



Avaliação numérica dos ensaios ENF e 4ENF para a determinação da taxa crítica de libertação de energia ao corte (GIIC) de adesivos estruturais

ALBERTO JORGE DA SILVA LEAL

Outubro de 2016

Avaliação numérica dos ensaios ENF e 4ENF para a determinação da taxa crítica de libertação de energia ao corte (G_{IIc}) de adesivos estruturais

Alberto Jorge da Silva Leal

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia mecânica



Avaliação numérica dos ensaios ENF e 4ENF para a determinação da taxa crítica de libertação de energia ao corte (G_{IIC}) de adesivos estruturais

Alberto Jorge da Silva Leal

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 do Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Campilho.

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia mecânica



JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor Adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, orientador científico desta dissertação, pela oportunidade concedida, disponibilidade e transmissão de conhecimento. O seu apoio e incentivo foram inestimáveis, sem os quais este trabalho não seria possível.

A todos os que me encorajaram para terminar etapa, em especial à minha sobrinha Patrícia.

Aos meus pais, por tudo...

À minha esposa e aos meus filhos pelo apoio, carinho e compreensão por todos os momentos que não estive presente, sem a vossa força não seria capaz de concretizar este trabalho.

PALAVRAS CHAVE

Adesivos estruturais, ligações adesivas, *End-Notched Flexure* (ENF), *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF), Método de elementos finitos (MEF)

RESUMO

O uso de ligações adesivas tem vindo progressivamente a aumentar, graças às suas vantagens comparativamente a outros métodos de ligação. O seu uso encontra-se bastante difundido pelas mais diversas áreas, que vão desde a construção, embalagem, indústria automóvel, aeronáutica até às aplicações médicas. Em virtude disso, e devido às exigências das respetivas aplicações, torna-se cada vez mais necessário estimar de forma fiável o seu comportamento mecânico. Experimentalmente existem vários métodos normalizados para esse efeito, todavia estes requerem sempre equipamentos e materiais que nem sempre estão ao alcance de todos. Recentemente têm vindo a usar-se modelos de dano coesivo (MDC) que, em conjunto com *software* de método de elementos finitos (MEF), permitem de uma forma segura calcular a resistência das juntas adesivas. No âmbito dos MDC a taxa de libertação de energia ao corte (G_{IIC}) é um dos parâmetros que mais influência tem na previsão de resistência de juntas adesivas. Como tal, é de grande relevância estudar em detalhe os vários ensaios e respetivos métodos de redução disponíveis para a obtenção deste parâmetro.

Com esta dissertação pretende-se efetuar uma avaliação numérica aos ensaios *End Notched Flexure* (ENF) e *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF) com o intuito de determinar G_{IIC} . Para o efeito foram utilizados dados experimentais de trabalhos anteriores [1, 2] relativos a três adesivos, um frágil, um intermédio e um dúctil, respetivamente, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. A estes dados foram aplicados os métodos de redução *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance-Based Beam Method* (CCBM) nos ensaios ENF, e CCM e CBT nos ensaios 4ENF, de forma a obter as respetivas curvas resistentes (curvas-R). Os valores de G_{IIC} daí obtidos foram *a posteriori* introduzidos em modelos realizados no código comercial ABAQUS®, que através do MEF e de um MDC triangular, permitiu estimar a lei coesiva em corte para cada um dos adesivos. Seguidamente, foi realizado um teste de sensibilidade à variação de G_{IIC} e à resistência coesiva ao corte (t_s^0). Por fim, foi efetuada uma validação dos métodos de redução utilizados na parte experimental através da sua aplicação aos dados dos ensaios numéricos e respetiva comparação dos valores de G_{IIC} resultantes com os introduzidos inicialmente nos modelos numéricos. Do trabalho apresentado, conclui-se que os valores de G_{IIC} para cada adesivo obtidos pelos ensaios ENF e 4ENF apresentam uma boa concordância entre si. As leis coesivas obtidas numericamente pelos dois ensaios também apresentam parâmetros característicos similares. A validação numérica dos métodos de redução também permitiu a validação dos mesmos para a obtenção de G_{IIC} .

KEYWORDS

Structural adhesives, Adhesively-bonded joints, End-Notched Flexure (ENF), Four-Point End-Notched Flexure (4ENF), Finite element Method (FEM)

ABSTRACT

The use of adhesive bonding has been steadily increasing, thanks to its advantages compared to other joining methods. Its use is widespread in several fields, ranging from construction, packaging, automotive industry, aeronautics and medical applications. As a result, and due to the requirements of their application, it becomes increasingly necessary to reliably estimate their mechanical behaviour. Experimentally, there are several standard methods for that purpose, but these always require equipment and materials that are not always available. Recently, the use of Cohesive Zone Modelling (CZM), together with finite element method (FEM) software, provides an accurate technique to calculate the strength of adhesive joints. In the context of CZM, the shear fracture toughness (G_{IIC}) is one of the parameters that has higher influence on the strength prediction of adhesive joints. As a result, it is of great importance to study in detail the various tests and respective reduction methods available to obtain this parameter.

This thesis aims to make a numerical evaluation of the *End Notched Flexure* (ENF) and *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF) tests to determine G_{IIC} . For this purpose, experimental data from previous studies [1, 2] were used regarding three adhesives, a brittle, an intermediate and a ductile, respectively the Araldite®AV138, Araldite®2015 and SikaForce®7752. To this data, the *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) and *Compliance-Based Beam Method* (CCBM) data reduction methods were applied for the ENF test and the CCM and CBT reduction methods were applied for the 4ENF test, to obtain the respective (Resistance-Curves) *R*-curves. The obtained values of G_{IIC} were subsequently introduced in ABAQUS® which, by the FEM and a triangular CZM law, allowed to estimate the cohesive CZM parameters for each one of the adhesives. Next, a parameter influence study was carried out on the three adhesives, varying G_{IIC} and the cohesive shear strength t_s^0 . Finally, a validation of the data reduction methods used in the experimental part was carried through to the data of the numerical tests, by comparing the resulting G_{IIC} values with the respective values initially introduced in the numerical models. It was concluded that the G_{IIC} values for each adhesive obtained by the ENF and 4ENF tests are in good agreement. The cohesive laws obtained by the two tests also exhibit similar characteristic parameters. The validation of the numerical data reduction methods also enabled their validation of to obtain G_{IIC} .

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

4ENF	<i>Four-Point End Notched Flexure</i>
ADCB	<i>Asymmetric Double Cantilever Beam</i>
AECMA	<i>Association of European Aircraft and Component Manufacturers</i>
ARCAN	<i>Notched Plate Shear Method</i>
ASTM	<i>American Society for Testing and Materials</i>
CBBM	<i>Compliance-Based Beam Method</i>
CBT	<i>Corrected Beam Theory</i>
CCM	<i>Compliance Calibration Method</i>
Curva-R	Curva resistente
DBT	<i>Direct Beam Theory</i>
DCB	<i>Double Cantilever Beam</i>
ECM	<i>Effective crack method</i>
ELS	<i>End Loaded Split</i>
ENF	<i>End Notched Flexure</i>
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
JIS	<i>Japanese Industrial Standards</i>
JSD	Junta de sobreposição dupla
JSS	Junta de sobreposição simples
MDC	Modelos de dano coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Estendido
MMB	<i>Mixed Mode Bending</i>
MMF	<i>Mixed-Mode Flexure</i>
NF	Norma Francesa
SMC	<i>Sheet moulding compound</i>
TDCB	<i>Tapered Double-Cantilever Beam</i>
VCCT	<i>Virtual crack closure technique</i>
ZPF	Zona de Processo de Fratura

Caracteres Gregos

χ_{4ENF}^1	Fator de correção ensaio 4ENF
Δ_l	Fator de correção do comprimento de fenda
μ	Coefficiente de atrito

Γ	Representa a curva a rodear a ponta da fenda
γ_f	Deformação de rotura ao corte
Δ	Fator de correção da fenda inicial
Δ_{aZPF}	Fator de correção do comprimento de fenda afeta à Zona de Processo de Fratura
ϵ_f	Deformação de rotura à tração
ϵ_n	Deformação em tração
ϵ_s	Deformação em corte
σ	Tensão de tração
σ_f	Tensão de rotura
σ_y	Tensão de cedência
ν	Coefficiente de Poisson
$\nu_{xy}, \nu_{xz}, \nu_{yz}$	Coefficiente de Poisson
$\delta_{m\acute{a}x}$	Deslocamento máximo
$\delta_{m\acute{a}x,med}$	Deslocamento máximo médio
δ_n	Deslocamento em tração
δ_n^s	Deslocamento em tração no início de amaciamento
δ_s	Deslocamento em corte
δ_s^0	Deslocamento de carga máxima ao corte
δ_s^f	Deslocamento de rotura ao corte
δ_s^s	Deslocamento em corte no início de amaciamento
θ_0	Rotação dos aderentes na ponta da fenda
θ_p	Rotação dos aderentes na linha da carga
τ	Tensão de corte ao longo da espessura de substrato
τ_f	Tensão de rotura ao corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

Caracteres Romanos

$2h$	Altura do provete
$2L$	Distância entre apoios
$2L_1$	Comprimento do provete
A	Área da fenda propagada
a	Comprimento da fenda
a_0	Comprimento de fenda inicial
a_{eq}	Comprimento de fenda equivalente
B	Largura do provete, Largura da junta
$C = \delta/P$	Flexibilidade
C_0	Flexibilidade inicial
C_0, C_1, C_2, C_3	Constantes do polinómio cúbico para determinação da flexibilidade

