-\Delta$ NUMÉRICA COM A EXPERIMENTAL DO PROVETE 3 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	104
FIGURA 76 - CURVA R PARA G_I OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 2 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	105
FIGURA 77 -CURVA R PARA G_{II} OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 2 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	105
FIGURA 78 - CURVA R PARA G_I OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 3 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	106
FIGURA 79 - CURVA R PARA G_{II} OBTIDA PELOS ENSAIOS NUMÉRICOS NO PROVETE 3 DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	106
FIGURA 80 - ENVELOPE DE FRATURA OBTIDO NUMERICAMENTE DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	108
FIGURA 81 - ENVELOPE DE FRATURA OBTIDO NUMERICAMENTE DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	109
FIGURA 82 - ENVELOPE DE FRATURA OBTIDO NUMERICAMENTE DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	110
FIGURA 83- ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO G_{IC} NO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	111
FIGURA 84 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO G_{IIC} NO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	111
FIGURA 85 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS G_{IC} E G_{IIC} AGRUPADO NO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	112
FIGURA 86 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO T_N^0 NO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	112
FIGURA 87 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO T_S^0 NO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	113
FIGURA 88 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS T_N^0 E T_S^0 NO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	113
FIGURA 89 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS VÁRIOS PARÂMETROS ANALISADOS NO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	114
FIGURA 90 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO G_{IC} NO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	115

FIGURA 91 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO G_{IIC} NO ADESIVO ARALDITE® 2015	115
FIGURA 92 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS G_{IC} E G_{IIC} AGRUPADO NO ADESIVO ARALDITE® 2015	116
FIGURA 93 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO T_N^0 NO ADESIVO ARALDITE® 2015	116
FIGURA 94 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO T_S^0 NO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	117
FIGURA 95 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS T_N^0 E T_S^0 NO ADESIVO ARALDITE® 2015....	117
FIGURA 96 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS VÁRIOS PARÂMETROS ANALISADOS NO ADESIVO ARALDITE® 2015	118
FIGURA 97 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO G_{IC} NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	119
FIGURA 98 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO G_{IIC} NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	119
FIGURA 99 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS G_{IC} E G_{IIC} AGRUPADO NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	120
FIGURA 100 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO T_N^0 NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	120
FIGURA 101 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AO PARÂMETRO T_S^0 NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	121
FIGURA 102 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE AOS PARÂMETROS T_N^0 E T_S^0 NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	121
FIGURA 103 - ANÁLISE DE SENSIBILIDADE À VARIAÇÃO SIMULTÂNEA DOS VÁRIOS PARÂMETROS ANALISADOS NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	122

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1- VALORES APROXIMADOS DE T_G PARA VÁRIOS TIPOS DE ADESIVOS [2]	11
TABELA 2-COEFICIENTES DE EXPANSÃO TÉRMICA DE VÁRIOS MATERIAIS [2].....	12
TABELA 3 - ENSAIOS PARA MEDIR A TENACIDADE À FRATURA EM MODO MISTO E RESPECTIVA MIXICIDADE	32
TABELA 4- PROPRIEDADES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS DO COMPÓSITO REFORÇADO COM FIBRAS DE CARBONO, COM AS FIBRAS ALINHADAS UNIDIRECCIONALMENTE NA DIREÇÃO X [26, 42].....	52
TABELA 5- PROPRIEDADES ELÁSTICAS E PLÁSTICAS DO ADESIVO ARALDITE® AV138[43, 44]	54
TABELA 6- PROPRIEDADES ELÁSTICAS E PLÁSTICAS DO ADESIVO ARALDITE® 2015[43].....	56
TABELA 7- PROPRIEDADES ELÁSTICAS E PLÁSTICAS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752[45].....	58
TABELA 8- VALORES DE A_0 [MM] MEDIDOS PARA CADA PROVETE[26]	64
TABELA 9- VALORES MÁXIMOS DE P E Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138	68
TABELA 10-VALORES DE G_I OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138	71
TABELA 11-VALORES DE G_{II} OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138	72
TABELA 12- VALORES MÁXIMOS DE P E Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	74
TABELA 13 - VALORES DE G_I OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	77
TABELA 14- VALORES DE G_{II} OBTIDOS PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	77
TABELA 15 - VALORES MÁXIMOS DE P E RESPECTIVO Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	80
TABELA 16 - VALORES DE G_I OBTIDOS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	83
TABELA 17 - VALORES DE G_{II} OBTIDOS PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	84
TABELA 18 - RESUMO DOS RESULTADOS OBTIDOS PARA OS 3 ADESIVOS ESTUDADOS.....	86
TABELA 19- VALORES MÁXIMOS DE P E RESPECTIVO Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138.....	93
TABELA 20- VALORES DE G_I OBTIDOS NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	97
TABELA 21-VALORES DE G_{II} OBTIDOS NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	97
TABELA 22 - VALORES MÁXIMOS DE P E RESPECTIVO Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015	98
TABELA 23-VALORES DE G_I OBTIDOS NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	102

TABELA 24-VALORES DE G_{II} OBTIDOS NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015	102
TABELA 25 - VALORES MÁXIMOS DE P E RESPETIVO Δ OBTIDOS NOS ENSAIOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	103
TABELA 26 - VALORES DE G_I OBTIDOS NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	107
TABELA 27 -VALORES DE G_{II} OBTIDOS NUMERICAMENTE PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752	107

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1	Ligações adesivas	5
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas	5
2.1.1.1	Definição	5
2.1.1.2	Breve história das juntas adesivas	6
2.1.1.3	Aplicações	7
2.1.1.4	Vantagens e desvantagens	9
2.1.1.5	Propriedades.....	10
2.1.1.5.1	Propriedades Térmicas.....	10
2.1.1.5.1.1	Temperatura de transição vítrea	10
2.1.1.5.1.2	Temperatura de fusão	10
2.1.1.5.1.3	Temperatura de decomposição	11
2.1.1.5.1.4	Coeficiente de expansão térmica.....	11
2.1.1.5.1.5	Máxima temperatura de serviço.....	13
2.1.1.5.2	Propriedades mecânicas	13
2.1.1.5.2.1	Viscoelasticidade.....	13
2.1.1.5.2.2	Módulo de elasticidade.....	13
2.1.1.5.2.3	Coeficiente de Poisson.....	14
2.1.1.5.2.4	Tensão de Cedência	14
2.1.1.5.2.5	Ductilidade	15

2.1.1.5.2.6	Fratura frágil	15
2.1.1.6	Fases para se obter uma junta adesiva	15
2.1.2	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	16
2.1.2.1	Tipos de esforços	16
2.1.2.1.1	Tração e compressão	16
2.1.2.1.2	Corte.....	17
2.1.2.1.3	Clivagem e arrancamento	18
2.1.2.2	Modos de rotura	18
2.1.3	Configurações possíveis de junta	19
2.1.3.1	Junta de sobreposição simples	20
2.1.3.2	Junta de sobreposição dupla	21
2.1.3.3	Junta com chanfro exterior	21
2.1.3.4	Junta Topo a topo	21
2.1.3.5	Junta em degrau e junta com chanfro interior	21
2.1.3.6	Cobre-junta	21
2.1.3.7	Junta tubular	22
2.1.3.8	Juntas de arrancamento	22
2.1.4	Adesivos estruturais	22
2.1.4.1	Epóxidos.....	22
2.1.4.2	Fenólicos	24
2.1.4.3	Poliaromáticos de alta temperatura	24
2.1.4.4	Poliuretanos.....	25
2.1.4.5	Acrílicos.....	25
2.1.4.5.1	Anaérobicos	25
2.1.4.5.2	Cianoacrilatos.....	26
2.1.4.5.3	Acrílicos modificados	26
2.2	Ensaio para a determinação da tenacidade à fratura	26
2.2.1	Ensaio em tração (modo I).....	29
2.2.2	Ensaio em corte (modo II).....	31

2.3.3	Ensaio em solitação combinada (modo misto I+II)	32
2.3	Ensaio Single-Leg Bending (SLB).....	33
2.3.1	Caracterização do ensaio.....	33
2.3.2	Métodos para determinação da tenacidade à fratura	34
2.3.2.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda	34
2.3.2.1.1	Modelo 1- Oliveira et al [27]	34
2.3.2.1.2	Modelo 2- Szekrényes e Uj[28]	36
2.3.2.1.3	Modelo 3- Ye Zhu[31].....	40
2.3.2.1.4	Modelo 4 - W.S. Kim et al[32]	41
2.3.2.1.5	Modelo 5 – L.F.M. da Silva et al[33]	42
2.3.2.2	Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente	43
2.3.2.2.1	Compliance Based Beam Method (CBBM)[34]	43
2.3.2.3	Método baseado no integral J[35].....	44
2.3.2.3.1	Utilização de sensores mecânicos para obtenção dos parâmetros	47
2.3.2.3.2	Utilização de métodos óticos para obtenção dos parâmetros	47
3	DESENVOLVIMENTO	51
3.1	Trabalho experimental	51
3.1.1	Materiais utilizados	51
3.1.1.1	Substratos	51
3.1.1.2	Adesivos	52
3.1.1.2.1	Araldite® AV138	52
3.1.1.2.2	Araldite® 2015.....	54
3.1.1.2.3	Sikaforce® 7752.....	56
3.1.2	Fabrico dos provetes SLB.....	58
3.1.2.1	Geometria dos provetes SLB.....	58
3.1.2.2	Colagem dos provetes	59
3.1.2.3	Preparação dos provetes para ensaio.....	63
3.1.3	Ensaio dos provetes SLB	65
3.1.3.1	Condições de ensaio	65

3.1.3.2	Método ótico	65
3.1.3.3	Realização dos ensaios.....	66
3.1.4	Resultados obtidos	66
3.1.4.1	Araldite® AV138	67
3.1.4.1.1	Estimativa de G_c	68
3.1.4.1.2	Envelope de Fratura	73
3.1.4.2	Araldite® 2015	73
3.1.4.2.1	Estimativa de G_c	75
3.1.4.2.2	Envelope de fratura.....	78
3.1.4.3	Sikaforce® 7752	79
3.1.4.3.1	Estimativa de G_c	80
3.1.4.3.2	Envelope de Fratura	85
3.1.5	Análise dos resultados.....	85
3.2	Trabalho numérico	88
3.2.1	Condições da análise numérica	88
3.2.2	Modelo de dano coesivo	90
3.2.2.1	Modelo de dano triangular	90
3.2.3	Validação das leis coesivas obtidas	92
3.2.3.1	Araldite® AV138	92
3.2.3.2	Araldite® 2015	97
3.2.3.3	Sikaforce® 7752	102
3.2.4	Validação dos critérios de propagação	108
3.2.4.1	Araldite® AV138.....	108
3.2.4.2	Araldite® 2015	108
3.2.4.3	Sikaforce® 7752	109
3.2.5	Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas	110
3.2.5.1	Araldite® AV138.....	110
3.2.5.2	Araldite® 2015	114
3.2.5.3	Sikaforce® 7752	118

4	CONCLUSÕES.....	125
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	129

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

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

1.2 Objetivos

O objetivo desta dissertação é a análise da taxa de libertação de energia (propriedade relacionada com a mecânica da fratura, relativa à capacidade de um material resistir à propagação de uma fenda provocada por esforços externos), sobre efeitos conjuntos de tração (modo I) e de corte (modo II). Considerou-se o ensaio de provetes *Single-Leg Bending* (SLB) em juntas adesivas, com substratos de matriz polimérica reforçada com fibra de carbono, colados através de três tipos distintos de adesivo (frágil, moderadamente dúctil e dúctil). 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}). Através dos resultados obtidos pelos ensaios realizados, são criadas curvas $P-\delta$ que servem de base à análise dos resultados a efetuar. 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 fratura, que permite situar os valores de G_I e G_{II} obtidos relativamente aos de modo puro (G_{IC} e G_{IIC} , respetivamente) e determinar qual o critério de propagação em modo misto mais adequado. Após ser selecionado o critério de propagação mais indicado para cada adesivo, 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. Após este estudo foi feita uma análise de sensibilidade a G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 , com o objetivo de perceber a influencia destes parâmetros nas curvas $P-\delta$.

1.3 Organização do relatório

A presente dissertação encontra-se estruturada da seguinte forma:

Capítulo 1- No capítulo 1 estão descritas a contextualização, os objetivos e a organização deste relatório.

Capítulo 2- Neste capítulo é feita uma revisão bibliográfica relativa às ligações adesivas, sua caracterização e propriedades a ter em conta, esforços e modos de rotura a que estão normalmente associadas, configurações das juntas adesivas mais utilizadas, caracterização e classificação dos principais tipos de adesivos estruturais e os diversos ensaios utilizados com o intuito de obter as propriedades de fratura (G_I , G_{II} e $G_{I/II}$) das juntas adesivas, com particular incidência no ensaio SLB, em que é feita a sua caracterização e são indicados alguns modelos para a determinação de G_I e G_{II} .

Capítulo 3- São apresentados e discutidos neste Capítulo todos os passos envolventes na caracterização à fratura das juntas adesivas ensaiadas, desde os procedimentos levados a cabo na produção dos provetes do ensaio SLB, até aos resultados experimentais obtidos através dos 6 modelos de redução de G_I e G_{II} a analisar. São também analisados os resultados obtidos experimentalmente. Também é apresentada a modelação efetuada no *software* Abaqus®, os resultados obtidos através dos ensaios numéricos e a validação do critério de propagação escolhido através dos ensaios experimentais. É feita uma análise de sensibilidade aos parâmetros constituintes da lei coesiva.

Capítulo 4- São apresentadas neste capítulo as conclusões retiradas neste trabalho.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Neste capítulo são abordados alguns assuntos relevantes como a caracterização das juntas adesivas, os esforços e modos de rotura, as configurações possíveis de junta e os tipos principais de adesivos estruturais.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

Nesta secção é feita uma caracterização dos adesivos, em que são indicadas as propriedades mais relevantes e os vários tipos de adesivos. Também são indicadas algumas aplicações das ligações adesivas, as configurações possíveis da junta e as vantagens e desvantagens das ligações adesivas.

2.1.1.1 Definição

Uma junta adesiva é um tipo de ligação de duas peças, em que se utiliza um adesivo de modo a acoplar as peças. Este tipo de fixação é constituído pelos aderentes (ou substratos) e pelo adesivo.

O adesivo é uma substância capaz de unir pelo menos duas superfícies de uma forma permanente e rígida. Os adesivos têm de possuir diversas características, sendo estas:

- Durante a preparação da junta adesiva, o material tem de se comportar como um líquido, de modo a escoar sobre o substrato e a molhá-lo (é de extrema importância assegurar a molhabilidade do substrato);
- Formar forças de fixação durante o processo de adesão (desenvolvimento de forças intermoleculares);
- Serem capazes de suportar esforços contínuos e esforços variáveis ao longo da sua vida útil;
- Serem capazes de transferir e distribuir cargas pelos componentes da montagem;
- Serem capazes de preencher ranhuras, cavidades e espaços;
- Terem boa resistência ao meio ambiente de modo a que não se degradem após efetuada a ligação.

Os adesivos são escolhidos pelo seu poder de fixação e de união que conseguem disponibilizar ao sistema e, devido a este facto, apresentam geralmente uma elevada tensão de rotura e tensão de rotura ao corte [1].

Os adesivos podem ser classificados em adesivos estruturais e em adesivos não estruturais, sendo que as características necessárias para este ser considerado estrutural serão indicadas posteriormente.

A junta adesiva é constituída pelo conjunto formado pelos aderentes, o adesivo, primários (quando utilizados) e por todas as interfases associadas. Na Figura 1 pode-se observar os diferentes constituintes de uma junta adesiva.

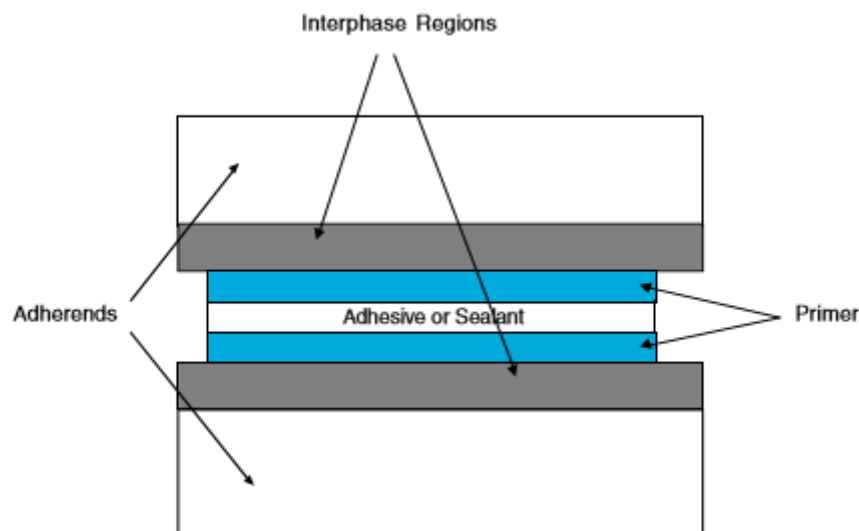


Figura 1- Constituintes de uma junta adesiva [1]

O substrato é o material a ser ligado, designado por aderente após a ligação. A zona entre o adesivo e o aderente (ou substrato) é designada por interfase, sendo esta uma região fina na zona de contacto entre o adesivo e o aderente. A interfase possui características físicas e químicas diferentes da parte maciça do adesivo ou do aderente, sendo que é um fator crítico na determinação das propriedades de uma ligação adesiva.

A interfase, ou camada limite (*boundary layer*) é o plano de contacto entre as superfícies de dois materiais, e está contida na interfase. Na interfase podem estar contidas várias interfaces entre diferentes materiais localizados entre o adesivo e o aderente.

Por vezes, é utilizada por aplicação direta na superfície dos substratos uma substância designada por primário com o objetivo de melhorar a adesão ou proteger as respetivas superfícies até se efetuar a aplicação do adesivo [2].

2.1.1.2 Breve história das juntas adesivas

Os adesivos são usados desde há milhares de anos e até muito recentemente os adesivos eram de origem vegetal, animal ou mineral.

No início do século XX, sensivelmente na mesma altura em que começou a indústria polimérica, os adesivos poliméricos de origem sintética começaram a substituir os

adesivos de origem natural devido a possuírem uma maior capacidade de adesão, maiores possibilidades de formulação e melhor resistência ao ambiente em que vão operar.

Apesar destas vantagens dos adesivos sintéticos em relação aos naturais, estes últimos ainda são largamente utilizados.

Nos anos 40 e 50 assistiu-se a um considerável crescimento do mercado de adesivos devido ao desenvolvimento dos adesivos estruturais, e também de selantes, para a indústria militar (aeronáutica). Devido a uma excepcional relação tensão de cedência-peso, o desenvolvimento dos adesivos está intimamente ligado à indústria aeronáutica e aeroespacial.

Um problema dos primeiros adesivos foi a durabilidade, sendo este resolvido no final dos anos 70 com o desenvolvimento de sistemas avançados de adesão.

Com o sucesso da aplicação dos adesivos nestas indústrias, rapidamente se percebeu que a utilização de adesivos poderia ser uma alternativa económica aos métodos de união mecânica como soldadura, brasagem e rebitagem.

Neste momento, a ciência da adesão é largamente aceite, e os métodos e regras básicas para obter juntas de elevada performance estão bem estabelecidos, sendo que atualmente os esforços de desenvolvimento de adesivos estão concentrados no custo e tempos de produção (de fabrico e de montagem da junta), na melhoria ambiental e na aplicação a novos substratos, tais como os plásticos de engenharia, compósitos e cerâmicos[1].

2.1.1.3 Aplicações

Atualmente, os adesivos são usados numa grande variedade de indústrias, entre as quais se destacam a indústria automóvel, têxtil, construção civil, aeronáutica, marítima e mobiliária.

Devido à variedade de aplicações dos adesivos, foram desenvolvidos vários tipos de adesivos, que são posteriormente apresentados, e existem vários fabricantes dedicados ao desenvolvimento e ao comércio deste produto.

Na indústria automóvel o uso das ligações adesivas está relacionado com a necessidade de reduzir o peso do automóvel de modo a baixar o consumo e aumentar as velocidades. Devido a isso torna-se necessário recorrer ao uso de materiais leves, como o alumínio ou os plásticos reforçados com fibras, que são mais difíceis de ligar com os métodos tradicionais. Na Figura 2 pode ver-se um Lotus Elise, carro que devido ao uso de ligações adesivas e de materiais leves consegue um peso reduzido. Outros meios de transporte, como os comboios, autocarros ou camiões, também estão a recorrer ao uso de materiais leves, necessitando desse modo de recorrer às ligações adesivas[2].

Na Figura 2 pode ver-se um Lotus Elise, carro que devido ao uso de ligações adesivas e de materiais leves consegue um peso reduzido.



Figura 2 - Lotus Elise [3]

Por razões similares às da indústria automóvel, na indústria aeronáutica e na indústria marítima também se recorre a ligações adesivas.

Na construção civil, uma das aplicações onde se pode recorrer aos adesivos é na construção de pontes, em que estes podem substituir os métodos de ligação tradicionais[2].

Na indústria têxtil, os adesivos podem ser usados em vestuário desportivo devido à maior necessidade de respirabilidade e proteção impermeável. Também podem ser usados no fabrico de vestuário para aplicações especiais como, por exemplo, vestuário dos bombeiros ou vestuário medicinal.

Também na indústria têxtil, mas dedicada à indústria automóvel, o uso de adesivos ajuda a conferir atratividade e superfícies têxteis macias [4].



Figura 3- Interior de um veículo em que nas superfícies têxteis recorrem a adesivos para a montagem [5]

Na indústria marítima, os adesivos são utilizados devido às juntas serem sujeitas a diversos esforços e necessitarem de possuírem boa resistência e de serem impermeáveis [6].

2.1.1.4 Vantagens e desvantagens

A utilização de juntas adesivas em detrimento de métodos clássicos, como a rebiteagem, soldadura ou aparafusamento, apresenta certas vantagens que lhe conferem uma grande importância no momento em que se escolhe o método de ligação mais indicado. As vantagens das juntas adesivas são as seguintes[1]:

- Apresentam uma distribuição mais uniforme das tensões, o que permite uma maior rigidez e transmissão de carga. Este facto possibilita uma redução de peso e, conseqüentemente, um menor custo;
- As tensões são parcialmente absorvidas, melhorando assim a resistência à fadiga dos elementos ligados, devido ao amortecimento de vibrações;
- Permite que sejam ligados materiais diferentes em composição e com distintos coeficientes de expansão térmica, devido ao facto de a flexibilidade do adesivo poder compensar diferentes expansões;
- Permite uma ligação de chapas eficiente, o que constitui uma aplicação importante dos adesivos para ligar materiais metálicos e não metálicos (devido aos adesivos poliméricos apresentarem resistências mecânicas baixas não permitem ligar grandes blocos com elevada resistência);
- Possibilidade de automatização, dado que a mistura e a aplicação dos adesivos podem ser realizadas com recurso a um robot;
- Permite o uso de novos conceitos (como as estruturas em ninho de abelha) e de novos materiais (como compósitos), tornando assim o projeto mais flexível;
- Evitam furos, provocados por rebites ou parafusos, e marcas de soldadura, permitindo desse modo ter estruturas com contornos regulares;
- Criam um contacto contínuo entre as superfícies ligadas;
- Projetos que recorrem a ligações adesivas tendem a ser mais ligeiros e mais económicos, podendo permitir uma redução de custos.

Porém, para além das vantagens inerentes à utilização de adesivos, também existem desvantagens que podem desaconselhar ou impedir a sua utilização. As principais desvantagens inerentes à utilização de ligações adesivas são as seguintes:

- É necessário que se procure eliminar ao máximo as forças de arrancamento, clivagem e impacto. Quando um dos materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento e quando os 2 materiais a ligar (substratos) são rígidos a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem.
- É necessário procurar que o adesivo esteja maioritariamente sujeito a tensões de corte, pois neste caso as tensões são paralelas à ligação adesiva e estão melhor distribuídas. Para este efeito, é importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e assegurem uma distribuição uniforme das tensões. Deve-se procurar que o adesivo esteja sujeito a esforços de corte, pois de outra forma podem surgir forças de arrancamento ou de clivagem;
- As ligações adesivas apresentam limitada resistência a condições extremas, como o calor e a humidade;

- Necessidade de utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição devido ao facto de a ligação não ser, normalmente, realizada instantaneamente;
- Necessidade de uma cuidada preparação da superfície de modo a obter uma boa ligação;
- Os adesivos são frequentemente curados a temperaturas elevadas (forno, prensa, etc);
- Dificuldade do controlo de qualidade e segurança, embora recentemente tenham sido desenvolvidas técnicas não destrutivas adequadas;
- Não existe um critério de dimensionamento universal que permita projetar qualquer estrutura, sendo que existem muitos que funcionam bem apenas em determinadas situações.

2.1.1.5 Propriedades

2.1.1.5.1 Propriedades Térmicas

As propriedades dos adesivos são de extrema importância para a selecção de um adesivo para uma determinada aplicação. Pelo facto de os adesivos se tratarem de polímeros, as suas propriedades térmicas adquirem uma enorme importância para o seu correto funcionamento, uma vez que as propriedades podem apresentar uma enorme variação numa gama de temperaturas pequena [1, 2, 7].

De entre as propriedades térmicas, apresentam especial importância a temperatura de transição vítrea, a temperatura de fusão, a temperatura de decomposição, o coeficiente de expansão térmica e a máxima temperatura de serviço.

2.1.1.5.1.1 Temperatura de transição vítrea

A temperatura de transição vítrea (T_g) é uma temperatura da fase amorfa (enquanto a temperatura de fusão é uma propriedade da fase cristalina) que está relacionada com a mobilidade molecular. Para temperaturas inferiores a T_g não existe movimento dos átomos que constituem o polímero enquanto para temperaturas superiores a T_g esse movimento pode ocorrer, originando flexibilidade no polímero. Na Tabela 1 encontram-se os valores aproximados da T_g para vários tipos de adesivos [2].

2.1.1.5.1.2 Temperatura de fusão

A temperatura de fusão é a temperatura a que ocorre a mudança do estado sólido para o estado líquido. Nos polímeros que são parcialmente cristalinos a temperatura de fusão é bem definida, enquanto que nos adesivos amorfos, como os epóxidos e os fenólicos, esta propriedade tem pouca importância [2].

Tabela 1- Valores aproximados de T_g para vários tipos de adesivos [2]

Adesivo	T_g (°C)
Epóxido Modificado	50-150
Epóxido-fenólico	200
Epóxido-nylon	50
Epóxido-polisulfito	50
Epóxido vinilo	50
Nitrilo-fenólico	120
Vinilo-fenólico	70
Neopreno-fenólico	70
Bismaleimida	210-280
Poliimida	340-430
Poliuretanos	20-50
Anaérobico	120
Cianocrilatos	80
Acrílicos modificados	60-120

2.1.1.5.1.3 Temperatura de decomposição

Os polímeros degradam-se quimicamente se a temperatura for suficientemente elevada, e o oxigénio na atmosfera acelera o processo. Os produtos resultantes da degradação podem incluir voláteis e resíduos carbonados que, no entanto, podem permitir à junta resistir a uma carga por um tempo suficiente à sua aplicação, sendo que essa carga é inferior à resistência inicial da junta. Algumas aplicações militares, como é o caso de projéteis, dependem da capacidade dos adesivos manterem as suas propriedades durante a sua utilização (que é sujeita a variações de temperatura) para completar a sua missão. À luz destas mudanças profundas que ocorrem nos polímeros utilizados como adesivos estruturais são esperadas alterações substanciais nas propriedades mecânicas tais como o módulo, a resistência e o comportamento à fluência com pequenas variações de temperatura [2].

2.1.1.5.1.4 Coeficiente de expansão térmica

O coeficiente de expansão térmica (α) determina como o volume de um objeto muda com a variação de temperatura. Este coeficiente pode ser volumétrico, de área ou linear, sendo que o seu uso depende de cada aplicação e da dimensão a controlar.

O mais usual é o coeficiente de expansão volumétrico, em que as substâncias expandem ou contraem-se em todas as direções com a variação de temperatura.

Nos adesivos estruturais esta propriedade tem uma elevada importância devido ao facto de os adesivos curarem a temperaturas elevadas e a sua utilização ocorrer a

temperaturas consideravelmente mais baixas. Alguns valores dos coeficientes de expansão térmica podem ser observados na Tabela 2 [2, 8].

Tabela 2-Coefficientes de expansão térmica de vários materiais [2]

Material	$\alpha(\times 10^{-6} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1})$	
Alumínio	24	
Aço	12	
Titânio	9	
Fibra de Vidro	6	
Fibra de carbono (axial)	-0.5	
Fibra de carbono (radial)	10	
Compósito unidirecional epóxico/ carbono (ao longo das fibras)	-0.1	
Compósito unidirecional epóxico/ carbono (através das fibras)	30	
	Abaixo de T_g	Acima de T_g
Epóxico DGEBA / dietileno tetramina	60	180
Epóxico DGEBA / 1.2-diaminobenzeno	57	210
Bismaleimida	35	114
Metacrilato de polimetilo	26	53
Cianocrilato	80	
Anaérobico	85	235

Na Tabela 2 pode-se observar que os adesivos têm valores de coeficiente de expansão térmica superiores aos dos substratos, o que origina tensões de origem térmica e que acima de T_g , o coeficiente de expansão térmica é muito maior.

Depois da cura, o adesivo deve ter um módulo e um coeficiente de expansão térmica idêntico ao dos substratos ou ter uma tenacidade suficiente para acomodar as tensões térmicas.

Diferenças na rigidez ou de expansão térmica entre o substrato e o adesivo podem produzir tensões internas, que podem originar uma rotura prematura. Devido a esse facto devem-se usar adesivos rígidos para ligar metais e adesivos mais flexíveis para ligar polímeros [2].

2.1.1.5.1.5 Máxima temperatura de serviço

As temperaturas que os adesivos podem suportar por longos períodos estão normalmente ligadas à T_g dado que os adesivos estruturais devem ser capazes de suportar uma força substancial e por esse motivo não faz sentido usá-los a uma temperatura em que o seu comportamento é semelhante ao da borracha. Apenas alguns epóxido-fenólicos, as bismaleimidas, as poliimidas e o polibenzimidazol podem ser usados por um longo período de tempo acima de 180°C. Muitos epóxidos e alguns cianoacrilatos têm temperaturas máximas de serviço moderadas, à volta de 120°C [2].

2.1.1.5.2 Propriedades mecânicas

Devido ao facto de os adesivos serem utilizados abaixo da sua temperatura de transição vítrea, as propriedades de maior importância são aquelas que os adesivos apresentam no seu estado vítreo.

As propriedades mecânicas de maior importância para o funcionamento do adesivos são: viscoelasticidade, módulo de elasticidade (E), coeficiente de Poisson (ν), tensão de cedência (σ_c), ductilidade e a taxa crítica de libertação de energia (G_c) [2].

2.1.1.5.2.1 Viscoelasticidade

A viscoelasticidade é uma propriedade dos materiais que apresentam simultaneamente características viscosas e elásticas quando sujeitos a deformações. Os materiais viscosos resistem a tensões e deformam-se de modo linear com o tempo quando uma força é aplicada. Os materiais elásticos deformam-se quando sujeitos a esforços e rapidamente voltam ao estado inicial quando o esforço é removido [9].

2.1.1.5.2.2 Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade (E), ou módulo de Young, é uma propriedade mecânica que indica a rigidez de um material sólido. Esta propriedade é um parâmetro muito importante para a engenharia e aplicação de materiais e está associado a outras propriedades como, por exemplo, a tensão de escoamento.

Este módulo é uma propriedade intrínseca ao material, que depende da composição química, microestrutura e defeitos e que pode ser obtida pela razão entre a tensão aplicada e a deformação sofrida [10].

Os adesivos dúcteis e tenazes podem suportar grandes deformações antes que se inicie a sua fratura, e devido a isso, a relação entre a tensão e a deformação é não linear, como mostrado na Figura 4 [2].

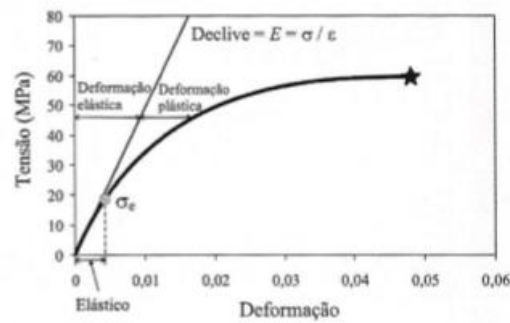


Figura 4 - Curva de tração tensão-deformação de um adesivo dúctil [2]

2.1.1.5.2.3 Coeficiente de Poisson

Como os adesivos são considerados materiais isotrópicos, o Módulo de elasticidade longitudinal está relacionado com o módulo de elasticidade transversal (G) e com o coeficiente de Poisson (ν) de acordo com a seguinte equação

$$G = \frac{E}{2(1+\nu)} \quad (1)$$

Para os polímeros, ν varia entre os extremos 0,3 e 0,5 [2].

2.1.1.5.2.4 Tensão de Cedência

Ao contrário dos metais, que têm uma tensão de cedência semelhante à tração e à compressão, os adesivos têm uma resistência à compressão superior à resistência à tração, sendo que normalmente a relação entre a tensão de cedência à compressão e a tensão de cedência à tração varia entre 1,2 e 1,7. Devido a esse facto, não é possível aplicar os métodos convencionais desenvolvidos na teoria da elasticidade para metais, como os de Tresca e Von Mises [2].

O critério de Von Mises estabelece que as tensões de cedência à tração (σ_{yt}), compressão (σ_{yc}) e corte (t_y) se relacionam da seguinte forma:

$$\sigma_{yt} = \sigma_{yc} \quad (2)$$

$$t_y = \frac{\sigma_{yt}}{\sqrt{3}} \quad (3)$$

No entanto, verificou-se que os valores experimentais não são bem aproximados pelo modelo. Se for usado um modelo que contempla a componente hidrostática [11] obtém-se uma melhor concordância com os resultados experimentais [12].

$$\sigma_{yc} = \lambda \sigma_{yt} \quad (4)$$

$$t_y = \frac{\sigma_{yt}}{\sqrt{3}} \frac{2\lambda}{(\lambda+1)} \quad (5)$$

Em que λ representa a relação entre a tensão de cedência à compressão e a tensão de cedência à tração.

2.1.1.5.2.5 Ductilidade

Nos adesivos, a ductilidade é muito difícil de quantificar pois depende de diversos fatores como o tipo de ensaio utilizado e a quantidade de defeitos existentes, como por exemplo, poros ou micro-fendas.

Geralmente, os adesivos são mais dúcteis quando ensaiados ao corte. Uma possível explicação é o facto de o adesivo ser mais sensível a defeitos quando ensaiado à tração onde uma concentração de tensões pode provocar uma rotura prematura do adesivo. Quando ensaiado ao corte o adesivo é capaz de se deformar plasticamente, mesmo quando tem porosidades ou outros defeitos [2].

2.1.1.5.2.6 Fratura frágil

A teoria da rotura frágil na formação e na propagação de fendas aplica-se a polímeros e a metais, sendo que nos polímeros é de extrema importância.

A energia requerida para propagar a fenda é designada por taxa crítica de libertação de energia (G_c), e é uma característica do material. Esta taxa pode ser dividida consoante o modo rotura obtido. Se a fenda se propagar devido à ação de uma força trativa (Modo I) então designa-se como taxa de libertação de energia à tração (G_{IC}) enquanto se for devida à ação de um esforço de corte (Modo II e III) designa-se como taxa de libertação de energia ao corte (G_{IIC}). Nas juntas adesivas, ao contrário do que acontece nos materiais homogéneos, a análise da propagação da fratura é difícil de efetuar devido ao fato de a fenda se propagar perto de duas interfaces, o que cria descontinuidades no material [2].

2.1.1.6 Fases para se obter uma junta adesiva

Para se efetuar uma ligação adesiva eficiente é necessário seguir diversas etapas:

- Seleção do adesivo;
- Projeto da junta;
- Preparação da superfície;
- Fabrico da junta;
- Controlo do processo.

A seleção do adesivo deve obedecer a um conjunto de critérios definidos pela aplicação em vista. Geralmente os parâmetros mais importantes são a resistência mecânica, a temperatura de serviço, o meio ambiente e o método de aplicação. O conhecimento das propriedades do adesivo permite projetar a junta para garantir que o nível de tensão no

adesivo não excede a sua resistência. É necessário recorrer a métodos de dimensionamento que têm em conta a resistência mecânica estática e, eventualmente, a resistência à fadiga e à fluência.

Conhecendo o tipo de adesivo e substrato a ligar, convém preparar a superfície de modo a garantir uma boa adesão inicial e, posteriormente, em serviço.

O fabrico da junta envolve a aplicação do adesivo sobre os substratos a colar e a cura do adesivo sob determinadas condições de temperatura e pressão. Uma vez que o adesivo é aplicado no estado líquido, é necessário garantir que os substratos a ligar estão bem fixos.

Finalmente, para garantir que a junta fabricada tem uma resistência satisfatória a curto e longo prazo, as juntas devem ser sujeitas a um processo de controlo através de ensaios destrutivos e não destrutivos [1, 2].

2.1.2 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

2.1.2.1 Tipos de esforços

Os esforços a que uma junta adesiva pode estar sujeita podem ser divididos em quatro tipos, sendo que estes podem ser combinados ou estarem presentes individualmente [1]. Os 4 tipos de esforços que uma junta adesiva pode estar sujeita são:

- Tração e compressão
- Corte
- Clivagem
- Arrancamento

2.1.2.1.1 Tração e compressão

Os esforços de tração e compressão ocorrem quando existe uma força, uniformemente distribuída pela área ligada, perpendicular ao plano da junta (Figura 5).

Quando sujeito a tração, o adesivo desenvolve regiões de elevado esforço nas extremidades da ligação, sendo que essas áreas suportam uma maior tensão do que a zona central[1].

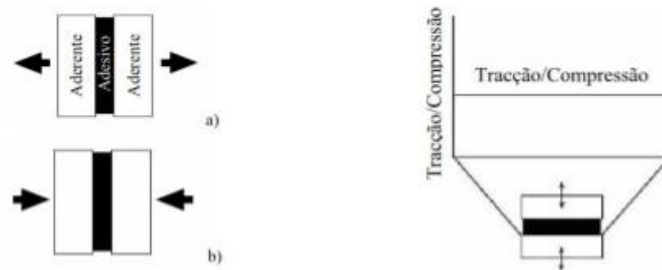


Figura 5- Esforço de tração (a) e compressão (b) e correspondente distribuição da tensão [13]

Quando sujeito a tração, o início da fenda ocorre na área que estiver sujeita a picos de tensão, uma vez que apesar de teoricamente a distribuição de tensões ser uniforme podem existir picos de tensão devido a clivagem ou arrancamento nas extremidade da zona de sobreposição que levam à criação de fendas que se propagam rapidamente levando à rotura da junta [13].

Para prevenir a rotura por tração é necessário ter em atenção o design da junta de modo a distribuir as tensões o mais uniformemente possível. Um design adequado requer que as superfícies dos substratos sejam paralelas (espessura do adesivo constante) e que a carga seja axial. No entanto, a espessura é de difícil controlo e as cargas raramente são axiais, pelo que tendem a desenvolver-se esforços de clivagem ou arrancamento.

Quando sujeita a cargas de compressão, ao contrário das de tração, é pouco provável que a junta adesiva falhe, sendo que é importante manter as cargas alinhadas de modo a assegurar compressão pura. Quando a junta não está sujeita a compressão pura, pode ocorrer o aparecimento de fendas nos pontos fracos da ligação.

Na realidade, quando a junta adesiva está sujeita a compressão, dificilmente necessita de uma adesão de qualquer tipo dado que quando a força de compressão é suficientemente elevada e não existe movimento das partes, essas partes irão manter-se na mesma posição relativa entre elas, a não ser que o adesivo falhe coesivamente [1].

2.1.2.1.2 Corte

As tensões de corte ocorrem quando são aplicados esforços paralelos ao plano do adesivo de modo a tentar separar os substratos (Figura 6) [1].

De um modo geral, as juntas adesivas são mais resistentes quando sujeitas ao corte uma vez que toda a área de sobreposição contribui para a resistência da junta.

Devido ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição (cada substrato deforma-se longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da ligação), as tensões de corte atingem os valores máximos nas extremidade da junta e valores mínimos no meio da junta [14, 15].

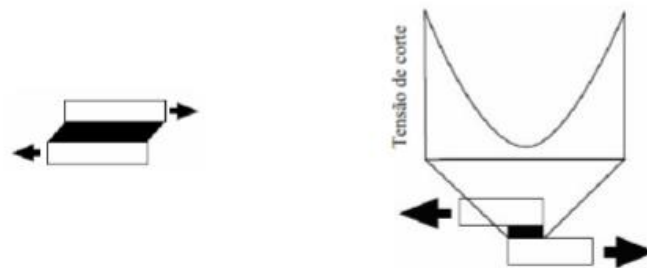


Figura 6-Esforço de corte e distribuição da tensão de corte[13]

2.1.2.1.3 Clivagem e arrancamento

Os esforços de clivagem e de arrancamento não são desejados nas ligações adesivas.