C_{0corr}	Flexibilidade inicial corrigida
C_{f0}	Flexibilidade flexural inicial
E	Módulo de elasticidade longitudinal
E_1	Módulo de elasticidade longitudinal
E_3	Módulo de elasticidade longitudinal segundo a direção 3
E_a	Modulo de elasticidade dos aderentes
E_f	Modulo de elasticidade efetivo
E_x, E_y, E_z	Módulo de elasticidade
G	Energia de fratura
G	Taxa de libertação de energia de deformação
G_{13}	Módulo de corte transversal
\bar{G}_a	Módulo de corte do adesivo
G_c	Taxa crítica de libertação de energia de deformação
G_I	Taxa de libertação de energia de fratura em modo I
G_{Ic}	Taxa crítica de libertação de energia de fratura em modo I
G_{II}	Taxa de libertação de energia de fratura em modo II
\bar{G}_{IIc}	Taxa crítica de libertação de energia de fratura em modo II
G_T	Taxa de libertação de energia de fratura total
$G_{xy}, G_{xz}, G_{yz},$	Módulo de corte nas respetivas direções
H	Espessura de substrato; espessura do provete normal ao plano de colagem; espessura dos aderentes
h	Espessura dos substratos
J	Energia de fratura
J_c	Energia crítica à fratura
K	Fator de intensidade de tensão
K_{COH}	Matriz que relaciona as tensões e deformações em tração em corte nos elementos coesivos
L	Comprimento do provete; comprimento de metade da amostra; metade da distância entre apoios nos ensaios ENF e 4ENF
L_0	Comprimento de sobreposição
L_i	Distância entre os rolamentos de carga no ensaio 4ENF
m	Declive
P	Carga aplicada, carregamento, força
$P_{máx}$	Carga máxima aplicada
$P_{máx,med}$	Carga máxima média
P_u	Carga por unidade de largura
R	Raio dos suportes
S	Metade da distância entre apoios nos ensaios 4ENF, comprimento do arco que contorna a fenda

S_1, S_4	Distância entre apoios no dispositivo de Ferlung and Spelt
t_A	Espessura do adesivo
t_n	Tensão normal
t_n^0	Tensão máxima em tração
t_p	Espessura dos aderentes
t_s	Tensão de corte
t_s^0	Tensão máxima em corte
U	Densidade de energia de deformação do material
u_i	Vetor deslocamento
W_e	Densidade de energia
W_f	Energia de fratura
x	Coordenada
y	Coordenada

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 – CONFIGURAÇÃO TÍPICA DE UMA JUNTA ADESIVA	8
FIGURA 2 - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DE LIGAÇÕES ADESIVAS [9-12]	10
FIGURA 3 - DIFERENTES ESFORÇOS NAS JUNTAS COESIVAS	12
FIGURA 4 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JUNTA À TRAÇÃO [13]	12
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JUNTA À COMPRESSÃO [13]	13
FIGURA 6 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JUNTA AO CORTE [13]	13
FIGURA 7 - DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JUNTAS SOLICITADAS À CLIVAGEM E AO ARRANCAMENTO [13]	14
FIGURA 8 - ESQUEMATIZAÇÃO DOS MODOS DE ROTURA EM JUNTAS ADESIVAS [13].....	14
FIGURA 9 - CONFIGURAÇÃO DE JUNTAS MAIS COMUNS [14].....	16
FIGURA 10 - JUNTA DE RESSALTO [14]	16
FIGURA 11 - DISPOSITIVO DE MOLDAÇÃO ROTACIONAL, ADAPTADO DE [17]	22
FIGURA 12 - DISPOSITIVO DE MOLDAÇÃO POR PRENSA HIDROSTÁTICA, ADAPTADO DE [17].....	22
FIGURA 13 - ENSAIO DE TRAÇÃO [18]	23
FIGURA 14 - DIMENSÕES GERAIS DOS PROVETES PARA ENSAIO DE TRAÇÃO DE ACORDO COM A NORMA ISO 572-2 [19]	23
FIGURA 15 - DISPOSITIVO DE ENSAIO DE COMPRESSÃO SEGUNDO A NORMA ASTM D695 [20].....	24
FIGURA 16 - CURVA TENSÃO-DEFORMAÇÃO DO ENSAIO DE COMPRESSÃO PELA NORMA ASTM D695 [20]	24
FIGURA 17 - PROVETES PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO SEGUNDO AS NORMAS NFT51-10 (A) E ASTM D695 (B)	24
FIGURA 18 - PROVETE PLANO PARA ENSAIO DE COMPRESSÃO NORMA ASTM D695 [7]	25
FIGURA 19 - DIMENSÕES GERAIS DO PROVETE PARA O ENSAIO ARCAN [13]	25
FIGURA 20 - ESQUEMA DAS FIXAÇÕES COM PROVETE NO ENSAIO DE ARCAN, ADAPTADO DE [17]	26
FIGURA 21 - ESQUEMA DO DISPOSITIVO DE ENSAIO IOSIPESCU, ADAPTADO DE [22].....	26
FIGURA 22 - DIMENSÕES DO PROVETE ENSAIO IOSIPESCU [7]	27
FIGURA 23 - DIMENSÕES GERAIS DO PROVETE PARA ENSAIO DE TAST SEGUNDO A NORMA ISO11003-2.2	27
FIGURA 24 - ENSAIO À TRAÇÃO DE UMA JSS [25].....	28

FIGURA 25 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO PELA NORMA ASTM D1876 [26].....	29
FIGURA 26 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO A 180° PELA NORMA ASTM D903, ADAPTADO DE [28].....	29
FIGURA 27 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO A 90° PELA NORMA ASTM 6252, ADAPTADO DE [29]	30
FIGURA 28 - CURVA $P-\delta$ DO ENSAIO DE ARRANCAMENTO A 90° ASTM 6252, ADAPTADO DE [30].....	30
FIGURA 29-ENSAIO <i>CLIMBING DRUM</i> ASTM D1781, ADAPTADO DE [31]	31
FIGURA 30 - ENSAIO DE ROLETE FLUTUANTE, ADAPTADO DE [32]	31
FIGURA 31 - CURVA FORÇA/DESLOCAMENTO DO ENSAIO DE ROLETE FLUTUANTE, ADAPTADO DE [32] .	32
FIGURA 32 - DIAGRAMA S-N, ADAPTADO DE [7]	32
FIGURA 33 - MÁQUINA SERVO-HIDRÁULICA DE ENSAIO DE FADIGA [33]	33
FIGURA 34 - ESQUEMA DE FIXAÇÃO DO ENSAIO DE IMPACTO, ADAPTADO DE [17]	33
FIGURA 35 - ESQUEMA DO ENSAIO <i>WEDGE TEST</i> , PELA NORMA ASTM D3762, ADAPTADO DE [7]	34
FIGURA 36 - ESQUEMA DE DISPOSITIVOS PARA O ENSAIO DE DURABILIDADE EM JSS, PELA NORMA ASTM D2919, ADAPTADO DE [7].....	34
FIGURA 37 - ENSAIO DE TRAÇÃO EM CÂMARA AMBIENTAL [35].....	35
FIGURA 38 - ESQUEMA DE DISPOSITIVOS PARA O ENSAIO DE DURABILIDADE EM JUNTAS T, ADAPTADO DE [7]	35
FIGURA 39 - DISPOSITIVO DE FIXAÇÃO PARA O ENSAIO DE FLUÊNCIA, ADAPTADO DE [7].....	36
FIGURA 40 - MODOS DE PROPAGAÇÃO DE ROTURA [37]	37
FIGURA 41 - ESQUEMA DE UM PROVETE DO ENSAIO DCB PELA NORMA ASTM D3433, ADAPTADO DE [36]	38
FIGURA 42 - ESQUEMA DE UM PROVETE DO ENSAIO TDCB, PELA NORMA ISO 25217, ADAPTADO DE [36]	38
FIGURA 43 - ESQUEMA DE UM PROVETE DO ENSAIO TDCB, PELA NORMA ASTM D3433, ADAPTADO DE [36]	39
FIGURA 44 - ESQUEMA DO ENSAIO ENF, ADAPTADO DE [17].....	39
FIGURA 45 - ESQUEMA DO ENSAIO 4ENF, ADAPTADO DE [17].....	40
FIGURA 46 - ESQUEMA DO ENSAIO ELS, ADAPTADO DE [17].....	41
FIGURA 47 - ESQUEMA DO ENSAIO ADCB, ADAPTADO DE [7, 17]	41
FIGURA 48 - ESQUEMA DO ENSAIO MMF, ADAPTADO DE [7, 17].....	42
FIGURA 49 - ESQUEMA DO ENSAIO MMB, ADAPTADO DE [7, 17]	42
FIGURA 50 - ZONA DE PROPAGAÇÃO DE FRATURA (ZPF) DO MÉTODO CBBM, ADAPTADO DE [46]	45