A clivagem é definida como a tensão que ocorre quando forças atuam numa extremidade de uma ligação adesiva rígida tentando separar os aderentes.

O arrancamento é similar à clivagem, tendo a diferença de ocorrer quando um ou ambos os aderentes são flexíveis.

Apesar das semelhanças, o ângulo de separação (entre os substratos) pode ser muito superior no arrancamento do que na clivagem. As juntas sujeitas a arrancamento ou a clivagem oferecem uma menor resistência quando comparadas com as juntas sujeitas a esforços de corte, devido ao facto de as tensões serem concentradas numa menor área. Devido a esse facto este tipo de esforços não são desejados nas ligações adesivas[1].

2.1.2.2 Modos de rotura

A finalidade de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre os dois componentes ligados, mantendo a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e/ou dinâmicas e condições ambientais (humidade e temperatura) adversas. Quando sob o efeito das solicitações ou das condições ambientais a integridade da junta adesiva é afetada pode ocorrer a rotura da ligação, sendo que o modo de rotura da ligação adesiva pode ser classificado como:

- Rotura adesiva;
- Rotura coesiva;
- Rotura mista;
- Rotura do aderente.

Normalmente, pretende-se que a rotura (quando ocorre) seja coesiva, pois desse modo atingiu-se a resistência máxima do material. No entanto, o modo de rotura não deve ser usado como único critério numa ligação adesiva pois não garante que a junta seja prática ou económica nem que cumpra com o tempo de vida expectável.

A rotura adesiva ocorre na interface entre um dos aderentes e o adesivo e após a rotura a superfície de um dos aderentes não apresenta vestígios do adesivo e a superfície do outro aderente encontra-se coberta de adesivo. A principal causa da rotura adesiva é uma preparação inadequada da superfície dos substratos [16-19].

Quando a resistência do adesivo é inferior à resistência entre o adesivo e o aderente, a rotura ocorre no adesivo é classificada como rotura coesiva. Este modo de rotura é identificado pelo fato de permanecer uma camada de adesivo em cada um dos substratos [16, 17].

A rotura mista resulta da combinação da rotura adesiva e da rotura coesiva, e pode ocorrer devido a uma limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou mesmo à mistura não uniforme próprio adesivo [16, 17].

A rotura do aderente ocorre quando a resistência do aderente é menor do que a resistência do adesivo [16, 17]. [20][20][20][20][20][20][20][20][20][20][20][20][20][20][20]

2.1.3 Configurações possíveis de junta

Existem várias configurações possíveis para juntas adesivas, sendo as mais comuns as seguinte [13]:

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

Na Figura 7 estão ilustrados os vários tipos de junta.

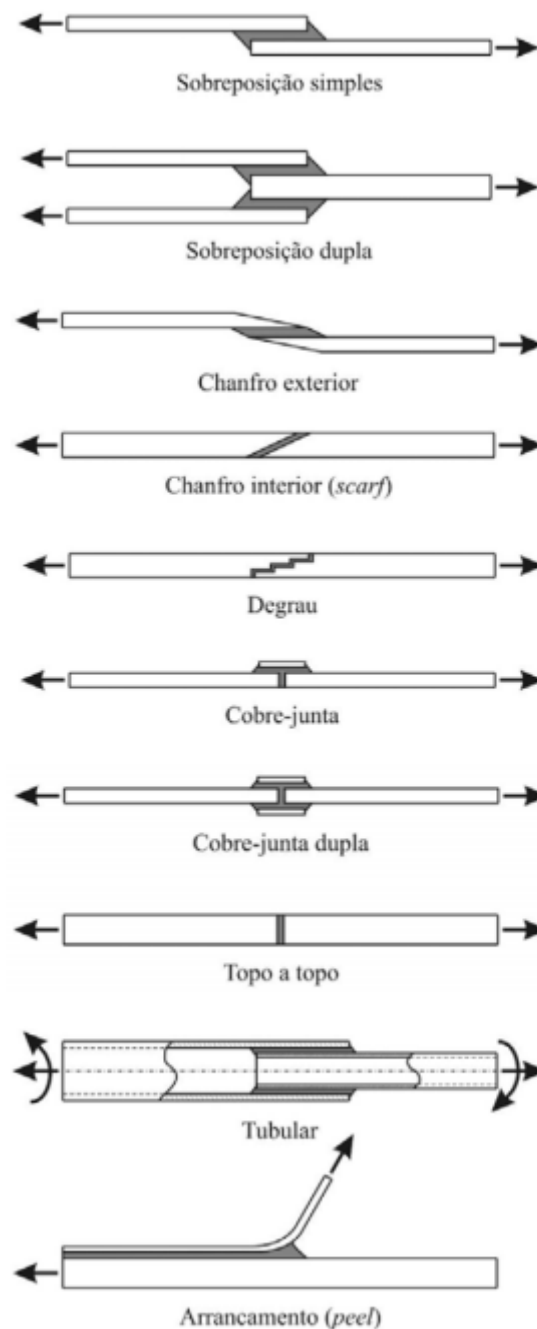


Figura 7 - Tipos de juntas adesivas [13]

2.1.3.1 Junta de sobreposição simples

As juntas de sobreposição simples são as mais utilizadas devido a serem fáceis de fabricar, poderem ser aplicadas a aderentes finos e os adesivos estarem sujeitos maioritariamente a esforços de corte. No entanto, tem como inconveniente o fato de os esforços não estarem alinhados, o que provoca a flexão dos substratos e cria esforços de

arrancamento nas extremidades da ligação (devido a tensões normais na direção da espessura do adesivo). A existência das tensões de arrancamento provoca uma diminuição da eficiência da junta, e podem ser minimizadas utilizando uma junta de sobreposição dupla [1, 2, 13].

2.1.3.2 Junta de sobreposição dupla

A junta de sobreposição dupla é mais difícil de fabricar do que a junta de sobreposição simples. Tem como vantagem o facto de possuir uma configuração simétrica e desse modo não criar esforços de flexão nos aderentes [1, 2].

2.1.3.3 Junta com chanfro exterior

A junta com chanfro exterior é mais eficiente do que a de sobreposição simples devido ao facto de as extremidades com chanfro dos aderentes permitirem a sua deformação durante o esforço, o que reduz os esforços de arrancamento nas extremidades da ligação [1, 2].

2.1.3.4 Junta Topo a topo

As juntas topo a topo são as mais fáceis de fabricar, no entanto este tipo de juntas não suporta esforços de flexão pois o adesivo iria estar sujeito a forças de arrancamento. Este tipo de juntas pode ser modificado de modo a reduzir os esforços de arrancamento no adesivo, dando origem a outros tipos de junta como a junta em degrau ou como a junta com chanfro interior [1, 13].

2.1.3.5 Junta em degrau e junta com chanfro interior

As juntas em degraus e as juntas com chanfro interior produzem uma diminuição da variação das tensões ao longo do adesivo e da excentricidade dos esforços, o que provoca um aumento da sua resistência. No entanto, o facto de ter de se maquinar os degraus ou o chanfro aumenta o custo do fabrico dos aderentes, quando os aderentes são metálicos. Quando estes são feitos em materiais compósitos é possível obter a forma pretendida aquando do seu fabrico (através de empilhamento anterior ao processo de cura) [1].

2.1.3.6 Cobre-junta

As cobre-juntas mantêm os esforços alinhados e são geralmente usadas quando não é possível o uso das juntas de sobreposição devido à espessura dos aderentes. À semelhança das juntas de sobreposição, a cobre junta simples está sujeita a tensões de arrancamento quando sujeita a esforços de flexão. Quando se espera que ocorram esforços de flexão a cobre junta dupla é mais aconselhada [1, 2].

2.1.3.7 Junta tubular

A junta tubular, ou cilíndrica, consiste na união de tubos e pode ter a extremidade lisa ou em chanfro. Apresenta boa resistência a esforços de tração e de compressão, mas é importante existir um alinhamento relativo ao eixo de revolução para não existirem esforços de arrancamento. Para esse efeito normalmente utilizam-se chanfros, canais e ressaltos, que permitem uma inserção das peças mais fácil e aumentam a área de contacto[1].

2.1.3.8 Juntas de arrancamento

As juntas de arrancamento são utilizadas quando um dos substratos é flexível e o outro rígido. Neste caso, o mais usual é que o adesivo esteja sujeito a esforços de arrancamento. A aplicação mais usual deste tipo de juntas é a ligação por fita-cola [1].

2.1.4 Adesivos estruturais

Para um adesivo ser considerado estrutural este necessita de possuir a capacidade de resistir a forças substanciais e de ser responsável pela resistência e rigidez da estrutura, sendo que tem de possuir no mínimo uma resistência de 7 MPa ao corte e possuir uma boa resistência ao meio ambiente [1, 2].

Os adesivos não estruturais apresentam uma resistência inferior e são normalmente utilizados para efetuar ligações temporárias ou para aplicações sujeitas a menores esforços [1].

Os adesivos estruturais têm uma composição que lhes permite serem normalmente usados em aplicações de elevado esforços ao longo do tempo.

Os adesivos podem ser classificados de acordo com a sua composição química, sendo que podem ser divididos nos seguintes grupos:

- Epóxidos;
- Fenólicos;
- Poliaromáticos;
- Poliuretanos;
- Acrílicos.

2.1.4.1 Epóxidos

Os adesivos epóxidos são o grupo de adesivos mais versátil devido ao facto de aderirem bem a um elevado numero de substratos e de poderem ser modificados para atingirem

as propriedades desejadas, através do uso de aditivos ou combinação de diferentes tipos de resinas.

Os adesivos epóxicos apresentam uma boa adesão à maioria dos substratos, uma excelente resistência a esforços de tração e de corte e uma excelente resistência a óleos e outros solventes. Também apresentam uma reduzida variação de dimensões durante o processo de cura e uma alta resistência à fratura quando sujeito a esforços prolongados. Têm como inconveniente o facto de apresentarem uma reduzida resistência a esforços de clivagem.

Os adesivos epóxicos são compostos por uma resina epóxida e por um agente de cura, sendo que este pode ser incorporado na resina para se obter um adesivo de um único componente ou pode ser fornecido num recipiente separado e a sua união ser feita antes da aplicação do adesivo. Este tipo de adesivos está disponível comercialmente na forma de líquidos, pastas e sólidos.

De forma a se obter determinadas propriedades, pode ser adicionada uma variedade de polímeros, sendo os mais comuns as resinas fenólicas, nitrílicas, polisulfitos e nylon.

Os adesivos epóxido-fenólicos são obtidos através da mistura de resinas fenólicas com resina epóxido de modo a melhorar as características apresentadas a altas temperaturas. Os adesivos epóxicos apresentam uma boa resistência ao meio ambiente, a óleos e a solventes. Também apresentam uma reduzida resistência ao impacto, a esforços de arrancamento e a choques térmicos.

Os adesivos epóxido-fenólicos foram inicialmente desenvolvidos para juntas metálicas em aplicações de elevada temperatura, e foram dos primeiros adesivos otimizados para aplicações aeronáuticas. Também são largamente usados para ligar vidros, cerâmicos e materiais compostos com base fenólica.

Os adesivos epóxido-nylon foram os primeiros adesivos estruturais desenvolvidos especificamente para terem excelente resistência ao corte e ao arrancamento, sendo que estas características foram obtidas através do uso das resinas poliamidas (nylon) como molificantes da resina epóxido. Estes adesivos apresentam uma boa resistência ao impacto e à fadiga.

Os adesivos epóxido-polisulfitos apresentam alta flexibilidade e resistência química, têm uma boa resistência a esforços de arrancamento e bom comportamento a baixas temperaturas. No entanto, apresentam reduzida resistência a esforços de corte e não devem ser usados a altas temperaturas. Eles são geralmente utilizados para ligar betão em chãos e estradas, colagem de vidros ou cerâmica, e colagem de borracha a metais [1, 2].

2.1.4.2 Fenólicos

As resinas fenólicas são o produto da condensação do fenol com o formaldeído. Devido a apresentarem boa resistência ao calor e boa estabilidade dimensional, têm sido usados em calços de travão, discos abrasivos, lixas e moldes de fundição.

As suas características podem ser modificadas através da combinação com outras resinas. Os fenólicos híbridos mais comuns são vinilo-fenólico, nitrilo-fenólico e neopreno-fenólico [2].

Os adesivos vinilo-fenólicos são um dos tipos de adesivos estruturais mais utilizados para ligações metálicas, devido a apresentarem uma excelente resistência ao corte e ao arrancamento. Também possuem uma resistência ao impacto e resistência química excelentes. No entanto, este tipo de adesivos tem uma temperatura máxima de operação de 93°C devido aos seus constituintes termoplásticos não suportarem temperaturas elevadas. São normalmente usados para unir metais, plásticos e borrachas a eles próprios ou entre eles, sendo que uma das suas principais aplicações é efetuar a ligação de folhas de cobre ao laminado de plástico no fabrico de placas de circuitos.

Nos adesivos nitrilo-fenólicos, o objetivo de incorporar o nitrilo na resina fenólica é melhorar a resistência ao arrancamento sem prejudicar a sua resistência a altas temperaturas. Este tipo de adesivos apresenta uma elevada resistência ao impacto e uma elevada capacidade de uso em aplicações que possuam uma temperatura de serviço elevada.

Os adesivos neopreno-fenólicos permitem a ligação de vários substratos e têm uma temperatura de serviço entre -55°C e 93°C. Devido a possuírem uma elevada resistência à fluência podem suportar esforços prolongados. Também possuem uma excelente resistência ao impacto e à fadiga. No entanto, comparado com os outros tipos de fenólicos modificados apresentam uma resistência ao corte inferior [1].

2.1.4.3 Poliaromáticos de alta temperatura

Este tipo de adesivos apresenta uma elevada capacidade de utilização a elevadas temperaturas pelo facto de usar como resinas as poliimidas, as bismaleimidas e as resinas de polibenzimidazol, entre outras resinas de alta temperatura, que apresentam uma excecional resistência térmica.

Os adesivos poliaromáticos foram desenvolvidos para aplicações de alta temperatura na aeronáutica, mas têm um uso limitado devido ao elevado custo e a dificuldades de processamento.

As poliimidas foram desenvolvidas principalmente pela NASA para a indústria aeroespacial e possuem uma temperatura de transição vítrea pelo menos 100°C acima da dos epóxidos e que lhes permite serem utilizadas a temperaturas mais altas. No entanto, têm como desvantagens o seu elevado custo e necessitarem de temperaturas elevadas para a cura.

As resinas bismaleimidadas são usadas na fabricação de painéis de circuitos electrónicos e em aplicações que necessitem de uma resistência à temperatura mais elevada do que a permitida pelos epóxidos, mas onde a resistência às temperaturas extremas, característica das poliimidadas, não é necessária. Este tipo de adesivos é adequado para exposições longas até 200°C e exposições curtas entre os 200 e os 230°C. No entanto, estes adesivos são muito rígidos, o que provoca um mau comportamento ao arrancamento.

O polibenzimidazol foi desenvolvido inicialmente nos anos 1960s na indústria aeroespacial e são o único tipo de adesivos que apresenta um bom comportamento desde temperaturas criogénicas até altas temperaturas. Devido ao seu difícil processamento, o polibenzimidazol é apenas usado em aplicações especiais e o seu uso comercial é limitado, sendo que as poliimidadas e as bismaleimidadas substituíram o polibenzimidazol na maioria das aplicações para altas temperaturas [1, 2].

2.1.4.4 Poliuretanos

Os adesivos poliuretanos são flexíveis e têm uma alta resistência a esforços de corte e de arrancamento, têm boa tenacidade e comparativamente com outros adesivos apresentam melhor resistência a temperaturas baixas. Estes adesivos não possuem boa resistência a altas temperaturas, e alguns degradam-se consideravelmente quando expostos a altos níveis de humidade. A temperatura máxima de serviço deste tipo de adesivos é de cerca de 150°C sendo a maioria usados a temperaturas abaixo dos 120°C.

Estes adesivos são largamente usados na indústria automóvel pois têm boas propriedades de adesão com painéis moldados por SMC (*Sheet Molding Compound*) e polímeros de uretano moldados por injeção RIM (*Reaction Injection Molding*) e, devido à sua flexibilidade, são muito usados para ligar filmes, folhas metálicas e elastómeros.

Para além destas aplicações, os adesivos poliuretano aderem excepcionalmente bem a substratos de madeira [2].

2.1.4.5 Acrílicos

Os adesivos acrílicos podem ser divididos nos seguintes tipos:

- Anaérobicos;
- Cianoacrilatos;
- Acrílicos modificados.

2.1.4.5.1 Anaérobicos

Estes adesivos são baseados no monómero acrilato e são essencialmente líquidos finos monoméricos que polimerizam para formar uma ligação tenaz quando ligam 2

substratos metálicos. Estes adesivos podem ligar todos os metais comuns, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis.

As principais aplicações destes adesivos é como travão líquido de porca para parafusos (*liquid lock washers*) e vedação de flanges [2].

2.1.4.5.2 Cianocrilatos

Os cianoacrilatos tornaram-se muito conhecidos após a sua introdução no mercado no início dos anos 70 com a designação de 'supercola'. Estes adesivos são líquidos de um só componente e têm uma cura rápida, excelente resistência ao corte e uma boa *shelf life* (podem ser armazenados durante um longo período antes do uso).

Os cianoacrilatos têm normalmente uma baixa resistência ao calor e à humidade, e a sua resistência ao arrancamento e ao impacto também são baixas. A sua aplicação restringe-se aos casos onde o meio ambiente não é muito severo e é fundamental ter uma ligação rápida de executar [2].

2.1.4.5.3 Acrílicos modificados

Os acrílicos modificados são sistemas termoendurecíveis de duas partes que possuem uma elevada resistência ao corte.

Estes adesivos são relativamente rígidos, mesmo com a adição de modificadores elastoméricos, e a baixas temperaturas possuem baixa resistência ao arrancamento e têm um mau comportamento em geral.

Estes adesivos possuem uma resistência mecânica alta (20-35 MPa) e uma cura rápida, sendo estas duas razões pelo que estes adesivos são utilizados em operações altamente automatizadas. Entre os -100°C e os 120°C , os acrílicos modificados têm uma boa resistência ao arrancamento, ao impacto e ao corte [2].

2.2 Ensaio para a determinação da tenacidade à fratura

A mecânica da fratura assume que a estrutura não está isenta de defeitos, que podem ter sido causados pelo processo de fabrico ou por acidentes durante o funcionamento. Devido a isso, a mecânica da fratura tem como objetivo avaliar o comportamento do material à rotura (o aparecimento e propagação de uma fenda).

Os princípios básicos da mecânica da fratura devem-se ao trabalho de Griffith (1920), que concluiu que todos os corpos possuem uma distribuição de defeitos e que a fratura ocorrerá pelo mais crítico [2].

Griffith estabeleceu que a propagação ocorrerá quando a energia disponível na extremidade da fenda (G - Taxa de libertação de energia) devido aos esforços aplicados

igualar a energia necessária à propagação da fenda (G_c - Taxa crítica de libertação de energia).

A taxa de libertação de energia é obtida a através da seguinte equação

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA}. \quad (6)$$

Nesta equação o parâmetro W é definido como o trabalho realizado pelas forças exteriores, o parâmetro U é a energia de deformação interna do sólido e dA a variação do comprimento da fenda [2].

Para analisar a fratura, alguns critérios são baseados no fator intensidade de tensão, que representa as tensões na vizinhança da extremidade da fenda

$$K = Y\sigma_R\sqrt{\pi a}. \quad (7)$$

Na equação anterior, Y representa um fator adimensional dependente da geometria e distribuição de carga, σ_R representa a tensão remota aplicada e a o comprimento de fenda. Quando a tensão atinge o seu valor crítico σ_u obtém-se a tenacidade à fratura

$$K_c = Y\sigma_u\sqrt{\pi a}. \quad (8)$$

Os 2 parametros possíveis para caracterizar a tenacidade à fratura (a taxa de libertação de energia e o factor intensidade de tensão) estão relacionados entre si pelas seguintes equações, determinadas por Irwin(1957), para estado plano de tensão e estado plano de deformação.

Para o plano de tensões apresenta a seguinte forma:

$$G = \frac{K^2}{E} \quad (9)$$

E para o plano de deformações apresenta a seguinte forma:

$$G = \frac{K^2(1 - \nu^2)}{E} \quad (10)$$

Uma fenda pode propagar-se em 3 modos, sendo que modo I representa o modo de abertura e os modos II e III representa os modos de corte. Os modos II e III diferem no facto em que no modo II as superfícies de fenda têm movimento relativo perpendicular à frente da fenda, enquanto no modo III esse movimento é paralelo à frente da fenda. Os diferentes modos estão representados na Figura 8 [2].

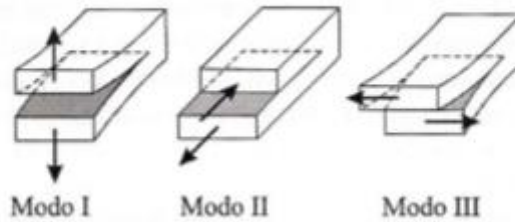


Figura 8 - Modos de rotura de uma junta adesiva [2]

Assumindo que $G_C = G_{IC} + G_{IIC} + G_{IIIC}$ as relações entre G_C e K_C para um material isotrópico, como é o caso dos adesivos, escreve-se para o estado plano de tensão:

$$G_C = \frac{1}{E} K_{IC}^2 + \frac{1}{E} K_{IIC}^2 + \frac{1 + \nu}{E} K_{IIIC}^2. \quad (11)$$

Para o estado plano de deformação escreve-se:

$$G_C = \frac{(1 - \nu^2)}{E} K_{IC}^2 + \frac{(1 - \nu^2)}{E} K_{IIC}^2 + \frac{1 + \nu}{E} K_{IIIC}^2. \quad (12)$$

Para as juntas coladas, o uso das taxas de libertação de energia em relação aos fatores de intensidade de tensão tem a vantagem de representar diretamente a capacidade de absorção de energia. Para além disso, o valor de K não é facilmente calculável [2].

No entanto, a aplicação das taxas de libertação de energia apresenta algumas dificuldades, nomeadamente quando a propagação de fendas ocorre em modo misto e o facto de as taxas dependerem da espessura do adesivo. Normalmente, a propagação de uma fenda em materiais homogéneos e isotrópicos tende a ser efetuada em modo I, independentemente da direção da fenda original, mas pelo facto de estar restringida pelos aderentes na maioria dos casos a propagação ocorre em modo misto (I+II) [2].

Nestas situações torna-se fundamental o uso de critérios energéticos adequados que na maioria dos casos adotam a seguinte forma

$$\left(\frac{G_I}{G_{IC}}\right)^A + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIC}}\right)^A = 1. \quad (13)$$

Para analisar o comportamento da propagação de fendas nos diferentes modos existem vários ensaios que simulam as condições de utilização dos adesivos e permitem obter os valores da taxa de libertação de energia para modo [2].

Uma das ferramentas para se analisar a taxa de libertação de energia é o envelope de fratura. O envelope de fratura pode ser determinado recorrendo a testes de fratura em vários modos de mixicidade. Na Figura 9 pode-se observar um exemplo do envelope de fratura resultante de vários ensaios [21].

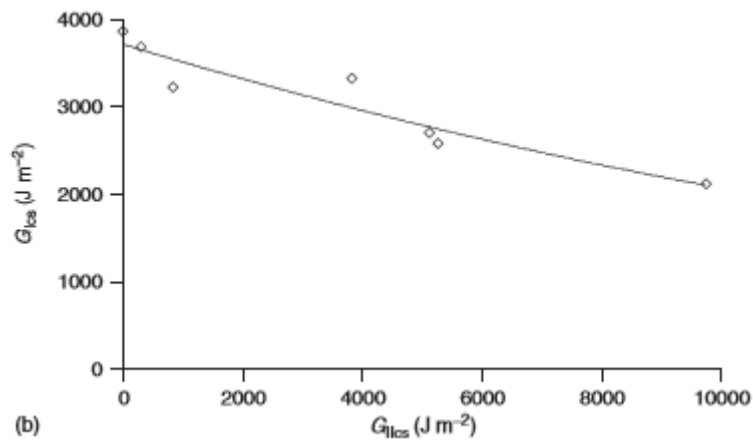


Figura 9- Exemplo de um envelope de fratura [21]

Outra das ferramentas que se obtém após uma análise dos ensaios de fratura é a curva de resistência (curva R), que representa a evolução da taxa de libertação de energia à medida que a fenda se propaga. A partir do momento em a fratura se inicia esta curva tende a apresentar um patamar, pelo que durante a propagação da fenda a taxa de libertação de energia tende a ser constante.

Na Figura 10 pode-se observar um exemplo de uma curva R, que neste caso engloba 2 adesivos [21].

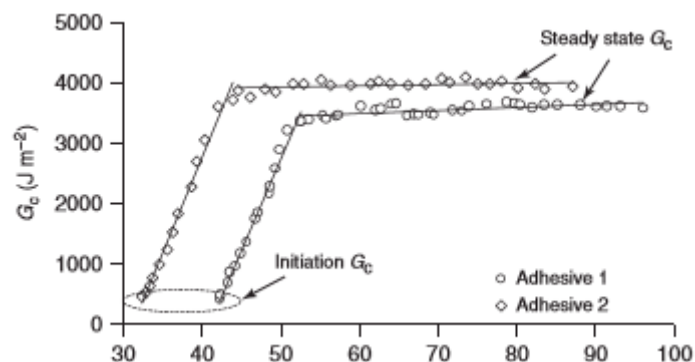


Figura 10- Curvas R [21]

2.2.1 Ensaios em tração (modo I)

O modo I corresponde ao movimento de abertura de fenda na direção perpendicular ao seu plano, por efeito de tração nessa direção e é o modo mais crítico no que se refere à propagação da fenda pelo facto de as tensões serem concentradas em porções menores do adesivo e por a junta ter menor resistência ao arrancamento do que ao corte. O ensaio Double-Cantilever Beam (DCB) é o mais utilizado devido à sua simplicidade e é universalmente aceite para caracterizar a fratura em modo I de diversos materiais como compósitos, madeiras e adesivos. Na Figura 11 está representado de forma esquemática o ensaio DCB.

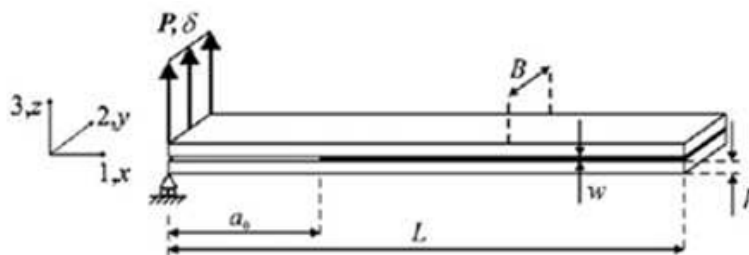


Figura 11- Representação esquemática de um ensaio DCB[22]

Os provetes DCB são constituídos por dois substratos (designados por braços) com comprimento igual (L), espessura constante (h) e largura (B) também iguais. O adesivo encontra-se entre os substratos e possui uma espessura constante (w), sendo considerado o comprimento de fenda inicial a_0 desde a zona onde é aplicada a solicitação até à extremidade da pré-fenda presente no adesivo [21].

O ensaio consiste em solicitar os braços do provete em abertura a uma velocidade constante. Durante o ensaio é registada a carga (P) e o deslocamento (δ). O comprimento de fenda é obtido através de análise de fotos/imagens obtidas durante o ensaio e com intervalos de tempo pré-estabelecidos [21].

Outro ensaio usado para caracteriza a fratura em modo I é o TDCB que tem um procedimento semelhante ao ensaio DCB. A diferença entre o ensaio TDCB e o ensaio DCB é a geometria dos provetes. No ensaio TDCB, os provetes são mais complexos e com custos superiores, mas a variação de altura permite uma taxa constante da flexibilidade ao longo da fenda, o que resulta na não necessidade de medir os valores do comprimento de fenda durante o ensaio [21].

No ensaio *compact tension* (CT), ilustrado na Figura 12, são aplicadas duas forças opostas, de igual força pelos dois orifícios presentes no provete de modo a propagar a fenda. Durante o ensaio são obtidas curvas P - δ , que depois de analisadas permitem obter a taxa de libertação de energia em modo I [21, 23].

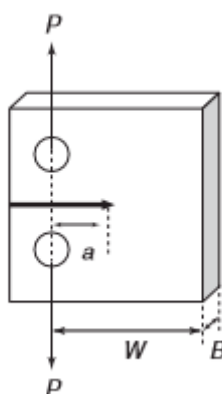


Figura 12 - Representação esquemática de um ensaio CT [21]

2.2.2 Ensaio em corte (modo II)

Até ao momento não existe qualquer norma para a caracterização à fratura em modo II de juntas coladas, sendo que os ensaios ENF (*End-Notched Flexure*), ELS (*End-Loaded split*) e 4ENF (*4- Point End-Notched Flexure*) são os ensaios que mais se destacam. Estes ensaios, geralmente utilizados para a caracterização da fratura interlaminar de modo II em materiais compósitos, servem de base à maioria dos artigos publicados sobre a fratura em modo II das juntas adesivas [21].

O ensaio ENF consiste em numa viga apoiada nas extremidades e sujeita a uma carga no centro da viga. Numa das extremidades é inserida uma pré-fenda de modo a promover o início e a propagação da fenda. Este ensaio é o mais utilizado para a determinação de G_{IIC} , mas apresenta como problema o facto de a propagação da fenda poder ser instável. Na Figura 13 está representado de forma esquemática o ensaio ENF.

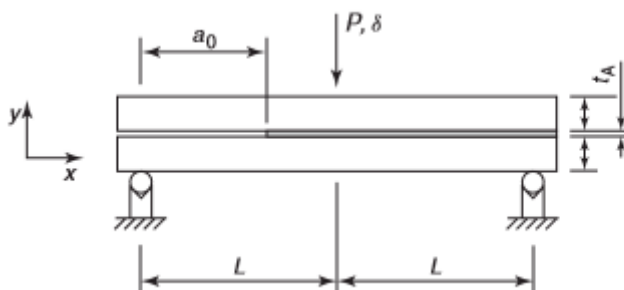


Figura 13 - Representação esquemática do ensaio ENF [21]

O ensaio 4ENF difere do ensaio ENF pelo facto de ser acrescentada uma viga de solicitação sem restrição de movimentos de modo a equilibrar os esforços presentes nos 2 cilindros que transmitem os esforços ao provete. No entanto, este ensaio requer um *setup* mais complexo e necessita que sejam contabilizados os efeitos de fricção entre os seus constituintes. Na Figura 14 está representado de forma esquemática o ensaio 4ENF.

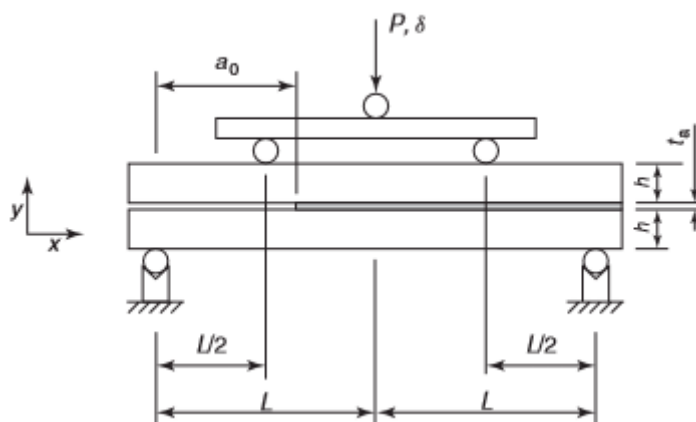


Figura 14- Representação esquemática do ensaio 4ENF [21]

O ensaio ELS possui aspetos distintivos que o colocam como uma opção válida para a análise do comportamento à fratura em modo II. Segundo Wang e Vu-Khanh [24], este método é o mais indicado para obter a curva R pelo facto de possuir um comprimento maior do provete para a propagação da fratura e desse modo a propagação ser mais estável em comparação com o ensaio ENF. Na Figura 15 pode-se ver o esquema de um ensaio ELS [21].

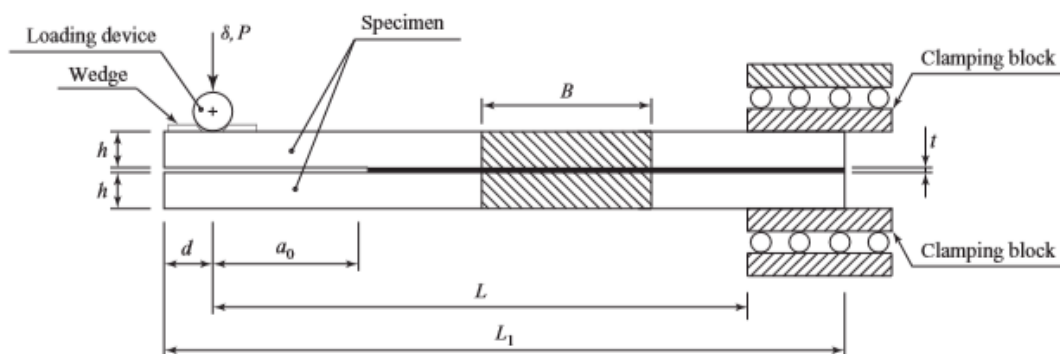


Figura 15- Representação de um ensaio ELS [21]

2.2.3 Ensaios em solitação combinada (modo misto I+II)

Como referido anteriormente, é importante saber o comportamento à fratura do adesivo quando sujeito a solitações combinadas (modo I+II). Para isso, foram desenvolvidos vários ensaios, que têm por base os ensaios em modo puro já referidos e que apresentam diferentes graus de combinação das solitações, permitindo assim determinar por completo o envelope de fratura de cada adesivo.

Na Tabela 3 estão inumerados os ensaios mais comuns em modo misto e o respetivo modo de mixicidade.

Tabela 3 - Ensaios para medir a tenacidade à fratura em modo misto e respetiva mixicidade

Ensaio	Mixicidade (ϕ)
Assymmetric Double Cantilever Beam (ADCB)	0-34°
Single Leg Bending (SLB)	41°
Crack Lap Shear (CLS)	49°
Fixed Rate Mixed Mode (FRMM)	41°

O ensaio ADCB (Figura 16) é uma derivação do ensaio DCB para caracterização de materiais em modo misto, em que os braços do provete são fabricados em materiais diferentes e / ou de diferentes espessuras [25].

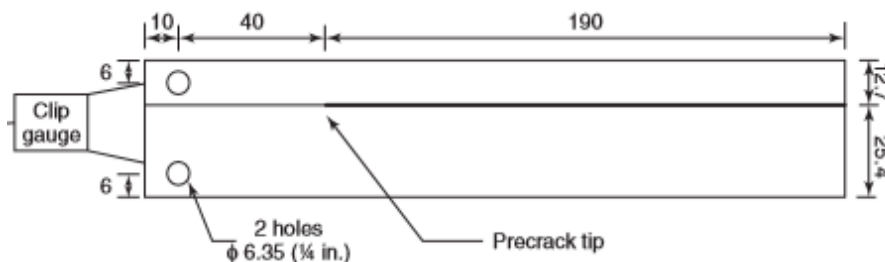


Figura 16 - Representação de um provete ADCB, com um rácio entre espessuras dos substratos de 2 [21]

O ensaio SLB é uma modificação do ensaio ENF. As características de este ensaio vão ser abordadas em detalhe posteriormente.

O ensaio CLS tornou-se um ensaio comum para os testes de fratura em ligações adesivas. Foi inicialmente usado na indústria aeronáutica e tornou-se popular devido à facilidade de montagem e de execução e devido ao facto os esforços serem predominantemente de corte, em semelhança às condições reais de utilização na indústria aeronáutica [21].



Figura 17 - Representação de um ensaio CLS [21]

O ensaio FRMM (Figura 18), à semelhança do ensaio ELS, tem a facilidade de necessitar de equipamento que normalmente está presente na maioria dos laboratórios de ensaios mecânicos, o que pode contribuir para a sua escolha. A diferença é que no ensaio ELS a carga é aplicada no substrato inferior de modo a que ambos os aderentes se deformem de maneira compatível enquanto no ensaio FRMM a carga é aplicada no substrato superior, permitindo que as extremidades do substrato inferior se movam livremente [21].

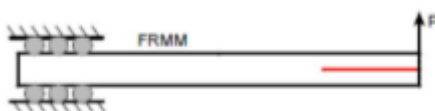


Figura 18 - Representação de um ensaio FRMM [20]

2.3 Ensaio Single-Leg Bending (SLB)

2.3.1 Caracterização do ensaio

O ensaio SLB resulta de uma modificação do ensaio ENF em que, numa das extremidades, apenas o braço superior está suportado devido a apresentar um comprimento superior ao do braço inferior. Este facto origina a que, durante o ensaio, se obtenha uma sollicitação combinada em modo I em modo II. A geometria dos provete e a posição dos apoios e sollicitações está representada na Figura 19 [21].

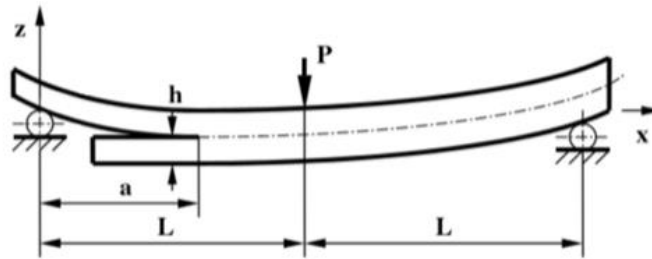


Figura 19 - Representação de um ensaio SLB [26]

Para a realização deste ensaio é necessário criar uma pré-fenda durante a preparação do provete, sendo que o comprimento inicial considerado (a_0) é o comprimento entre o apoio mais próximo e a extremidade pré-fenda (inclusive).

De modo a obter uma medição correta dos valores G_I e G_{II} , o ensaio é dado como terminado quando a fenda se aproximar do punção de solicitação, devido ao facto de a partir dessa zona existirem também esforços de compressão (provocados pelo punção que comprime o adesivo entre os substratos) [26].

Os provetes do ensaio SLB podem ter algumas variações sem que altere a sua geometria básica, sendo elas:

- Variar a espessura dos substratos e dos adesivos;
- Variar o comprimento e a largura dos substratos.

No entanto devem ser respeitada a relação entre a_0 e L , que deve ser aproximadamente 70/100 (não deve ser inferior), de modo a permitir uma área de estudo suficiente para permitir resultados concretos e evitar que a fenda se propague de forma instável [22].

Para a realização deste ensaio não são necessários componentes fora do vulgar nem cuidados especiais no processamento dos provetes. No entanto, é necessário obter imagens de boa resolução de modo a ser possível a leitura do comprimento da fenda.

2.3.2 Métodos para determinação da tenacidade à fratura

2.3.2.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

2.3.2.1.1 Modelo 1- Oliveira et al [27]

Este método é baseado na teoria das vigas e permite obter a curva R. Para isso necessita de ser determinada a flexibilidade, que recorrendo à teoria das vigas de Timoschenko é obtida a energia libertada, obtida através da seguinte equação:

$$U = \int_0^L \frac{M_f^2}{2E_L I} dx + \int_0^L \int_{-h}^h \frac{\tau^2}{2\mu_{RL}} B dy dx, \quad (14)$$

onde M é o momento de flexão, I o segundo momento de inércia e

$$\tau = \frac{3 V_i}{2 A_i} \left(1 - \frac{y^2}{c_i^2} \right), \quad (15)$$

onde A_i , c e V representam, respetivamente, área de secção transversal, metade da espessura da viga, e carga 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, a flexibilidade no ponto de carregamento para o comprimento da fenda é obtida através da seguinte equação:

$$C = \frac{28a^3 + L^3}{32E_L B h^3} + \frac{3(a + L)}{20\mu_{RL} B h}. \quad (16)$$

O comprimento inicial da fenda (a_0) e a flexibilidade inicial (C_0) podem ser utilizados na equação 17 para estimar o módulo de flexão E_f :

$$E_f = \left(C_0 - \frac{3(a_0 + L)}{20\mu_{RL} B h} \right)^{-1} \frac{28a_0^3 + L^3}{32B h^3}. \quad (17)$$

Baseado neste procedimento, não é necessário medir o módulo de flexão longitudinal para cada provete, o que representa uma vantagem do ensaio SLB em comparação com o ensaio ELS.