FIGURA 51 - MODELO COESIVO DE DANO TRIANGULAR [66, 67]	49
FIGURA 52 - MODELO COESIVO DE DANO TRAPEZOIDAL [59]	50
FIGURA 53 - COMPARAÇÃO ENTRE CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DE UM ENSAIO ENF, APÓS PROCESSO ITERATIVO DE AJUSTE [37]	51
FIGURA 54 - PROVETE DCB COM APLICAÇÃO DE CARGA	52
FIGURA 55 - PROVETE ENF COM APLICAÇÃO DE CARGA [70]	52
FIGURA 56 - ESQUEMA DO ENSAIO NUMÉRICO DCB [43]	54
FIGURA 57 - COMPARAÇÃO DA CURVA $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ENSAIO DCB [43]	54
FIGURA 58 - CURVAS-R NUMÉRICAS OBTIDAS APÓS APLICAÇÃO DOS VÁRIOS MÉTODOS DE REDUÇÃO [43]	54
FIGURA 59 - ESQUEMA DE UM MODELO NUMÉRICO DO ENSAIO ENF [72]	55
FIGURA 60 - CURVAS-R DO ENSAIO ENF [72].....	55
FIGURA 61 - MODELO NUMÉRICO DO ENSAIO 4ENF [73].....	56
FIGURA 62 - GRELHA E CONDIÇÕES FRONTEIRA DO ENSAIO [74]	57
FIGURA 63 - CURVAS $G_T(A_{EQ})$ PARA $G_I/G_{II} > 1$; $G_I/G_{II} < 1$; $G_I/G_{II}=1$ [74]	57
FIGURA 64 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS NAS JSD(A) E JSS (B)[76]	58
FIGURA 65 - EXEMPLO DO REFINAMENTO DA MALHA NUMA JSS [77].....	59
FIGURA 66 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICAS E EXPERIMENTAIS DE ENSAIOS EM JSS (USANDO MDC), $L_0 = 37,5$ MM ARALDITE® 2015 (A) E $L_0 = 50$ MM SIKAFORCE® 7888 (B) [77]	59
FIGURA 67 - CURVAS $\Sigma-E$ DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 E RESPETIVA APROXIMAÇÃO PARA A ANÁLISE NUMÉRICA [76]	64
FIGURA 68 - ADESIVO EPÓXIDO ARALDITE® AV138/HV998 [2]	65
FIGURA 69 - CURVAS $\sigma-E$ DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [78]	65
FIGURA 70 - ADESIVO EPÓXIDO ARALDITE® 2015 [2]	66
FIGURA 71 - CURVAS $\sigma-E$ DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [78]	67
FIGURA 72 - ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [2]	68
FIGURA 73 - CURVAS $\sigma-E$ DE PROVETES MACIÇOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [81].....	68
FIGURA 74 - REPRESENTAÇÃO DA GEOMETRIA DA JUNTA COM POSICIONAMENTO DOS CALÇOS, DO ENSAIO ENF [1].....	69
FIGURA 75 - REPRESENTAÇÃO DA GEOMETRIA DA JUNTA COM POSICIONAMENTO DOS CALÇOS, DO ENSAIO 4ENF [1].....	70

FIGURA 76 - GRANALHADORA CIDBLAST, MODELO RT6S [2].....	71
FIGURA 77 - GRANALHAGEM MECÂNICA DOS SUBSTRATOS A SECO [2].....	71
FIGURA 78 - CORTE DAS TIRAS DE CARBONO-EPÓXIDO COM UM X-ATO [1].....	72
FIGURA 79 - PASSAGEM DE PISTOLA DE CALOR [1].....	73
FIGURA 80 - PLACA COMPÓSITA [1].....	73
FIGURA 81 - PLACA COMPÓSITA INSERIDA NO MOLDE [1].....	74
FIGURA 82 - MÁQUINA DE CORTE BATISTI MECCANICA S.R.L DV25 [1].....	74
FIGURA 83 - LIMPEZA E LIXAGEM DOS SUBSTRATOS [1].....	75
FIGURA 84 - MONTAGEM DO CONJUNTO FITA CALBRADA + LÂMINA DE BARBEAR [1].....	75
FIGURA 85 - APLICAÇÃO DO DESMOLDANTE LOCTITE® 770-NC [1].....	76
FIGURA 86 - ESQUEMA DE MONTAGEM DOS CALÇOS NOS PROVETES [1].....	76
FIGURA 87 - DOSAGEM REALIZADA NA PREPARAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF [1].....	77
FIGURA 88 - APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® AV138 [1].....	77
FIGURA 89 - APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [1].....	77
FIGURA 90 - APLICAÇÃO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [1].....	78
FIGURA 91 - FIXAÇÃO DOS PROVETES PARA INÍCIO DA CURA [1].....	78
FIGURA 92 - ALISAMENTO DOS BORDOS DOS PROVETES [1].....	78
FIGURA 93 - PROVETES DO ENSAIO 4ENF, COM AS ESCALAS COLADAS NAS FACES LATERAIS DOS PROVETES [1].....	79
FIGURA 94 - MÁQUINA DE ENSAIOS SHIMADZU AG-X 100 [2].....	80
FIGURA 95 - ESQUEMA DO ENSAIO EXPERIMENTAL ENF [2].....	81
FIGURA 96 - PRIMEIRA IMAGEM DO PROVETE 7 DO ENSAIO ENF [2].....	81
FIGURA 97 - IMAGEM DO PROVETE 7 NO DECORRER DO ENSAIO ENF [2].....	81
FIGURA 98 - IMAGEM FINAL DO PROVETE 7 DO ENSAIO ENF [2].....	82
FIGURA 99 - ESQUEMA DO ENSAIO EXPERIMENTAL 4ENF [1].....	82
FIGURA 100 - FERRAMENTA PARA APLICAÇÃO DE CARGA DO ENSAIO 4ENF [1].....	82
FIGURA 101 - EXEMPLO REPRESENTATIVO DO MODO DE ROTURA DO PROVETE 7, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF [1].....	83
FIGURA 102 - EXEMPLO REPRESENTATIVO DO MODO DE ROTURA DO PROVETE 1, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF [1].....	83

FIGURA 103 - CURVAS $P-\delta$ DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	85
FIGURA 104 - CURVAS $P-\delta$ DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	86
FIGURA 105 - CURVAS $P-\delta$ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	87
FIGURA 106 - CURVAS $P-\delta$ DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	88
FIGURA 107 - CURVAS $P-\delta$ DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	89
FIGURA 108 - CURVA $P-\delta$ DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	90
FIGURA 109 - COMPARATIVO DA CARGA MÁXIMA MÉDIA ($P_{MAX,MED}$) NOS ENSAIOS ENF E 4ENF	91
FIGURA 110 - COMPARATIVO ENTRE DESLOCAMENTOS MÁXIMOS MÉDIOS ($\delta_{MAX,MED}$) NOS ENSAIOS ENF E 4ENF	91
FIGURA 111 - CURVAS- R DO PROVETE 6 OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	93
FIGURA 112 - CURVAS- R DO PROVETE 7 OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	94
FIGURA 113 - VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	94
FIGURA 114 - VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	95
FIGURA 115 - CURVAS- R DO PROVETE 1 OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	96
FIGURA 116 - CURVAS- R DO PROVETE 4 OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	96
FIGURA 117 - VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	97
FIGURA 118 - VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	97
FIGURA 119 - CURVA- R DO PROVETE 1 OBTIDAS PELO MÉTODO CBBM, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	98
FIGURA 120 - CURVA- R DO PROVETE 6 OBTIDAS PELO MÉTODO CBBM, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	99
FIGURA 121 - VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELO MÉTODO CBBM, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	99
FIGURA 122 - COMPARAÇÃO DE VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} DOS 3 ADESIVOS OBTIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS, DO ENSAIO ENF	100

FIGURA 123 - CURVAS-R DO PROVETE 1 OBTIDAS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	101
FIGURA 124 - CURVAS-R DO PROVETE 5 OBTIDAS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4 ENF	102
FIGURA 125 - VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	102
FIGURA 126 - VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	103
FIGURA 127 - CURVAS-R DO PROVETE 4 OBTIDAS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	104
FIGURA 128 - CURVAS-R PROVETE 5 OBTIDAS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	104
FIGURA 129 - VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4 ENF	105
FIGURA 130 - VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	105
FIGURA 131 - CURVAS-R DO PROVETE 5 OBTIDAS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	106
FIGURA 132 - CURVAS-R DO PROVETE 6 OBTIDAS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	107
FIGURA 133 - VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	107
FIGURA 134 - VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	108
FIGURA 135 - COMPARAÇÃO DE VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT DO ENSAIO 4ENF	109
FIGURA 136 - COMPARAÇÃO DE VALORES MÉDIOS DE G_{IIC} ENTRE OS ENSAIOS ENF E 4ENF	110
FIGURA 137 - EFEITO DA RIGIDEZ NA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÕES EM JSS, ENTRE UM ADESIVO FRÁGIL E UM DÚCTIL [84].....	112
FIGURA 138 - ESQUEMA DO MODELO NUMÉRICO NO ENSAIO ENF	112
FIGURA 139 - ESQUEMA DO MODELO NUMÉRICO NO ENSAIO 4ENF	112
FIGURA 140 - ESQUEMA DA MALHA UTILIZADA NO ENSAIO ENF, NA ZONA DA PRÉ-FENDA	113
FIGURA 141 - ESQUEMA DA MALHA UTILIZADA NO ENSAIO 4ENF, NA ZONA DA PRÉ-FENDA E PUNÇÃO DE CARREGAMENTO.....	113

FIGURA 142 - ESQUEMA DA MALHA NA ZONA DOS APOIOS, NOS ENSAIOS ENF E 4ENF	114
FIGURA 143 - ESQUEMA DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA, NO ENSAIO ENF	114
FIGURA 144 - ESQUEMA DAS CONDIÇÕES FRONTEIRA, NO ENSAIO 4ENF	114
FIGURA 145 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® AV138 DO PROVETE 6, DO ENSAIO ENF	118
FIGURA 146 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® AV138 DO PROVETE 7, DO ENSAIO ENF	118
FIGURA 147 - LEI COESIVA DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	119
FIGURA 148 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015 DO PROVETE 1, DO ENSAIO ENF	121
FIGURA 149 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015 DO PROVETE 4, DO ENSAIO ENF	121
FIGURA 150 - LEI COESIVA DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	122
FIGURA 151 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 DO PROVETE 1, DO ENSAIO ENF	124
FIGURA 152 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 DO PROVETE 6, DO ENSAIO ENF	124
FIGURA 153 - LEI COESIVA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	125
FIGURA 154 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® AV138 DO PROVETE 1, DO ENSAIO-4ENF	127
FIGURA 155 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® AV138 DO PROVETE 5, DO ENSAIO 4ENF	127
FIGURA 156 - LEI COESIVA ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	128
FIGURA 157 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015 DO PROVETE 4, DO ENSAIO 4ENF	130
FIGURA 158 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO ARALDITE® 2015 DO PROVETE 5, DO ENSAIO 4ENF	130
FIGURA 159 - LEI COESIVA DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	131
FIGURA 160 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 DO PROVETE 5, DO ENSAIO 4ENF	132
FIGURA 161 - CURVAS $P-\delta$ NUMÉRICA E EXPERIMENTAL DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 DO PROVETE 3, DO ENSAIO ENF	133
FIGURA 162 - LEI COESIVA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	134

FIGURA 163 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE G_{IIC} PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF135	
FIGURA 164 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE G_{IIC} PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF..135	
FIGURA 165 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE G_{IIC} PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF 136	
FIGURA 166 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE T_5^0 PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF 137	
FIGURA 167 - CURVAS $P-\delta$, COM A VARIAÇÃO DA T_5^0 PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	137
FIGURA 168 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DA T_5^0 PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, NO ENSAIO ENF 138	
FIGURA 169 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE G_{IIC} PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	139
FIGURA 170 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE G_{IIC} PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF 139	
FIGURA 171 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE G_{IIC} PARA O ADESIVO SIKAFORCE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	140
FIGURA 172 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE T_5^0 PARA O ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	141
FIGURA 173 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE T_5^0 PARA O ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF.	141
FIGURA 174 - CURVAS $P-\delta$ DA VARIAÇÃO DE T_5^0 PARA O ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	142
FIGURA 175 - COMPARATIVO ENTRE VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS, NO ADESIVO ARALDITE® AV138 NO ENSAIO ENF	143
FIGURA 176 - COMPARATIVO ENTRE VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS, NO ADESIVO ARALDITE® 2015 NO ENSAIO ENF	144
FIGURA 177 - COMPARATIVO ENTRE VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS, NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NO ENSAIO ENF	145
FIGURA 178 - COMPARATIVO ENTRE VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS, NO ADESIVO ARALDITE® AV138 NO ENSAIO 4ENF	146
FIGURA 179 - COMPARATIVO ENTRE VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS, NO ADESIVO ARALDITE® 2015 NO ENSAIO 4ENF	146
FIGURA 180 - COMPARATIVO ENTRE VALORES DE G_{IIC} OBTIDOS PELOS DIFERENTES MÉTODOS, NO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NO ENSAIO 4ENF	147

ÍNDICE DE TABELAS

TABELA 1 – VANTAGENS DAS LIGAÇÕES ADESIVAS [6, 7]	8
TABELA 2 – DESVANTAGENS DAS LIGAÇÕES ADESIVAS [6, 7]	9
TABELA 3 – CLASSIFICAÇÃO DOS ADESIVOS	17
TABELA 4 - DIFERENTES TIPOS DE ADESIVOS ESTRUTURAIS [16]	18
TABELA 5 - COMPOSIÇÃO QUÍMICA DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 [2].	63
TABELA 6 - PROPRIEDADES MECÂNICAS DA LIGA DE ALUMÍNIO AW 6082-T651 [2].	63
TABELA 7 - PROPRIEDADES ELÁSTICAS ORTOTRÓPICAS DO COMPÓSITO [1]	64
TABELA 8 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO ARALDITE® AV138, ADAPTADO DE [78, 79].	66
TABELA 9 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [78]	67
TABELA 10 - PROPRIEDADES MECÂNICAS E DE FRATURA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [81]	69
TABELA 11 - CONTROLO DIMENSIONAL DOS SUBSTRATOS DE ALUMÍNIO (MM) [2]	70
TABELA 12 - CONTROLO DIMENSIONAL DOS SUBSTRATOS DE FIBRA DE CARBONO [2]	70
TABELA 13 - TABELA COM VALORES DE PRÉ-FENDA DOS PROVETES DO ENSAIO ENF [2]	72
TABELA 14 - TABELA COM VALORES DE PRÉ-FENDA DOS PROVETES DO ENSAIO 4ENF [1]	79
TABELA 15 - VALORES DE CARGA MÁXIMA E DESLOCAMENTO MÁXIMO DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	84
TABELA 16 - VALORES DE CARGA MÁXIMA E DESLOCAMENTO MÁXIMO DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	86
TABELA 17 - VALORES DE CARGA MÁXIMA E DESLOCAMENTO MÁXIMO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	87
TABELA 18 - VALORES DE CARGA MÁXIMA E DESLOCAMENTO MÁXIMO DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	88
TABELA 19 - VALORES DE CARGA MÁXIMA E DESLOCAMENTO MÁXIMO DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	89
TABELA 20 - VALORES DE CARGA MÁXIMA E DESLOCAMENTO MÁXIMO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	90
TABELA 21 - VALORES DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF	93
TABELA 22 - VALORES DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS POR DIFERENTES MÉTODOS, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	95

TABELA 23 - VALORES DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS PELO MÉTODO CBBM, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	98
TABELA 24 - VALORES MÉDIOS E RESPETIVOS DESVIOS DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM, DBT, CBT E CBBM DO ENSAIO ENF	100
TABELA 25 - VALORES DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	101
TABELA 26 - VALORES DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	103
TABELA 27 - VALORES DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	106
TABELA 28 - VALORES MÉDIOS E RESPETIVOS DESVIOS DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDOS PELOS MÉTODOS CCM E CBT, DO ENSAIO 4ENF	108
TABELA 29 - MÉDIA E RESPETIVO DESVIO PADRÃO DE G_{IIC} [N/MM] OBTIDO PELOS MÉTODOS CCM (DO ENSAIO ENF) E CBBM (NO ENSAIO 4ENF).....	109
TABELA 30 - VALORES DE G_{IIC} [N/MM] PELO MÉTODO CBBM E INTEGRAL-J, [70, 72]	110
TABELA 31 - DESVIOS EM PERCENTAGEM DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO CBBM NO ENSAIO ENF, RELATIVAMENTE A DADOS OBTIDOS, PELOS MÉTODOS CBBM E INTEGRAL-J EM ESTUDOS ANTERIORES [72, 83]	110
TABELA 32 - DESVIOS EM PERCENTAGEM DOS RESULTADOS OBTIDOS PELO MÉTODO CCM NO ENSAIO 4ENF, RELATIVAMENTE A DADOS OBTIDOS, PELOS MÉTODOS CBBM E INTEGRAL-J EM ESTUDOS ANTERIORES [72, 83]	111
TABELA 33 - DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS, DO ENSAIO ENF, DO ADESIVO ARALDITE® AV138	117
TABELA 34 - DADOS OBTIDOS PELA LEI TRIANGULAR DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO ENF.....	119
TABELA 35 - DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF	120
TABELA 36 - DADOS OBTIDOS PELA LEI TRIANGULAR DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO ENF ..	122
TABELA 37 - DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	123
TABELA 38 - DADOS OBTIDOS PELA LEI TRIANGULAR DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF ..	125
TABELA 39 - DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF.....	126
TABELA 40 - DADOS OBTIDOS PELA LEI TRIANGULAR DO ADESIVO ARALDITE® AV138, DO ENSAIO 4ENF	128

TABELA 41 - DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF.....	129
TABELA 42 - DADOS OBTIDOS PELA LEI TRIANGULAR DO ADESIVO ARALDITE® 2015, DO ENSAIO 4ENF	131
TABELA 43 - DADOS DE ENTRADA DOS MODELOS NUMÉRICOS DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO ENF	132
TABELA 44 - DADOS OBTIDOS PELA LEI TRIANGULAR DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752, DO ENSAIO 4ENF	133

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO	1
1.1	Contextualização	1
1.2	Objetivos	1
1.3	Organização do relatório	2
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	7
2.1	Ligações adesivas.....	7
2.1.1	Caracterização das juntas adesivas.....	7
2.1.2	Aplicações comuns das juntas adesivas.....	9
2.1.3	Esforços e modos de rotura em juntas adesivas	11
2.1.3.1	Solicitação à tração.....	12
2.1.3.2	Solicitação à compressão	12
2.1.3.3	Solicitação ao corte.....	13
2.1.3.4	Clivagem e arrancamento	13
2.1.3.5	Modos de rotura em juntas adesivas	14
2.1.4	Configurações possíveis de junta.....	15
2.1.5	Adesivos estruturais.....	16
2.1.5.1	Adesivos fenólicos	18
2.1.5.1.1	Fenólicos-vinílicos	18
2.1.5.1.2	Fenólicos-nitrilo	18
2.1.5.1.3	Fenólicos-policloropreno.....	19
2.1.5.2	Adesivos Acrílicos	19
2.1.5.3	Adesivos de poliuretano	19
2.1.5.4	Adesivos poliimida	20
2.1.5.5	Adesivos epóxidos	20
2.1.5.5.1	Epóxidos de poliamida	20
2.1.5.5.2	Epóxidos de polisulfureto	20

2.1.5.5.3	Epóxidos fenólicos.....	21
2.1.5.5.4	Epóxidos de poliuretano.....	21
2.1.5.5.5	Epóxido-nitrilo.....	21
2.2	Determinação das propriedades dos adesivos	21
2.2.1	Ensaio de adesivo maciço	21
2.2.1.1	Elaboração de provetes maciços	21
2.2.1.2	Ensaio de tração	22
2.2.1.3	Ensaio de compressão	24
2.2.1.4	Ensaio Notched plate shear method (ARCAN)	25
2.2.1.5	Ensaio Iosipescu ou V-Notched beam shear method.....	26
2.2.2	Ensaio de adesivo em junta adesiva.....	27
2.2.2.1	Ensaio Thick Adherend Shear Test, (TAST).....	27
2.2.2.2	Ensaio ao corte em juntas de sobreposição simples (JSS)	28
2.2.2.3	Ensaio de arrancamento.....	28
2.2.2.3.1	Ensaio de arrancamento em junta T	28
2.2.2.3.2	Ensaio de arrancamento em ângulo	29
2.2.2.3.3	Ensaio Climbing Drum	30
2.2.2.3.4	Ensaio de rolete flutuante ou <i>floating roller test</i>	31
2.2.2.4	Ensaio à fadiga	32
2.2.2.5	Ensaio de impacto.....	33
2.2.2.6	Ensaio de durabilidade.....	34
2.2.2.7	Ensaio de fluência	35
2.3	Ensaio de caracterização à fratura.....	36
2.3.1	Modo I	37
2.3.1.1	Ensaio Double-Cantilever Beam (DCB)	37
2.3.1.2	Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam (TDCB).....	38
2.3.2	Modo II	39
2.3.2.1	Ensaio End Notched Flexure (ENF)	39
2.3.2.2	Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF).....	40