A tenacidade à fratura do adesivo sujeito a esforços de modo misto pode ser obtida através da equação de Irwin-Kies

$$G_T = \frac{P_c^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (18)$$

que aplicada ao provete SLB apresenta-se na seguinte forma:

$$G_T = \frac{21P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3}. \quad (19)$$

Seguindo o método de modo de partição baseado na teoria da viga proposto por Szekrényes e Uj (2004) [28], as componentes da taxa de libertação de energia em modo I e modo II podem ser escritas como

$$G_I = \frac{12P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{10\mu_{RL} B^2 h} \quad (20)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3}. \quad (21)$$

2.3.2.1.2 Modelo 2- Szekrényes e Uj[28]

Para a aplicação deste método é necessário analisar a flexibilidade entre os braços do provete. A flexibilidade pode ser obtida facilmente através do trabalho de Ozdil et al.(1998) [29], em que a seguinte expressão foi baseada no ensaio ENF usando a teoria das vigas de Timoshenko:

$$C = \frac{2L^3 d_{11.2} + a^3 (d_{11.1} - d_{11.2})}{12} + \frac{2La_{55.2} + a(a_{55.1} - a_{55.2})}{4k}; \quad (22)$$

onde $K=5/6$ é o fator de correção de corte. A resistência à fratura pode ser expressada diferenciando-se a flexibilidade em relação ao comprimento de fenda

$$G_{I/II} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}. \quad (23)$$

Conjugando as equações 22 e 23 obtém-se

$$G_{I/II} = \frac{P^2}{8b} \left(a^2 (d_{11.1} - d_{11.2}) + \frac{(a_{55.1} - a_{55.2})}{4} \right). \quad (24)$$

As flexibilidades de corte e de flexão das zonas com e sem fenda dos provetes SLB simétricos e unidirecionais são:

$$d_{11.1} = \frac{12}{bh^3 E_{11}} \quad (25)$$

$$d_{11.2} = \frac{3}{2bh^3 E_{11}}$$

$$a_{55.1} = \frac{1}{bhG_{13}}$$

$$a_{55.2} = \frac{1}{2bhG_{13}}.$$

Conjugando as anteriores equações e tendo em conta os efeitos de corte e os efeitos elásticos, a flexibilidade do provete SLB torna-se:

$$\begin{aligned}
C = & \frac{7a^3 + 2L^3}{8bh^3E_{11}} + \frac{a + 2L}{8bhkG_{13}} \\
& + \frac{a^3}{8bh^3E_{11}} \left(2.71 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 2.45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} \right. \\
& \left. + 1.11 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{3}{4}} \right). \quad (26)
\end{aligned}$$

A resistência à fratura pode ser calculada utilizando a equação:

$$\begin{aligned}
G_{I/II} = & \frac{21P^2a^2}{4b^2h^3E_{11}} + \frac{P^2}{4b^2hkG_{13}} \\
& + \frac{P^2a^2}{4b^2h^3E_{11}} \left(5.42 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 2.45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} \right). \quad (27)
\end{aligned}$$

De modo a efetuar a partição dos modos de carregamento é utilizado o método de Williams melhorado com o efeito do corte transversal e análise de fundação Winkler [28]. Na Figura 20 pode-se observar uma ilustração do modo em que é realizada a partição dos modos de carregamento.

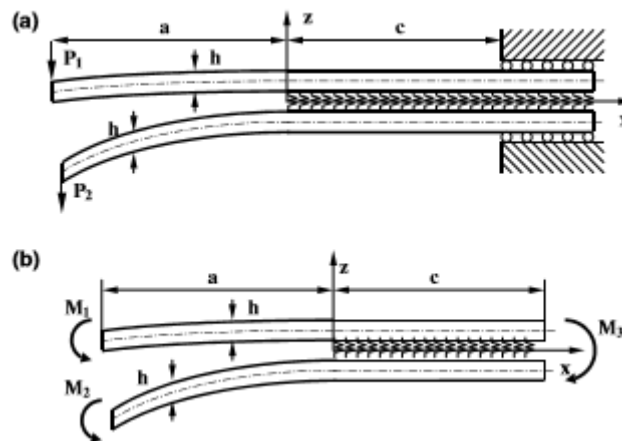


Figura 20-Esquema de redução para a partição dos modos [28]

Sobrepondo os efeitos do corte transversal e dos efeitos elásticos na flexibilidade dos braços superiores e inferiores obtém-se:

$$C_1 = \frac{7a^3 + L^3}{2bh^3E_{11}} + \frac{(L^3 - a^3)P_2}{2bh^3E_{11}P_1} + \frac{L(P_1 + P_2) + a(P_1 - P_2)}{bhkG_{13}P_1} + \frac{a^3(P_1 - P_2)}{2bh^3E_{11}P_1} f_{w1} \quad (28)$$

$$C_2 = \frac{7a^3 + L^3}{2bh^3E_{11}} + \frac{(L^3 - a^3)P_1}{2bh^3E_{11}P_2} + \frac{L(P_1 + P_2) + a(P_2 - P_1)}{bhkG_{13}P_2} + \frac{a^3(P_2 - P_1)}{2bh^3E_{11}P_2} f_{w1}, \quad (29)$$

onde

$$f_{w1} = 2.71 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}}\right)^{\frac{1}{4}} + 2.45 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}}\right)^{\frac{1}{2}} + 1.11 \left(\frac{h}{a}\right)^3 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}}\right)^{\frac{3}{4}}. \quad (30)$$

A taxa de libertação de energia apresenta a seguinte forma:

$$G_1 = \frac{21P_1^2a^2}{4b^2h^3E_{11}} - \frac{3P_1P_2a^2}{4b^2h^3E_{11}} + \frac{P_1(P_1 - P_2)}{4b^2hkG_{13}} + \frac{P_1(P_1 - P_2)a^2}{4bh^3E_{11}} f_{w2} \quad (31)$$

$$G_2 = \frac{21P_1^2a^2}{4b^2h^3E_{11}} - \frac{3P_1P_2a^2}{4b^2h^3E_{11}} + \frac{P_2(P_2 - P_1)}{4b^2hkG_{13}} + \frac{P_2(P_2 - P_1)a^2}{4bh^3E_{11}} f_{w2}. \quad (32)$$

onde

$$f_{w2} = 5.42 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}}\right)^{\frac{1}{4}} + 2.45 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}}\right)^{\frac{1}{2}}. \quad (33)$$

De acordo com a Figura 20, o problema (a) foi reduzido no problema (b), onde $M_1=P_1a$, $M_2=P_2a$, e $M_3=M_1+M_2$ são momentos de flexão da ponta da fenda. A soma das equações das taxas de libertação de energia pode ser transformada em:

$$G_T = \frac{21(M_1^2 + M_2^2) - 6M_1M_2 + (M_1 - M_2)^2(f_T + f_{w2})}{4b^2h^3E_{11}}, \quad (34)$$

onde

$$f_T = \frac{1}{k} \frac{E_{11}}{G_{13}} \left(\frac{h}{a} \right)^2. \quad (35)$$

De acordo com Ducept et al. (1999) [30], os momentos de flexão equivalentes podem ser decompostos em:

$$M_1 = M_I + M_{II} \quad (36)$$

$$M_2 = \alpha M_I + \varphi M_{II}. \quad (37)$$

No caso de modo II puro, os braços superiores e inferiores do provete têm a mesma curvatura

$$\frac{12M_{II}}{bh^3E_{11}} = \frac{12\varphi M_{II}}{bh^3E_{11}}, \quad (38)$$

o que leva a que $\varphi=1$. Conjugando-se as equações anteriores permite-se a separação do termo que contém o produto de $M_I M_{II}$

$$G_{I/II}^* = \frac{9M_I M_{II} (1 + \alpha)}{b^2 h^3 E_{11}}. \quad (39)$$

De modo a cancelar este termo escolhe-se $\alpha=-1$. Então os componentes do modo I e modo II são:

$$G_I = \frac{M_I^2 (12 + f_T + f_{w2})}{b^2 h^3 E_{11}}, \quad (40)$$

$$G_{II} = \frac{9M_{II}^2}{b^2 h^3 E_{11}}. \quad (41)$$

De acordo com as Equações anteriores, o corte transversal e o comportamento elástico contribuem apenas para o componente do modo I

Reorganizando a equação dos momentos fletores, obtém-se

$$M_I = \frac{M_1 - M_2}{2} \quad (42)$$

$$M_{II} = \frac{M_1 - M_2}{2}. \quad (43)$$

Para o provete SLB, os momentos de flexão reduzidos na ponta da fenda são: $M_1=0$, $M_2=Pa/2$. Tendo em conta as equações de G_I e G_{II} anteriores as componentes da taxa de libertação de energia são:

$$G_I = \frac{12P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} + \frac{P^2}{16b^2hkG_{13}} + \frac{P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} \left(5.42 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 2.45 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} \right) \quad (44)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}}. \quad (45)$$

2.3.2.1.3 Modelo 3- Ye Zhu[31]

Este método é baseado no Método de Szekrényes e Uj [28] e foi modificado através da aplicação da teoria de vigas de Timoshenko e Euler-Bernoulli em conjunto com análises de Winkler-Pasternak e com a análise do efeito de Saint-Venant.

A equação para a flexibilidade apresenta a seguinte forma:

$$C = \frac{7a^3 + 2L^3}{8bh^3E_{11}} + \frac{a + 2L}{8bhkG_{13}} + \frac{a^3}{8bh^3E_{11}} \left(0.98 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.43 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right) \right) + \frac{1}{\pi} \frac{3a^2}{4bh^2E_{11}} \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} \frac{a^3}{8bh^3E_{11}} \left(5.07 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 8.58 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 2.08 \left(\frac{h}{a} \right)^3 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{3}{4}} \right) \quad (46)$$

As equações para a taxa de libertação de energia apresentam a seguinte forma:

$$G_I = \frac{12P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} \left(1 + 0.85 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{4}} + 0.71 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.32 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.1 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right) \right) \quad (47)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2a^2}{16b^2h^3E_{11}} \left(1 + 0.22 \left(\frac{h}{a} \right) \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right)^{\frac{1}{2}} + 0.048 \left(\frac{h}{a} \right)^2 \left(\frac{E_{11}}{E_{33}} \right) \right) \quad (48)$$

2.3.2.1.4 Modelo 4 - W.S. Kim et al[32]

Este método permite o uso de diferentes materiais dos substratos, o que permite obter várias condições de carga em modo misto. Tal como a maioria dos esquemas de redução de dados para obter a taxa de libertação de energia crítica (G_c), este esquema de redução de dados utiliza o método de calibração da flexibilidade baseado na equação de Irwin-Kies(18).

Em vez de utilizar a teoria das vigas para derivar a relação $C=f(a)$, a determinação experimental da relação entre a flexibilidade e o comprimento da fenda permite a consideração dos efeitos de flexão e corte na ponta da fenda. A flexibilidade e o comprimento da fenda foram assumidos como E_1BC e a/t_1 respetivamente, e a forma usual da relação $C=f(a)$, $C=k(a+\Delta a)^3$, apresenta a seguinte forma:

$$\frac{a}{t_1} = \alpha(E_1BC)^{\frac{1}{3}} + \beta, \quad (49)$$

onde α e β são constantes que devem ser determinadas experimentalmente.

Conjugando as equações 18 e 48, a tenacidade pode ser calculada através da carga crítica da fenda como:

$$G_c = \frac{3}{2t_1} \left(\frac{P_c}{B} \right)^2 \frac{(E_1BC)^{\frac{2}{3}}}{\alpha E_1}. \quad (50)$$

No caso de diferentes materiais serem ligados a altas temperaturas, a incompatibilidade de coeficientes de expansão térmica provoca tensões térmicas residuais. Portanto, a tensão residual induz que a taxa de libertação de energia (G_T) que deve ser incluída na taxa de libertação de energia total, como descrito na equação:

$$G = G_{\text{mech}} + G_T + G_{\text{int}}, \quad (51)$$

onde G_{int} é um termo resultante da interação térmica com a carga mecânica. Nairn (2006) calculou os dois termos adicionais no espécime do teste SLB baseado na teoria das vigas e na mecânica da fratura linear elástica, como descrito abaixo:

$$G_T = \frac{1}{2} \frac{E_1 t_1 \Delta \alpha^2 \Delta T^2 (1 + R\lambda^3)}{1 + R\lambda (4 + \lambda(6 + \lambda(4 + R\lambda)))} \quad (52)$$

$$G_{\text{int}} = \frac{3Pa\Delta T\Delta\alpha(R\lambda^2(1+\lambda))}{Bt_1(1+R\lambda(4+\lambda(6+\lambda(4+R\lambda))))}. \quad (53)$$

A taxa de libertação de energia total, $G=G_I+G_{II}$, é dividida através da decomposição dos 3 pontos da carga de flexão aplicada na ponta da fenda do provete SLB no modo I e no modo II puro como mostra a Figura 21

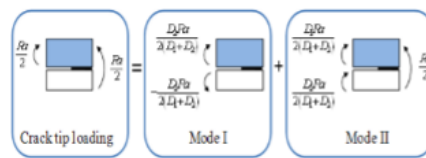


Figura 21- Decomposição dos modos de rotura na extremidade da fenda

A taxa de libertação de energia em cada modo de carregamento pode ser calculada usando a teoria das vigas com as equações:

$$G_I = \frac{P^2 a^2}{8B} \left(\frac{D_2^2}{(D_1 + D_2)^2} \left(\frac{1}{D_1} + \frac{1}{D_2} \right) \right) \quad (54)$$

$$G_{II} = \frac{P^2 a^2}{8B} \left(\frac{1}{(D_1 + D_2)^2} - \frac{1}{D} \right), \quad (55)$$

onde $D_1=E_1I_1$ para a viga superior, $D_2=E_2I_2$ para a viga inferior, e $D=(EI)_{\text{eff}}$ para a secção de viga ligada.

2.3.2.1.5 Modelo 5 – L.F.M. da Silva et al[33]

Este esquema de representação de dados é baseado no esquema proposto por Szekrenyes e Uj [28], sendo que o taxa de libertação de energia em cada modo de carregamento é:

$$G_I = \frac{12P^2 a^2}{16b^2 h^3 E} \left(1 + 0.55 \left(\frac{h}{a}\right) + 0.31 \left(\frac{h}{a}\right)^2 + 0.32 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{G_s}\right)^{\frac{1}{2}} + 0.1 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{G_s}\right) \right) \quad (56)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a^2}{16b^2 h^3 E} \left(1 + 0.218 \left(\frac{h}{a}\right) \left(\frac{E}{G_s}\right)^{\frac{1}{2}} + 0.048 \left(\frac{h}{a}\right)^2 \left(\frac{E}{G_s}\right) \right) \quad (57)$$

Estas expressões utilizadas são bastante semelhantes às do esquema de redução de dados proposto por Szekrenyes e Uj, apresentando, no entanto, diferentes fatores para cada parâmetro.

2.3.2.2 Métodos baseados num comprimento de fenda equivalente

2.3.2.2.1 Compliance Based Beam Method (CBBM)[34]

Este método tem como base o uso do comprimento de fenda equivalente, em vez do uso do comprimento de fenda medido experimentalmente durante o ensaio. Este método é útil porque um dos aspetos de maior dificuldade associado ao estudo da tenacidade do adesivo é a monitorização do comprimento de fenda ao longo do provete. Por outro lado, este método também permite considerar a zona afetada plasticamente pela propagação da fenda.

Tendo por base a Teoria das vigas de Timonchenko, a equação para a flexibilidade entre o ponto de carga e o comprimento da fenda é:

$$C = \frac{7a^3 + (2L)^3}{8E_1 b h^3} + \frac{3(a + 2L)}{20G_{13} B h}. \quad (58)$$

De modo a estimar o Módulo de elasticidade à flexão E_f , que irá substituir E_1 , são usados o comprimento de fenda inicial e a flexibilidade no momento da criação da fenda na equação:

$$E_f = \left(C_0 - \frac{3(a_0 + 2L)}{20G_{13} B h} \right) \frac{7a_0^3 + 2L^3}{8B h^3}. \quad (59)$$

A equação 59 pode ser utilizada para obter o comprimento de fenda equivalente durante a propagação como uma função da flexibilidade ($a_e=f(C)$), que envolve cálculos avançados sendo a equação resultante:

$$a_{eq} = \left(\frac{1}{6B}\right) * A - \frac{2h}{A}. \quad (60)$$

A é obtido pela seguinte expressão:

$$A = \left(\left(-108C + 12 \sqrt{3 \left(\frac{4h^3 + 27C_3^2 B}{B} \right)} \right) B^2 \right)^{\frac{1}{3}}. \quad (61)$$

Para se conseguir resultados por esta equação ainda é necessário determinar o valor de C_3 pela seguinte expressão:

$$C_3 = \frac{2l^3}{32E_f B h^3} + \frac{6L}{20G_{13} B h} - C. \quad (62)$$

Recorrendo ao uso da equação de Irwin-Kies, a tenacidade à fratura pode ser obtida através da seguinte equação:

$$G_T = \frac{21P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{40G_{13} B^2 h}. \quad (63)$$

De acordo com o método de Szekrényes, as componentes da taxa de libertação de energia à fratura para modo I e modo II são

$$G_I = \frac{3P^2 a_{eq}^2}{4E_f B^2 h^3} + \frac{3P^2}{40G_{13} B^2 h} \quad (64)$$

$$G_{II} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16E_f B^2 h^3}. \quad (65)$$

2.3.2.3 Método baseado no integral J[35]

O método do integral J foi desenvolvido por Rice [36] em 1968 de modo a caracterizar a concentração de tensões à volta de fendas e entalhes. A equação original para o integral J é:

$$J = \int_C (W_{n_k} - \sigma_{ij} u_{i,k} n_j) ds. \quad (66)$$

em que W_{n_k} representa a densidade de energia de deformação, u_i é o vetor de deslocamento, n_j é o vetor centrífugo do contorno C e σ_{ij} é o tensor de carga.

Na definição original, foram apresentados cenários em 2D que incluíam o domínio e elástico e o elasto-plástico. Posteriormente, foi aplicado a materiais compósitos ortotrópicos e a situações em 3D. Para o uso em 3D foi apresentado o vetor J_k definido como:

$$J_k = \int_C (W_{n_k} - \sigma_{ij} u_{i,k} n_j) ds + \int_A (W \delta_{k3} - \sigma_{i3} u_{i,k})_{,3} dA, \quad k = 1, 2$$

$$J_3 = \int_C (W_3 n_1 - \sigma_{3j} u_{3,1} n_j) ds. \quad (67)$$

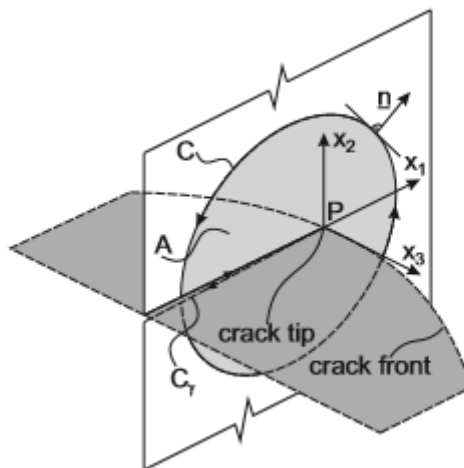


Figura 22- Sistema de referência para o integral J 3D

De acordo com a Figura 22 n_j é o vetor centrífugo do contorno C , δ_{ij} é o tensor Kronecker, σ_{ij} é o tensor de carga ($\delta_{ij} n_j$ é o vetor de tração), tal como anteriormente referido, u_i é o vetor de deslocamento, A é a área delimitada pelo contorno C . O contorno C contém a ponta da fenda e a sua integração é realizada na direção contrária ao sentido dos ponteiros do relógio (ver Figura 22). Sob condições estáticas, o integral J é equivalente à taxa de libertação de energia, G .

O modelo original de fratura frágil de Griffith aplica a seguinte relação para determinar a taxa de libertação de energia

$$G = \frac{\partial U}{\partial A} - \frac{\partial W_f}{\partial A}. \quad (68)$$

Esta relação é útil se existir dependência entre a energia libertada (U) as forças externas (W_f), dependentes do comprimento da fenda a ($dA=bda$, onde b é a largura).

No entanto, nas situações em que seja difícil determinar as relações anteriores com o comprimento de fenda o método do integral J é muito efetivo. A taxa de libertação de energia pode ser obtida usando o campo teórico, isto é, os estados de tensão podem ser calculados analiticamente e numericamente.

Para o ensaio SLB, que promove a propagação de dano em modo misto, o braço inferior do provete não é carregado, como indicado na Figura 23.

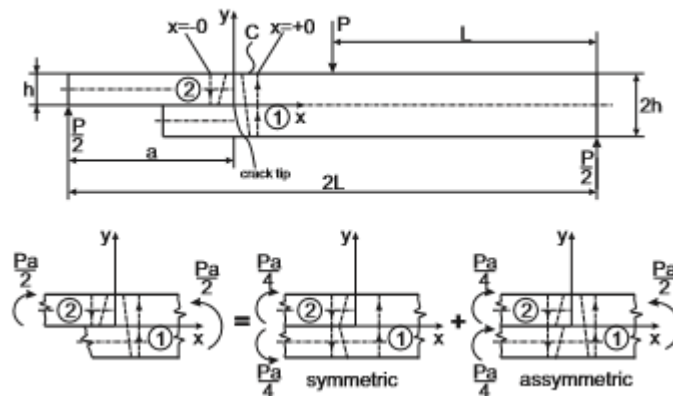


Figura 23- Decomposição dos esforços no ensaio SLB

Deste modo é razoável calcular as taxas de libertação de energia em modo I e modo II separadamente. O método de decomposição de modos foi proposto por Shivakumar e Raju [37] e é baseado na separação dos componentes de deslocamentos e tensores em partes simétricas e assimétricas. Mais tarde foi mostrado por Rigby e Aliabadi [38] que a decomposição de tensor era parcialmente incorreta e o método foi revisto, sendo aplicado mais tarde por numerosos autores.

O tensor de carga pode ser decomposto pela sobreposição de um ensaio DCB carregado por um momento de flexão $Pa/2$ e pelo ensaio ENF [35]. Desse modo, para este ensaio, o método de Shivakumar e Raju [37] é equivalente ao método global de Williams[39], pelo que as taxas de libertação de energia são obtidas pelas seguintes equações:

$$J_I = \frac{12P^2a^2}{16b^2h^3E} \quad (69)$$

$$J_{II} = \frac{9P^2a^2}{16b^2h^3E} \quad (70)$$

$$J_{I/II} = \frac{21P^2a^2}{16b^2h^3E} \quad (71)$$

2.3.2.3.1 Utilização de sensores mecânicos para obtenção dos parâmetros

Para a determinação dos parâmetros P (carga), δ (deslocamento do apoio do provete) e t (tempo) para um ensaio SLB, a máquina de ensaio encontra-se em comunicação com um computador de aquisição de dados onde regista os dados obtidos.

Com o registo dos valores de carga e deslocamento, obtemos assim as curvas P - δ . O deslocamento do adesivo na extremidade da fenda, δ_i , é medido por um sensor de deslocamento LVDT (*Linear Variable Differential Transformer*) (Figura 24). O ângulo de rotação θ_0 dos aderentes pode ser medido utilizando um codificador de eixo ou com dois sensores de inclinação.

Estes equipamentos possuem uma elevada precisão e resolução [20, 40].

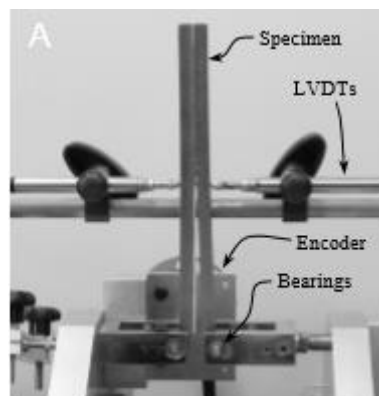


Figura 24 - Exemplo de utilização de LVDTs [40]

2.3.2.3.2 Utilização de métodos óticos para obtenção dos parâmetros

Nos últimos anos denotou-se uma evolução nas técnicas de análise de imagem com recurso à computação. Essa evolução permitiu o acesso a técnicas de medição dos campos cinemáticos (campo dos deslocamentos e das deformações) por análise de imagem através da Correlação Digital de Imagem (CDI).

Para a análise da propagação da fenda, é necessário que a fenda seja fotografada, durante a sua propagação em intervalos contantes de tempo (5 em 5 segundos), sendo que as imagens resultantes devem ter uma boa resolução de modo a permitir o seu tratamento através de CDI.

Para a execução desta análise, o algoritmo de correlação compara as imagens com a imagem padrão (inicial) [20, 41].

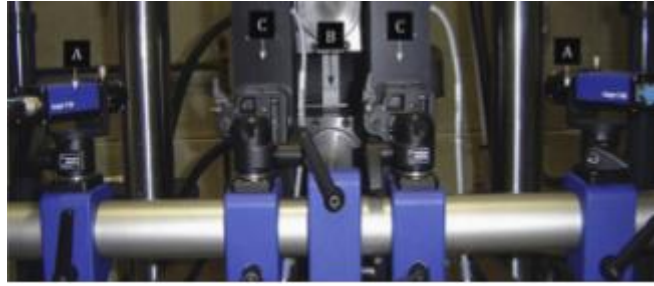


Figura 25 - Exemplo de um *setup* que permite a CDI [41]

DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

- 3.1.1 Materiais utilizados
- 3.1.2 Fabrico dos provetes SLB
- 3.1.3 Ensaio dos provetes SLB
- 3.1.4 Resultados obtidos
- 3.1.5 Análise dos resultados

3.2 Trabalho numérico

- 3.2.1 Condições da análise numérica
- 3.2.2 Modelo de dano coesivo
- 3.2.3 Validação das leis coesivas obtidas
- 3.2.4 Validação dos critérios de propagação
- 3.2.5 Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Nesta secção irão ser detalhadas as várias fases do trabalho experimental, desde os materiais utilizados até aos resultados finais passando pelo procedimento experimental. De referir que o fabrico dos provetes e respetivo ensaio foram realizados num trabalho anterior [26], enquanto no âmbito do presente trabalho efetuou-se todo o tratamento experimental dos dados, partindo das curvas $P-\delta$ dos ensaios e fotografias tiradas durante os mesmos, e se efetuou a análise dos resultados correspondente.

3.1.1 Materiais utilizados

Neste ponto estão apresentados os materiais utilizados nos substratos e nos adesivos e as suas propriedades principais.

3.1.1.1 Substratos

Para o fabrico dos substratos optou-se por um compósito de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibra de carbono, pré-impregnada e unidirecional (SEAL® Texipreg HS 160 RM). O pré-impregnado utilizado possui 0,15 mm de espessura e foi adquirido sob a forma de rolo. De modo a se obter a espessura pretendida de de 3 mm foram utilizadas 20 camadas de pré-impregnado, cortado com as medidas pretendidas.

Na Tabela 4 estão indicadas as propriedades do compósito reforçado com fibras de carbono.

Tabela 4- Propriedades elásticas ortotrópicas do compósito reforçado com fibras de carbono, com as fibras alinhadas unidireccionalmente na direção x [26, 42]

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

3.1.1.2 Adesivos

Este capítulo descreve os três adesivos utilizados neste trabalho. Dos três adesivos selecionados, todos eles são bi-componente (resina e endurecedor), dois deles epóxicos (Araldite® AV138 e 2015) e um poliuretano (SikaForce® 7752). Todos estes adesivos são caracterizados pela fácil aplicação devido à viscosidade relativamente baixa. A forma bi-componente é vantajosa em relação à de película, na medida em que permite flexibilidade na escolha da espessura da camada adesiva, incluindo a possibilidade de compensar alguma falta de planeza dos aderentes. Estes adesivos apresentam uma ductilidade crescente pela ordem apresentada, desde a consideração de um adesivo frágil até um adesivo bastante dúctil, o que vai permitir a caracterização e modelação dos ensaios em condições diferentes [26].

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O Araldite® AV138 (Figura 26), juntamente com o endurecedor HV998, é um adesivo do fabricante Huntsman Advanced Materials, considerado estrutural de base epóxida, termoendurecível de dois componentes. É um adesivo que se apresenta na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa emissão de gases e perdas voláteis, excelente resistência química e resistente a temperaturas até aos 120 °C.



Figura 26 - Adesivo epóxico Araldite® AV138/HV998 [26]

O Araldite® AV138 com o endurecedor HV998, quando combinado nas proporções corretas, descreve-se como um adesivo epóxico frágil, mas de elevada resistência, adequado para ligar materiais de famílias diferentes tais como metais, compósitos e polímeros. A Figura 27 apresenta curvas típicas de tensão normal - deformação (σ - ϵ) de provetes maciços ensaiados à tração, obtidas experimentalmente no trabalho [43].

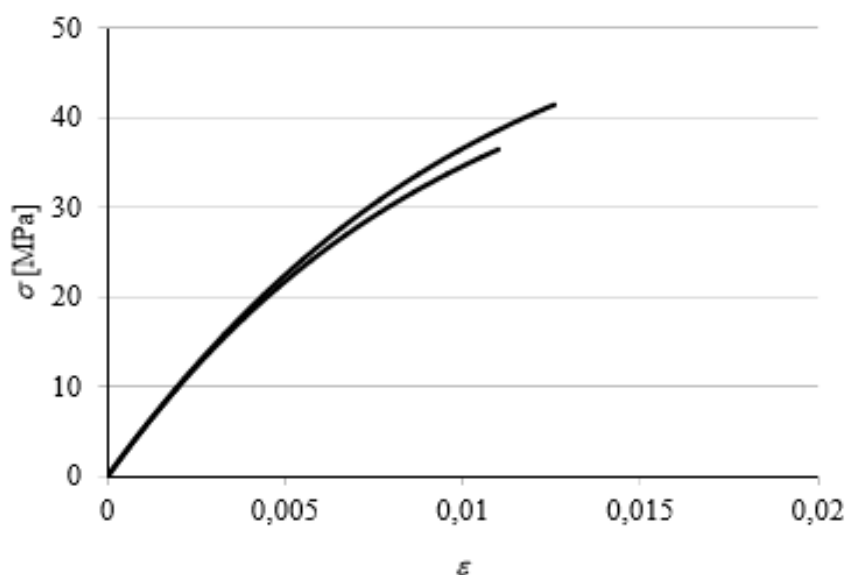


Figura 27 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [26]

A Tabela 5 indica as propriedades mecânicas elásticas e plásticas mais relevantes do adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [43, 44].

Tabela 5- Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® AV138[43, 44]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de Young/Elasticidade, E[GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν	0,35 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	36.49±2.47
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	39.45±3.18
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	1,21±0,10
Módulo de elasticidade transversal, G_{xy} [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	30,2±0,40
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	0,20 ^b
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	0,38 ^b
^a valor do fabricante	
^b valores estimados na referência	

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 (Figura 28) é um adesivo do fabricante Huntsman Advanced Materials considerado estrutural, de base epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentado na forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente, com baixa contração e uma alta resistência ao corte e clivagem, com uma ductilidade moderada.



Figura 28 - Adesivo epóxico Araldite® 2015 [26]

A resistência e durabilidade das ligações efetuadas por este adesivo são dependentes de um tratamento adequado das superfícies a ligar. No mínimo, as superfícies a ligar devem ser limpas com um bom agente desengordurante tal como acetona, isopropanol (para plásticos) ou outros agentes desengordurantes, a fim de remover todos os vestígios de contaminações e sujidade. As curvas σ - ϵ dos provetes maciços, ensaiados à tração, são dadas na Figura 29.

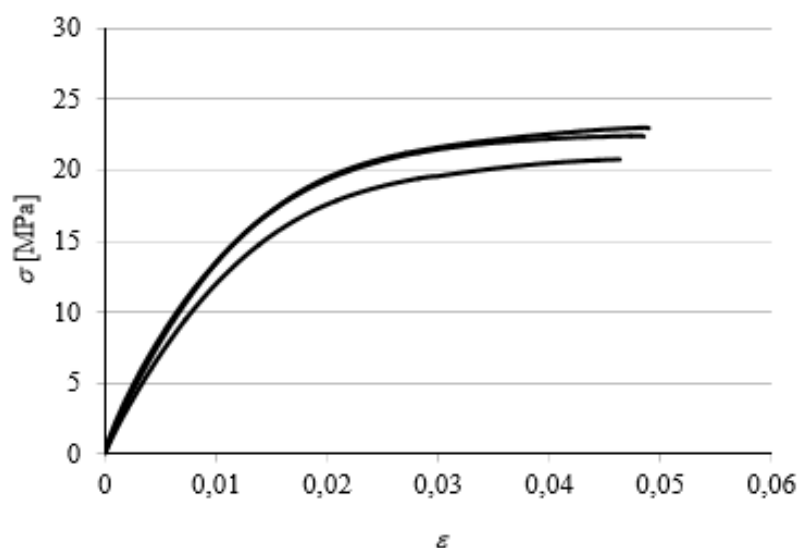


Figura 29- Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [26]

O adesivo Araldite® 2015, quando comparado com o adesivo Araldite® AV138, oferece uma resistência à tração e corte inferiores. No entanto, o facto de ser um adesivo dúctil possibilita a redistribuição de tensões nas regiões de concentrações de tensões, tipicamente nas extremidades da zona de ligação, devido à existência de assimetria da junta e do efeito de deformação diferencial dos aderentes. A Tabela 6 indica as propriedades mecânicas mais relevantes deste adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente [43].

Tabela 6- Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Araldite® 2015[43]

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

^a valor do fabricante

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

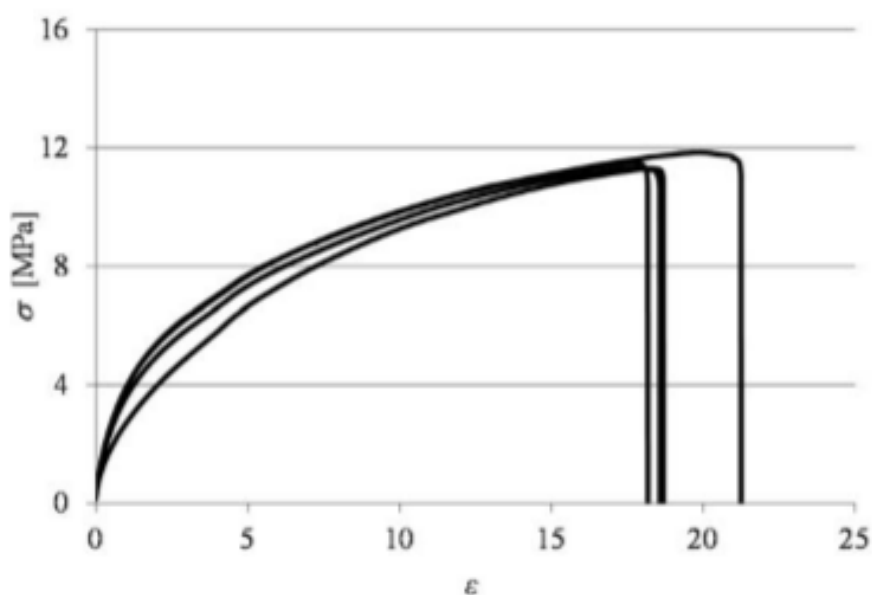
3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O SikaForce® 7752 L60 (VP) (Figura 30) é um adesivo à base de poliuretano, estrutural tixotrópico de 2 componentes, formado por uma resina polioliol com cargas e endurecedor de base isocianato, com baixa emissão de gases e perdas voláteis e com boa resistência a altas temperaturas.



Figura 30 - Adesivo SikaForce® 7752 [26]

O SikaForce® 7752 é um adesivo que cura à temperatura ambiente, com boa resistência ao envelhecimento e à exposição química, com grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas. Encontra aplicação na ligação de metais, cerâmicos, madeira e seus derivados. É um adesivo bastante dúctil, o que pode ser comprovado nos valores de tenacidade obtidos anteriormente. As curvas σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração estão apresentadas na Figura 31 [26].

Figura 31 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo SikaForce® 7752 [26]

A Tabela 7 indica os valores mais relevantes das propriedades mecânicas do adesivo, obtidas num trabalho realizado anteriormente [45].

Tabela 7- Propriedades elásticas e plásticas do adesivo Sikaforce® 7752[45]

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de Young/Elasticidade, E [GPa]	0,49±0,09
Coefficiente de Poisson, ν	0,30 ^a
Tensão de cedência à tração, σ_y [MPa]	3.24±0.48
Tensão de rotura à tração, σ_f [MPa]	11.48±0.25
Deformação de rotura à tração, ϵ_f [%]	19,18±1,40
Módulo de elasticidade transversal, G_{xy} [GPa]	0,19±0,01
Tensão de cedência ao corte, τ_y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura ao corte, τ_f [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura ao corte, γ_f [%]	54,82±6,38
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41±0,47

^a valor do fabricante

3.1.2 Fabrico dos provetes SLB

Nesta secção estão indicadas as várias etapas necessárias para o fabrico dos provetes.

3.1.2.1 Geometria dos provetes SLB

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 deformação plástica durante os ensaios, que iria afetar os resultados obtidos.

Tendo em consideração que se deve ter uma relação entre a_0 e L aproximadamente de 70/100 e as limitações dimensionais de fabrico (molde), foram utilizadas as seguintes dimensões:

$L = 125 \text{ mm}$

$a_0 = 87,5 \text{ mm}$

$h_t = 7 \text{ mm}$ (3 mm de espessura de cada substrato e 1 mm de espessura de adesivo)

Na Figura 32 está representada a geometria do provete SLB.

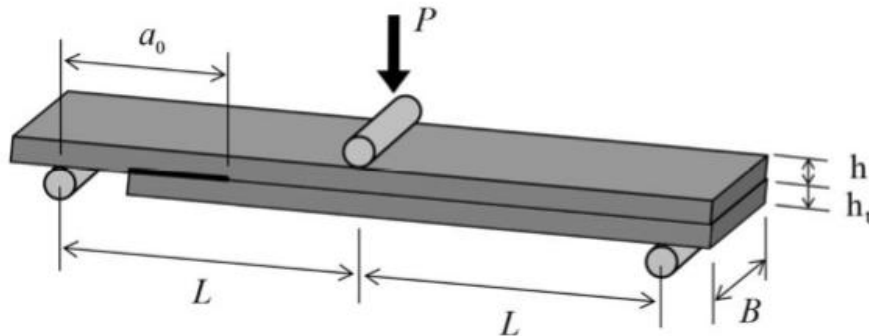


Figura 32- Geometria do provete SLB [26]

O substrato superior tem o comprimento de 280 mm e o substrato inferior de 200 mm. A largura (B) de ambos os substratos é de 15 mm.

3.1.2.2 Colagem dos provetes

Para a realização dos ensaios foi necessário o fabrico de 21 provetes (7 para cada adesivo). De modo a ser possível o fabrico dos substratos necessários foram fabricadas 3 placas de compósito de $300 \times 300 \text{ mm}^2$, com 3 mm de espessura (espessura dos substratos).

Para o fabrico das placas foi utilizado um rolo de 0,15 mm de espessura de pré-impregnado, que foi cortado nas medidas pretendidas de modo a ser empilhado até ser obtida a espessura desejada (para tal foram utilizadas 20 camadas de pré-impregnado). Para se proceder ao empilhamento aplicou-se calor (Figura 33) em 2 camadas de pré-impregnado para ativar a resina e em seguida essas camadas são unidas (na mesma direção, 0°).

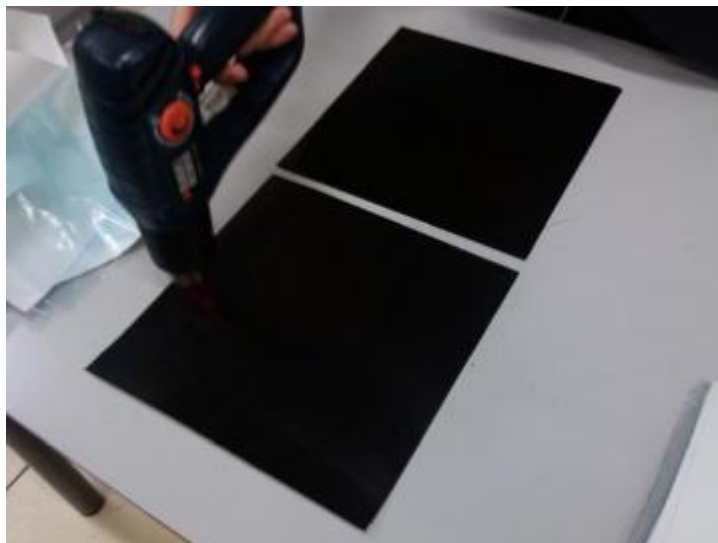


Figura 33- Aplicação de calor nas camadas de pré-impregnado [26]

De seguida foi aplicada pressão, com o auxílio de uma placa metálica, da periferia para o interior de modo a tentar eliminar todas as bolhas de ar. A pressão é aplicada sobre uma folha de proteção contida em cada camada, que antes de ser aplicada a camada seguinte era retirada. As últimas folhas de proteção (na parte inferior e superior da placa) não são removidas de modo a servirem de proteção nas etapas seguintes do fabrico.