2.3.2.3	Ensaio End-loaded split (ELS)	40
2.3.3	Modo misto I + II	41
2.3.3.1	Ensaio Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB).....	41
2.3.3.2	Ensaio Mixed-Mode Flexure (MMF)	41
2.3.3.3	Ensaio Mixed-Mode Bending (MMB)	42
2.4	Métodos de determinação de G_{IIc}.....	42
2.4.1	Ensaio End-Notched Flexure (ENF)	42
2.4.1.1	Metodologias analíticas de cálculo de G_{IIc} baseadas na medição de a	43
2.4.1.1.1	Método Compliance Calibration Method (CCM).....	43
2.4.1.1.2	Método Direct Beam Theory (DBT).....	43
2.4.1.1.3	Método Corrected Beam Theory (CBT).....	44
2.4.1.2	Metodologias baseadas no comprimento de fenda equivalente (a_{eq}).....	44
2.4.1.3	Metodologia baseada no integral-J	45
2.4.2	Ensaio 4Point End-Notched Flexure (4ENF)	47
2.4.2.1	Métodos baseados na medição de a	47
2.4.2.2	Métodos que não necessitam da medição de a	47
2.5	Modelos de dano coesivo	48
2.5.1	Leis de dano coesivo	48
2.5.1.1	Lei triangular.....	49
2.5.1.2	Lei trapezoidal	49
2.5.2	Métodos de determinação dos parâmetros coesivos	50
2.5.2.1	Método inverso	50
2.5.2.2	Método direto	51
2.5.2.3	Método de definição individual de parâmetros.....	53
2.5.3	Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo	53
2.5.3.1	Ensaio de fratura em modo puro	53
2.5.3.1.1	Ensaio Double Cantilever Beam (DCB).....	53
2.5.3.1.2	Ensaio End Notched Flexure (ENF).....	55
2.5.3.1.3	Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)	56

2.5.3.2	Ensaio de fratura em modo misto	56
2.5.3.3	Juntas usadas em aplicações de modo misto	57
3	DESENVOLVIMENTO	63
3.1	Trabalho experimental	63
3.1.1	Materiais utilizados	63
3.1.1.1	Substratos do ensaio experimental ENF	63
3.1.1.2	Substratos do ensaio experimental 4ENF	64
3.1.1.3	Adesivos	64
3.1.1.3.1	Araldite® AV138	65
3.1.1.3.2	Araldite® 2015	66
3.1.1.3.3	Sikaforce® 7752	68
3.1.2	Geometria das juntas	69
3.1.2.1	Ensaio End Notched Flexure (ENF)	69
3.1.2.2	Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)	70
3.1.3	Processo de fabrico	70
3.1.3.1	Fabrico dos provetes ENF	70
3.1.3.2	Fabrico dos provetes 4ENF	72
3.1.4	Ensaio das juntas	79
3.1.4.1	Esquema do ensaio experimental ENF	80
3.1.4.2	Esquema do ensaio experimental 4ENF	82
3.1.5	Resultados obtidos	83
3.1.5.1	Curvas força-deslocamento ($P-\delta$)	83
3.1.5.1.1	Curvas $P-\delta$ do ensaio ENF, do adesivo Araldite® AV138	84
3.1.5.1.2	Curvas $P-\delta$ do ensaio ENF, do adesivo Araldite® 2015	85
3.1.5.1.3	Curvas $P-\delta$ do ensaio ENF, do adesivo SikaForce® 7752	86
3.1.5.1.4	Curvas $P-\delta$ do ensaio 4ENF, do adesivo Araldite® AV138	87
3.1.5.1.5	Curvas $P-\delta$ do ensaio 4ENF, do adesivo Araldite® 2015	88
3.1.5.1.6	Curvas $P-\delta$ do ensaio 4ENF, do o adesivo SikaForce® 7752	89
3.1.5.2	Comparativo dos valores obtidos através das curvas $P-\delta$ dos ensaios ENF e 4ENF	90

3.1.5.3	Tenacidade ao corte em modo II.....	91
3.1.5.3.1	Valores de G_{IIC} do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF	92
3.1.5.3.2	Valores de G_{IIC} do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF	95
3.1.5.3.3	Valores de G_{IIC} do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF	98
3.1.5.3.4	Valores de G_{IIC} do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF	100
3.1.5.3.5	Valores de G_{IIC} do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF	103
3.1.5.3.6	Valores de G_{IIC} do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF	105
3.1.5.4	Análise dos resultados obtidos.....	109
3.2	Trabalho numérico	112
3.2.1	Condições da análise numérica	112
3.2.2	Modelos de dano coesivo.....	115
3.2.3	Estimativa da lei coesiva ao corte nos ensaios ENF e 4ENF	116
3.2.3.1	Ensaio End Notched Flexure (ENF).....	116
3.2.3.1.1	Adesivo Araldite® AV138	117
3.2.3.1.2	Araldite® 2015.....	120
3.2.3.1.3	SikaForce® 7752	123
3.2.3.2	Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)	126
3.2.3.2.1	Araldite® AV138	126
3.2.3.2.2	Araldite® 2015.....	129
3.2.3.2.3	SikaForce® 7752	132
3.2.4	Análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos.....	134
3.2.4.1	Efeito da variação de G_{IIC} no ensaio ENF	134
3.2.4.2	Efeito da variação de t_s^0 no ensaio ENF	136
3.2.4.3	Efeito da variação de G_{IIC} no Ensaio 4ENF	138
3.2.4.4	Efeito da variação de t_s^0 no Ensaio 4ENF	140
3.2.5	Validação dos métodos de redução de G_{IIC}	142
3.2.5.1	Ensaio End Notched Flexure (ENF)	143
3.2.5.1.1	Araldite® AV138	143
3.2.5.1.2	Araldite® 2015.....	143
3.2.5.1.3	SikaForce® 7752	144

3.2.5.2	Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)	145
3.2.5.2.1	Araldite® AV138	145
3.2.5.2.2	Araldite® 2015.....	146
3.2.5.2.3	SikaForce® 7752	147
4	CONCLUSÕES.....	151
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	157

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A utilização das juntas adesivas tem vindo a aumentar nas últimas décadas devido às suas características competitivas relativamente aos métodos tradicionais de união. Para aumentar a confiança no projeto de estruturas coladas, é importante conseguir prever com precisão a sua resistência mecânica. Neste contexto, as abordagens pela Mecânica da Fratura e do Dano apresentam vantagens significativas em comparação aos métodos baseados na Resistência dos Materiais, especialmente em estruturas com singularidades de tensões e quando os materiais envolvidos apresentam comportamento plástico significativo. A abordagem pela Mecânica da Fratura é frequentemente aplicada por uma análise energética, onde o parâmetro principal a determinar para previsão da evolução do dano e rotura é a taxa crítica de libertação de energia (G_c). Este parâmetro pode ainda ser dividido em componente de tração (G_{Ic}) e corte (G_{IIc}). Diversos autores abordaram recentemente o tema da determinação do valor de G_{IIc} de camadas finas de adesivo em juntas coladas. A maioria dos trabalhos publicados sobre caracterização à fratura ao corte utiliza o ensaio *End Notched Flexure* (ENF). As principais vantagens do ensaio ENF incluem a sua simplicidade e a possibilidade de obter G_{IIc} matematicamente usando a Teoria das Vigas. No entanto, este ensaio tem tendência para a propagação instável da fenda, o que dificulta a medição de G_{IIc} . Existem outros ensaios, como o *Four-Point End Notched Flexure* (4ENF), cuja geometria conduz a uma propagação estável da fenda. Apesar disso, o ensaio 4ENF é mais complicado no que concerne ao método e dispositivo de ensaio. Considera-se assim de grande importância a existência de uma comparação exaustiva entre estes dois métodos para a medição de G_{IIc} de adesivos estruturais.

1.2 Objetivos

Neste trabalho pretende-se comparar numericamente, recorrendo ao *software* ABAQUS®, os métodos ENF e 4ENF para medição do valor de G_{IIc} de juntas adesivas, considerando adesivos com diferentes ductilidades. Pressupõe-se inicialmente a utilização de dados experimentais de ensaios ENF e 4ENF, anteriormente realizados [1, 2], para obtenção de G_{IIc} . Com recurso a estes e à respetiva leitura dos comprimentos de fenda obtidos a partir do arquivo fotográfico dos ensaios, é feito um estudo de determinação de G_{IIc} através dos métodos *Compliance Calibration Method* (CCM), *Direct Beam Theory* (DBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) para o ensaio ENF; e CCM e CBT para o ensaio 4ENF. Com os resultados obtidos é feita uma análise crítica aos valores obtidos. O trabalho numérico compreende a análise dos ensaios experimentais ENF e 4ENF, pelo Método de Elementos Finitos (MEF)

e Modelos de dano coesivo (MDC), para obtenção de leis coesivas que permitam a reprodução do comportamento obtido experimentalmente. Pretende-se também estudar o efeito dos parâmetros coesivos nos resultados numéricos obtidos, de forma a averiguar a sua influência na previsão do comportamento das juntas. Em paralelo, é efetuado um estudo numérico à adequabilidade dos diferentes métodos de redução usados para o cálculo de G_{IIC} pelos dois tipos de ensaio.

1.3 Organização do relatório

Esta dissertação foi organizada da seguinte forma:

Capítulo 1

Descrição dos objetivos, contexto e problemática do trabalho a realizar e estruturação da tese.

Capítulo 2

Neste capítulo efetua-se uma revisão bibliográfica aos seguintes temas:

- Caracterização das juntas adesivas e respetivas aplicações mais comuns;
- Classificação e tipos de adesivos estruturais;
- Ensaio de adesivos em maciço e ensaios de adesivos em junta;
- Ensaio de caracterização à fratura para o modo I, modo II e modo misto (I+II);
- Métodos de determinação G_{IIC} para os ensaios ENF e 4ENF;
- MDC

Capítulo 3

Nesta secção apresenta-se o desenvolvimento de todo o trabalho efetuado:

- Descrição dos ensaios efetuados e respetivos materiais empregues;
- Apresentação e análise dos resultados obtidos através do cálculo de G_{IIC} , através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM para os dados experimentais dos ensaios ENF e dos métodos CCM e CBT para os ensaios 4ENF;
- Apresentação e análise dos resultados obtidos, através da simulação numérica com recurso ao código comercial ABAQUS®;
- Estimativa da lei coesiva para os dois ensaios;
- Análise aos efeitos da variação dos parâmetros coesivos (G_{IIC} e t_s^0) nas curvas força-deslocamento ($P-\delta$);
- Estudo numérico à adequabilidade dos métodos de redução.

Capítulo 4

Por último, são apresentadas as conclusões do trabalho realizado e recomendações para eventuais trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Desde os primórdios da humanidade, o ser humano verificou que poderia obter inúmeras vantagens com as ligações adesivas com recurso a matérias-primas existentes na natureza. Descobertas em fósseis parecem demonstrar que os Neandertais usavam colas feitas a partir da queima de varas de vidoeiro. Esta cola (piche) era depois usada para o fabrico de utensílios e armas [3]. No mesmo sentido, em África usavam-se compostos adesivos para o fabrico de ferramentas e armas [4]. Os antigos Egípcios foram um dos povos da antiguidade que mais se notabilizou no uso de colas, pois usavam-nas para situações tão diversas como a decoração, embalsamento de múmias, utensílios e ferramentas [5]. Atualmente, os adesivos são usados nas mais diversas áreas que vão desde aplicações mecânicas estruturais e não estruturais, aplicações médicas à indústria do mobiliário, construção naval, indústria automóvel e vestuário.

Sem retirar mérito às vantagens e funcionalidade, os adesivos naturais possuem algumas lacunas em termos de resistência e fiabilidade, pois são bastante afetados pelas condições ambientais devido à sua elevada taxa de absorção de humidade que provoca a sua degradação, impossibilitando a utilização em situações de alta performance.

De forma a colmatar estes problemas, e tendo em conta as vantagens que se podem retirar deste tipo de ligações, houve a necessidade de encontrar materiais mais adequados às novas exigências e cujas propriedades fossem mais facilmente estimáveis pelos gabinetes de projeto. No século passado, com o advento da aeronáutica e a pressão provocada pelas duas grandes guerras, assistiu-se a uma elevada procura por materiais e equipamentos mais leves e com melhor performance originando enormes desenvolvimentos na área de compósitos e plásticos técnicos. Estes fatores contribuíram de forma significativa para a descoberta e a utilização de adesivos sintéticos, que conhecemos nos dias de hoje.

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas caracterizam-se pela união entre pelo menos dois materiais, distintos ou iguais, designados por substratos, por intermédio de um outro adesivo. Seguidamente, na Figura 1, esquematiza-se a configuração típica de uma junta adesiva, onde o substrato ou aderente (nome frequentemente atribuído após a ligação) é parte estrutural de uma junta; a interfase é a secção do ponto de contacto entre o aderente e o adesivo; o primário é uma camada aplicada por vezes para promover a proteção da

superfície e, por último, o adesivo é um material que quando aplicado em duas superfícies promove a sua adesão.

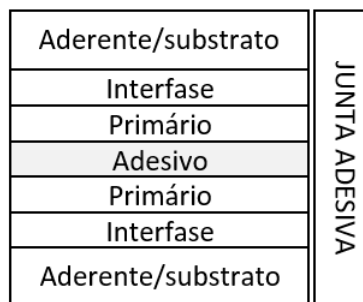


Figura 1 – Configuração típica de uma junta adesiva

Comparativamente a outros métodos, nomeadamente a soldadura, soudo-brasagem e ligações aparafusadas, as ligações adesivas possuem vantagens [6, 7]. As mais significativas transcrevem-se para a Tabela 1.

Tabela 1 – Vantagens das ligações adesivas [6, 7]

- Permitem uma fácil automatização do processo de fabrico;
- Garantem uma distribuição uniforme de tensões ao longo da área ligada aumentando com isso a sua força e rigidez;
- Permitem obter estruturas com contornos regulares sem marcas devidas à soldadura ou soudo-brasagem e sem o aspeto visual dos parafusos;
- Tornam a construção mais leve;
- Permitem o isolamento elétrico entre substratos;
- Em certos casos podem atuar como vedantes;
- Possibilitam o fabrico de peças de elevada complexidade;
- Relativamente à soldadura permitem a união de materiais distintos;
- Possibilitam a ligação entre chapas de espessura reduzida;
- Eliminam pontos facilitadores de corrosão;
- Evitam a formação de distorções e zonas termicamente afetadas.

Como desvantagens, em relação aos métodos anteriormente descritos, podem-se enumerar as seguintes (Tabela 2):

Tabela 2 – Desvantagens das ligações adesivas [6, 7]

- A sua resistência é afetada por fatores ambientais, nomeadamente a temperatura e humidade;
- Para obter bons resultados é necessária uma cuidada preparação das superfícies: abrasão mecânica, desengorduramento com solvente, ataques químicos, primários;
- Podem ocorrer tensões residuais resultantes dos diferentes coeficientes de expansão térmica;
- O controlo de qualidade e segurança da ligação é mais difícil de assegurar comparativamente aos outros métodos (soldadura, soudo-brasagem e ligações aparafusadas);
- Falta de critério de dimensionamento aceite universalmente;
- A ligação é mais difícil de quebrar;
- Apresentam problemas de toxicidade e inflamabilidade.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Atualmente, como demonstrado na Figura 2, este tipo de ligação é usado nas mais diversas áreas tendo em conta, sobretudo, as suas vantagens em comparação a outro tipo ligações. Segundo um artigo publicado no The Wall Street Journal [8], o uso deste tipo de ligação tem aumentado de forma consistente a taxas de 4 a 5% ao ano, sendo as indústrias da aeronáutica e automóvel as fortes impulsionadoras deste crescimento. Na indústria automóvel, verifica-se uma cada vez maior apetência do consumidor por veículos menos poluentes, obrigando a que os construtores procurem materiais mais leves. Ainda segundo o mesmo artigo [8], hodiernamente, a utilização de adesivos nos automóveis cresceu 50% comparativamente à década anterior.

Devido à sua elevada diversificação, é difícil conseguir efetuar uma clara estruturação do emprego de adesivos por sector de atividade, até porque existem nichos de mercado difíceis de contabilizar. Não obstante, segundo estudos realizados [6], podem-se considerar as seguintes áreas como as mais significativas:

- Indústria automóvel;
- Médica e farmacêutica;
- Indústria aeroespacial;
- Construção;
- Embalagem;
- Indústria da madeira;
- Vestuário e calçado;
- Componentes e eletrónica de consumo.



Figura 2 - Exemplos de aplicação de ligações adesivas [9-12]

Dentro destes sectores, pode destacar-se alguns exemplos da utilização destes materiais pelo respetivo sector de atividade:

Indústria automóvel e aeroespacial

- Materiais compósitos para uso geral e estrutural;
- Componentes estruturais (chassis, fixações, etc...);
- Para-lamas;
- Tejadilhos em vinil;
- Fixadores de roscas;
- Interiores do habitáculo;
- Vedações de portas e janelas.

Indústria médica e farmacêutica

- Pensos e adesivos;
- Próteses e órteses;
- Dispositivos médicos e cirúrgicos (agulhas, máscaras, cotonetes, etc...);
- Adesivos e selos dentários;
- Embalagens.

Embalagem

- Cartão corrugado;
- Materiais compósitos descartáveis;
- Etiquetas;
- Fitas adesivas;
- Envelopes, caixas;

- Embalagens de uso geral.

Construção

- Ligação de tubaria para canalizações;
- Revestimentos;
- Aplicações cerâmicas;
- Tetos falsos e divisórias;
- Painéis *sandwich*;
- Vedantes para janelas e portas.

Indústria da madeira

- Mobiliário geral;
- Cozinhas;
- Painéis e revestimentos para a construção;
- Portas e janelas.

Vestuário e calçado

- Solas e fabrico de calçado;
- Velcros e entre telas;
- Costuras adesivas;
- Equipamentos desportivos;
- Tapeçaria;
- Tecidos laminados.

Componentes de uso geral e eletrónica de consumo

- Assemblagens eletrónicas;
- Eletrodomésticos;
- Material escolar;
- Instrumentos musicais.

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Se for eliminado o efeito de fatores externos, a resistência de uma ligação adesiva é condicionada em especial pelos materiais que compõem a junta, a interface de contacto e as tensões residuais nela presente. Como consequência, a configuração e preparação das juntas adesivas desempenha um papel determinante para que estas suportem ou não, as cargas a que estarão sujeitas [6, 7]. Ao projetar uma junta, um dos fatores fundamentais a ter em linha de conta é obrigar o adesivo a trabalhar ao corte, para que dessa forma se consiga tirar maior proveito da ductilidade deste, neste tipo de solicitação [7].

Nas juntas adesivas existem cinco tipos de esforços [7]: tração, compressão, corte, arrancamento e clivagem (Figura 3).