Após terminar o empilhamento, as placas são colocadas num molde constituído por 2 tampas de alumínio e por uma moldura de aço colocada no interior das tampas. Esta moldura tem 3 mm de altura e contorna as placas. Como as placas possuem 3mm, e ainda têm as camadas de proteção, é necessário que entre as tampas e a moldura sejam colocados espaçadores de modo a compensar a diferença.

Após a placa ser inserida no molde, este é colocado numa prensa de pratos (Figura 34) quentes com uma pressão constante de 3 bar, e realizado o ciclo térmico indicado na Figura 35 [26].



Figura 34- Prensa de pratos quentes [26]

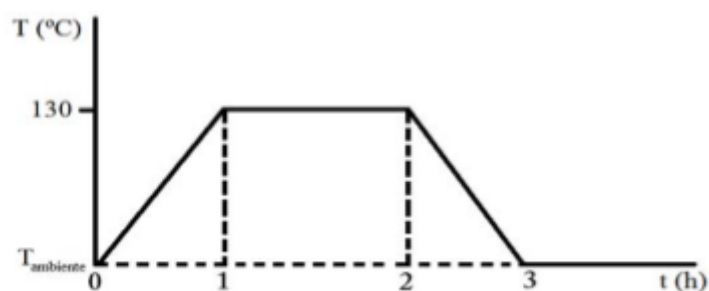


Figura 35- Ciclo térmico aplicado às placas de compósito [26]

Após a aplicação do ciclo térmico a placa é retirada do molde com as propriedades desejadas, as folhas de proteção são retiradas e as placas cortadas com as medidas dos substratos. As placas são cortadas numa máquina de corte com disco diamantado e pulverização de água, de modo a evitar a suspensão de partículas nocivas.

Terminado o corte dos substratos, estes são secos e é realizada uma preparação superficial. Para tal é utilizada uma lixa de grão P60 com o objetivo de limpar a superfície e, desse modo, evitar reduzir a adesão do adesivo à superfície e aumentar a área de contacto entre as superfícies dos substratos e do adesivo. Após a lixagem, as superfícies são bem limpas com acetona de modo a eliminar a presença de agentes externos na ligação [26].

Para além dos substratos, também é necessário efetuar a preparação dos espaçadores, que vão ser responsáveis por controlar a espessura do adesivo e por, numa das extremidades, criar a pré-fenda por onde se iniciará a propagação da fenda durante o ensaio. Para a preparação dos espaçadores a colocar na extremidade interior do provete, responsáveis pela criação da pré fenda, são necessárias 2 chapas de alumínio com 0,45 mm de espessura e uma lâmina de 0,1 mm (colocada entre as outras 2 lâminas)

de modo a obter a espessura de 1 mm desejada. Estas lâminas são limpas com acetona e posteriormente fixas, recorrendo a um adesivo cianocrilato, e de forma a que a lamina de 0,1 mm sobressaia para permitir a criação da pré-fenda. Para a extremidade do provete em que não é pretendida a criação da pré-fenda, os espaçadores são constituídos por um único elemento com 1 mm de espessura.

Após a preparação inicial dos espaçadores, estes são aquecidos num forno elétrico de modo a elevar a sua temperatura para ser aplicado o desmoldante (esta elevação de temperatura facilita o processo de adesão). O desmoldante é aplicado 3 vezes sobre cada superfície do espaçador com o cuidado de deixar que cada aplicação seque antes da seguinte [26].

Terminada a preparação dos substratos e dos espaçadores, é possível prosseguir para a colagem dos provetes. Para tal, utilizaram-se plataformas de madeira nas quais foram colocados os provetes. Nas plataformas de madeira foi colocada uma película de Teflon® de modo a prevenir que, em caso de vazamento, o adesivo ficasse colado à madeira.

Após o revestimento das plataformas, os substratos maiores foram colocados sobre estas e foi marcada a posição em que os espaçadores seriam colocados. De seguida os espaçadores foram colocados nas suas posições e, como medida preventiva, fixados através da aplicação de pequenas quantidades de cianocrilato que permitissem a sua imobilização sem, no entanto, impedir a sua fácil remoção após cura do adesivo.

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. De forma a garantir uma melhor distribuição de tensões, foi utilizada uma régua durante a aplicação da pressão, para garantir uma melhor distribuição de tensões durante a aplicação da pressão, para evitar zonas com menor concentração de adesivo. Paralelamente ao processo de colagem dos substratos foram colocados calços na extremidade da pré-fenda (Figura 36) [26].

Paralelamente aos processos anteriores, iam sendo colados os calços na extremidade da pré-fenda.

Para finalizar a colagem dos substratos são colocados grampos exercendo pressão nos locais onde estão colocados os espaçadores. Os grampos são deixados durante a cura do adesivo de modo a assegurar um correto posicionamento entre os substratos e garantir a espessura desejada (Figura 36) [26].

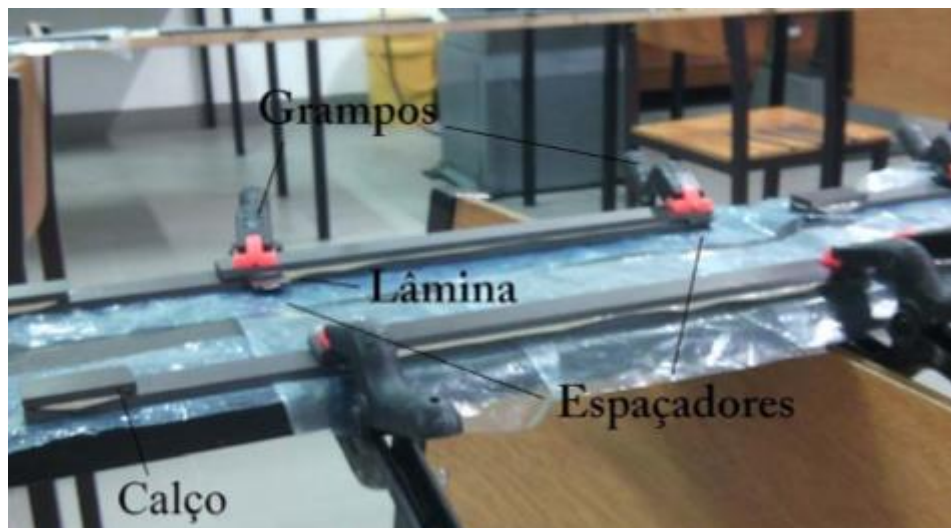


Figura 36 - Posicionamento dos espaçadores, calço e grampos, durante a aplicação de pressão nos provetes [26]

3.1.2.3 Preparação dos provetes para ensaio

Após a colagem dos adesivos é necessário ainda efetuar algumas operações antes da realização dos ensaios. Estas operações apenas podem ser realizadas após o adesivo possuir rigidez suficiente. Neste caso, para os adesivos terem uma rigidez suficiente tiveram de ter os seguintes tempos de cura:

- Araldite® AV138- 3 dias;
- Araldite® 2015- 3 dias;
- SikaForce® 7752- 5 dias.

Após terminado o processo de cura, foram removidos os espaçadores recorrendo a um alicate (esta etapa foi facilitada pela aplicação do desmoldante). De seguida o excesso de adesivo foi removido dos bordos dos provetes. Para este processo é utilizado um alicate para remover o máximo possível de adesivo sem danificar o provete e sem remover adesivo da zona útil de ligação. Após estas operações o provete possui o aspeto apresentado na Figura 37.



Figura 37- Provete SLB, após remoção de parte do excesso de adesivo [26]

De modo a remover o excesso de adesivo em excesso após as etapas anteriores é utilizada uma mó com rugosidade reduzida de modo a permitir ao operador efetuar este processo sem danificar os substratos.

Após a remoção dos excessos de adesivo, os provetes foram limpos com acetona e registado numa das faces o tipo de adesivo e numero de provete. De seguida pintou-se a face que iria ser alvo do registo fotográfico com corretor, de modo a melhorar a identificação da fenda na análise das imagens [26].

Após estas etapas foi criada uma pré-fenda através de uma reduzida carga para separar os substratos na zona onde se iniciará a fenda. A distância entre a extremidade da fenda até ao apoio esquerdo (a_0) foi registada, tendo-se obtido os valores presentes na Tabela 6.

Tabela 8- Valores de a_0 [mm] medidos para cada provete[26]

Provete	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	85,60	88,39	85,98
2	85,63	85,60	88,51
3	84,54	85,40	85,82
4	86,87	84,67	88,61
5	104,36	88,96	87,17
6	86,40	88,52	86,70
7	91,45	86,80	85,30

Os valores de a_0 obtidos foram, no geral, aproximados dos pretendidos (87,5 mm). No entanto houve 2 provetes, ambos do adesivo Araldite® AV138, com valores superiores devido à propagação excessiva na altura da propagação normal da fenda, induzida pela fragilidade do adesivo.

Para terminar, é colada uma escala em cada substrato do adesivo do lado onde será realizado o registo fotográfico (Figura 38).

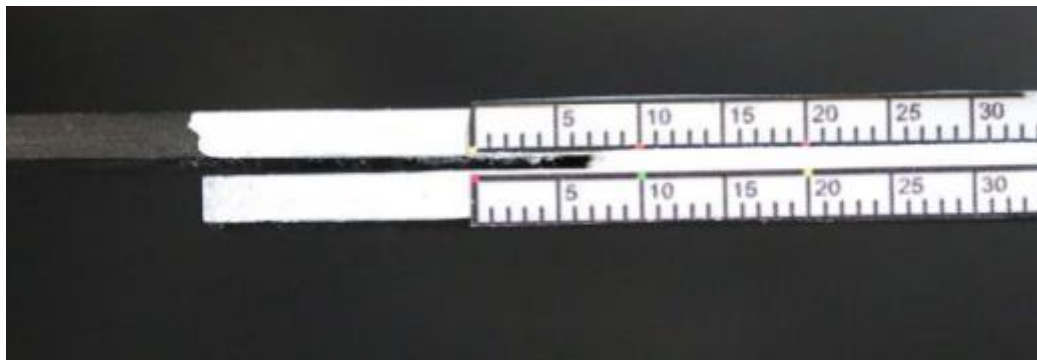


Figura 38 - Aspeto final de um provete para ensaio [26]

3.1.3 Ensaio dos provetes SLB

3.1.3.1 Condições de ensaio

Para a realização dos ensaios recorreu-se a uma máquina de ensaios eletromecânica Shimadzu AG-X 100 com uma célula de carga de 100kN. Este equipamento foi ligado a um computador responsável pelo processamento do ensaio e pelo registo dos dados. O computador apresenta os resultados sob a forma de um gráfico P (N) vs. deslocamento δ (mm) e foi selecionada uma frequência de aquisição de dados de 4 Hz [26].

3.1.3.2 Método ótico

Para controlar a evolução do comprimento de fenda foi utilizada uma máquina fotográfica Canon EOS 70D de 20,2 MPx com apoio fixo. Foram também utilizadas algumas placas de aço para dar estabilidade e altura suficiente para permitir à câmara registar todos os momentos do ensaio, um cronómetro e um sistema de iluminação para melhorar a qualidade das fotografias. Na Figura 39 está mostrado o *setup* do ensaio com a câmara fotográfica posicionada [26].

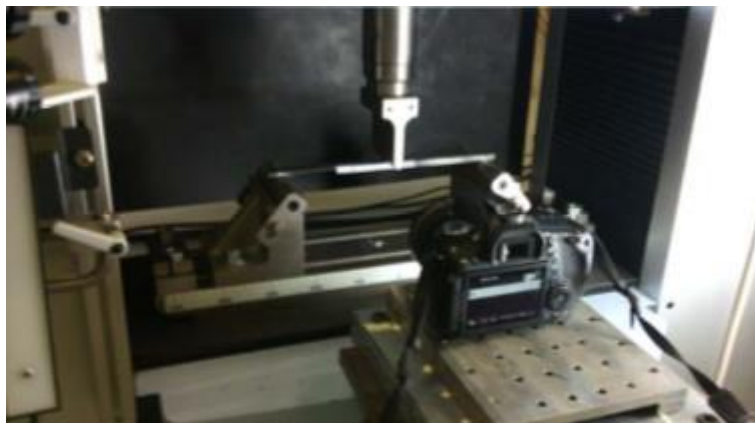


Figura 39- Setup do ensaio SLB [26]

3.1.3.3 Realização dos ensaios

Para se proceder à realização dos ensaios, inicialmente é necessário colocar o provete na situação desejada. Para tal o provete é alinhado por linhas paralelas marcadas em ambos os apoios do ensaio com o objetivo de garantir a perpendicularidade da força aplicada com o comprimento dos provetes.

Após o alinhamento do provete procede-se à regulação da altura do punção, que é feita manualmente de modo a que seja colocado perto do provete para que, quando acionada a máquina, o punção inicie o ensaio rapidamente.

Terminada a regulação da altura do punção de solicitação é posicionada a máquina fotográfica de modo a que seja possível registar todo o ensaio sem que o provete, devido a efeitos de flexão, saia fora dos limites de imagem.

Após a preparação do *setup* de ensaio, este é iniciado com uma velocidade de ensaio adaptada a cada adesivo e enquadrada na suposição de ensaio quase-estático (de modo a que não haja influencia de efeitos viscoelásticos). Para tal foram escolhidas as seguintes velocidades de ensaio (velocidade do punção) [26]:

- Araldite® AV138- 0.35 mm/min;
- Araldite® 2015- 0.8 mm/min;
- SikaForce® 7752- 3 mm/min.

Durante o ensaio são tiradas fotografias de 5 em 5 segundos até ao fim do ensaio. O ensaio termina quando a propagação da fenda atinge a zona do punção(a metade do comprimento total do provete) ou até que se verifique a rotura do adesivo [26].

3.1.4 Resultados obtidos

Nesta secção estão indicados os resultados obtidos experimentalmente e a sua análise para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752.

3.1.4.1 Araldite® AV138

Para o adesivo Araldite® AV138, foram testados 7 provetes, sendo obtidas as curvas $P-\delta$ indicadas na Figura 40.

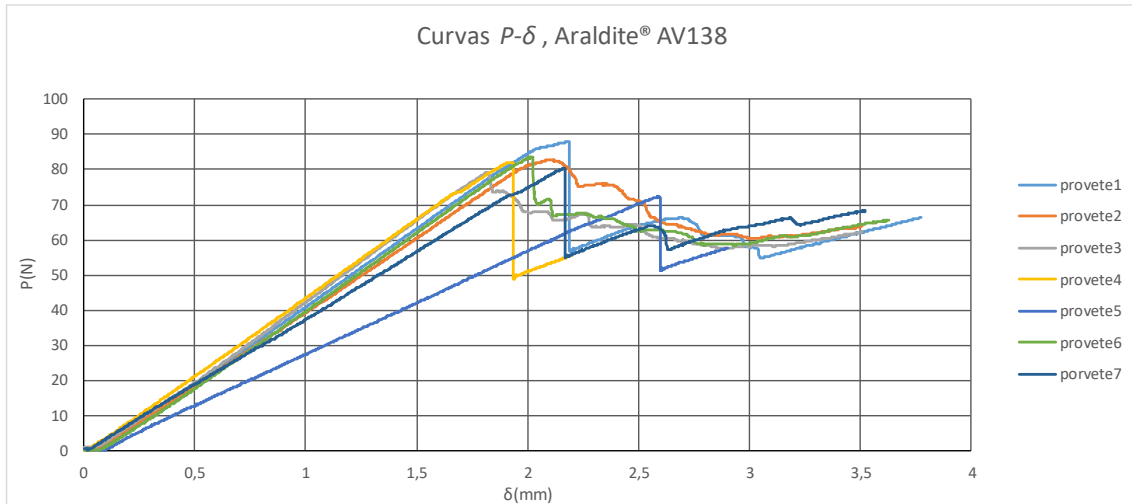


Figura 40 - Curvas $P-\delta$ obtidas do Adesivo Araldite® AV138

De acordo com as curvas obtidas pode-se observar que os provetes apresentaram comportamentos semelhantes após o início da fenda. Com exceção do provete 2, os adesivos tiveram diminuição considerável da força no início da propagação da fenda no adesivo, o que indica que este adesivo tem um comportamento à rotura frágil.

Também se pode observar que os adesivos atingiram durante o ensaio uma carga máxima superior a 80 N. A carga máxima obtida durante o ensaio e o deslocamento máximo estão indicados na Tabela 9.

Em termos de rigidez, na Figura 40 pode-se observar que, com exceção do provete 5, os provetes apresentam uma rigidez semelhante pois apresentam um declive da curva semelhante até ser atingido o ponto de carga máxima.

De acordo com a Tabela 9 pode-se constatar que o provete 5 teve uma carga máxima significativamente menor do que a média dos resultados do conjunto dos provetes. Este facto também se pode observar nas curvas $P-\delta$ obtidas (Figura 40), em que se pode constatar um menor declive da reta obtida até ao ponto de força máxima.

Tabela 9- Valores máximos de P e δ obtidos nos ensaios do adesivo Araldite® AV138

# Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
1	2,18	87,98
2	2,10	82,87
3	1,82	79,14
4	1,92	82,16
5	2,59	72,22
6	2,02	83,70
7	2,16	80,28
Média	2,11	81,19
Desvio Padrão	0,25	4,86

3.1.4.1.1 Estimativa de G_c

Após a obtenção dos resultados procedeu-se à sua análise de modo a obter os valores de G_I e G_{II} . Para tal foram utilizados 6 métodos, 5 deles baseados no comprimento real da fenda e um baseado no conceito de fenda equivalente. Estes métodos foram apresentados no capítulo 2.3.2 e são comuns aos 3 adesivos estudados.

Na Figura 41 e na Figura 42 estão registadas as curvas R de um provete representativo dos ensaios com este adesivo, considerando os diversos modelos utilizados para a determinação de G_I e de G_{II} .

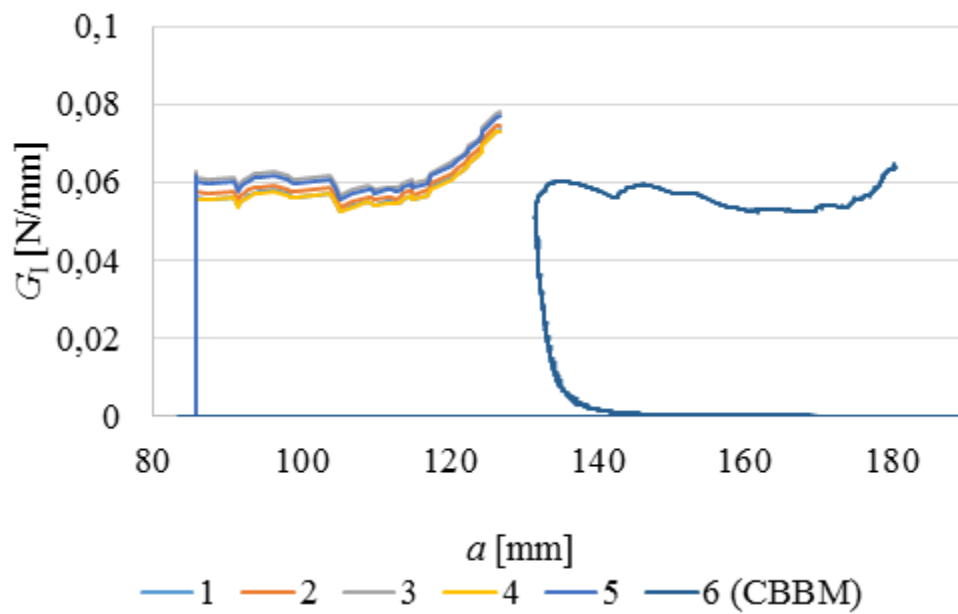


Figura 41 - Curvas-R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 do adesivo Araldite® AV138

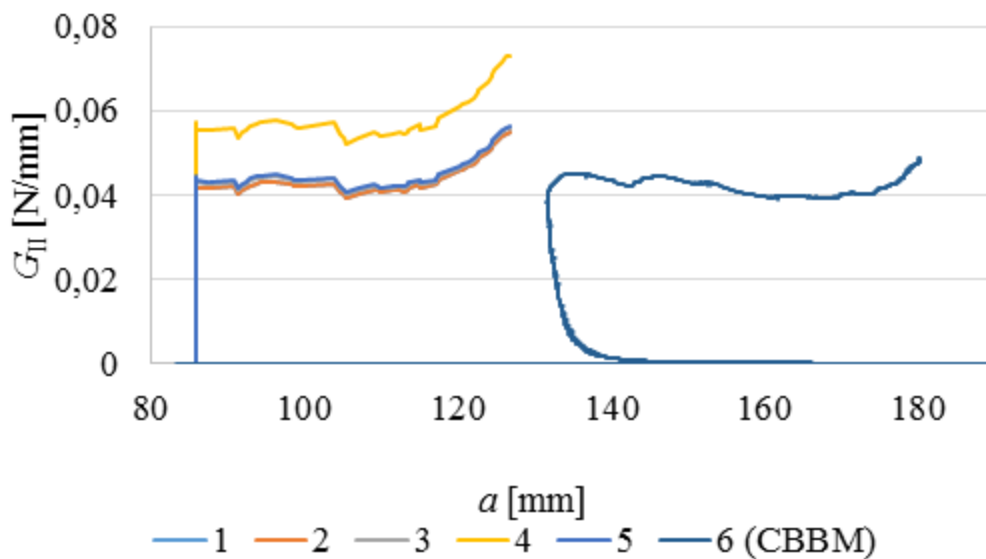


Figura 42-Curvas-R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #3 do adesivo Araldite® AV138

Para esta análise não foi tido em consideração o provete 4 devido ao facto de este provete ter sofrido rotura prematuramente e desse modo os valores calculados de G_I e G_{II} serem consideravelmente inferiores aos restantes.

Para G_I pode-se constatar que os métodos que requerem a medição do comprimento de fenda apresentam uma forma semelhante, sendo que os valores são ligeiramente

diferentes. Para o método CBBM pode-se observar que, apesar de o método ser baseado no conceito de fenda equivalente, este possui resultados comparáveis.

Para G_{II} , os vários métodos permitem obter curvas R com uma forma semelhantes às de G_I , embora com valores inferiores. No entanto, e ao contrário do que acontece para G_I , o método 4 apresenta resultados superiores aos dos outros métodos.

Também se pode observar que as curvas R, quer para o modo I como para o modo II apresentam um patamar aproximadamente constante durante a propagação da fenda ($80 \leq a \leq 120$). Este facto pode indicar que o adesivo apresentou um comportamento estável durante a propagação da fenda.

Para o cálculo de G_I e G_{II} apenas é considerada a zona do gráfico em que a taxa de libertação de energia apresenta um patamar, que é indicativa de propagação da fenda com G_I ou G_{II} constante. Os valores de G_I e G_{II} obtidos através destes métodos estão indicados na Tabela 10 e na

Tabela 11, respetivamente.

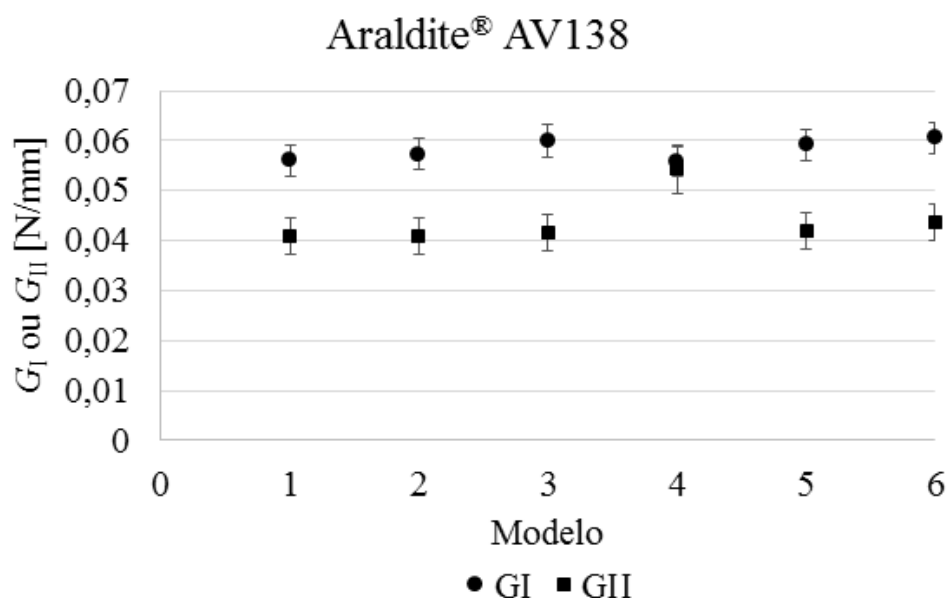
Tabela 10-Valores de G_I obtidos para o adesivo Araldite® AV138

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,0586	0,0599	0,0628	0,0584	0,0619	0,0634	0,0609
2	0,0574	0,0586	0,0617	0,0571	0,0607	0,0603	0,0593
3	0,0565	0,0576	0,0603	0,0563	0,0594	0,0627	0,0588
5	0,0566	0,0578	0,0607	0,0564	0,0598	0,0627	0,0590
6	0,0500	0,0511	0,0536	0,0498	0,0528	0,0549	0,0520
7	0,0572	0,0584	0,0612	0,0571	0,0604	0,0594	0,0589
Média	0,0561	0,0573	0,0600	0,0559	0,0592	0,0605	0,0582
Desvio Padrão	0,0031	0,0031	0,0033	0,0031	0,0032	0,0032	0,0031

Tabela 11-Valores de G_{II} obtidos para o adesivo Araldite® AV138

# Provete	1	2	3	4	5	6(CBBM)	Média
1	0,0438	0,0438	0,0448	0,0584	0,0451	0,0412	0,0462
2	0,0429	0,0429	0,0438	0,0571	0,0442	0,0451	0,0460
3	0,0422	0,0422	0,0431	0,0563	0,0434	0,0469	0,0457
5	0,0423	0,0423	0,0432	0,0564	0,0436	0,0469	0,0458
6	0,0373	0,0373	0,0382	0,0498	0,0385	0,0411	0,0404
7	0,0428	0,0428	0,0437	0,0571	0,0440	0,0444	0,0458
Média	0,0419	0,0419	0,0428	0,0559	0,0432	0,0443	0,0450
Desvio Padrão	0,0023	0,0023	0,0023	0,0031	0,0024	0,0026	0,0023

Na Figura 43 apresenta-se de forma gráfica o resumo dos resultados obtidos, em que se confirma, como as curvas R anteriormente indicavam, que os vários métodos produzem resultados semelhantes, com exceção do método 4 para G_{II} .

Figura 43 - Resumo dos resultados experimentais G_I e G_{II} obtidos do adesivo Araldite® AV138

3.1.4.1.2 Envelope de Fratura

Tendo por base o método CBBM, na Figura 44 está representado o envelope de fratura do adesivo Araldite® AV138, em que estão representadas 4 diferentes curvas que correspondem a quatro expoentes diferentes aplicados à equação que representa a relação entre G_I e G_{II} com base na equação 13.

Pela figura pode-se constatar que os vários ensaios aos provetes resultaram em resultados bastante semelhantes, como comprava o facto de os vários pontos relativos aos resultados experimentais apresentarem uma reduzida dispersão.

Também se pode observar que os resultados obtidos se aproximam da curva relativa ao expoente 0,5, o que permite concluir que, para este adesivo, o critério de propagação respetivo é o que melhor se adequa.

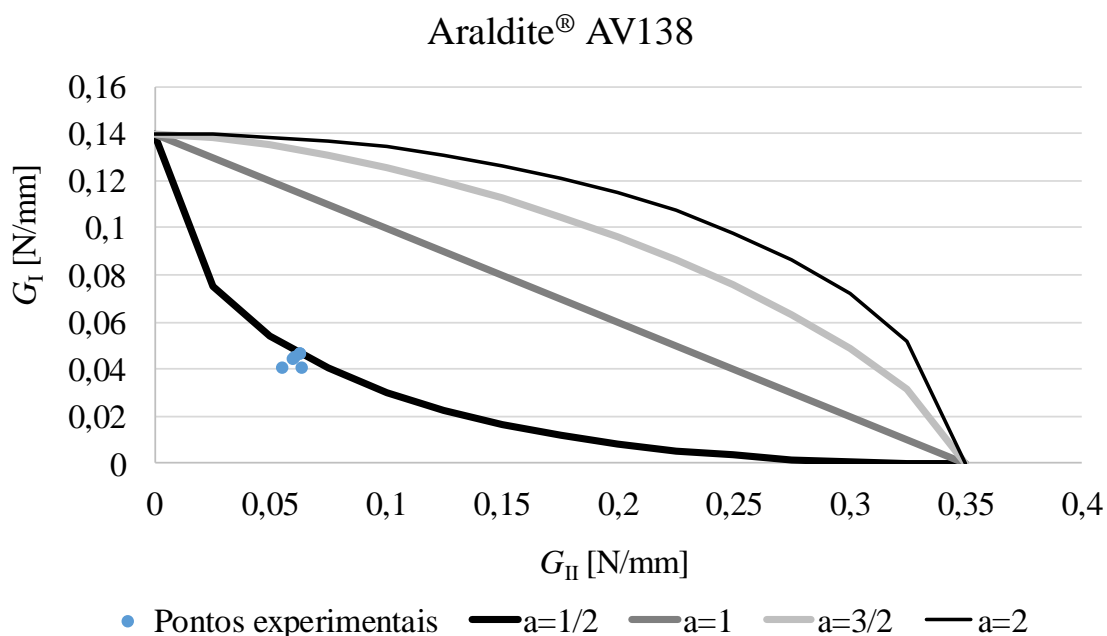


Figura 44 - Envelope de fratura experimental do adesivo Araldite® AV138

3.1.4.2 Araldite® 2015

Para o adesivo Araldite® 2015, foram testados 7 provetes, sendo obtidas as curvas P - δ apresentadas na Figura 45.

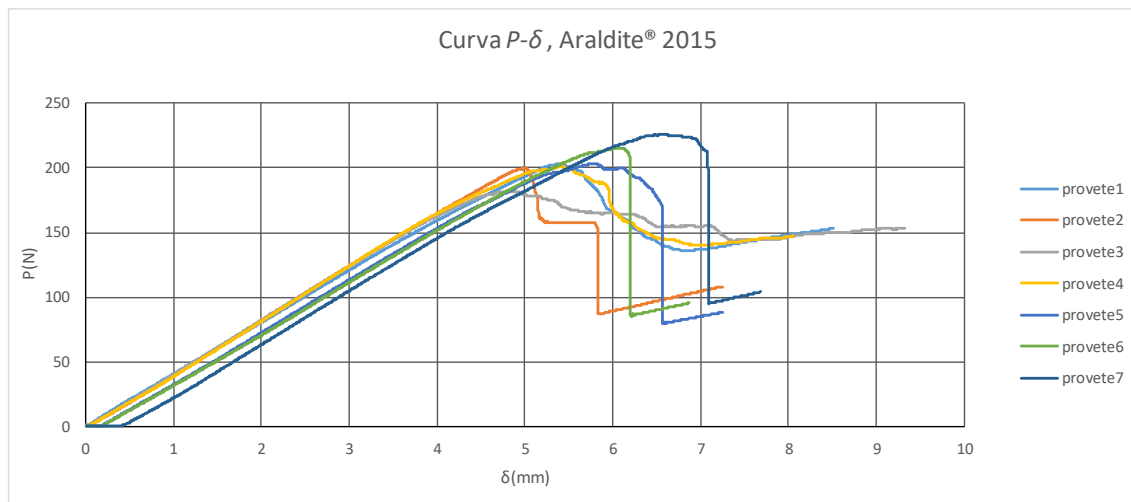


Figura 45 - Curvas $P-\delta$ obtidas do adesivo Araldite® 2015

Pela observação das curvas presentes na Figura 45 pode-se concluir que o adesivo apresentou uma rigidez semelhante entre os vários ensaios, como é mostrado pelo declive das curvas até à força máxima.

Tabela 12- Valores máximos de P e δ obtidos nos ensaios do adesivo Araldite® 2015

# Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
1	5,3587	202,8306
2	4,9911	199,4769
3	4,8362	181,9928
4	5,3996	200,7802
5	5,7796	203,371
6	6,0496	215,594
7	6,6029	226,0844
Média	5,5739	204,3043
Desvio Padrão	0,6175	13,77437

Também se pode observar que, após a rotura, ao contrário do que aconteceu com o adesivo Araldite® AV138 os vários ensaios apresentaram comportamentos diferentes. Para os provetes 2,5,6 e 7 a força apresenta uma diminuição abrupta, após o início da propagação da fenda, enquanto nos restantes essa diminuição é progressiva.

A Tabela 12 sumariza os valores de força máximos obtidos durante o ensaio e o deslocamento máximo que os vários provetes atingiram durante os ensaios.

3.1.4.2.1 Estimativa de G_c

Após a obtenção dos resultados relativos ao adesivo Araldite® 2015 procedeu-se à sua análise de modo a obter os valores de G_I e G_{II} .

Na Figura 46 e Figura 47 estão registadas as curvas R referentes aos modelos utilizados para a determinação de G_I e de G_{II} , considerando um ensaio representativo dos resultados obtidos.

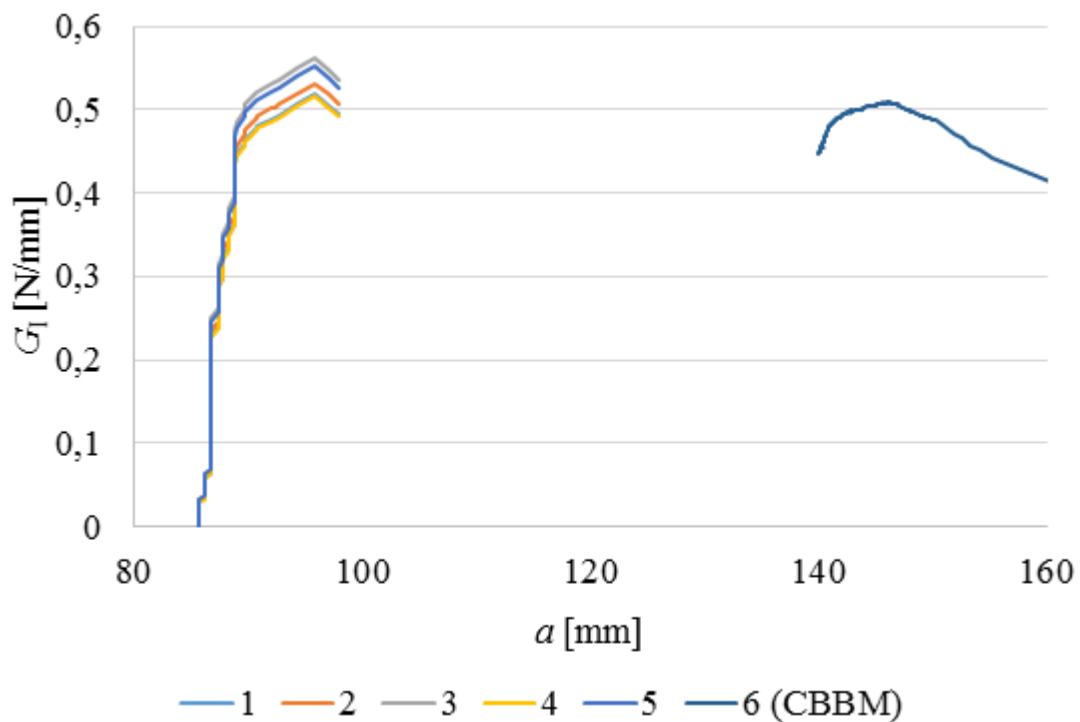


Figura 46 - Curvas-R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #7 do adesivo Araldite® 2015

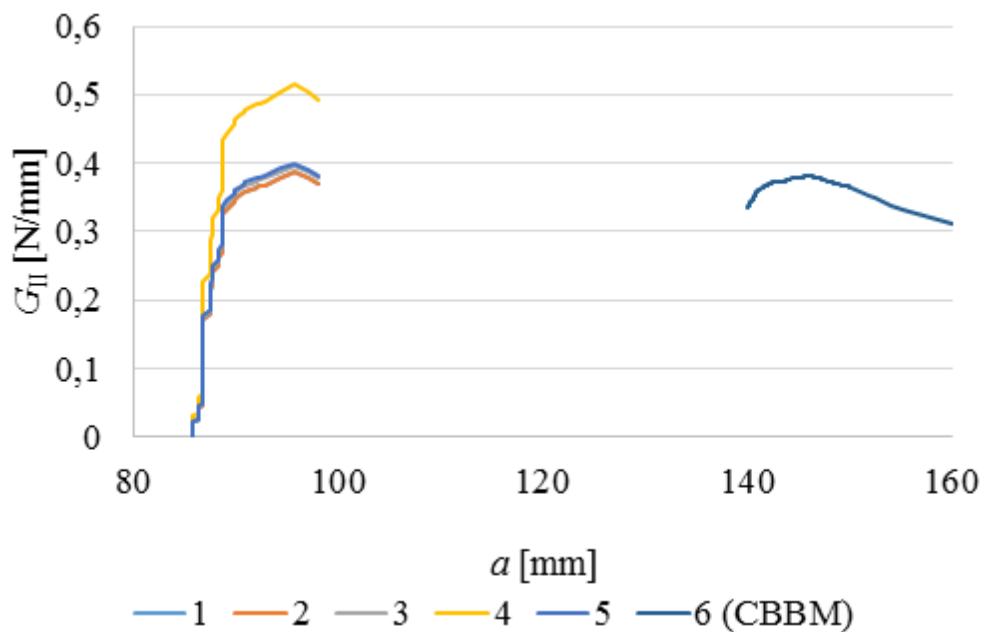


Figura 47 - Curvas-R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #7 do adesivo Araldite® 2015

Para G_I pode-se comprovar que os métodos que requerem a medição do comprimento de fenda apresentam curvas semelhantes, sendo que os valores possuem valores ligeiramente diferentes. Para o método CBBM pode-se observar que apesar de o método ser baseado no conceito de fenda equivalente possui resultados semelhantes aos outros métodos. Para G_{II} , o comportamento dos resultados obtidos é semelhante ao comportamento dos resultados de G_I , com exceção do modelo 4 que apresenta resultados bastante superiores aos outros métodos.

Pode-se observar que as curvas R, quer para o modo I como para o modo 2 e ao contrário do adesivo Araldite® AV138, não apresentam um patamar estável aquando da propagação da fenda. Na ausência desse patamar estável, pode-se observar uma diminuição do declive aquando da propagação da fenda, sendo essa zona a indicada para o cálculo da taxa de libertação de energia.

Pode-se também observar que, em comparação com o adesivo Araldite® AV138, este adesivo apresenta valores superiores de G_I e G_{II} devido à maior ductilidade deste adesivo.

Para o cálculo de G_I e G_{II} apenas é considerada a zona do gráfico em que a taxa de libertação de energia se aproxima de um patamar apesar de que para este adesivo não se apresente bem definido, que indica a propagação da fenda. Os valores de G_I e G_{II} obtidos através destes métodos estão indicados na Tabela 8 e na Tabela 9.

Tabela 13 - Valores de G_I obtidos para o adesivo Araldite® 2015

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,384	0,394	0,418	0,382	0,410	0,374	0,392
2	0,404	0,415	0,440	0,375	0,432	0,365	0,405
3	0,339	0,346	0,363	0,338	0,358	0,402	0,355
4	0,413	0,421	0,442	0,411	0,436	0,370	0,415
5	0,443	0,443	0,468	0,430	0,460	0,404	0,440
6	0,431	0,442	0,468	0,429	0,460	0,444	0,443
7	0,443	0,455	0,482	0,441	0,474	0,462	0,457
Média	0,408	0,417	0,440	0,401	0,433	0,403	0,415
Desvio Padrão	0,037	0,037	0,040	0,037	0,039	0,038	0,035

Tabela 14- Valores de G_{II} obtidos para o adesivo Araldite® 2015

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,286	0,286	0,294	0,382	0,297	0,280	0,302
2	0,301	0,301	0,309	0,375	0,313	0,273	0,310
3	0,254	0,254	0,259	0,338	0,261	0,301	0,274
4	0,308	0,308	0,315	0,411	0,318	0,277	0,321
5	0,331	0,323	0,331	0,430	0,334	0,302	0,339
6	0,322	0,322	0,330	0,429	0,333	0,332	0,341
7	0,331	0,331	0,339	0,441	0,343	0,346	0,352
Média	0,305	0,303	0,311	0,401	0,314	0,301	0,320
Desvio Padrão	0,028	0,027	0,028	0,037	0,028	0,028	0,027

Na Figura 48 pode-se observar de forma gráfica o resumo dos resultados obtidos, no pode-se constatar que, com exceção do método 4, os vários métodos originam resultados idênticos.

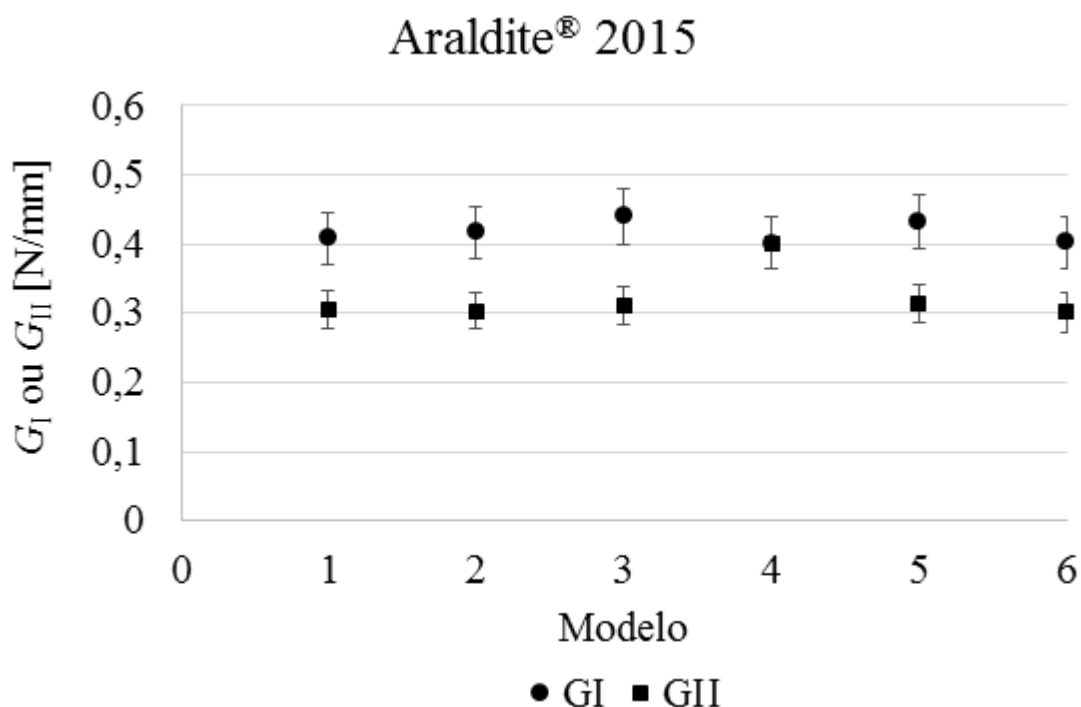


Figura 48 - Resumo dos resultados experimentais obtidos do adesivo Araldite® AV138

3.1.4.2.2 Envelope de fratura

Tendo por base o método CBBM, na Figura 49 está representado o envelope de fratura do adesivo Araldite® 2015, no qual se pode analisar qual dos expoentes, aplicado à equação 13, melhor caracteriza a relação entre G_I e G_{II} .

Pela Figura 49 pode-se constatar que os vários os ensaios dos provetes apresentaram resultados ligeiramente diferentes e que possuem uma dispersão com algum significado.

Também se pode observar que os resultados obtidos se aproximam da curva relativa ao expoente 0,5, apesar da dispersão verificada, o que permite concluir que para este adesivo este parâmetro da lei de propagação é o que melhor se adequa para a análise e previsão do comportamento do adesivo.

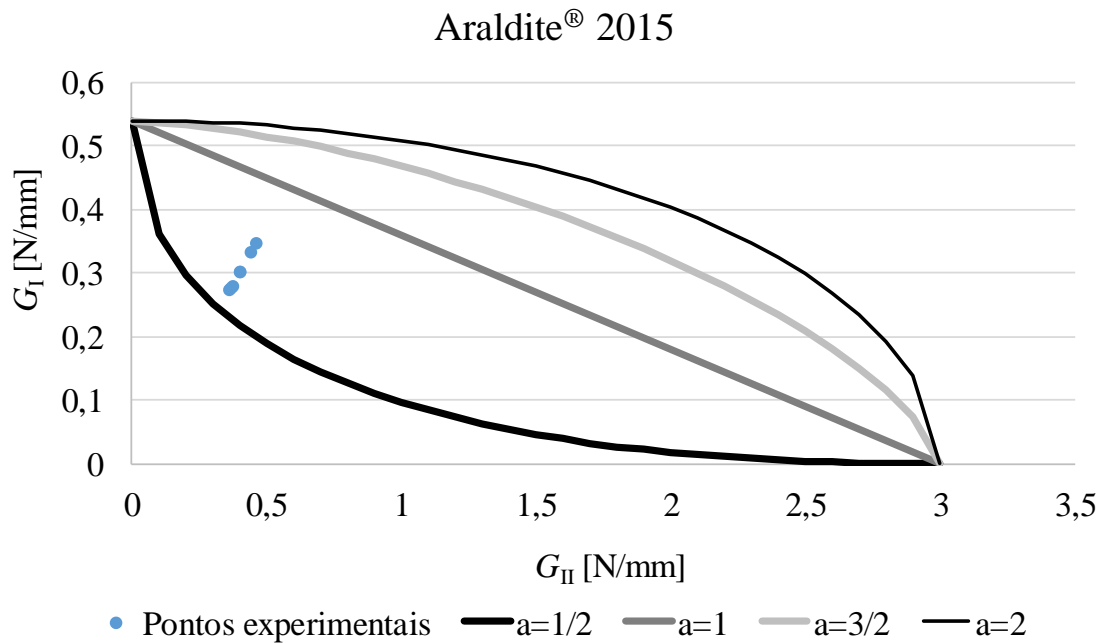


Figura 49 - Envelope de fratura experimental do adesivo Araldite® 2015

3.1.4.3 Sikaforce® 7752

Para o adesivo Sikaforce® 7752, foram testados 7 provetes, sendo obtidas as curvas $P-\delta$ indicadas na Figura 50.

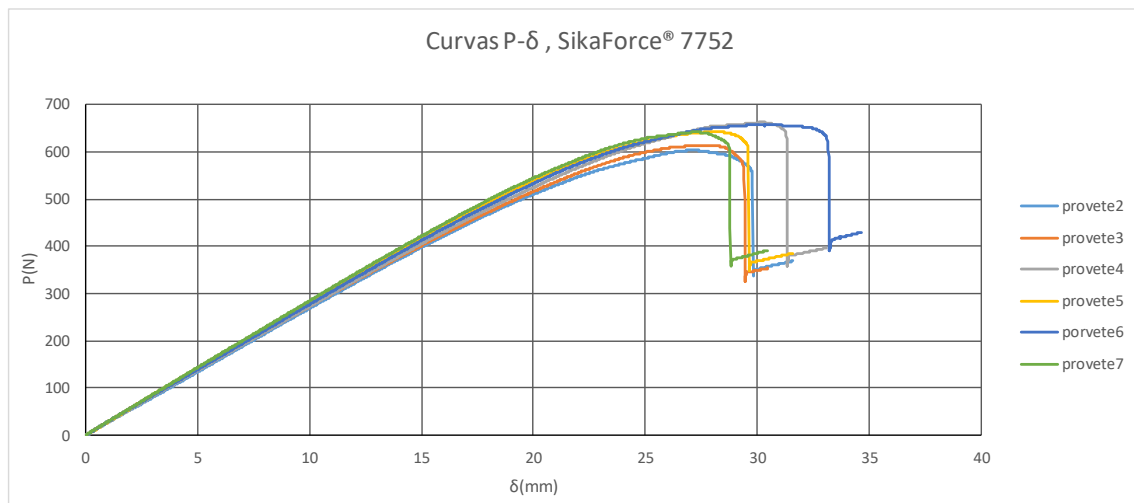


Figura 50--Curvas $P-\delta$ obtidas do adesivo Sikaforce® 7752

Pela observação dos gráficos presentes na Figura 50 pode-se concluir que o adesivo apresentou uma rigidez semelhante os vários ensaios, como é mostrado pelo declive das curvas até ao ponto de força máxima.

Também se pode observar que, após a rotura, os vários provetes apresentaram comportamentos similares, dado que em todos elas a força registou uma diminuição abrupta.

Na Tabela 15 pode-se observar os valores de força máximos obtidos durante o ensaio e o deslocamento máximo que os vários provetes atingiram durante os ensaios, sendo que os valores referentes ao provete 1 foram ignorados devido ao facto de durante o ensaio o provete ter saído da área de fotografia, pelo que foi impossível monitorizar o comprimento da fenda.

Tabela 15 - Valores máximos de P e respetivo δ obtidos nos ensaios do adesivo Sikaforce® 7752

# Provete	Deslocamento (mm)	Força (N)
2	27,0733	603,6918
3	27,6380	613,4193
4	30,2858	662,8513
5	28,2358	642,9036
6	29,9734	657,4471
7	27,2140	642,1884
Média	28,4034	637,0836
Desvio Padrão	1,404	23,72167

3.1.4.3.1 Estimativa de G_c

Após a obtenção dos resultados experimentais procedeu-se à sua análise de modo a obter os valores de G_I e G_{II} resultantes dos vários provetes ensaiados.

Na Figura 51e Figura 52 estão registadas as curvas R referentes aos modelos utilizados para a determinação de G_I e G_{II} de um provete representativo dos resultados obtidos.

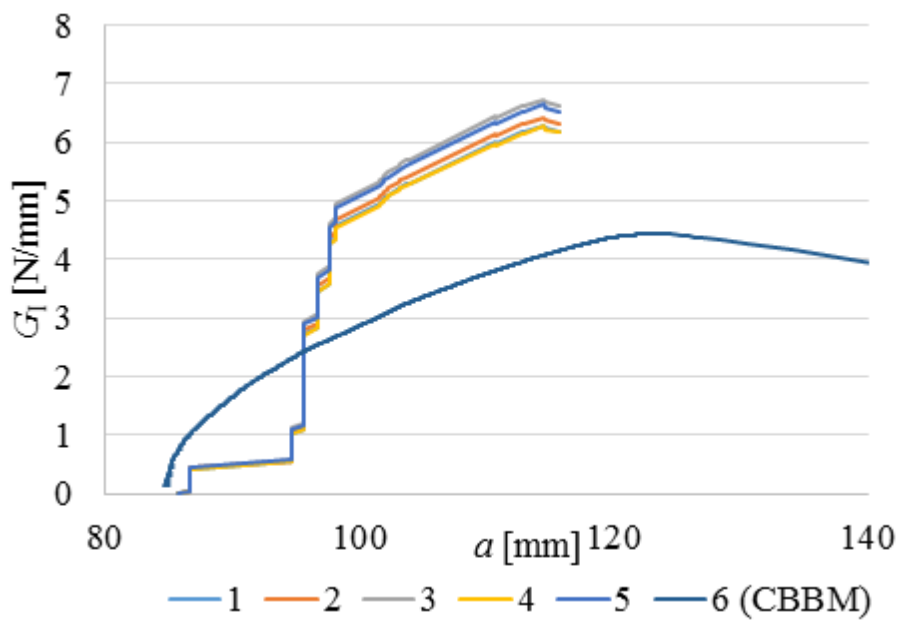


Figura 51 - Curvas-R relativas a G_I , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #6 do adesivo Sikaforce® 7752

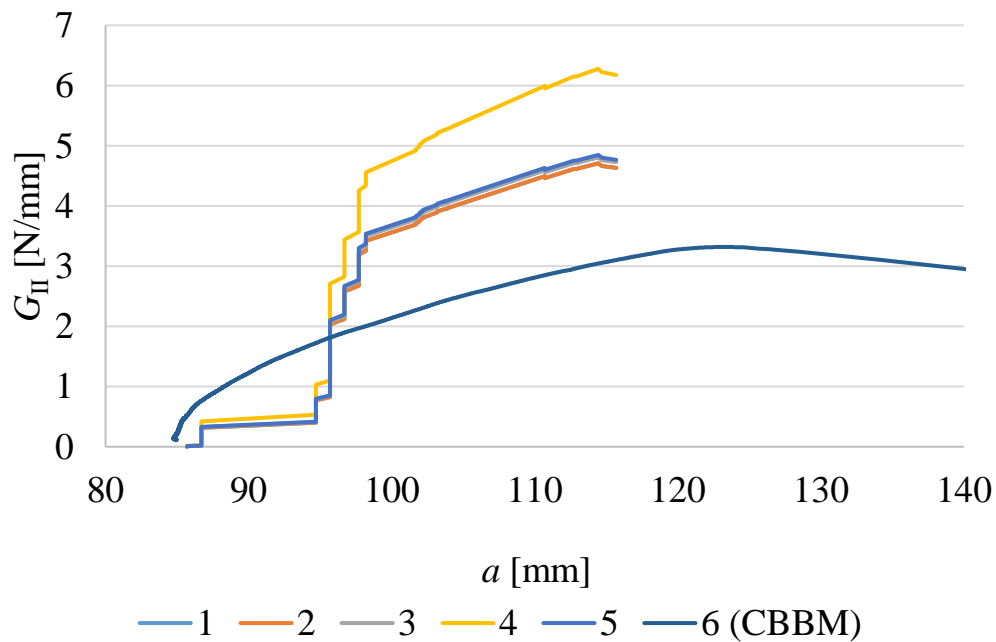


Figura 52 - Curvas-R relativas a G_{II} , obtidas utilizando os diversos modelos, referentes ao provete #6 do adesivo Sikaforce® 7752

Pela análise das curvas R pode-se observar que o método CBBM, ao contrário do que aconteceu com os outros adesivos, não teve o comprimento de fenda equivalente deslocado para a direita aproximando-se mais dos comprimentos de fenda reais.

Também se pode observar que, apesar de se identificar um patamar, este possui um declive considerável indicando que a propagação da fenda não ocorreu com valores constantes de G_I e G_{II} . Esse fato ocorre devido a este adesivo apresentar uma ductilidade elevada, que origina uma zona afetada plasticamente pela propagação da fenda de dimensões consideráveis, o que faz com que os efeitos do punção de carregamento artificialmente aumentem os valores medidos de G_I e G_{II} .

Devido a esse efeito, para a determinação dos valores de G_I e G_{II} apenas foi considerada a zona inicial da propagação da fenda.

Os valores de G_I e G_{II} obtidos estão representados na Tabela 16 e

Tabela 17, pela ordem respetiva.

Tabela 16 - Valores de G_i obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
2	3,196	3,272	3,453	3,182	3,397	3,318	3,287
3	3,184	3,256	3,426	3,171	3,373	3,401	3,284
4	3,475	3,559	3,758	3,459	3,696	3,650	3,580
5	3,250	3,330	3,519	3,235	3,460	3,524	3,366
6	3,137	3,211	3,388	3,123	3,333	3,418	3,249
7	3,356	3,432	3,611	3,343	3,555	3,612	3,466
Média	3,266	3,343	3,526	3,252	3,469	3,487	3,372
Desvio Padrão	0,127	0,130	0,138	0,126	0,136	0,130	0,128

Tabela 17 - Valores de G_{II} obtidos para o adesivo Sikaforce® 7752

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
2	2,386	2,386	2,443	3,182	2,468	2,486	2,534
3	2,378	2,378	2,432	3,171	2,455	2,548	2,534
4	2,594	2,594	2,657	3,459	2,684	2,716	2,757
5	2,426	2,426	2,486	3,235	2,511	2,640	2,593
6	2,342	2,342	2,398	3,123	2,422	2,559	2,504
7	2,507	2,507	2,563	3,343	2,588	2,705	2,675
Média	2,439	2,439	2,496	3,252	2,521	2,609	2,599
Desvio Padrão	0,095	0,095	0,097	0,126	0,098	0,093	0,098

Na Figura 53 pode-se observar graficamente o resumo dos resultados obtidos para G_I e G_{II} .

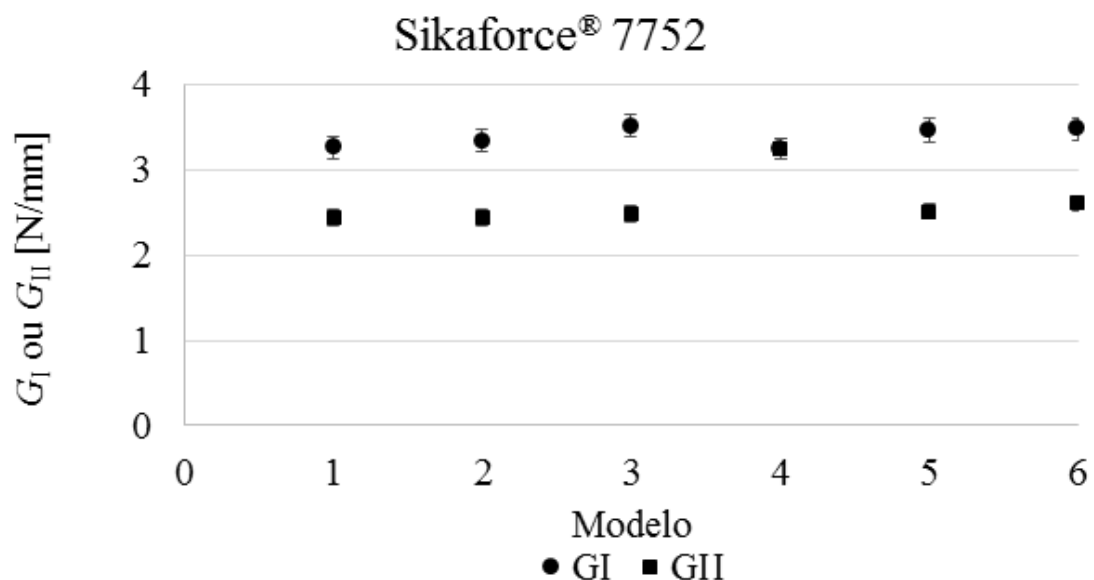


Figura 53 - Resumo dos resultados experimentais obtidos do adesivo Sikaforce® 7752

3.1.4.3.2 Envelope de Fratura

Tendo por base o método CBBM, na Figura 54 está representado o envelope de fratura do adesivo Sikaforce® 7752. Neste envelope de fratura estão representados vários expoentes de modo a ser possível visualizar qual representa o comportamento do adesivo. Pela figura pode-se constatar que os vários os ensaios dos provetes apresentaram resultados ligeiramente diferentes e que possuem uma dispersão não desprezável. Também se pode observar que os resultados obtidos se aproximam da curva relativa ao expoente 2 que, apesar da dispersão verificada, permite concluir que é o critério que melhor representa o comportamento do adesivo.

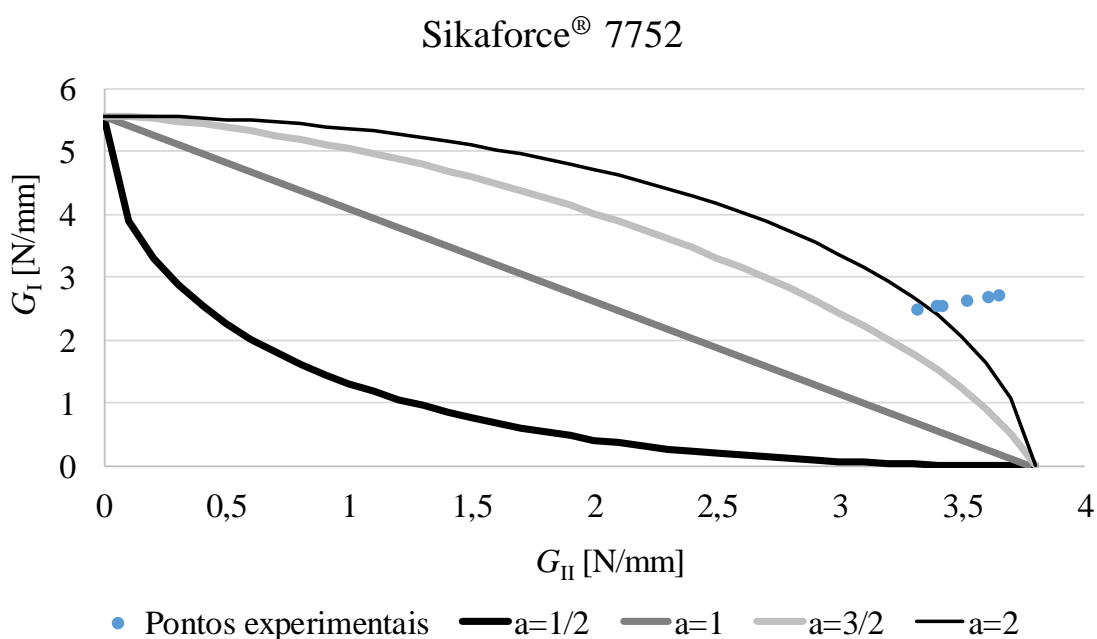


Figura 54 - Envelope de fratura experimental do adesivo Sikaforce® 7752

3.1.5 Análise dos resultados

Após a análise dos vários adesivos pode-se observar que os vários modelos estudados apresentam resultados semelhantes para cada adesivo, com exceção do modelo 4 que apresentou valores de G_{II} superiores aos outros métodos.

Para G_I , os resultados apresentam uma variação reduzida entre os vários provetes. Para o adesivo Araldite® AV138 obteve-se uma variação aproximada de 5% em relação ao valor médio calculado. O adesivo Araldite® 2015, apresentou uma variação ligeiramente superior à do Araldite® AV138, de 8%. O adesivo que apresentou uma variação menor foi o Sikaforce® 7752, em que se obteve valores de aproximadamente 4%.

Para G_{II} a variação obtida entre os vários resultados foi semelhante à variação obtida para G_I .

A reduzida variação verificada (inferior a 10% em todos os adesivos) mostra a boa repetibilidade dos ensaios que se obteve durante a sua realização.

Pela observação dos envelopes de fratura, também se pode observar que, para cada adesivo, os provetes apresentaram comportamentos semelhantes apesar de poderem apresentar uma pequena dispersão nos resultados.

Também se pode observar que os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 seguem uma lei de libertação de energia com expoente de 0,5 enquanto para o adesivo Sikaforce® 7752 um expoente de 2 se adequa melhor.

Estes expoentes, e as respetivas curvas, permitem efetuar previsões sobre como o adesivo se irá comportar sob cargas em modo misto. Para um expoente de 2, como 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 do que no caso do expoente 0,5, como obtido para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015. 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.

Para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 pode-se observar que os valores de G_I são mais aproximados dos valores em modo puro do que os de G_{II} , o que indica que estes adesivos são mais afetados pela mixicidade de esforços pela presença dos esforços de corte.

Na Tabela 18 apresentam-se os valores médios obtidos nos ensaios experimentais para os três adesivos estudados. Pela análise dos resultados obtidos pode-se verificar que o adesivo SikaForce® 7752 é aquele que necessita de mais energia de deformação para ocorrer a propagação do dano. Pode-se observar que o adesivo Sikaforce® obteve valores de G_I e G_{II} mais de 50 vezes superiores aos registados para o adesivo Araldite® AV138 e mais de 7 vezes superiores aos obtidos para o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 18 - Resumo dos resultados obtidos para os 3 adesivos estudados

	Araldite® AV138	Araldite® 2015	Sikaforce® 7752
G_I	0,0582	0,415	3,372
G_{II}	0,0450	0,320	2,259

Dos resultados obtidos para os três adesivos estudados observa-se que o SikaForce® 7888 é o mais dúctil, sendo o Araldite® AV138 o mais frágil. Como é sabido, as propriedades dos adesivos influenciam altamente a resistência da junta. No entanto, um adesivo mais forte não significa necessariamente ter uma resistência superior na junta. Na verdade, um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nos bordos da junta

adesiva uma tensão elevada, mas não permite a redistribuição do esforço para o interior desta. Como resultado, a tensão de corte média de rotura é muito baixa. Este é o comportamento expectável do Araldite® AV138. Por outro lado, os adesivos com elevada ductilidade e de baixo módulo têm geralmente uma resistência baixa. No entanto, eles são capazes de distribuir as tensões de forma mais uniforme ao longo da junta por deformação plástica (devido à baixa rigidez), o que torna as juntas muito mais resistentes do que com os adesivos mais resistentes e frágeis [46]. Enquadra-se nesta categoria o Araldite® 2015, que apresenta uma ductilidade moderada para adesivos estruturais e uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138.

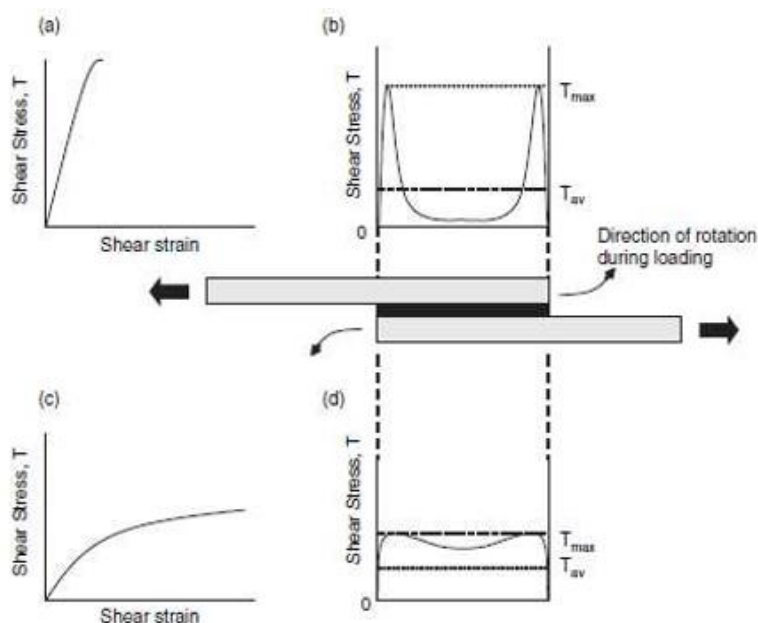


Figura 55 - Distribuição da tensão de corte em adesivos frágeis e dúcteis [46]

Pela Figura 55 podemos 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 da sobreposição atingem os valores limites do adesivo (b). Em adesivos dúcteis, com uma curva típica de tensão vs. deformação como mostrado em (c), a rotura tem lugar após plastificação do adesivo nas extremidades da sobreposição e 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 superior. A flexibilidade do adesivo mais dúctil permite à junta acomodar mais facilmente o movimento dos aderentes durante o carregamento; a tensão é então distribuída ao longo de uma área maior. Ora adesivos frágeis são mais sensíveis à propagação da fenda enquanto os dúcteis resistem mais à sua propagação, o que se reflecte numa maior resistência [47]. O SikaForce® 7888, uma vez que combina elevada resistência com grande ductilidade, está em vantagem comparativamente aos anteriores no que concerne à 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 (8). Os adesivos frágeis são muito sensíveis a defeitos, tais como espaços vazios e microfissuras [48]. 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 [49].

3.2 Trabalho numérico

A parte numérica deste trabalho tem o objetivo principal de reproduzir os resultados experimentais através da utilização de leis de dano coesivo e critérios de modo misto que sejam representativos do comportamento dos adesivos utilizados. Estas leis podem ser aplicadas posteriormente para efeitos de previsão da resistência de juntas adesivas com estes adesivos. As simulações foram feitas 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 6.13. Este software é baseado 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 junta colada foi usado um elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS®), já utilizado em estudos anteriores [50] e que utilizou o MDC com lei triangular de amaciamento. 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 foram adaptadas à zona do provete e aos esforços previstos tendo como dimensão base 0,5 mm x 1,0 mm. Na Figura 56 apresenta-se uma visão geral do refinamento da malha utilizada nos provetes SLB.



Figura 56-Refinamento geral de malha do modelo utilizado nos provetes SLB

Na Figura 57 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.

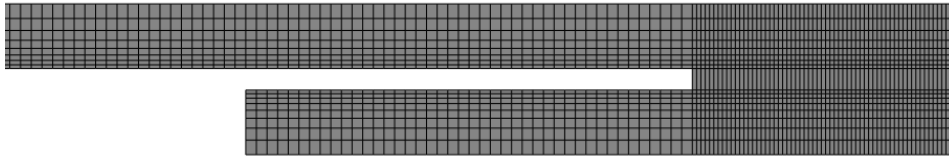


Figura 57-Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na proximidade da extremidade da fenda

Na Figura 58 está representada em detalhe a malha na zona de contato entre o provete e o punção de carregamento, onde se pode observar um maior refinamento de malha, sendo utilizados elementos com largura de 0.05 mm, e também a utilização de 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 contato entre o provete e os cilindros de suporte foi utilizada uma malha idêntica à utilizada na zona de contacto com o punção de carregamento.

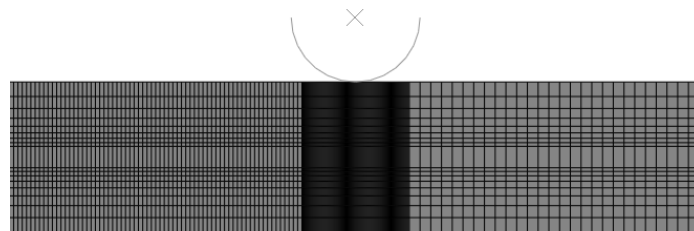


Figura 58- Detalhe do refinamento de malha de elementos finitos na zona de contato entre o provete e o punção de carregamento

As variações do tamanho da malha e a utilização do efeito *bias* na 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 59), de forma a reproduzir as condições reais dos ensaios experimentais, restringiram-se os cilindros de suporte nas duas direções (vertical e horizontal) e rotação no plano. Também se restringiu o punção de carregamento na direção horizontal e aplicou-se um deslocamento vertical com sentido descendente. finalmente, restringiu-se um nó a meio do comprimento do provete na direção horizontal para evitar o deslocamento horizontal do mesmo.

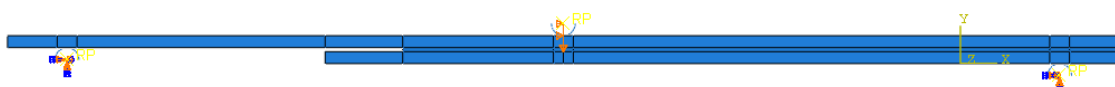


Figura 59- Condições fronteira definidas para o ensaio numérico

Foi necessário introduzir condições de contato 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. Foi utilizada uma formulação com pequeno deslizamento do tipo *surface to surface*. Foi utilizado um comportamento tangencial sem fricção e um comportamento normal do tipo *hard contact*.

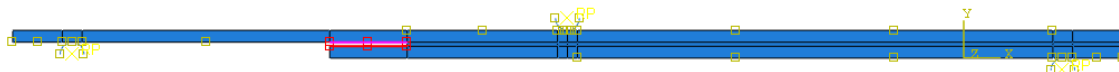


Figura 60 - Condições de contacto para o ensaio numérico

3.2.2 Modelo de dano coesivo

3.2.2.1 Modelo de dano 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 resultados mais precisos [51]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [52], linear parabólico [53], exponencial [54], polinomial [55] e trapezoidal [56]. 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 [57]. O modelo triangular 2D implementado no *software* ABAQUS® está representado na Figura 61, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em 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 respetivo forem anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar os esforços de tensão e corte [58]. 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.

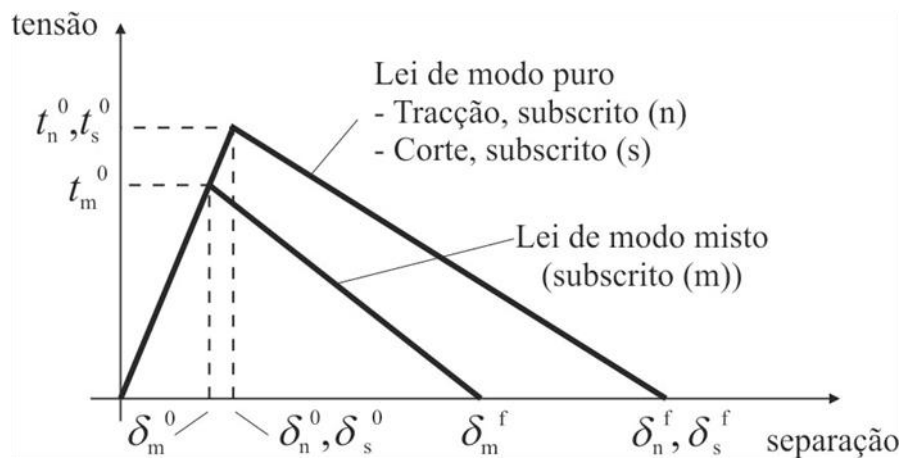


Figura 61 -MDC triangular implementado no *software* ABAQUS®.

Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz K_{COH} , que relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida como:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \boldsymbol{\varepsilon} \quad (72)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja considerada uma formulação local, usada para simular fraturas de espessura nula, os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [42]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0, \quad (73)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [58]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério quadrático de tensões, expresso pela seguinte expressão

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1. \quad (74)$$

$\langle \ \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [59]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 61), pela igualdade da equação (74), a rigidez do

material começa a sofrer um processo de amaciamento. A separação completa de um par de nós homólogos (δ_m^f na Figura 61) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (75)$$

3.2.3 Validação das leis coesivas obtidas

As simulações numéricas realizadas tiveram como condições as apresentadas anteriormente de forma a validar os valores obtidos pelos ensaios experimentais e obter uma lei coesiva que seja representativa do comportamento do adesivo, de modo a que seja possível a previsão da resistência de juntas adesivas para os adesivos estudados.

Para tal, e como os valores obtidos experimentalmente não correspondem às taxas de libertação de energia em modo puro, optou-se por usar valores de G_{IC} e G_{IIC} para todos os provetes determinados experimentalmente em trabalhos anteriores para condições geométricas idênticas. Também se teve em consideração que, de modo a que os ensaios numéricos reproduzissem as condições experimentais, os valores de α_0 fossem individualmente ajustados aos valores obtidos experimentalmente.

3.2.3.1 Araldite® AV138

Na Tabela 19 estão indicados os valores de força máxima e o respetivo deslocamento obtidos nos vários ensaios numéricos realizados nos provetes com o adesivo Araldite® AV138. Estes valores foram obtidos através das curvas $P-\delta$ originadas durante o processamento da análise numérica.

Na Figura 62 e na Figura 63 estão representas as curvas $P-\delta$ numéricas dos provetes 3 e 5, respetivamente, sendo também representada a curva obtida experimentalmente do provete respetivo. Nestes gráficos pode-se observar que os valores de pico atingidos são semelhantes nos ensaios experimentais e nos ensaios numéricos, para os adesivos respetivos. Também se pode observar que as curvas possuem um declive semelhante até à força máxima.

Tabela 19- Valores máximos de P e respetivo δ obtidos nos ensaios do adesivo Araldite® AV138

# Provete	Força (N)	Deslocamento (mm)
1	82,48	1,96
2	82,09	1,96
3	82,97	1,92
4	81,00	1,96
5	68,24	2,46
6	80,80	1,96
7	77,19	2,13
Média	79,25	2,05
Desvio Padrão	5,22	0,19

Em termos de comportamento após o valor de pico, o adesivo Araldite® AV138 apresentou uma correlação distinta entre os valores numéricos e os experimentais consoante os provetes estudados. Por exemplo, para o provete 3 representado na Figura 62, o comportamento após pico é similar entre o ensaio experimental e o ensaio numérico, sendo que a força teve uma diminuição progressiva à medida que a fenda se propagava. Por outro lado, para o provete 5, representado na Figura 63, os ensaios experimentais e os numéricos, após se atingir o valor de pico apresentaram comportamentos distintos, tendo a força apresentado uma diminuição progressiva nos ensaios numéricos e uma diminuição abrupta nos ensaios experimentais. Esta diminuição abrupta pode ter ocorrido devido a defeitos no provete ensaiado.

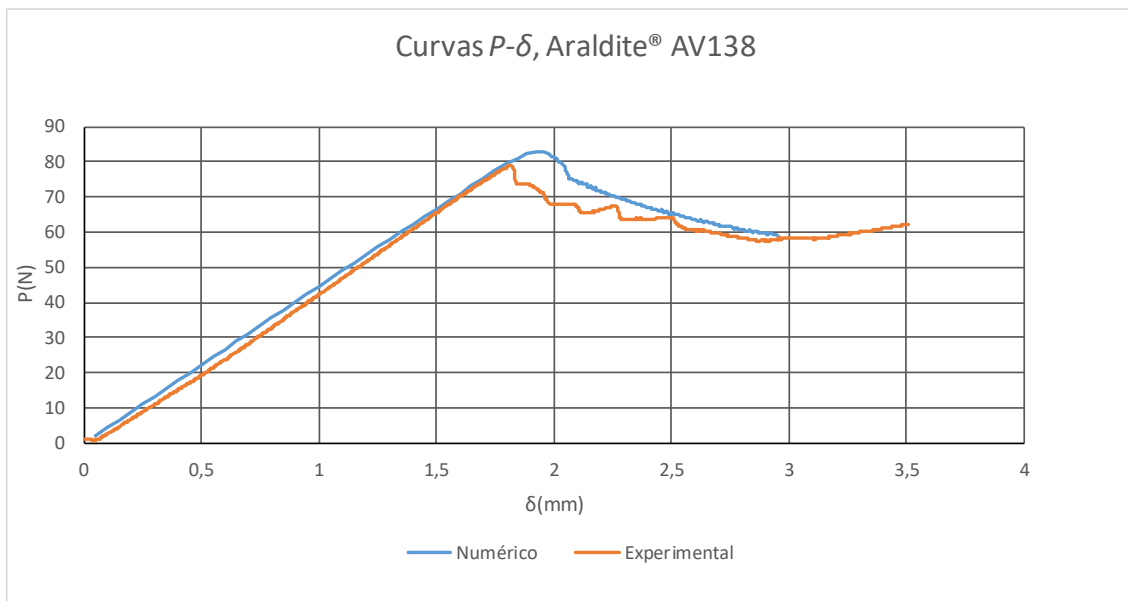


Figura 62 - Comparação entre a curva P - δ numérica com a experimental do provete 3 do adesivo Araldite® AV138

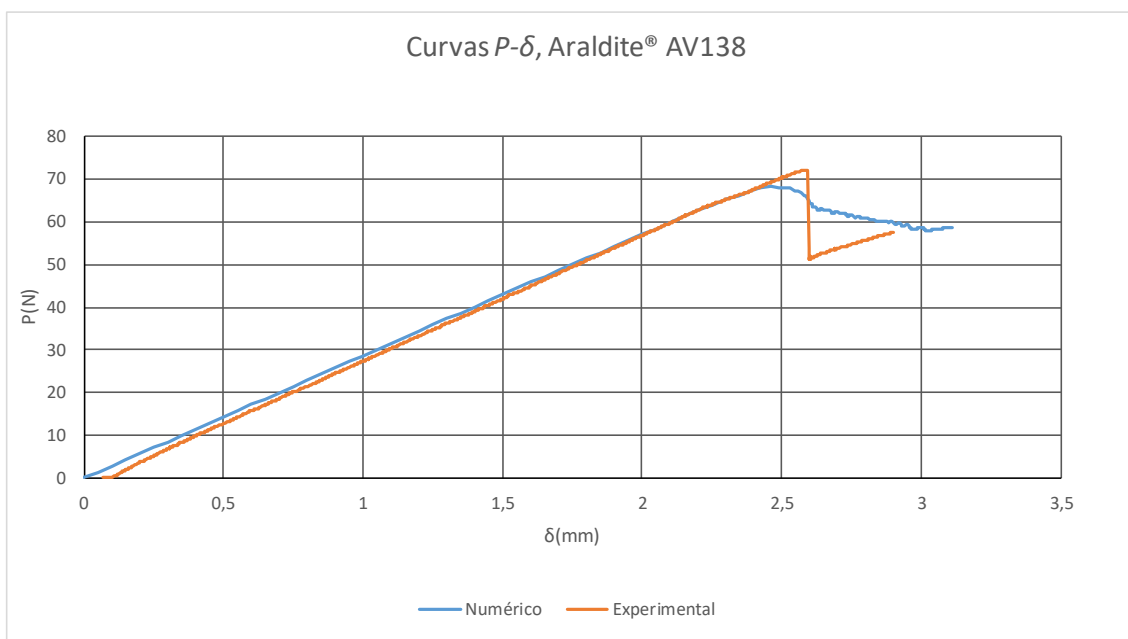
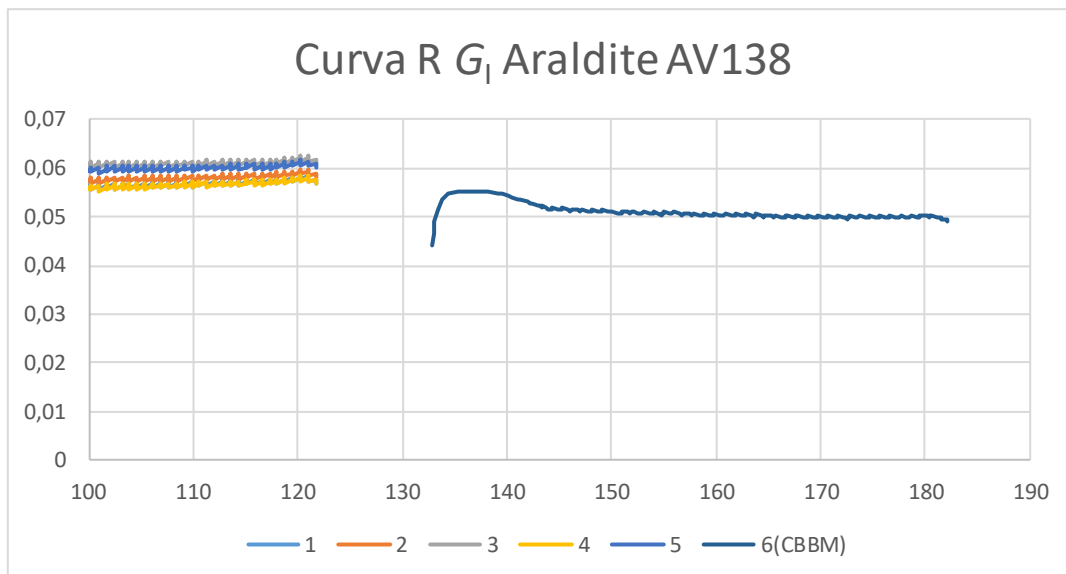
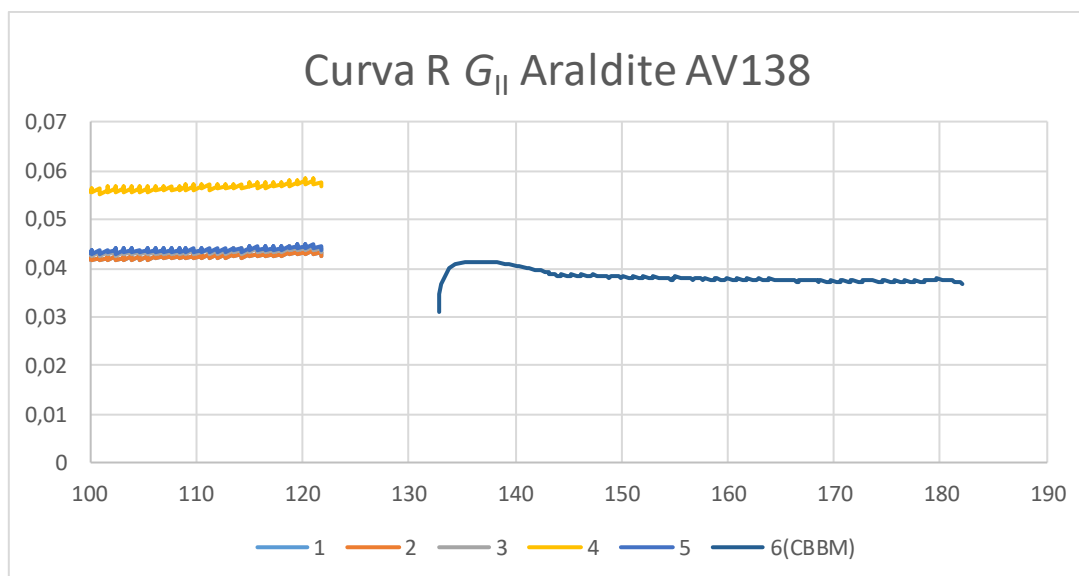


Figura 63 - Comparação entre a curva P - δ numérica com a experimental do provete 5 do adesivo Araldite® AV138

Na Figura 64 e na Figura 65 estão mostradas as curvas R referentes ao provete 3 do adesivo Araldite® AV138 e na Figura 3 e na Figura 66 e na Figura 67 pode-se observar as curvas R referentes ao provete 5 representativas do comportamento do adesivo. Pode-se observar que existe um patamar bem definido das curvas R em que os valores dos métodos baseados no comprimento de fenda real e no comprimento de fenda equivalente são semelhantes. Para G_{II} , tal como nos ensaios experimentais, o método 4 apresenta valores superiores aos outros métodos.