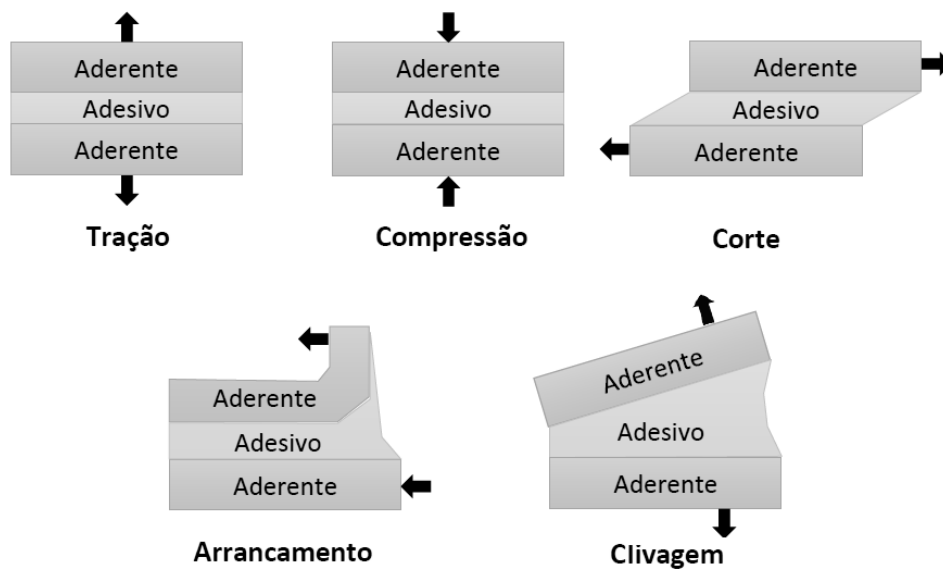


Figura 3 - Diferentes esforços nas juntas coesivas

2.1.3.1 Solicitação à tração

Este tipo de solicitação (Figura 4) ocorre quando a força é efetuada perpendicularmente ao plano da junta e é aplicada uniformemente por toda a área da ligação. Na realidade, é praticamente impossível garantir uma espessura uniforme do adesivo ao longo da ligação, o que leva a que surjam picos de tensões de clivagem e arrancamento nas extremidades [6, 7].

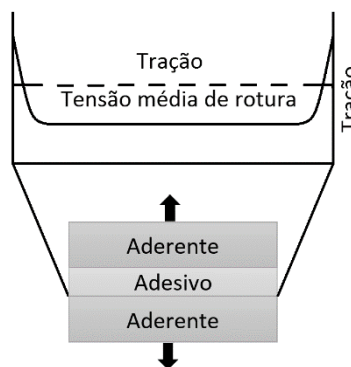


Figura 4 - Distribuição de tensões em junta à tração [13]

2.1.3.2 Solicitação à compressão

A força é efetuada perpendicularmente ao plano da junta e é aplicada uniformemente por toda a área da ligação e, neste caso, as forças tendem a comprimir um aderente

contra o outro. Neste tipo de ligação (Figura 5) podem aparecer fissuras nos pontos onde as tensões não são uniformes [6, 7]. Se o esforço de compressão for forte o suficiente que não permita a deslocação de um substrato sobre o outro (compressão pura), pode mesmo não ser necessário o uso de adesivo [7].

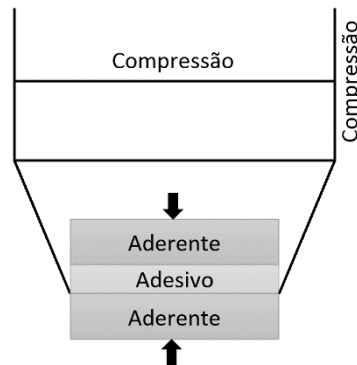


Figura 5 - Distribuição de tensões em junta à compressão [13]

2.1.3.3 Solicitação ao corte

Os esforços de corte surgem quando as forças atuam no plano do adesivo e tendem a separar os aderentes (Figura 6). Estas juntas são geralmente mais resistentes, pois toda a área coesiva contribui para a resistência e é mais fácil manter os substratos alinhados [6, 7]. É nas extremidades que se pode encontrar a maior concentração de tensões e a parte central contribui pouco para a resistência da ligação. Este efeito deve-se à deformação diferencial dos aderentes ao longo do comprimento da ligação [6].

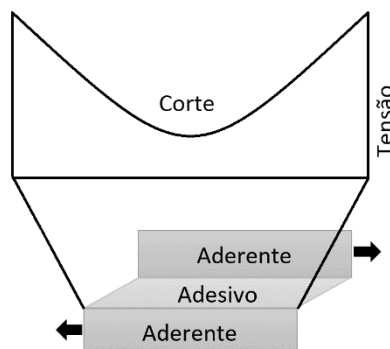


Figura 6 - Distribuição de tensões em junta ao corte [13]

2.1.3.4 Clivagem e arrancamento

Estes dois tipos de esforços devem ser sempre evitados nas juntas adesivas. As juntas submetidas a estes dois tipos de esforços suportam cargas menores, pois as tensões atuam em áreas muito reduzidas. A clivagem acontece quando as forças na extremidade da junta tendem a separar os substratos. Os esforços de arrancamento são muito

similares aos de clivagem, contudo implicam que pelo menos um dos substratos seja flexível. Como consequência, o ângulo de separação pode ser maior que na clivagem [6]. Estes dois efeitos podem ser visualizados na Figura 7.

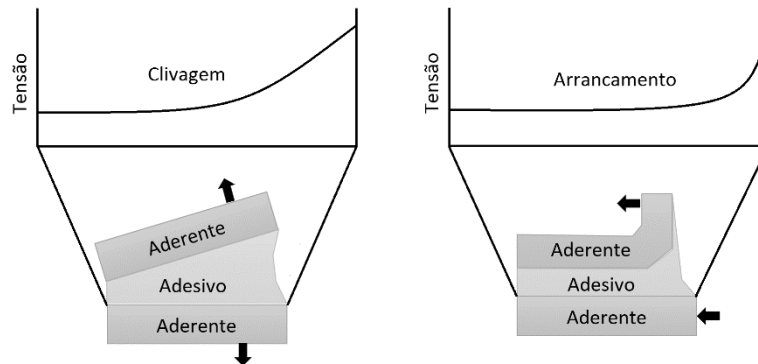


Figura 7 - Distribuição de tensões em juntas solicitadas à clivagem e ao arrancamento [13]

2.1.3.5 Modos de rotura em juntas adesivas

Um dos principais objetivos de uma ligação adesiva é a transmissão de esforços com a garantia que estes suportem as cargas a que irão estar sujeitos. Assim, é fundamental a correta avaliação do perfil de tensões ao longo da junta assim como os seus possíveis modos de rotura [7]. No dimensionamento de uma junta esta nunca deve romper pelo adesivo.

Se se atender à Figura 8, constata-se que existem, essencialmente, quatro modos de rotura das juntas adesivas [6, 7]:

- A. Rotura adesiva;
- B. rotura coesiva;
- C. rotura mista;
- D. rotura do substrato.

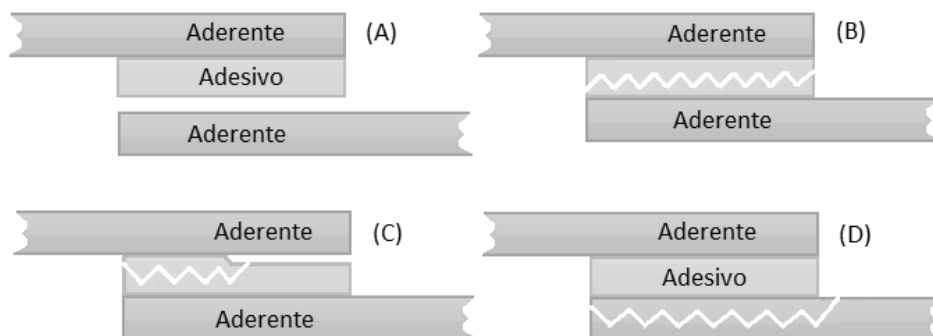


Figura 8 - Esquemática dos modos de rotura em juntas adesivas [13]

A rotura adesiva (A) ocorre na interfase, ou seja, na ligação do adesivo com o substrato. Este tipo de rotura ocorre, fundamentalmente, quando existe uma má preparação/limpeza da superfície de ligação.

A rotura coesiva (B) ocorre internamente no núcleo do adesivo. Após a rotura ambas as superfícies dos substratos contêm adesivo. Neste caso, o núcleo do adesivo possui menos resistência que as zonas de ligação com os aderentes.

A rotura mista (C) surge quando ocorre rotura coesiva com rotura adesiva, como referido anteriormente, este modo de rotura emerge sobretudo devido à má preparação das superfícies de ligação e à menor resistência do núcleo do adesivo.

A rotura do substrato (D), na realização do projeto de uma junta, é sempre o modo de rotura mais desejado [7], pois permite que a carga de rotura corresponda ou se aproxime da carga de rotura do substrato [2]. Este tipo de rotura ocorre no núcleo do aderente, devido ao facto de este possuir uma menor resistência que o adesivo.

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Na Figura 9 representa-se a configuração de juntas adesivas mais comuns. As mais utilizadas são as juntas de sobreposição simples (JSS), juntas de sobreposição dupla (JSD), juntas de chanfro (*scarf joint*) e as juntas em degrau [2, 7].

As juntas de topo a topo planas são as mais simples de executar, porém a sua eficácia é reduzida por causa das elevadas concentrações de tensões nas extremidades. Para além disso, este tipo de juntas não suporta esforços de flexão devido ao facto do adesivo estar sujeito a clivagem [2, 14].