Figura 64 - Curva R para G_I obtida pelos ensaios numéricos no provete 3 do adesivo Araldite® AV138Figura 65 - Curva R para G_{II} obtida pelos ensaios numéricos no provete 3 do adesivo Araldite® AV138

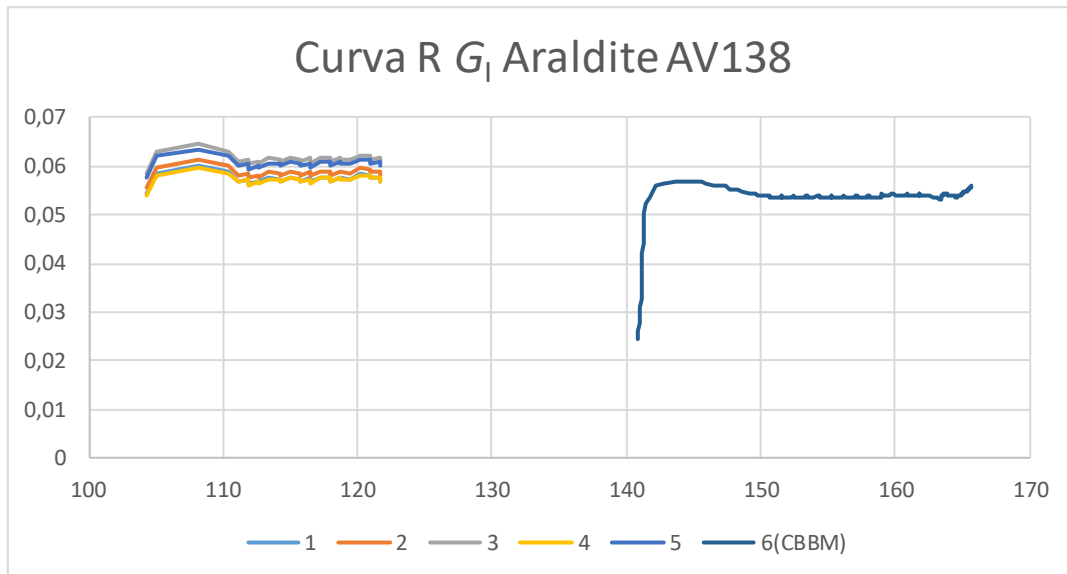


Figura 66 - Curva R para G_I obtida pelos ensaios numéricos no provete 5 do adesivo Araldite® AV138

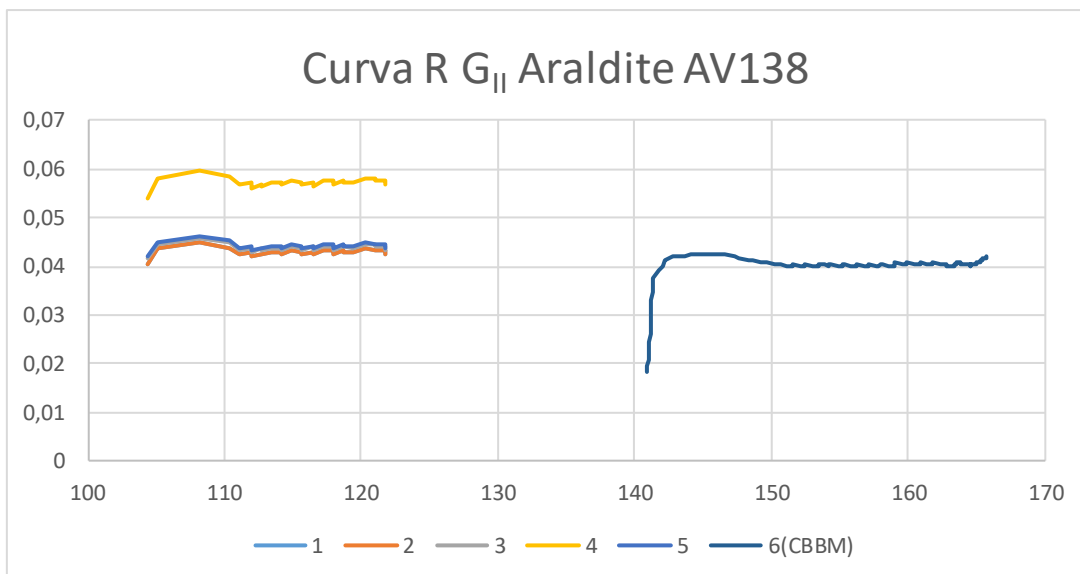


Figura 67 - Curva R para G_{II} obtida pelos ensaios numéricos no provete 5 do adesivo Araldite® AV138

Na Tabela 20 e na Tabela 21 estão indicados os valores de patamar de G_I e G_{II} obtidos pelos ensaios numéricos para todos os provetes, em que se pode observar que, para cada modelo, os vários provetes obtiveram resultados semelhantes, não apresentando variações significantes de provete para provete como é comprovado pelos reduzidos desvios padrão obtidos.

Tabela 20- Valores de G_I obtidos numericamente para o adesivo Araldite® AV138

# Provete	1	2	3	4	5	6(CBBM)	Média
1	0,0569	0,0582	0,0612	0,0567	0,0603	0,0562	0,0582
2	0,0568	0,0581	0,0611	0,0566	0,0601	0,0558	0,0581
3	0,0568	0,0581	0,0611	0,0566	0,0602	0,0553	0,0580
4	0,0574	0,0587	0,0617	0,0571	0,0608	0,0547	0,0584
5	0,0574	0,0586	0,0614	0,0572	0,0606	0,0570	0,0587
6	0,0569	0,0581	0,0612	0,0566	0,0602	0,0550	0,0580
7	0,0571	0,0583	0,0613	0,0569	0,0604	0,0558	0,0583
Média	0,0570	0,0582	0,0612	0,0568	0,0603	0,0559	0,0582
Desvio Padrão	0,0002	0,0002	0,0001	0,0003	0,0001	0,0007	0,0003

Tabela 21-Valores de G_{II} obtidos numericamente para o adesivo Araldite® AV138

# Provete	1	2	3	4	5	6(CBBM)	Média
1	0,0425	0,0425	0,0434	0,0567	0,0439	0,0420	0,0452
2	0,0425	0,0425	0,0434	0,0566	0,0438	0,0417	0,0451
3	0,0425	0,0425	0,0434	0,0566	0,0438	0,0414	0,0450
4	0,0429	0,0429	0,0438	0,0571	0,0442	0,0409	0,0453
5	0,0429	0,0429	0,0438	0,0572	0,0442	0,0427	0,0456
6	0,0425	0,0425	0,0434	0,0566	0,0438	0,0412	0,0450
7	0,0426	0,0426	0,0436	0,0569	0,0440	0,0417	0,0452
Média	0,0426	0,0426	0,0436	0,0568	0,0440	0,0417	0,0452
Desvio Padrão	0,0002	0,0002	0,0002	0,0003	0,0002	0,0006	0,0002

3.2.3.2 Araldite® 2015

Na Tabela 22 pode-se observar os valores de pico de força obtidos nas várias simulações e o deslocamento correspondente para as juntas com o adesivo Araldite® 2015. Pode-se observar que, em comparação com o adesivo Araldite® AV138, o Araldite® 2015 atingiu forças máximas superiores durante os ensaios devido ao facto de possuir

maiores tensões de cedência e maiores taxas de libertação de energia aquando da propagação da fenda. Também se pode observar que os valores de deslocamento vertical do punção foram semelhantes para os vários provetes, e em comparação com os deslocamentos obtidos nos ensaios do adesivo Araldite® foram superiores.

Tabela 22 - Valores máximos de P e respetivo δ obtidos nos ensaios do adesivo Araldite® 2015

# Proвете	Força (N)	Deslocamento (mm)
1	185,24	5,81
2	181,63	4,79
3	189,10	5,06
4	188,85	5,11
5	178,90	4,90
6	188,15	5,61
7	181,68	4,79
Média	184,79	5,16
Desvio Padrão	3,48	0,32

Na Figura 68 e na Figura 69 estão representadas as curvas P - δ experimentais e numéricas para os provetes 1 e 2, cujo comportamento é representativo dos vários provetes.

Pode-se observar que até ser atingido o ponto de força máxima, as curvas numéricas e experimentais apresentam declives semelhantes. Também se pode observar que, ao contrário do que aconteceu no adesivo Araldite® AV138, os valores de força máxima apresentam uma ligeira diferença, em que os valores experimentais atingiram valores de aproximadamente 200 N enquanto os ensaios numéricos atingiram valores na ordem dos 180 N.

Para além disso, após ser atingido o valor de força máxima, o comportamento observado entre os ensaios numéricos e os experimentais apresenta algumas diferenças em que os ensaios numéricos apresentam uma pequena diminuição da força aplicada e feita de forma gradual, enquanto nos ensaios experimentais essa diminuição teve uma maior amplitude e ocorreu de forma mais abrupta.

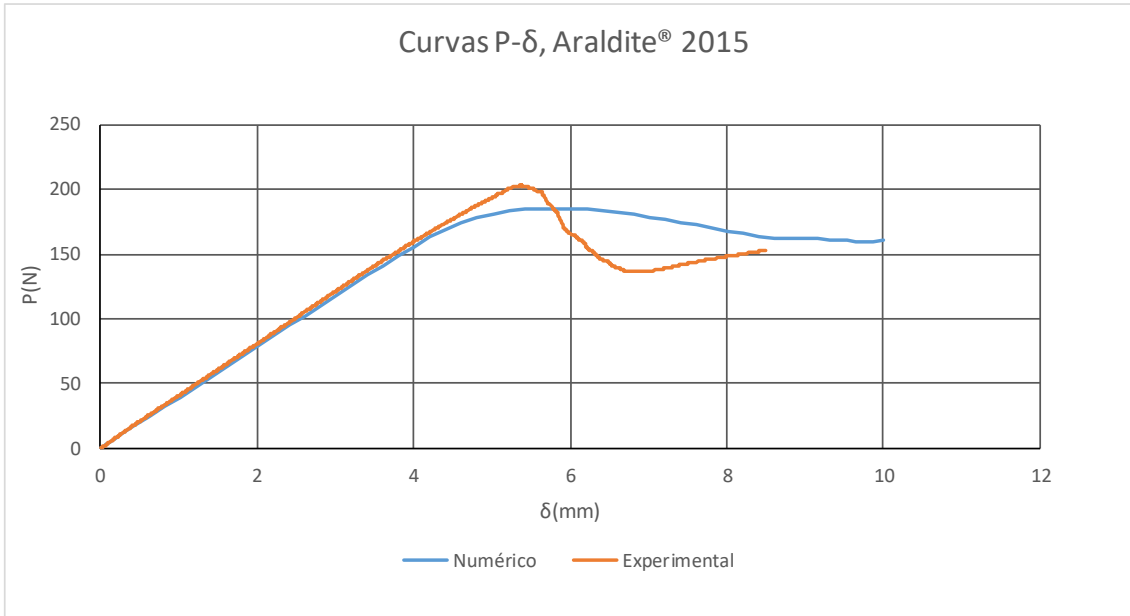


Figura 68 - Comparação entre a curva P - δ numérica com a experimental do provete 1 do adesivo Araldite® 2015

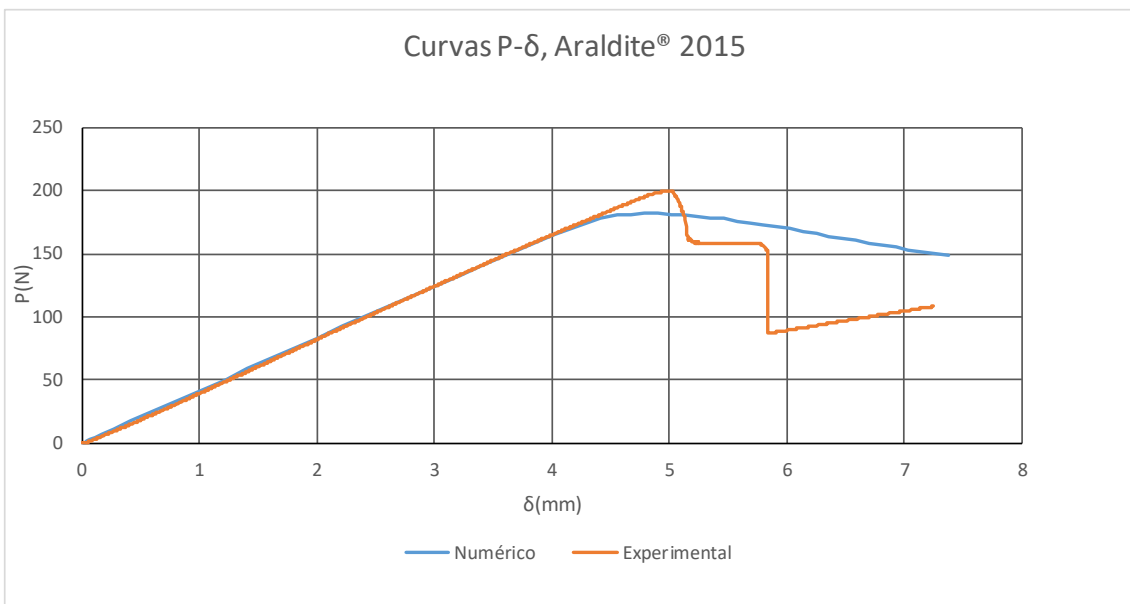


Figura 69 - Comparação entre a curva P - δ numérica com a experimental do provete 2 do adesivo Araldite® 2015

Na Figura 70 e na Figura 71 pode-se observar as curvas R obtidas para o provete 1 do adesivo Araldite® 2015, enquanto que na Figura 72 e na Figura 73 estão representadas as curvas R referentes ao provete 2, representativas do comportamento do adesivo. Pode-se notar que inicialmente os valores apresentam um patamar à medida que a fenda se propaga. À medida que a fenda se propaga, e à medida que a extremidade da fenda se aproxima do punção de carregamento, as taxas de libertação de energia aumentam de forma artificial devida à introdução de esforços de compressão provocados pela interação do punção com o provete.

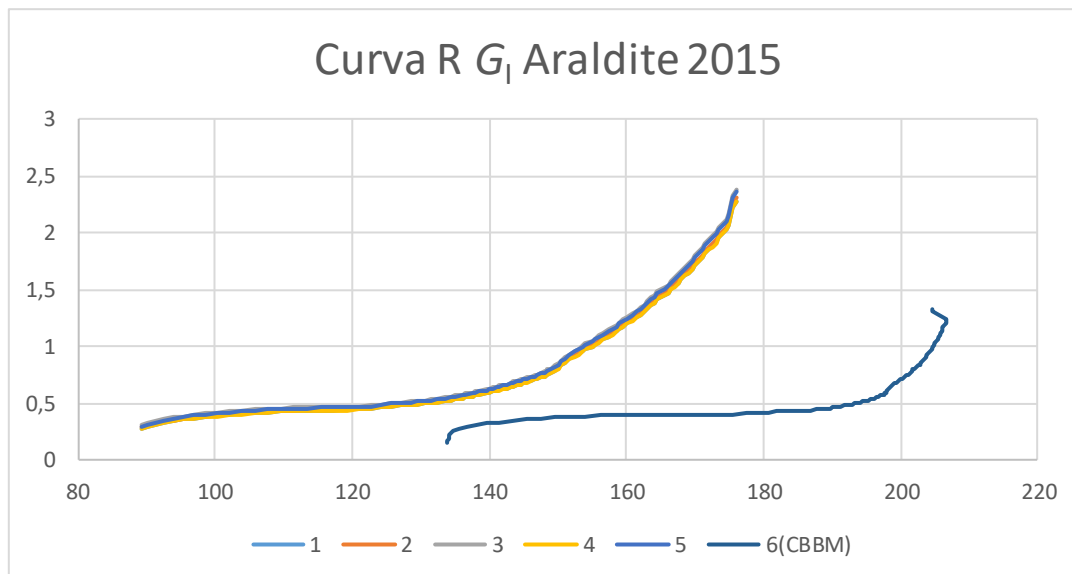


Figura 70 – Curva R para G_I obtida pelos ensaios numéricos no provete 1 do adesivo Araldite® 2015

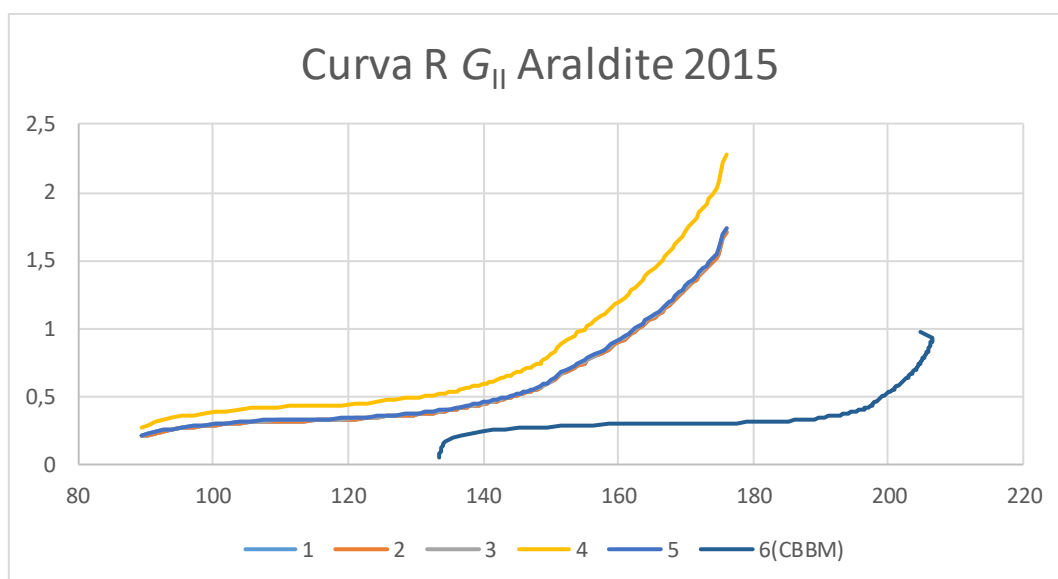


Figura 71 - Curva R para G_{II} obtida pelos ensaios numéricos no provete 2 do adesivo Araldite® AV2015

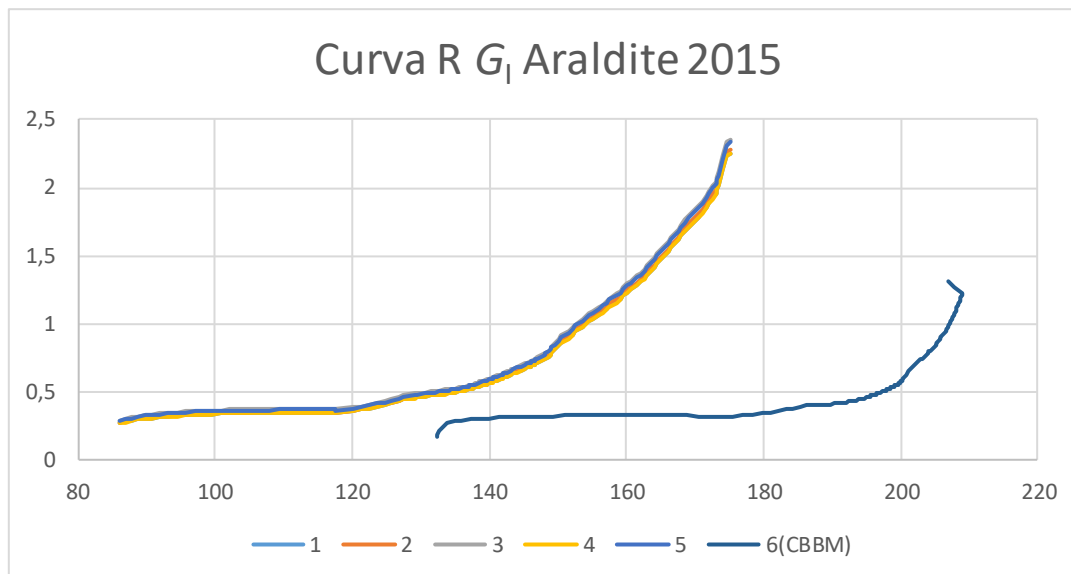


Figura 72 - Curva R para G_I obtida pelos ensaios numéricos no provete 2 do adesivo Araldite® 2015

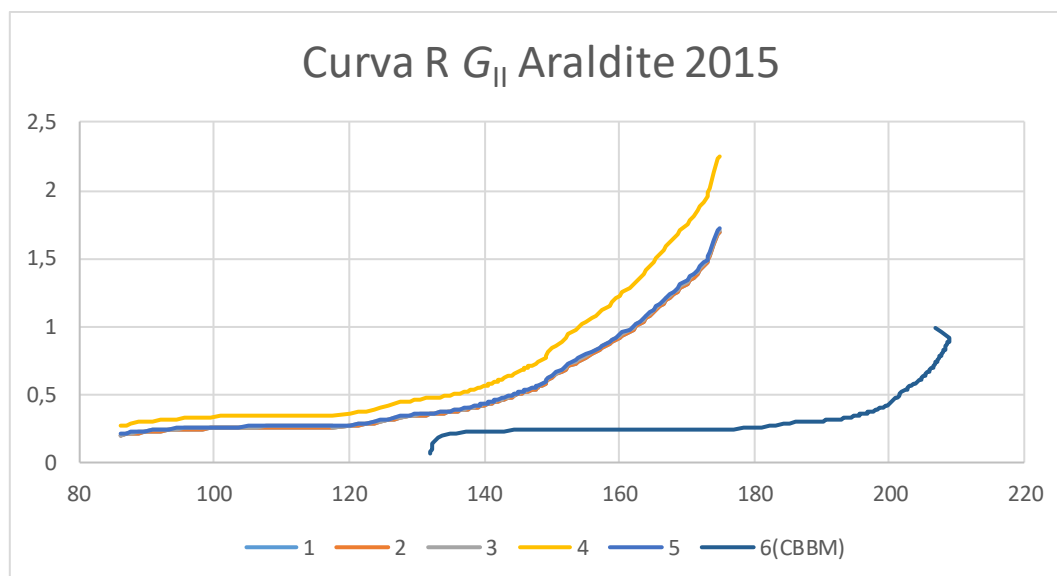


Figura 73 - Curva R para G_{II} obtida pelos ensaios numéricos no provete 2 do adesivo Araldite® AV2015

Na Tabela 23 e na Tabela 24 estão indicados os valores de G_I e G_{II} obtidos pelos ensaios numéricos do adesivo Araldite® 2015, em que se pode observar uma ligeira variação dos resultados obtidos consoante o modelo e o provete analisado.

Pode-se observar que os provetes 2, 5 e 7 apresentaram valores de G_I inferiores em comparação com os outros métodos. Também se pode observar que os métodos 3 e 5 foram os que apresentaram maiores valores de G_I .

Para G_{II} , à semelhança do ocorrido para G_I , os provetes 2, 5 e 7 foram os que apresentaram menores valores. Também se pode observar que o método 4 originou resultados consideravelmente superiores do que os restantes métodos.

Tabela 23-Valores de G_I obtidos numericamente para o adesivo Araldite® 2015

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,3728	0,3816	0,4025	0,3712	0,3960	0,3625	0,3811
2	0,3314	0,3391	0,3573	0,3299	0,3516	0,3263	0,3393
3	0,3509	0,3595	0,3801	0,3492	0,3737	0,3614	0,3625
4	0,3487	0,3572	0,3777	0,3470	0,3713	0,3602	0,3604
5	0,3273	0,3350	0,3533	0,3259	0,3476	0,3238	0,3355
6	0,3786	0,3875	0,4087	0,3770	0,4021	0,3554	0,3849
7	0,3321	0,3399	0,3583	0,3307	0,3526	0,3465	0,3434
Média	0,3488	0,3571	0,3769	0,3473	0,3707	0,3480	0,3581
Desvio Padrão	0,0205	0,0210	0,0222	0,0204	0,0218	0,0166	0,0198

Tabela 24-Valores de G_{II} obtidos numericamente para o adesivo Araldite® 2015

# Provete	1	2	3	4	5	6 (CBBM)	Média
1	0,2784	0,2784	0,2850	0,3712	0,2878	0,2713	0,2953
2	0,2475	0,2475	0,2532	0,3299	0,2557	0,2442	0,2630
3	0,2619	0,2619	0,2684	0,3492	0,2712	0,2737	0,2810
4	0,2602	0,2602	0,2667	0,3470	0,2694	0,2696	0,2789
5	0,2444	0,2444	0,2502	0,3259	0,2527	0,2424	0,2600
6	0,2827	0,2827	0,2894	0,3770	0,2922	0,2764	0,3001
7	0,2480	0,2480	0,2538	0,3307	0,2563	0,2602	0,2662
Média	0,2604	0,2604	0,2666	0,3473	0,2693	0,2625	0,2778
Desvio Padrão	0,0153	0,0153	0,0157	0,0204	0,0158	0,0141	0,0157

3.2.3.3 Sikaforce® 7752

Na Tabela 25 encontram-se os valores obtidos de força máxima e o respetivo deslocamento nos vários ensaios numéricos realizados para o adesivo Sikaforce® 7752. De notar que, devido à maior resistência deste adesivo, foram atingidos maiores valores de força quando comparados com os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015.

Também os valores de deslocamento vertical do punção de carregamento correspondente ao valor de força máxima foram superiores, em comparação com os outros adesivos analisados.

Tabela 25 - Valores máximos de P e respetivo δ obtidos nos ensaios do adesivo Sikaforce® 7752

# Provete	Força (N)	Deslocamento (mm)
1	534,36	17,63
2	526,12	17,63
3	532,06	17,63
4	529,00	17,63
5	526,46	17,63
6	532,44	17,63
7	540,40	17,23
Média	531,55	17,57
Desvio Padrão	3,73	0,10

Na Figura 74 e na Figura 75 estão ilustradas as curvas P - δ experimentais e numéricas para os provetes 2 e 3, respetivamente, do adesivo SikaForce® 7752. Pela comparação das curvas experimentais e numéricas pode-se observar que existiu uma boa repetibilidade do comportamento dos adesivos entre os vários provetes. No entanto registaram-se diferenças entre os ensaios numéricos e os ensaios experimentais. Pode-se observar que em termos de força máxima atingida, os ensaios numéricos atingiram valores significativamente menores que os ensaios experimentais

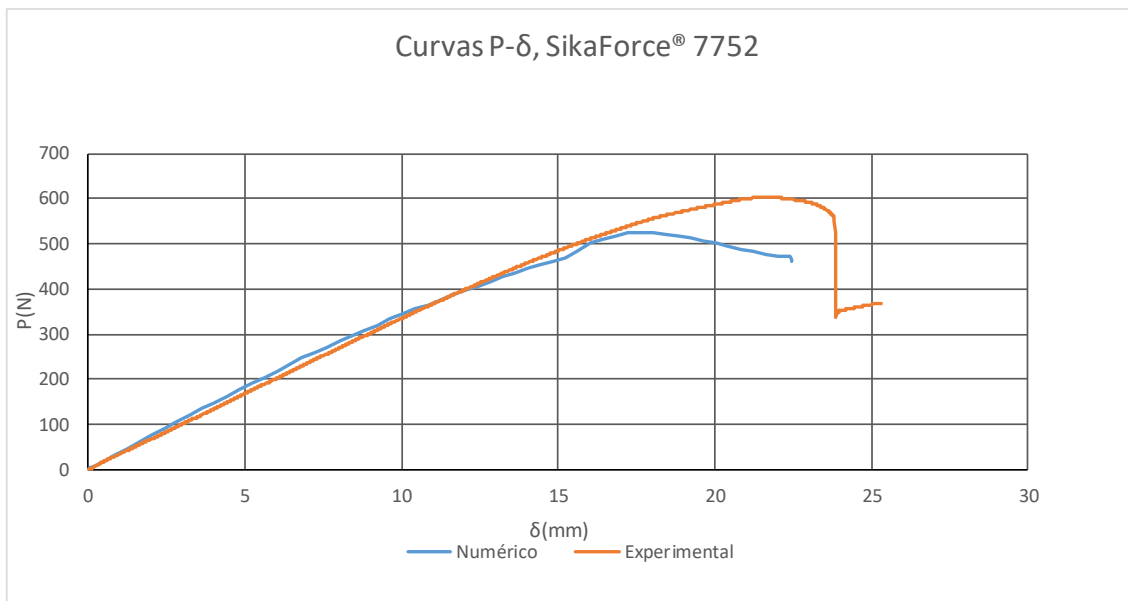


Figura 74 - Comparação entre a curva P- δ numérica com a experimental do provete 2 do adesivo SikaForce® 7752

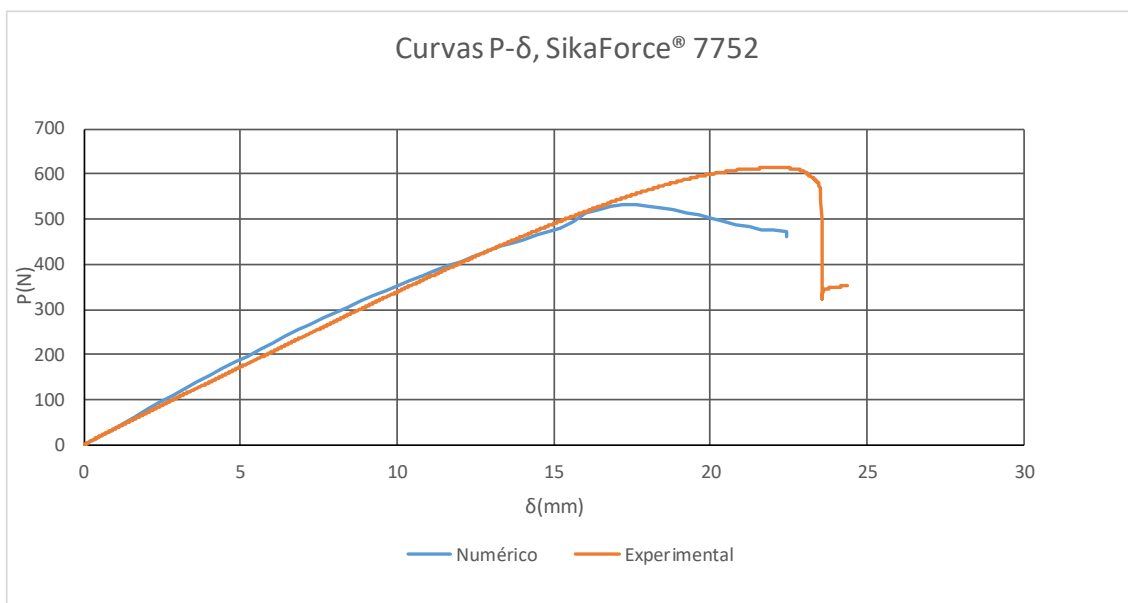


Figura 75 - Comparação entre a curva P- δ numérica com a experimental do provete 3 do adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 76 e na Figura 77 podem-se observar as curvas R obtidas para o provete 2 do adesivo SikaForce® 7752 e na Figura 78 e Figura 79 são mostradas as curvas R referentes ao provete 3, representativas do comportamento do adesivo. Pode-se observar um aumento dos valores de G_I e de G_{II} à medida que a fenda se propaga, devido ao adesivo Sikaforce® 7752 possuir uma ductilidade elevada e originar uma zona afetada plasticamente, que faz com que os efeitos do punção de carregamento aumentem artificialmente os valores medidos de G_I e G_{II} que e tal como anteriormente observado nas curvas R obtidas experimentalmente.

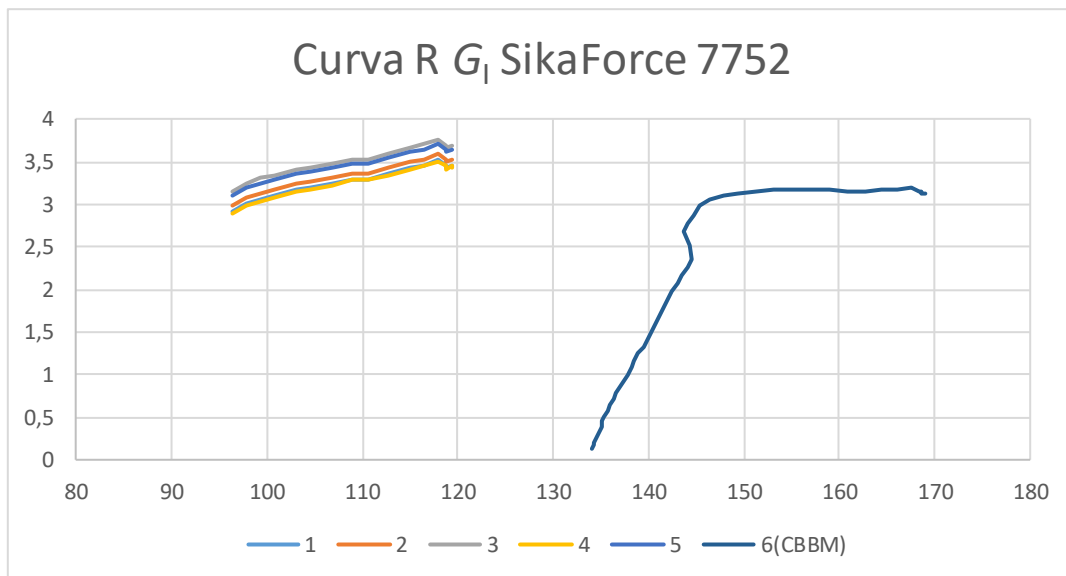


Figura 76 - Curva R para G_I obtida pelos ensaios numéricos no provete 2 do adesivo SikaForce® 7752

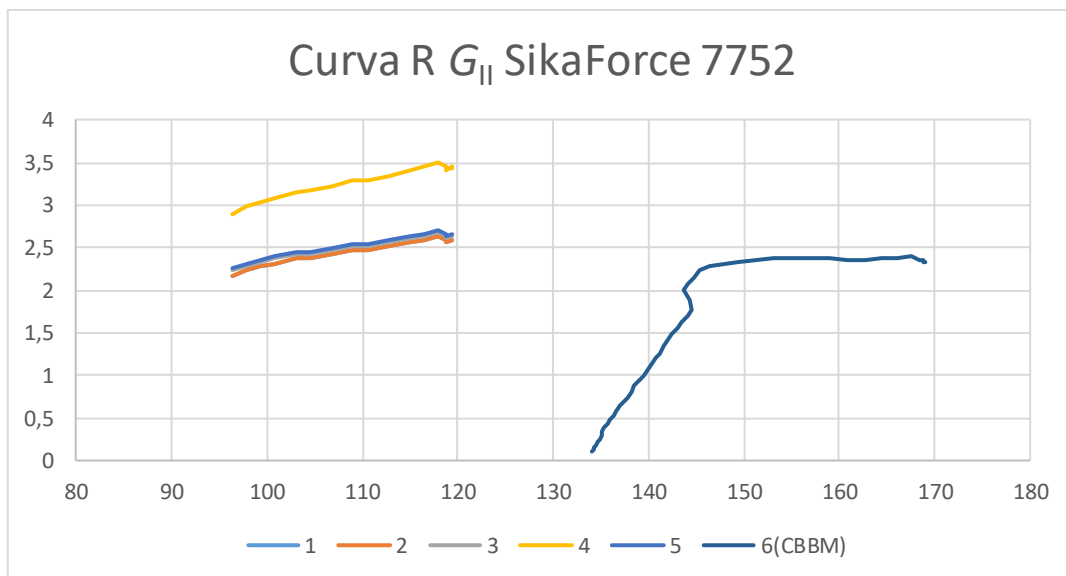


Figura 77 -Curva R para G_{II} obtida pelos ensaios numéricos no provete 2 do adesivo SikaForce® 7752

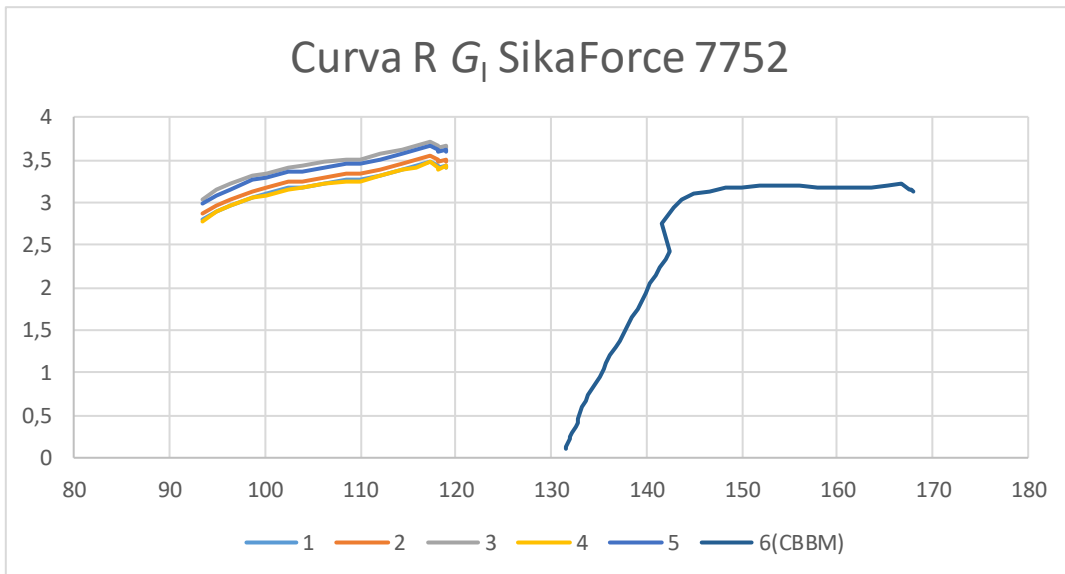


Figura 78 - Curva R para G_I obtida pelos ensaios numéricos no provete 3 do adesivo SikaForce® 7752

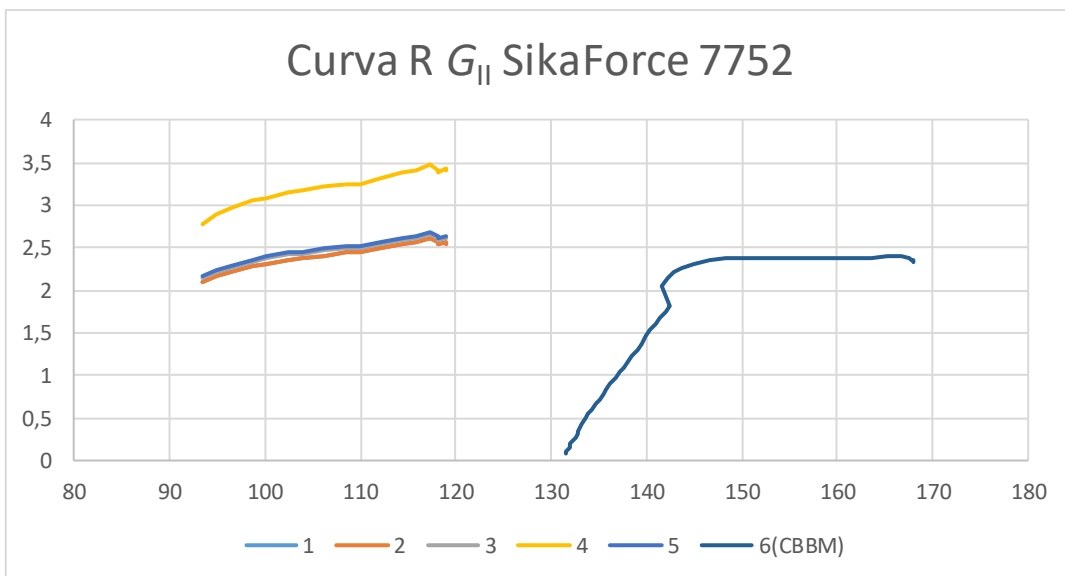


Figura 79 - Curva R para G_{II} obtida pelos ensaios numéricos no provete 3 do adesivo SikaForce® 7752

Os valores de G_I e de G_{II} obtidos nos ensaios numéricos estão indicados na Tabela 26 e na Tabela 27, respetivamente. Pode-se observar que, à semelhança do que aconteceu no adesivo Araldite® 2015, estes valores apresentam uma ligeira variabilidade entre os vários métodos e provetes. Pode-se observar que os modelos 3 e 5 foram os que obtiveram os valores de G_I superiores enquanto o modelo 6 obteve o valor menor. Para G_{II} , pode-se observar que o modelo 4 apresentou um valor bastante superior aos restantes métodos, situação já verificada nos adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 bem como na análise dos resultados experimentais.

Tabela 26 - Valores de G_I obtidos numericamente para o adesivo SikaForce® 7752

# Provete	1	2	3	4	5	6(CBBM)	Média
1	3,3541	3,4251	3,5921	3,3424	3,5403	3,1887	3,4071
2	3,3200	3,3914	3,5593	3,3081	3,5072	3,2121	3,3830
3	3,2669	3,3382	3,5062	3,2547	3,4541	3,2237	3,3406
4	3,3813	3,4523	3,6192	3,3697	3,5675	3,2000	3,4317
5	3,3592	3,4315	3,6015	3,3472	3,5487	3,1998	3,4146
6	3,3057	3,3773	3,5459	3,2936	3,4936	3,1992	3,3692
7	3,3143	3,3863	3,5558	3,3021	3,5032	3,2315	3,3822
Média	3,3200	3,3916	3,5601	3,3080	3,5079	3,2092	3,3828
Desvio Padrão	0,0339	0,0341	0,0342	0,0341	0,0342	0,0163	0,0267

Tabela 27 -Valores de G_{II} obtidos numericamente para o adesivo SikaForce® 7752

# Provete	1	2	3	4	5	6(CBBM)	Média
1	2,5068	2,5068	2,5592	3,3423	2,5818	2,3872	2,6473
2	2,4811	2,4811	2,5338	3,3080	2,5565	2,4048	2,6275
3	2,4410	2,4410	2,4938	3,2546	2,5165	2,4134	2,5934
4	2,5273	2,5273	2,5797	3,3697	2,6022	2,3957	2,6670
5	2,5104	2,5104	2,5638	3,3471	2,5867	2,3955	2,6523
6	2,4702	2,4702	2,5232	3,2936	2,5459	2,3951	2,6164
7	2,4766	2,4766	2,5298	3,3020	2,5527	2,4193	2,6262
Média	2,4876	2,4876	2,5405	3,3168	2,5632	2,4016	2,6329
Desvio Padrão	0,0291	0,0291	0,0291	0,0389	0,0290	0,0114	0,0247

3.2.4 Validação dos critérios de propagação

3.2.4.1 Araldite® AV138

Na Figura 80 pode-se observar o envelope de fratura referente ao adesivo Araldite® AV138 obtido para diferentes valores de expoentes através dos valores de G_I e de G_{II} numéricos, sendo o expoente considerado para a realização dos ensaios numéricos de 0,5. Pode-se observar que, em comparação com os resultados experimentais, estes apresentam uma menor dispersão. Também se pode observar que a escolha do critério de propagação feita tendo em consideração os resultados experimentais se revelou acertada tendo em conta a reduzida dispersão de resultados obtida, bem como o facto de estes se encontrarem bastante próximos da curva referente ao critério de propagação escolhido.

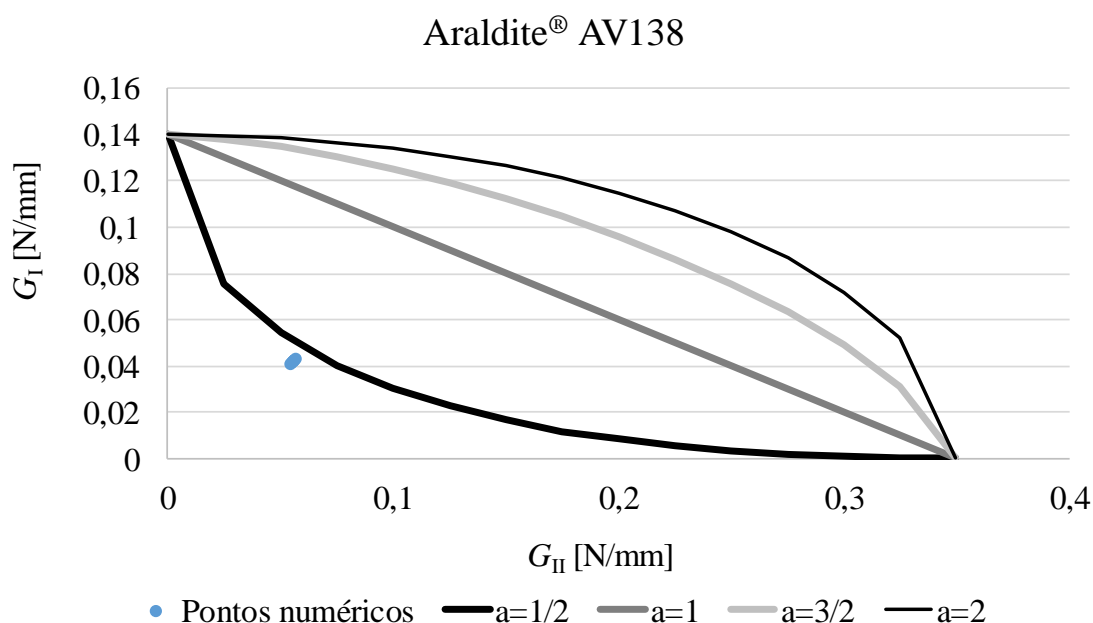


Figura 80 - Envelope de fratura obtido numericamente do adesivo Araldite® AV138

3.2.4.2 Araldite® 2015

Na Figura 81 pode-se observar o envelope de fratura obtido nos ensaios numéricos para o adesivo Araldite® 2015 utilizando um expoente de 0,5, em que os vários pontos retirados dos resultados dos ensaios numéricos para este adesivo se encontram bastante próximos da curva de expoente 0,5 e apresentam uma reduzida dispersão. Devido a esse facto pode-se concluir que o expoente de 0,5 escolhido através dos resultados experimentais se revelou correto e que o critério escolhido representa o comportamento do adesivo.

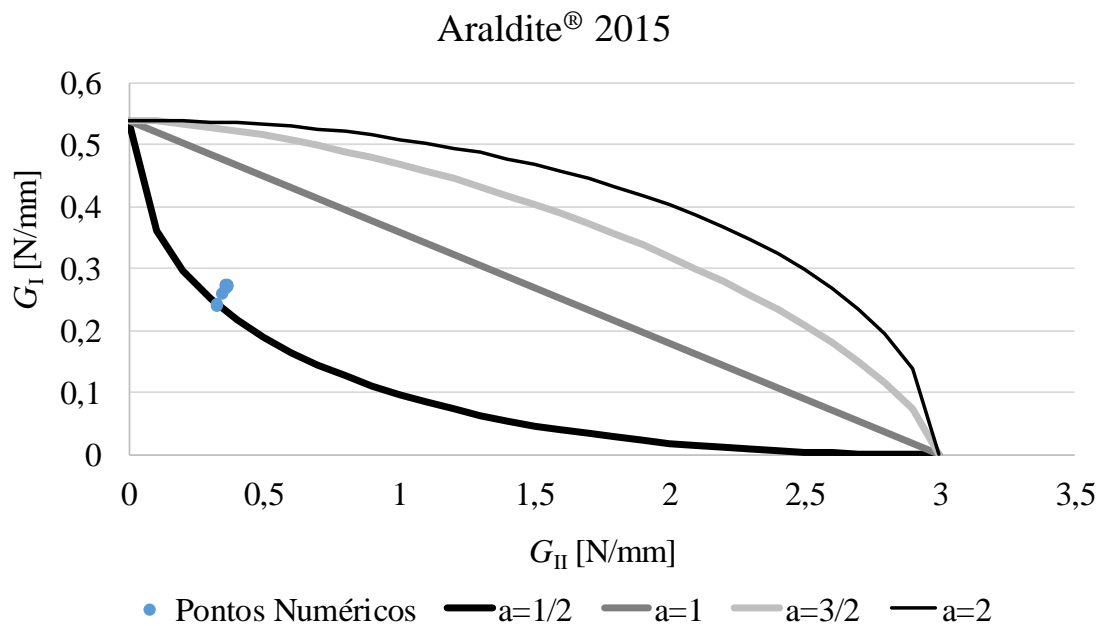


Figura 81 - Envelope de fratura obtido numericamente do adesivo Araldite® 2015

3.2.4.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 82 pode-se observar o envelope de fratura obtido através dos valores de G_I e de G_{II} numéricos do adesivo SikaForce® 7752 utilizando um expoente de 2. Pode-se observar que os valores obtidos apresentam uma dispersão muito reduzida e que os ensaios numéricos apresentaram uma boa repetibilidade, sendo que os pontos obtidos se encontram ligeiramente afastados da curva de expoente 2, devido ao facto de se considerar uma lei triangular em vez de uma lei trapezoidal. Apesar desse afastamento, a curva de expoente 2 é a que melhor se adequa para caracterizar o comportamento do adesivo.

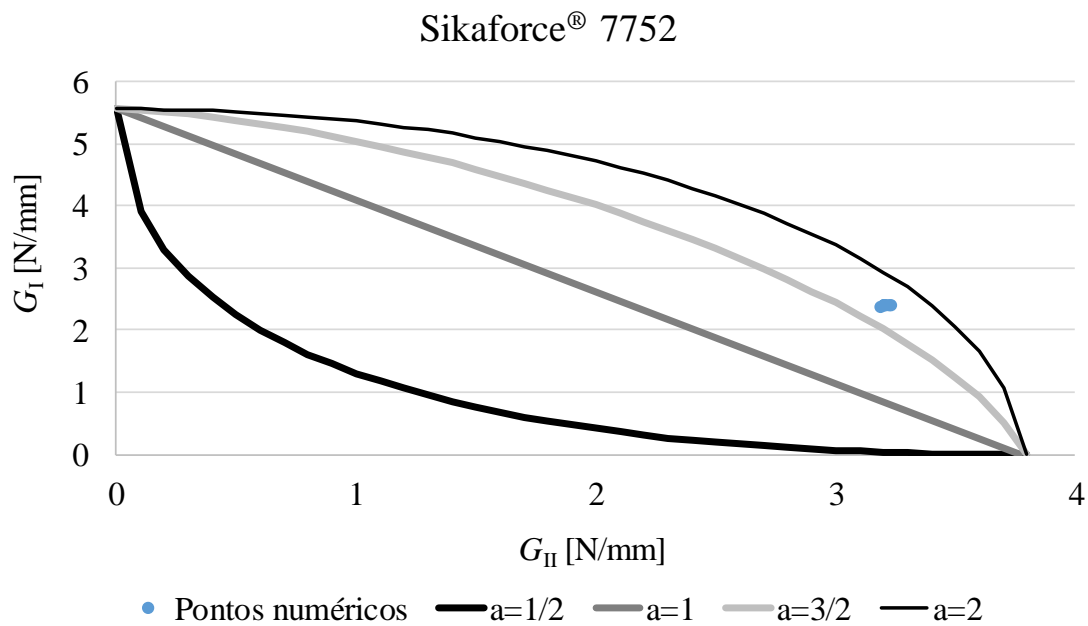


Figura 82 - Envelope de fratura obtido numericamente do adesivo SikaForce® 7752

3.2.5 Análise de sensibilidade às leis coesivas obtidas

Neste trabalho, o valor de G_{Ic} , G_{IIc} , T_n^0 e T_s^0 para os diversos provetes de cada adesivo testado teve em consideração valores de referencia obtidos anteriormente [42-45]. No entanto, é necessário compreender com mais detalhe a influência destes parâmetros na curva $P-\delta$ do ensaio SLB obtida numericamente.

Neste âmbito, foi realizado um estudo de sensibilidade destes quatro parâmetros no resultado da curva $P-\delta$ numérica. Neste estudo, cada parâmetro teve 4 variações distintas analisadas de modo individual (-50%, -25%, +25% e +50% sobre o valor inicial). Estas variações também foram aplicadas de forma agrupada entre os vários parâmetros.

3.2.5.1 Araldite® AV138

Como se pode observar na Figura 83, a variação de G_{Ic} afeta consideravelmente a força máxima obtida durante o ensaio, sendo que esta aumenta consoante o aumento do valor de G_{Ic} . Também se pode observar que a rigidez se manteve inalterada, uma vez que o declive da reta tangente à curva até ao ponto de força máxima se manteve. Desse modo, o deslocamento do punção de carregamento até ser atingido o ponto de força máxima também aumentou.

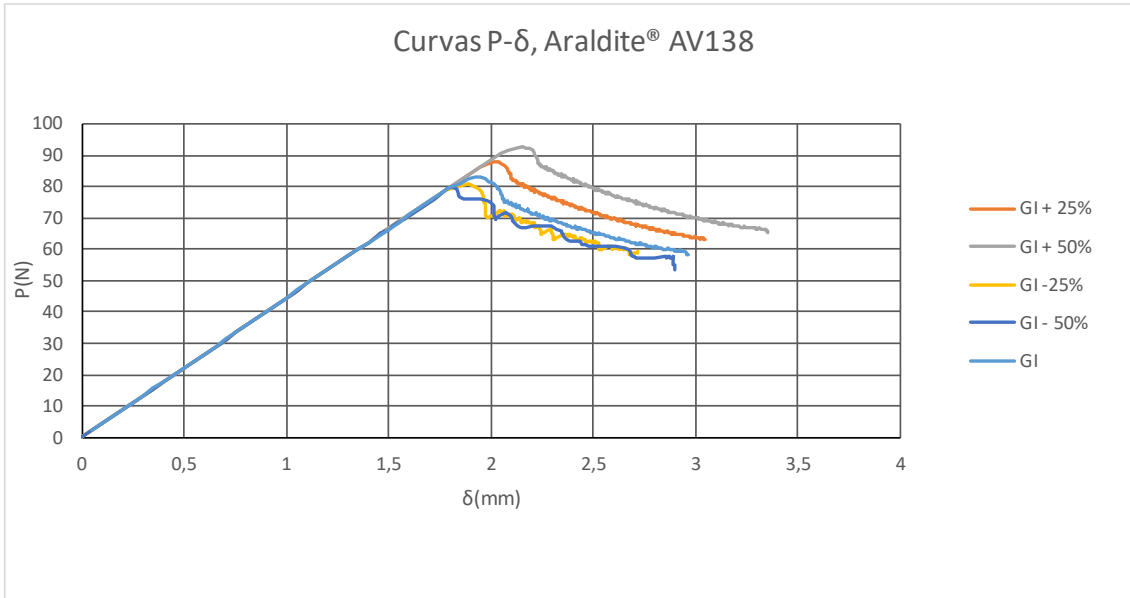


Figura 83- Análise de sensibilidade ao parâmetro G_{Ic} no adesivo Araldite® AV138

Na Figura 84 pode -se observar a variação do parâmetro G_{IIc} afetou as curvas $P-\delta$ de forma semelhante ao parâmetro G_{Ic} , embora de forma mais reduzida.

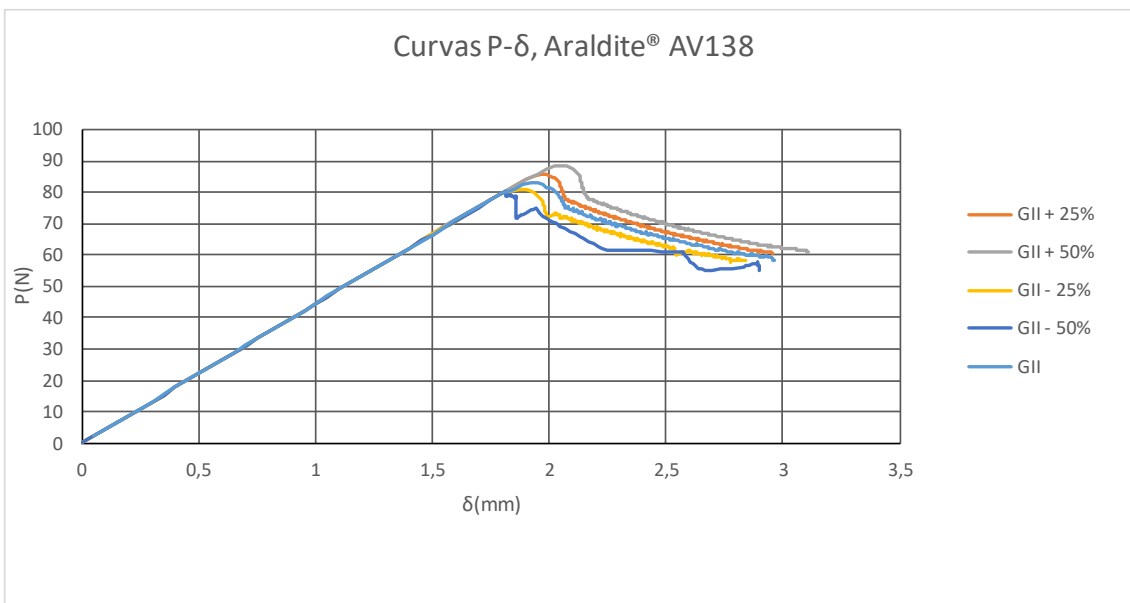


Figura 84 - Análise de sensibilidade ao parâmetro G_{IIc} no adesivo Araldite® AV138

Na Figura 85 pode-se observar o efeito da variação simultânea de G_{Ic} e G_{IIc} . Pode-se observar que a rigidez se manteve inalterada, de forma previsível, uma vez que nenhum destes parâmetros teve influência quando analisado de modo individual. Como cada parâmetro influenciou a carga máxima, quando conjugados, esta obteve uma variação considerável com a combinação da variação dos parâmetros.

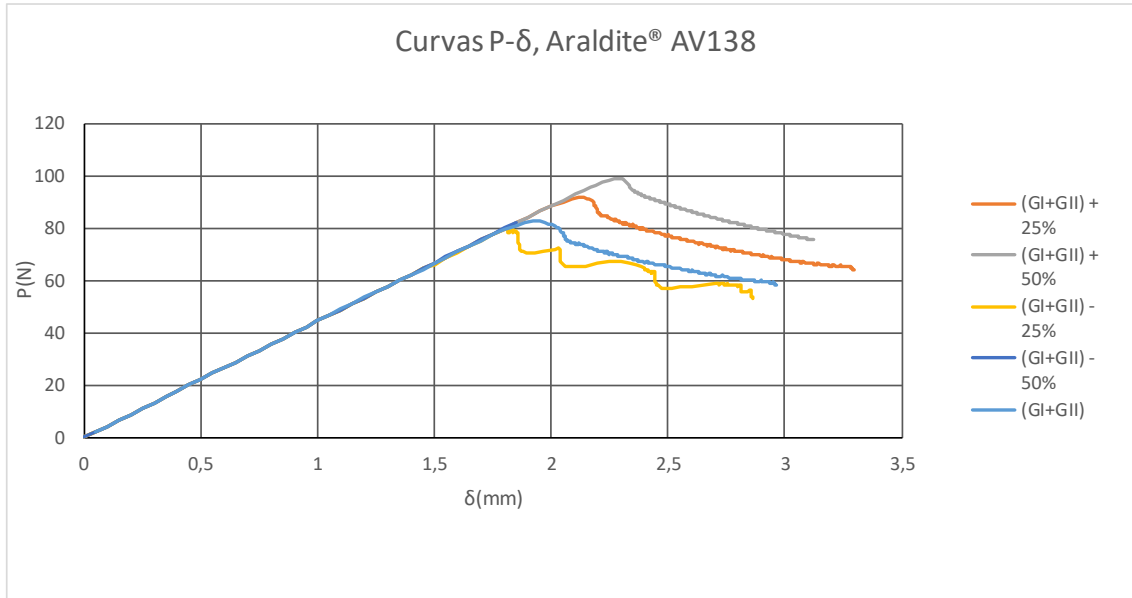


Figura 85 - Análise de sensibilidade aos parâmetros G_{Ic} e G_{IIc} agrupado no adesivo Araldite® AV138

Na Figura 86 estão representadas as curvas $P-\delta$ obtidas através da variação do parâmetro t_n^0 , em que se pode observar uma variação significativa dos valores de força máxima obtida durante os ensaios. Também se pode observar que a rigidez apresentou uma variação reduzida, tendo registado uma ligeira redução quando o valor de t_n^0 diminuiu.

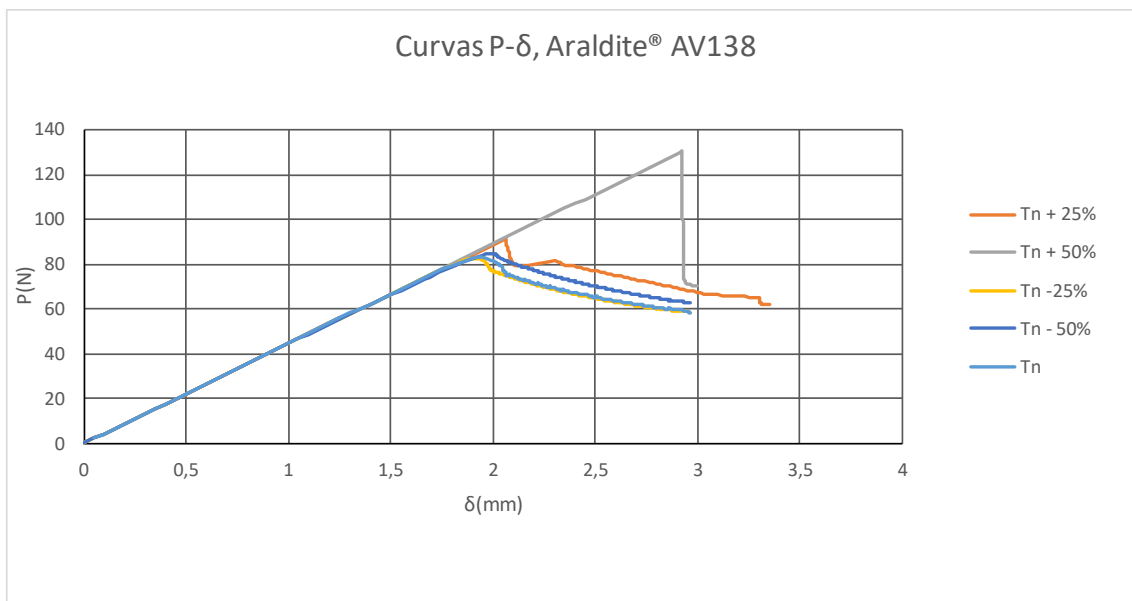


Figura 86 - Análise de sensibilidade ao parâmetro t_n^0 no adesivo Araldite® AV138

Os efeitos da variação de t_s^0 estão representados na Figura 87. Pode se observar que, à semelhança do que aconteceu com a variação de t_n^0 , a força máxima observada em cada

ensaio teve uma ligeira variação (para t_n^0 a variação foi bastante mais significativa). Também se pode observar que a rigidez apresentou uma variação muito reduzida.

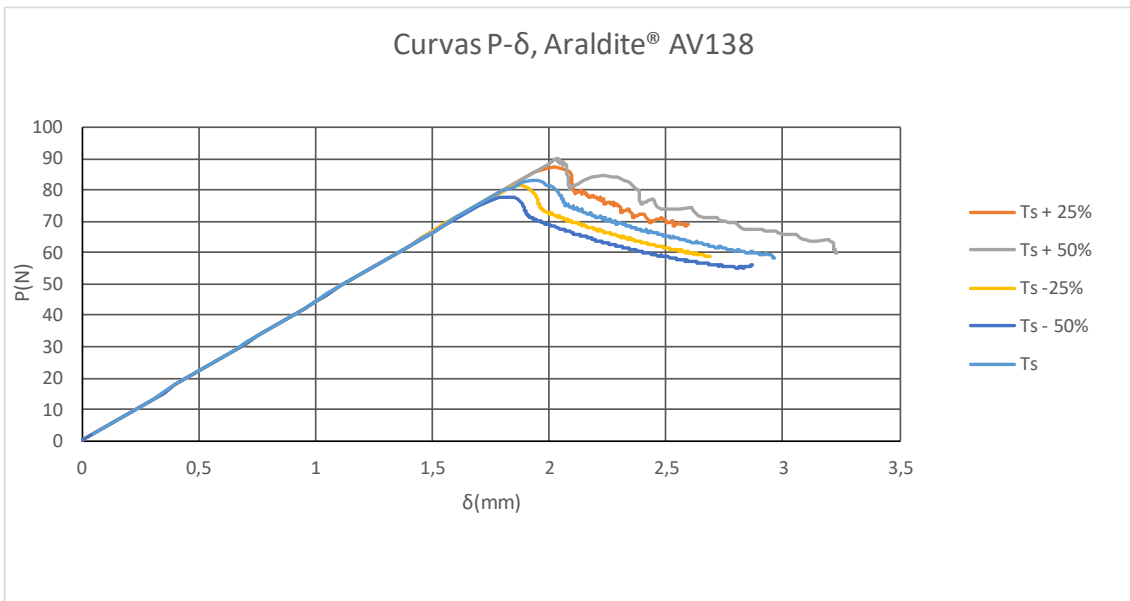


Figura 87 - Análise de sensibilidade ao parâmetro t_s^0 no adesivo Araldite® AV138

Na Figura 88 pode-se observar os efeitos da conjugação da variação simultânea de t_n^0 e t_s^0 . A força máxima observada em cada ensaio teve uma variação significativa com a sobreposição dos efeitos dado também ter sido bastante afetada com as variações individuais destes parâmetros. A rigidez, que apenas apresentou uma ligeira variação na análise individual da influência destes parâmetros, apresentou uma variação reduzida.

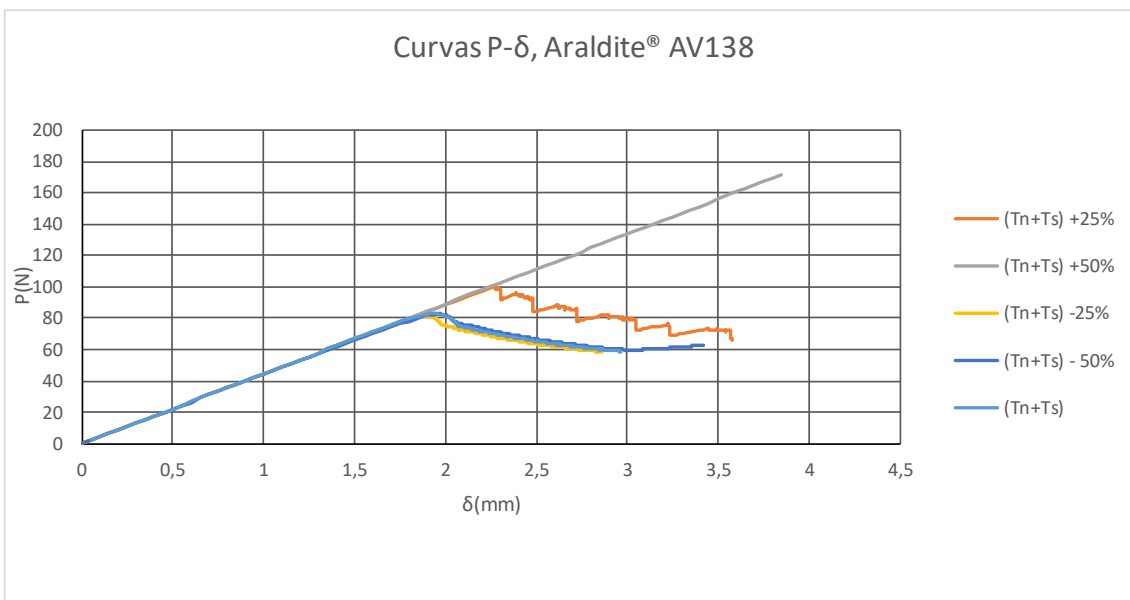


Figura 88 - Análise de sensibilidade aos parâmetros t_n^0 e t_s^0 no adesivo Araldite® AV138

Na Figura 89 podem-se observar os efeitos na curva $P-\delta$ da variação simultânea dos quatro parâmetros analisados. A força máxima registada em cada ensaio sofreu grandes variações. Esta amplitude de variação já era esperada devido ao facto de cada parâmetro ter influenciado de forma individual o valor de pico da curva $P-\delta$. No que se refere à rigidez, e como esperado devido às análises anteriores, observou-se uma ligeira variação nos vários ensaios.

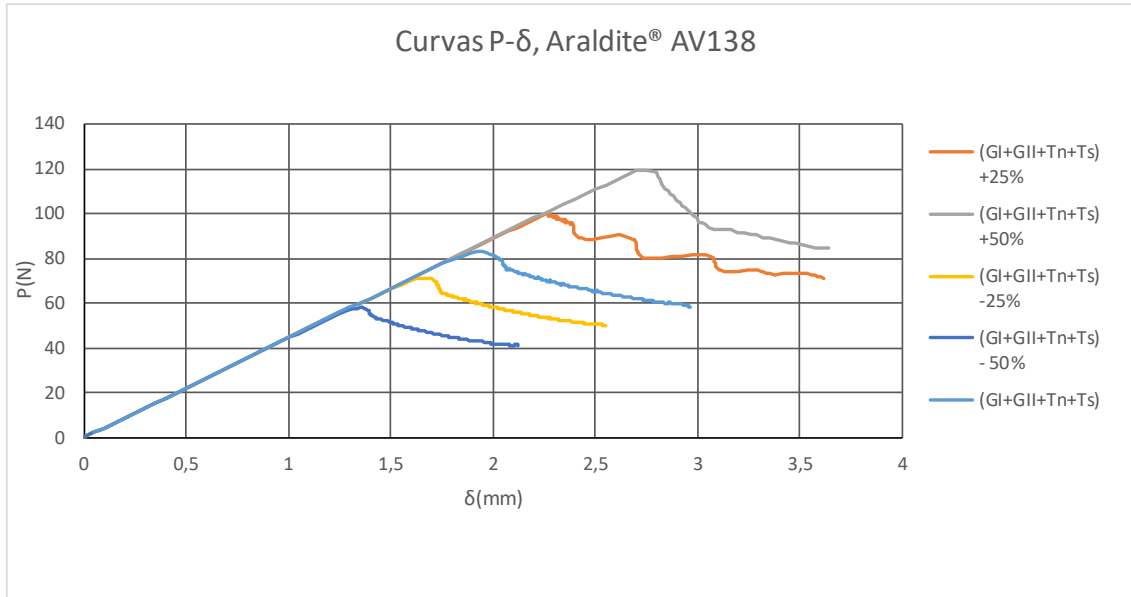


Figura 89 - Análise de sensibilidade à variação simultânea dos vários parâmetros analisados no adesivo Araldite® AV138

3.2.5.2 Araldite® 2015

Na Figura 90 pode-se observar como a variação de G_{Ic} afeta a curva $P-\delta$. A força máxima obtida durante o ensaio apresentou uma grande variação. A rigidez manteve-se inalterada, uma vez que o declive da reta tangente à curva até ao ponto de força máxima se manteve. Desse modo, o deslocamento do punção de carregamento até ser atingido o ponto de força máxima também aumentou com o aumento de G_{Ic} e vice-versa.

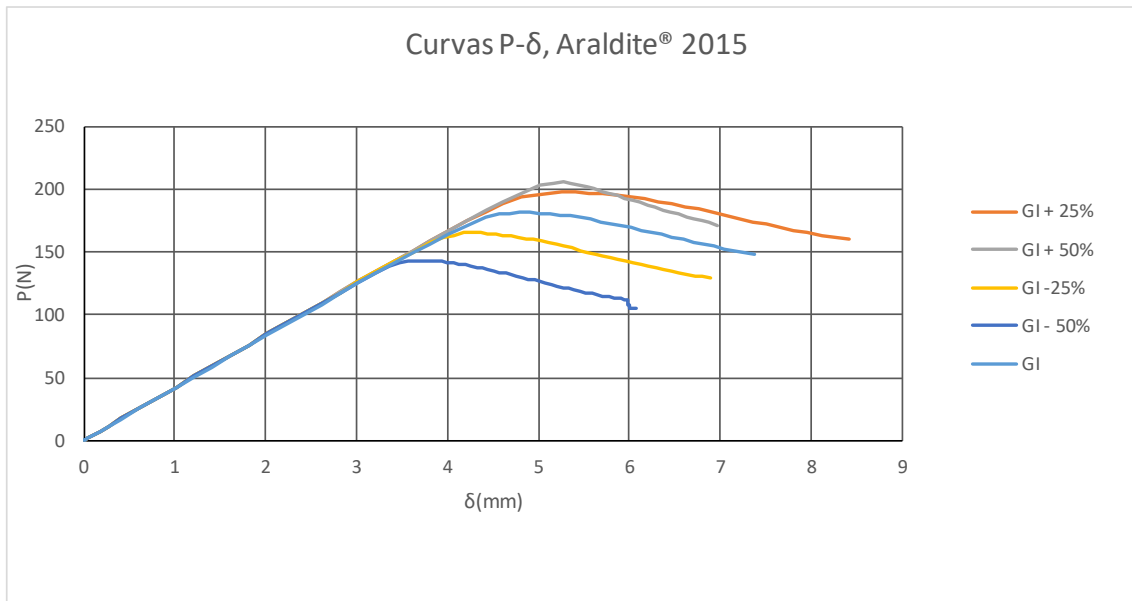


Figura 90 - Análise de sensibilidade ao parâmetro G_{Ic} no adesivo Araldite® 2015

Na Figura 91 pode -se observar que, à semelhança do ocorrido no adesivo Araldite® AV138, a variação do parâmetro G_{IIc} afetou as curvas $P-\delta$ de forma semelhante ao parâmetro G_{Ic} , embora de forma mais reduzida.

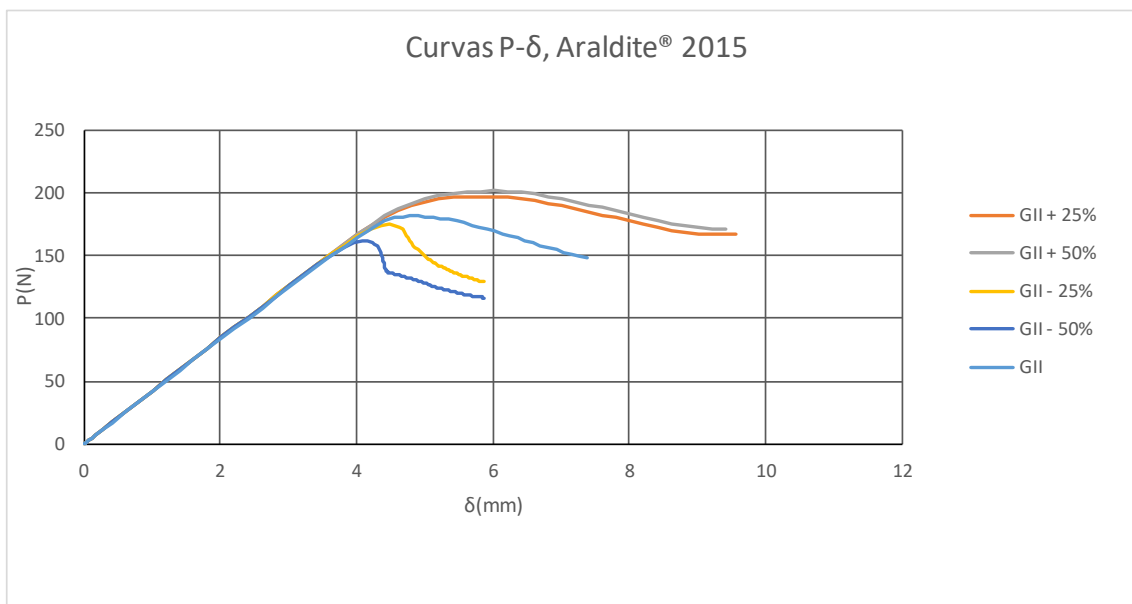


Figura 91 - Análise de sensibilidade ao parâmetro G_{IIc} no adesivo Araldite® 2015

Na Figura 92 pode-se observar o efeito da variação simultânea de G_{Ic} e G_{IIc} . A rigidez, que na variação individual dos parâmetros não sofreu alterações, manteve-se inalterada. A força máxima obtida durante os ensaios teve uma variação considerável

devido aos efeitos da variação de G_{Ic} e G_{IIc} conjugada, uma vez que ambos os parâmetros influenciaram a carga máxima.

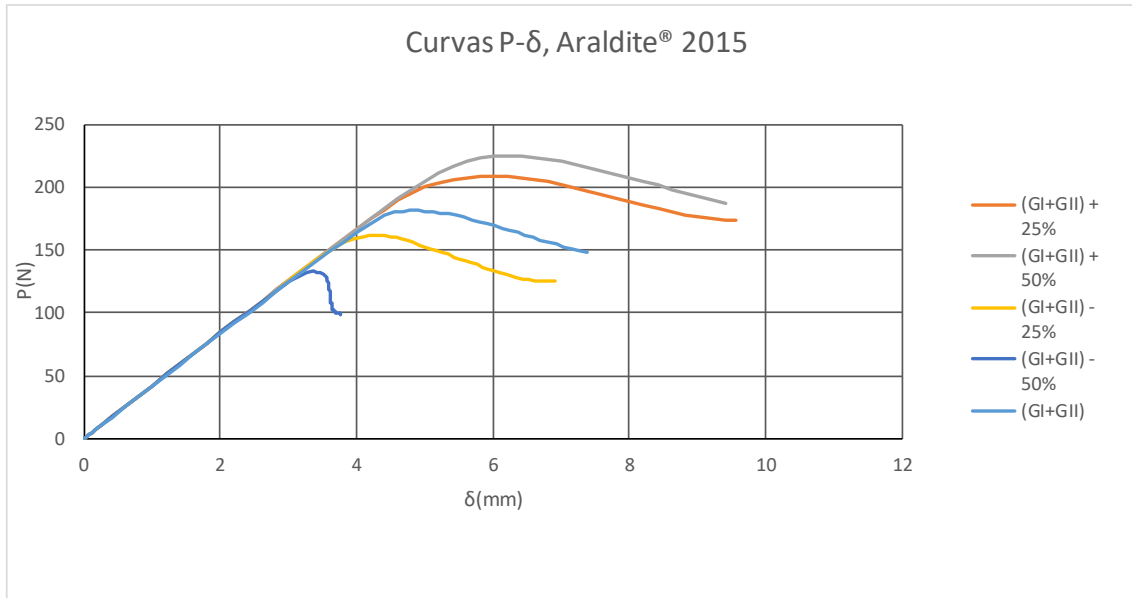


Figura 92 - Análise de sensibilidade aos parâmetros G_{Ic} e G_{IIc} agrupado no adesivo Araldite® 2015

Na Figura 93 estão representadas as curvas P - δ obtidas através da variação do parâmetro t_n^0 , em que se pode observar uma variação muito ligeira dos valores de força máxima obtida durante os ensaios. Também se pode observar que a rigidez apresentou uma variação reduzida.

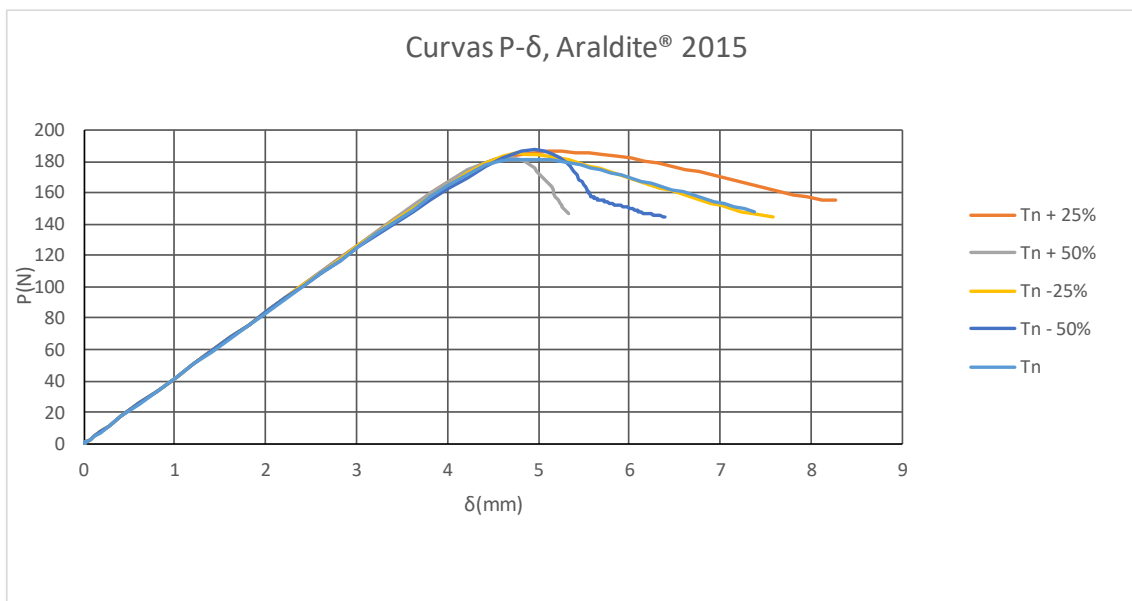


Figura 93 - Análise de sensibilidade ao parâmetro t_n^0 no adesivo Araldite® 2015

Na Figura 94 estão representados os efeitos resultantes da variação de t_s^0 . À semelhança do que aconteceu com a variação de t_u pode-se observar uma ligeira variação da força máxima obtida, embora esta variação não seja significativa. Também se pode observar que a rigidez apresentou uma variação razoável, tendo sido menor quando se reduziu t_s^0 .

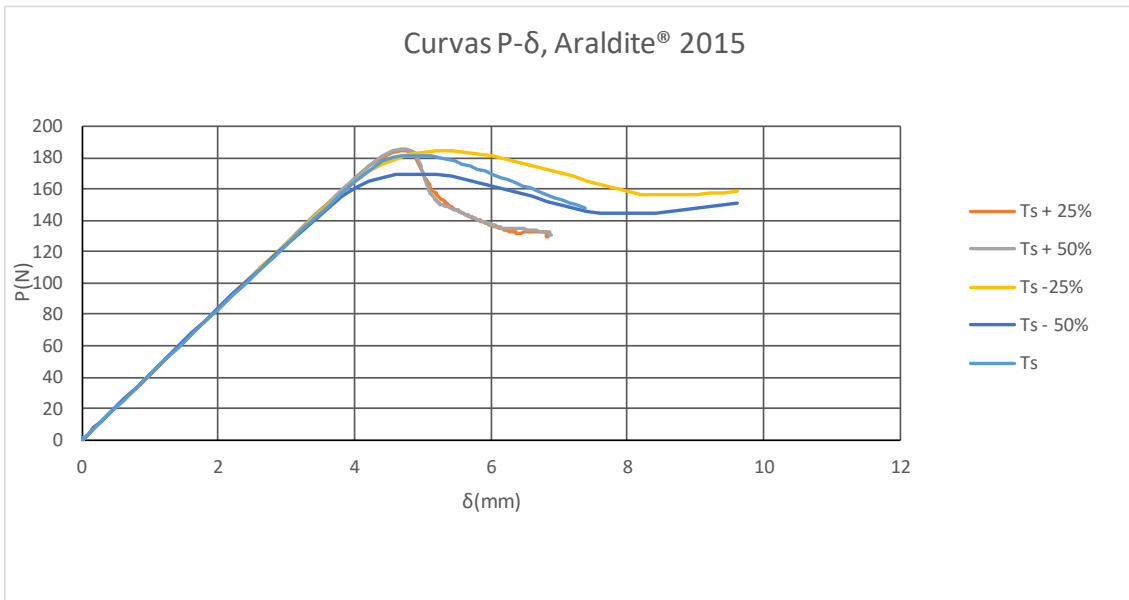


Figura 94 - Análise de sensibilidade ao parâmetro t_s^0 no adesivo Araldite® 2015

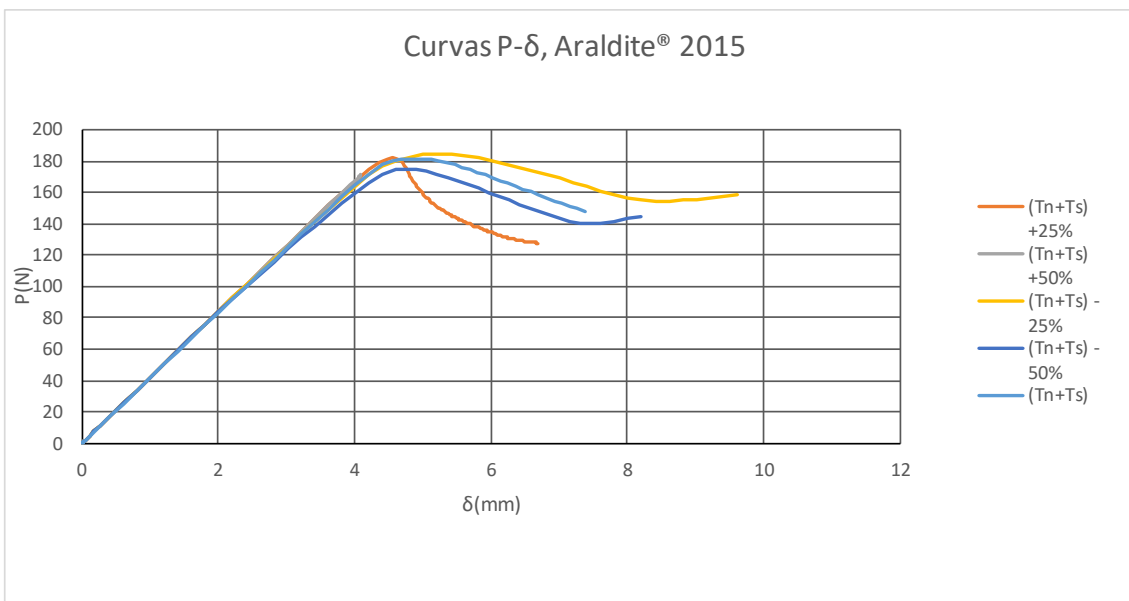


Figura 95 - Análise de sensibilidade aos parâmetros t_n^0 e t_s^0 no adesivo Araldite® 2015

Na Figura 95 estão representados os efeitos da variação simultânea de t_n^0 e t_s^0 . Pode-se observar que, à semelhança do que aconteceu com a variação individual destes

parâmetros, a variação da força máxima registada não é significativa. Com esta alteração de parâmetros a rigidez observada teve uma variação considerável.

Na Figura 96 estão registados os efeitos na curva $P-\delta$ da variação simultânea dos quatro parâmetros analisados. Pode-se observar que a carga máxima apresentou uma variação significativa devido aos efeitos de G_{Ic} e G_{IIc} e que a rigidez também teve uma ligeira variação devido aos efeitos provocados pela variação de t_n^p e t_s^0 .

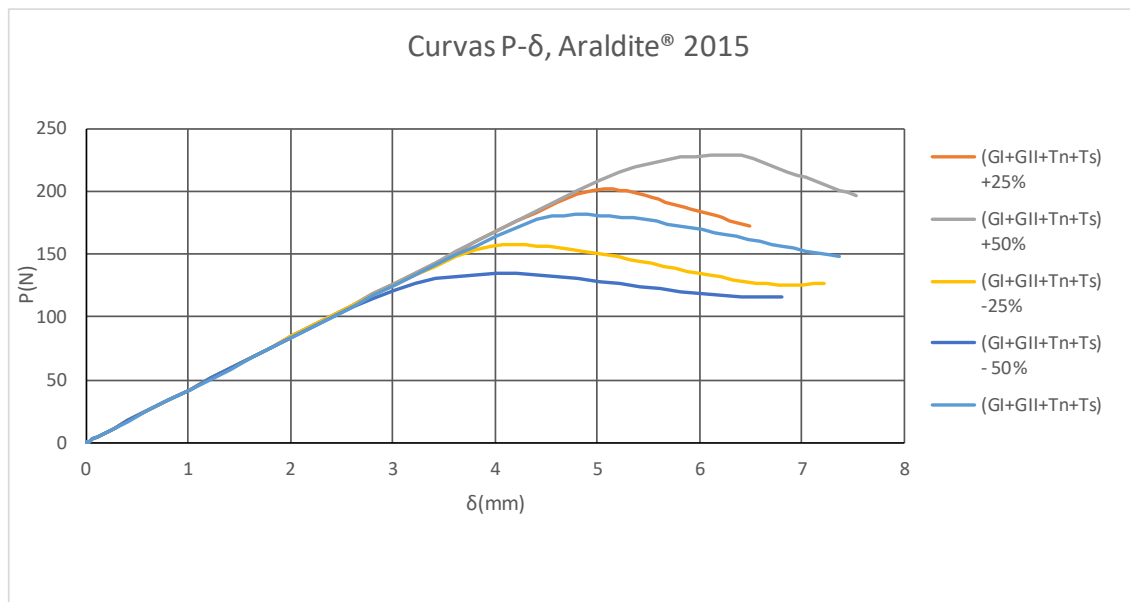


Figura 96 - Análise de sensibilidade à variação simultânea dos vários parâmetros analisados no adesivo Araldite® 2015

3.2.5.3 Sikaforce® 7752

Na Figura 97 pode-se observar os efeitos que a variação de G_{Ic} tem na curva $P-\delta$. A força máxima obtida durante o ensaio registou uma grande variação e a rigidez manteve-se inalterada, uma vez que o declive da reta tangente à curva até ao ponto de força máxima se manteve. Devido à conjugação dos factos anteriores, o deslocamento do punção de carregamento até ser atingido o ponto de força máxima também aumentou.

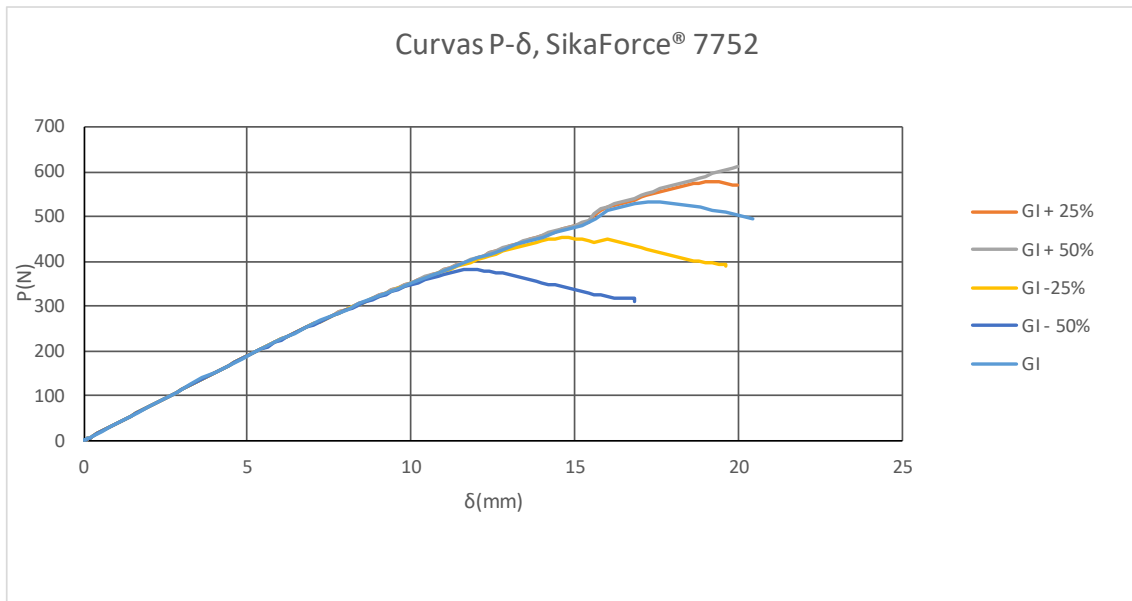


Figura 97 - Análise de sensibilidade ao parâmetro G_{Ic} no adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 98 pode-se observar que, tal como para o parâmetro G_{Ic} , a variação de G_{IIc} afetou a força máxima registada nas curvas $P-\delta$, embora a variação verificada tenha sido mais reduzida quando comparada com os efeitos de G_{Ic} .

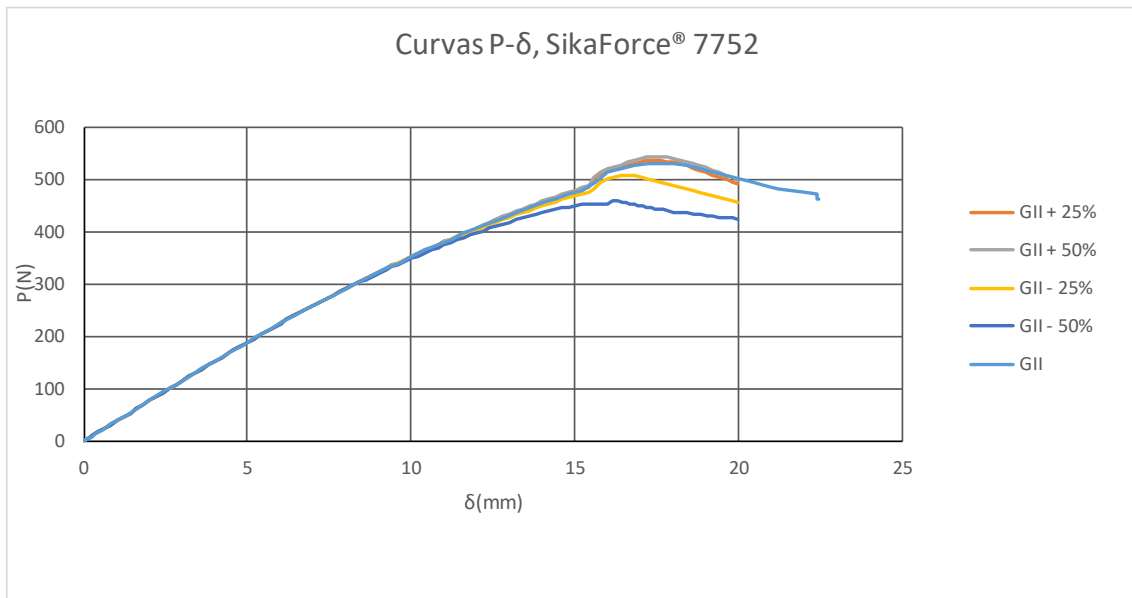


Figura 98 - Análise de sensibilidade ao parâmetro G_{IIc} no adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 99 pode-se observar o efeito da variação simultânea de G_{Ic} e G_{IIc} . A rigidez, que na variação individual dos parâmetros não sofreu alterações, manteve-se inalterada. A força máxima obtida durante os ensaios teve uma variação considerável devido aos efeitos da variação de G_{Ic} e G_{IIc} conjugada, uma vez que ambos os parâmetros influenciaram a carga máxima.

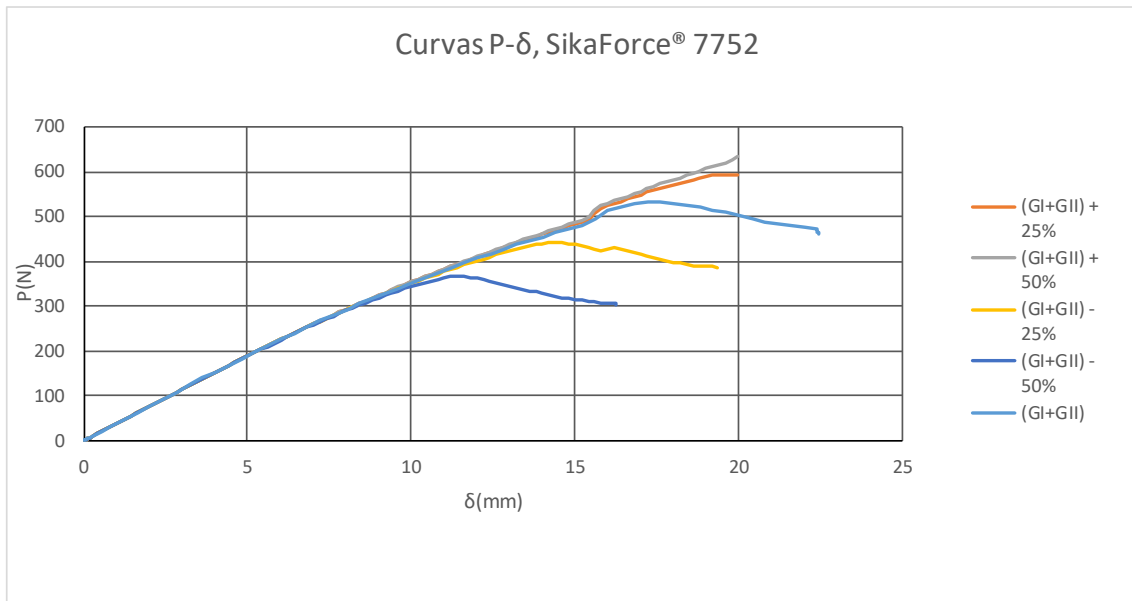


Figura 99 - Análise de sensibilidade aos parâmetros G_{Ic} e G_{IIc} agrupado no adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 100 estão representadas as curvas P - δ obtidas através da variação do parâmetro t_n^0 , em que se pode observar uma ligeira variação dos valores de força máxima obtida durante os ensaios. Também se pode observar que a rigidez apresentou uma variação não desprezável.

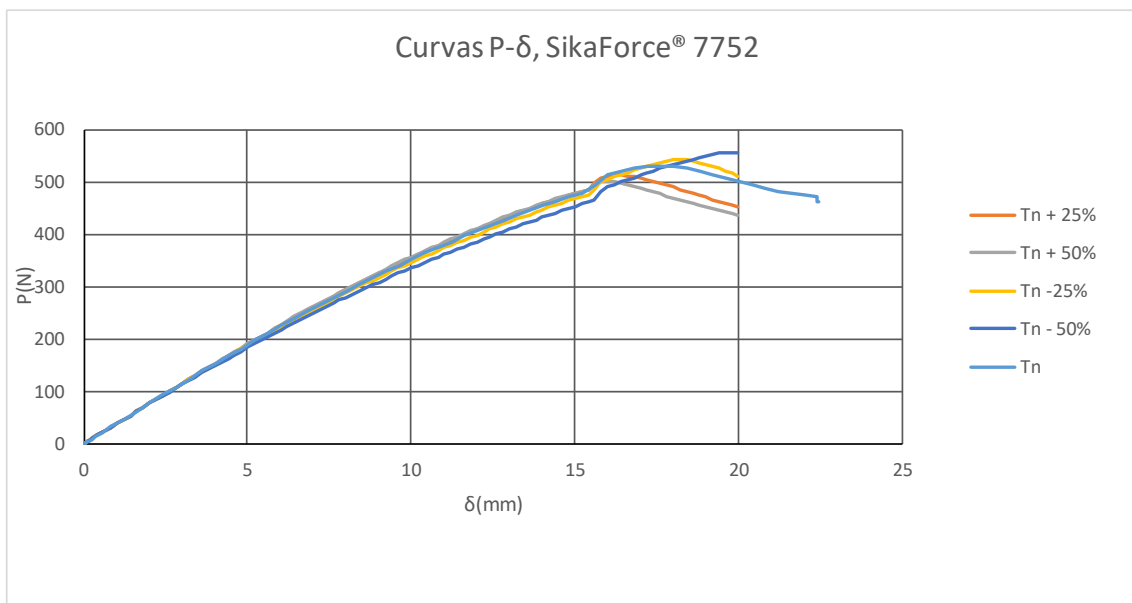


Figura 100 - Análise de sensibilidade ao parâmetro t_n^0 no adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 101 estão representados os efeitos resultantes da variação de t_s^0 . Pode-se observar, à semelhança do que aconteceu com a variação de t_n^0 , uma ligeira variação da força máxima obtida, embora esta variação não seja significativa. Também se pode

observar que a rigidez apresentou uma variação razoável, tendo sido menor quando se reduziu t_s^0 .

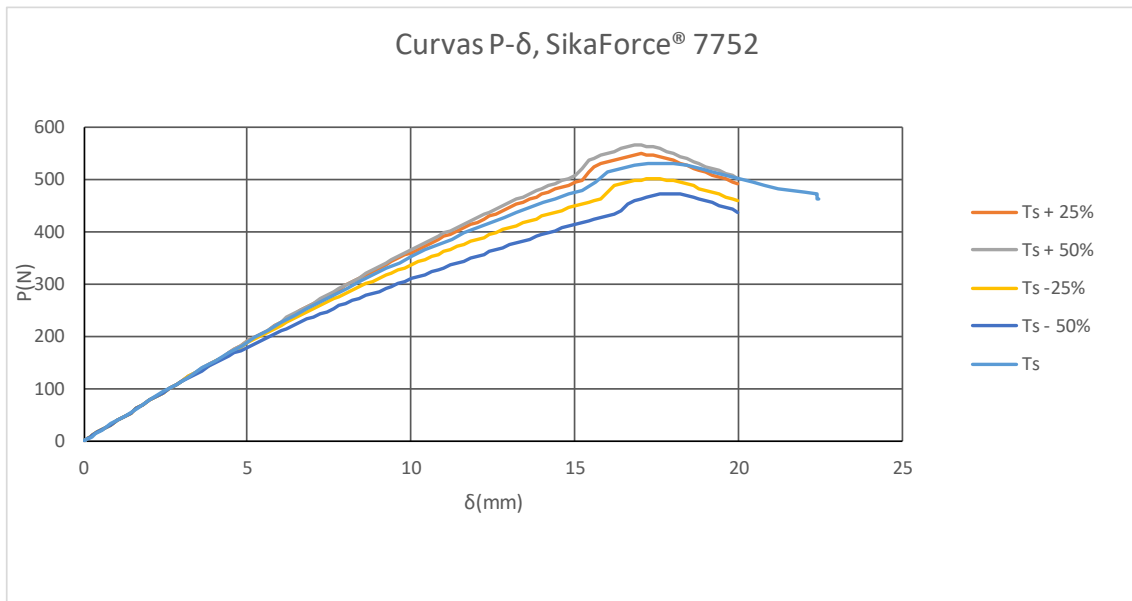


Figura 101 - Análise de sensibilidade ao parâmetro t_s^0 no adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 102 estão representados os efeitos da variação simultânea de t_n^0 e t_s^0 . Pode-se observar que, tal como observado na variação individual destes parâmetros, a variação da força máxima registada é bastante reduzida. Também se pode observar que a rigidez teve uma variação significativa, sendo maior quando os valores de t_n^0 e t_s^0 aumentam.

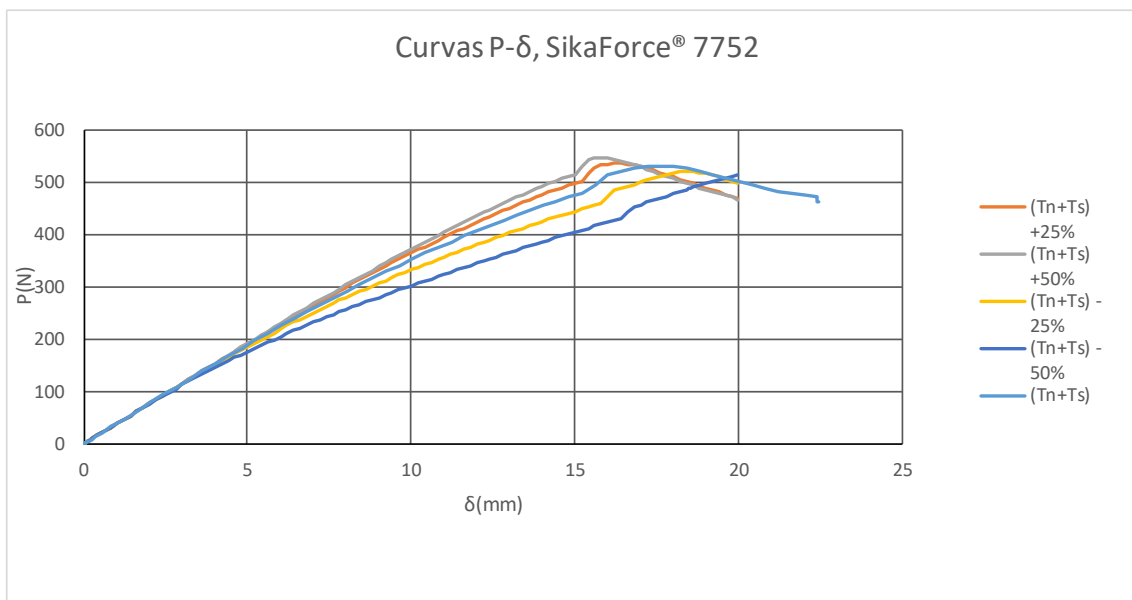


Figura 102 - Análise de sensibilidade aos parâmetros t_n^0 e t_s^0 no adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 103 estão registados o efeito da variação simultânea dos quatro parâmetros analisados na curva P- δ . Pode-se observar que, devido aos efeitos de G_{Ic} e G_{IIc} , a carga máxima apresentou uma variação significativa e que a rigidez, devido aos efeitos provocados pela variação de t_n^0 e t_s^0 , também teve uma ligeira variação.

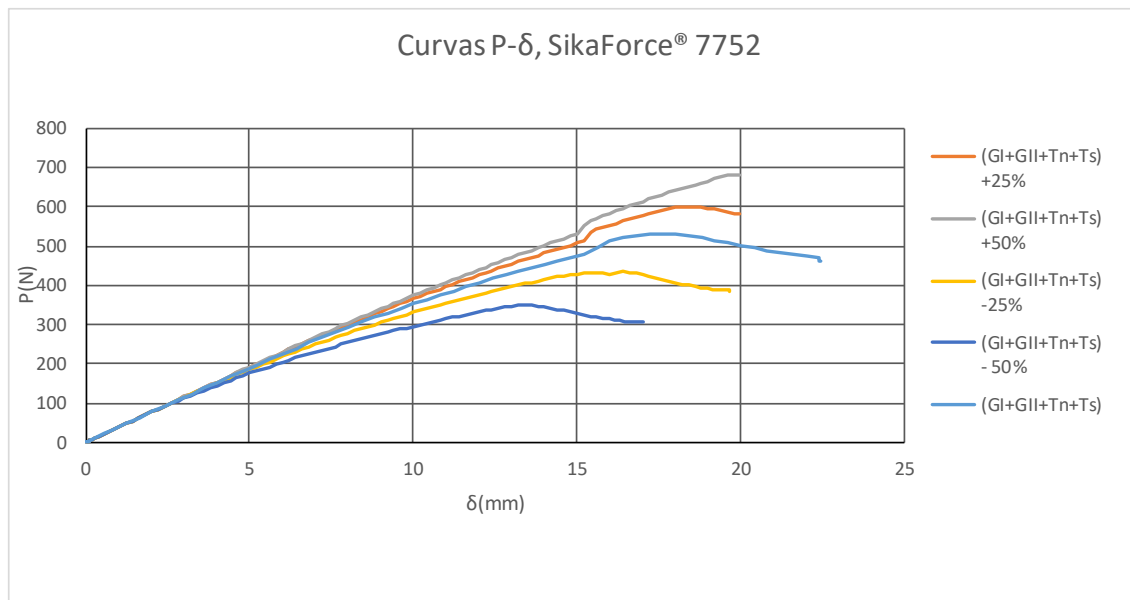


Figura 103 - Análise de sensibilidade à variação simultânea dos vários parâmetros analisados no adesivo SikaForce® 7752

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

De um modo geral pode-se concluir que os vários ensaios, experimentais e numéricos, para cada adesivo apresentaram uma boa repetibilidade, uma vez que se pode observar que as curvas P- δ e as curvas R foram similares nos vários provetes analisados. Também se pode observar que o adesivo Sikaforce® 7752 obteve os valores de G_I e de G_{II} mais elevados e que o adesivo Araldite® AV138 registou os valores mais reduzidos, confirmando desse modo a comportamento previsível dos 3 adesivos devido às suas propriedades.

Para a determinação de G_I os vários modelos de redução de dados apresentaram resultados similares, apresentando uma variação reduzida entre os valores médios dos vários métodos. Para a determinação de G_{II} , o modelo 4 apresentou valores consideravelmente superiores aos restantes métodos originando dessa forma uma maior variação dos resultados obtidos. Excluindo o modelo 4, os outros modelos apresentam uma variação similar à observada na determinação de G_I .

Também se pode concluir que, colocando os pontos experimentais obtidos nos respetivos envelopes de fratura em que foram considerados os valores de G_{IC} and G_{IIC} obtidos em trabalhos anteriores (em que foi estudado o comportamento destes adesivos a esforços de modo I e de modo II), os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 se adequam melhor a um critério de propagação de expoente 0,5. Por outro lado, o adesivo Sikaforce® 7752 é melhor representado por um expoente de 2.

Nos ensaios numéricos, realizados de acordo com o comprimento de fenda inicial observado em cada provete, foi observada a mesma tendência entre os vários modelos que a verificada nos ensaios experimentais, em que apenas o modelo 4 para o modo II apresentou resultados desfasados dos restantes modelos. Nos ensaios numéricos também se observou que as curvas R obtidas apresentaram uma alta estabilidade durante a propagação da fenda. Ao colocar os pontos numéricos obtidos nos envelopes de fratura dos respetivos adesivos foi confirmada a adequabilidade dos expoentes escolhidos pelos resultados experimentais, com a exceção de um ligeiro desvio verificado no adesivo Sikaforce® 7752.

Pela análise à sensibilidade a G_{IC} , G_{IIC} , t_n^0 e t_s^0 , efetuada aos vários adesivos, pode-se concluir que os parâmetros G_{IC} e G_{IIC} têm uma grande influência nas forças máximas obtidas nos ensaios, não tendo influência na rigidez verificada. Também se pode concluir que t_n^0 e t_s^0 apresentam uma ligeira influência nos valores de força máxima das curvas P- δ , enquanto para a rigidez a variação destes parâmetros tem uma influência considerável.

Como propostas de trabalhos futuros apresentam-se as seguintes:

- Realizar ensaios numéricos para o adesivo Sikaforce® 7752 utilizando uma lei trapezoidal e comparar com os resultados obtidos através da lei triangular;
- Comparar os resultados obtidos pelo ensaio SLB com outros ensaios de modo para efeitos de comparação com outras configurações de ensaio.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. McGraw-Hill.
2. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007: Publindústria.
3. Lotus Elise. 2016 [cited 2016 02/10/2016]; Available from: <http://www.motortrend.com/news/recall-roundup-32000-turbo-bmws-volvo-s60-c70-lotus-exige-elise-130737/>.
4. sikaforce, *Textile Adhesives*. 2016 [cited 2016 21/09/2016]; Available from: http://www.sika.com/en/solutions_products/industry-markets/general-industry/tapes-and-textiles/textile-adhesives.html.
5. HD Wallpapers Interior de um carro. [cited 2016 21/09/2016]; Available from: <http://en.fondecranhd.net/interior-de-um-carro/>.
6. Sikaforce, *Marine, Bonding*. 2016; Available from: http://www.sika.com/en/solutions_products/industry-markets/marine-market/marine/leisure-boats-yachts/01a006sa02200.html.
7. ; Available from: <http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/structural-design/adhesive-properties>.
8. [cited 2016; Available from: https://en.wikipedia.org/wiki/Thermal_expansion#Coefficient_of_thermal_expansion.
9. *Viscoelasticity*. Available from: <https://en.wikipedia.org/wiki/Viscoelasticity>.
10. *modulo de young*. 2016; Available from: https://pt.wikipedia.org/wiki/M%C3%B3dulo_de_Young.
11. Raghava R S, C.R.e.Y.G.S.Y., *J Mater Sei*. 1973. **8**: p. 225.
12. D, d.S.L.F.M.e.A.R., *Adhesion Sei Technol*. 2005(19): p. 109.
13. AZEVEDO, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (GIIc) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
14. Pereira, A.B., de Morais, A.B., *Influencia das tensões de Bordo na Resistncia de Juntas Colada de Sobreposição*. Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecânica 2004. **8**(3): p. 69-79.
15. Campilho, R.D.S.G., *Modelação da Execução de Reparação em Materiais Compósitos*. 2005, Faculdade Engenharia da Universidade do Porto.
16. Packham, D.E., *Handbook of Adhesion 2nd Edition*. England: John wiley & Sons, Ltd, 2005.
17. D5573-99, A., *Standard Pratrice for Classifying Failure Modes in Fiber-ReinforcedPlastic (FRP) Joints*. 1999, ASTM.
18. Gonçalves, J.P.M., de Moura, M.F.S.F., de Castro, P.M.S.T, *A three-dimension finit element model for stress analysis of adhesives joints*. internatuonal Journal of Adhesion & Adhesives, 2002(22): p. 357-365.

19. Pinto, A.G., Magalhães, A.G., Campilho, R.D.S.G., de Moura, M.F.S.F, Baptista, A.P.M, *Single-Lap Joints of Similar and Dissimilar Adherends Bonded with an Acrylic Adhesive*. International Jdhesivesournal of Adhesion & A 2009: p. 351-376.
20. Constante, C.J., *Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto
21. Lucas F.M. da Silva, D.A.D., Bamber Blackman, and Robert D. Adams, *Testing Adhesive Joints*. Wiley-VCH.
22. M. F. S. F. de Moura, R.D.S.G.C.e.J.P.M.G., *Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mod I Loading*. Composites Science and Technology.
23. Adams, D.A. *Compact tension fracture toughness testing*. 2016 [cited 2016 13-10-2016]; Available from: <http://www.compositesworld.com/articles/compact-tension-fracture-toughness-testing>.
24. Wang, H.a.V.-K., T. , *Compos. Struct.* Vol. 36. 1996.
25. Bennati, S., et al., *An enhanced beam-theory model of the asymmetric double cantilever beam (ADCB) test for composite laminates*. Composites Science and Technology, 2009. **69**(11–12): p. 1735-1745.
26. Soares, A.P.O.A.L., *Determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto pelo ensaio Single-Leg Bending*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto.
27. Jorge M.Q. Oliveira, M.M.S.F.d.M., José J.L. Morais, *Application of the end loaded split and single-leg bending tests to the mixed-mode fracture characterization of wood*.
28. András Szekrényes, J.U., *Beam and finite element analysis of quasi-unidirectional composite SLB and ELS specimens*. Composites Science and Technology, 2004(64): p. 2393-2406.
29. Ozdil F, C.L., Davies P., *Beam analysis of angle-ply laminate end-notched flexure specimens*. Composites Science and Technology, 1998(59): p. 1929-1938.
30. Ducept F, G.D., Davies P., *A mixed-mode failure criterion derived from tests of symmertic and asymmetric specimens*. Composites Science and Technology, 1999(59): p. 609-619.
31. Zhu, Y., *characterization of interlaminar fracture toughness of a carbon/epoxy composite material*, in *Department of Engineering Science and Mechanics* 2009, The Pennsylvania State University
32. W.S. Kim, D.S.H., C.J. Jang, J.J. Lee, *Enhancement Of Composite-Metal Adhesion Strength By Micro-Patterning Of Metal Surfaces*, in *18th International Conference On Composite Materials*.
33. L.F.M.daSilva, V.H.C.E., F.J.P.Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. Mat.-wiss.u.Werkstofftech, 2011. **5**(42): p. 460-470.
34. M.V. Fernández, M.F.S.F.d.M., L.F.M. da Silva, A.T. Marques, *Mixed-mode I + II fatigue/fracture characterization of composite bonded joints using the Single-Leg Bending test*. Composites: Part A, 2013: p. 63-69.
35. Szekrényes, A., *J-integrals for delaminated beam and plate models*. Periodica Polytechnica, 2012. **1**(56): p. 63-71.

36. R, R.J., *A path independent integral and the approximate analysis of strain concentration by notches and cracks*. Journal of Applied Mechanics, 1968(35): p. 379-386.
37. Shivakumar K N, R.I.S., *An equivalent domain integral method for three dimensional mixed-mode fracture problems*. Engineering Fracture Mechanics, 1992(42): p. 935-959.
38. Rigby R H, A.M.H., *Decomposition of the mixed-mode J-integral - revisited*. 1995(35): p. 2.7-2.99.
39. L, W., *On calculation of energy release rates for cracked laminates*. International Journal of fracture, 1988(36): p. 101-119.
40. Anders Biel, U.S.a.T.W., *A Critical Study of an Alternative Method to Measure Cohesive Properties of Adhesive Layers in European Conference on Fracture*.
41. A.J. Comer, K.B.K., W.F.Stanley,T.M.Young, *Characterising the behaviour of composite single lap bonded joints using digital image correlation*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013(40): p. 215-223.
42. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS, *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Composites Science and Technology, 2005. **65**: p. 1948–1958.
43. R. D. S. G. Campilho, M.D.B., J. A. B. P. Neto e L. F. M. da Silva, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **44**: p. 48-56.
44. J. A. B. P. Neto, R.D.S.G.C.e.L.F.M.d.S., *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96-101.
45. Faneco, T.M.S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
46. Troughton, M.J., *Handbook of plastics joining: a practical guide - 2nd ed.* 2008, United States of America: William Andrew Inc.
47. Corporation, H., *Design Guide for Bonding Plastics*. Engineering Adhesives. Vol. 6. 2011: Henkel Corporation.
48. da Silva, L.F.M., et al, *Effect of Adhesive Type and Thickness on the Lap Shear Strength*. Journal Of Adhesion, 2006(82): p. 1091-1115.
49. Space, E.-E.C.F., *Space engineering - Adhesive bonding handbook*. 2011, ECSS - European Cooperation For Space: Noordwijk, The Netherlands : ECSS Secretariat.
50. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2011. **31**(5): p. 363-372.
51. Pinto AMG, M.A., Campilho RDSG, de Moura MFSF, Baptista APM, *Single lap joints of similar and dissimilar adherends bonded with an acrylic adhesive*. The Journal of Adhesion, 2009: p. 85:351–376.
52. Alfano G, C.M., *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2001. **50**: p. 1701–1736.

53. Allix O, C.A., *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. International Journal of Fracture, 1996(77): p. 111–140.
54. Chandra N, L.H., Shet C, Ghonem H, *Some issues in the application of cohesive zone models for metal–ceramic interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2002(39): p. 2827–2855.
55. J, C., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. Journal of Thermoplastic Composite Materials, 2002(15): p. 429–441.
56. Kafkalidis MS, T.M., *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. International Journal of Solids and Structures, 2002(39): p. 4367–4383.
57. Liljedahl CDM, C.A., Wahab MA, Ashcroft IA, *Damage modelling of adhesively bonded joints*. International Journal of Fracture, 2006. **141**: p. 147–161.
58. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. International Journal of Solids and Structures, 2008(45): p. 1497–1512.
59. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. International Journal of Adhesion & Adhesives 2009(29): p. 195–205.