De uma forma geral, as juntas mais simples e fáceis de fabricar são as JSS, sendo também das mais estudadas em termos experimentais e teóricos. Não obstante da sua fácil execução, acarretam consigo o problema da flexão dos aderentes aquando do carregamento, dificultando a análise das tensões presentes na junta [7, 14]. Este problema da flexão dos aderentes origina o surgimento de tensões normais no sentido da espessura do adesivo. Após análise da Figura 6, pode-se verificar que os esforços presentes na JSS provocam picos de tensão nas extremidades da mesma, provocando uma diminuição da resistência da junta. De forma a colmatar este efeito, é comum usarem-se JSD, onde o efeito de flexão dos aderentes é consideravelmente inferior. Uma outra forma de contrariar os efeitos da flexão nas JSS, mencionados anteriormente, é através da utilização da junta de ressalto (*joggle lap joint*), que se ilustra na Figura 10, embora o fabrico dos substratos seja mais complexo.

As juntas de chanfro de degrau e JSD foram desenvolvidas para promover a diminuição do arrancamento [7, 14].

As juntas cobre-junta e cobre-junta dupla apresentam melhor resistência que as JSS, devido ao alinhamento dos substratos, e são bastantes usadas em reparações, graças à maior facilidade de colagem dos remendos.

As juntas tubulares são muito usadas para ligar tubos varões ou veios com as extremidades planas ou em chanfro. Estas juntas possuem uma boa resistência à compressão e à tração.

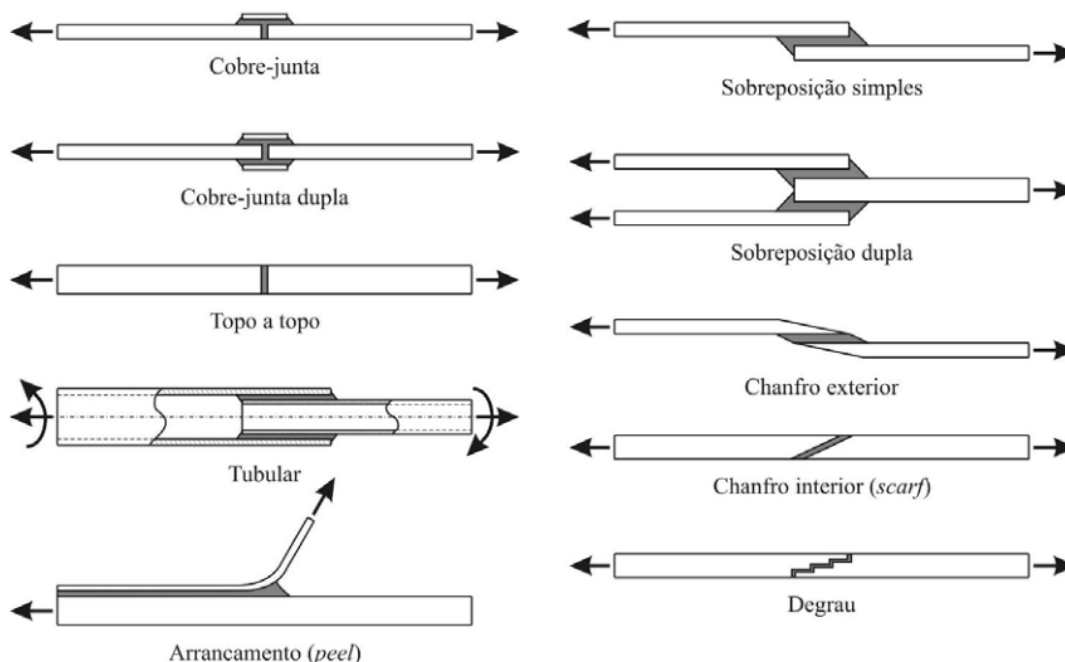


Figura 9 - Configuração de juntas mais comuns [14]

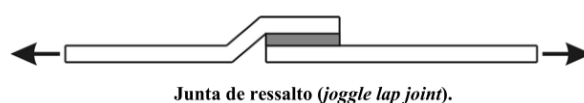


Figura 10 - Junta de Ressalto [14]

2.1.5 Adesivos estruturais

Comercialmente, existe uma vasta gama de adesivos, o que permite ao projetista adequá-los às suas necessidades específicas. No que toca à sua seleção, existem vários critérios para os classificar e diferenciar, todavia o critério desempenho é talvez o mais importante. Na Tabela 3, apresentam-se algumas formas de classificação dos adesivos segundo os seus objetivos [6, 7, 15].

Tabela 3 – Classificação dos adesivos

Origem	Sintéticos Semissintéticos Naturais
Função Desempenho	Estruturais Não estruturais
Custo	
Composição química	Termoendurecíveis Termoplásticos Elastoméricos Híbridos
Modo de aplicação	Reação química Perda de solvente Perda de água
Tipo de substrato	Adesivos para metais Adesivos para madeiras Adesivos para vinilos Outros
Forma física	Pasta ou líquido Pó Fita e filme

No que respeita aos adesivos estruturais, tema deste subcapítulo, estes são usados nas mais diversas aplicações onde é exigida uma ligação de elevada resistência coesiva. Uma união com este tipo de adesivo deve permitir obter resistências ao corte da ordem dos 5 a 10 MPa, à temperatura ambiente [7, 14]. Estes adesivos são caracterizados por poderem resistir a solicitações elevadas, sem que ocorra significativa deformação. Outra característica importante, é o facto de não serem particularmente afetados pelos ambientes mais comuns [7]. Na Tabela 4 esquematizam-se os principais tipos de adesivos estruturais [16].

Tabela 4 - Diferentes tipos de adesivos estruturais [16]

Fenólicos	Fenólicos-vinílicos Fenólicos-nitrilo Fenólicos-policloropreno
Acrílicos	Anaeróbicos Cianoacrilatos Reativos/ modificados
Poliuretano	
Poliimida	
Epóxidos	Epóxido-poliamida Epóxido-polisulfureto Epóxido-fenólicos Epóxido-poliuretano Epóxido-nitrilo

2.1.5.1 Adesivos fenólicos

Os adesivos fenólicos resultam da condensação de fenol e formaldeído, e caracterizam-se pelo baixo custo e uma boa resistência mecânica, ambiental e a temperaturas elevadas. Como desvantagens destacam-se: baixa resistência à corrosão por solventes, grande fragilidade e baixa resistência ao impacto, devido aos efeitos térmicos de contração sofridos no processo de cura. Para contrariar esse efeito, têm sido desenvolvidos ultimamente compostos que aliam estas resinas fenólicas com resinas vinílicas ou elastoméricos (nitrilo, cloropreno) [16].

2.1.5.1.1 Fenólicos-vinílicos

Esta combinação de resinas proporciona uma elevada resistência ao corte e ao arrancamento. A adição da resina vinílica através das suas propriedades plastificantes induz uma boa resistência à fadiga. Este composto pode ser usado até uma temperatura de 130°C.

2.1.5.1.2 Fenólicos-nitrilo

Os adesivos fenólicos em conjunto com borracha de nitrilo apresentam uma boa estabilidade térmica, podendo trabalhar em contínuo até temperaturas da ordem dos 160°C [16]. Em ligação com metais, esta formulação pode originar resistências ao corte da ordem dos 35 MPa, possuindo em paralelo excelentes propriedades aos esforços de

arrancamento e de fadiga [7]. Este composto é usado em diversas aplicações, em particular indústria do mobiliário, sapataria e eletrônica.

2.1.5.1.3 Fenólicos-policloropreno

Este composto é em tudo semelhante ao anterior, todavia neste caso, à resina fenólica é adicionada um elastómero de policloropreno. O que mais se destaca neste composto é o facto de poder trabalhar com temperaturas da ordem dos -50°C . Estes adesivos são muito condicionados por agentes químicos externos.

2.1.5.2 Adesivos Acrílicos

Neste grupo de adesivos incluem-se os anaeróbicos (diésteres poliacrílicos), os cianoacrilatos e os reativos. Os compostos anaeróbicos apresentam-se sob a forma de líquidos monocomponentes, cuja forma monomérica depende do contacto com o ar [16]. O processo de cura inicia-se através de uma reação de polimerização do tipo radical-livre, uma vez removido o oxigénio. Estes adesivos podem ser usados para ligar todos os metais mais correntes, vidro, cerâmicos e plásticos. São também conhecidos pela sua facilidade de utilização e rápido processo de cura, mesmo à temperatura ambiente. O seu uso é particularmente interessante em aplicações estruturais e de maquinaria. Um exemplo típico é a imobilização de parafusos em juntas roscadas. Em geral, podem usar-se em temperatura de funcionamento até 120°C .

Os cianoacrilatos são vendidos em formulações líquidas de baixa viscosidade. São bastantes conhecidos e o seu uso está bastante difundido, devido ao facto de terem um processo de cura muito rápido à temperatura ambiente. Comercialmente são apelidados de supercola. Apresentam uma boa resistência à tração, em contraponto com uma baixa resistência ao arrancamento, elevado custo e fragilidade.

Os acrílicos reativos obtêm-se através da adição de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Estes adesivos caracterizam-se por possuírem uma cura rápida, alta resistência e boa resistência ao arrancamento, impacto e corte. São adequados para situações que exijam uma elevada resistência à humidade, mas possuem o inconveniente de serem inflamáveis e de terem uma baixa resistência mecânica quando sujeitos a elevadas temperaturas.

2.1.5.3 Adesivos de poliuretano

Existem, no mercado, sob a forma sólida ou dissolvidos em solventes de uma ou duas partes. Podem curar à temperatura ambiente ou a temperaturas elevadas. Apresentam como principais vantagens alta resistência ao corte, arrancamento e abrasão, boa aderência a muitos substratos e a polímeros difíceis de colar e boa tenacidade nas ligações. Comparativamente com outros adesivos, têm uma melhorada resistência a temperaturas muito baixas, no entanto, não possuem uma elevada resistência a

temperaturas elevadas. São muito usados na indústria automóvel devido à boa adesão com painéis de *Sheet moulding compound* (SMC). A temperatura máxima de funcionamento ronda os 120°C.

2.1.5.4 Adesivos poliimida

Estas resinas foram desenvolvidas, fundamentalmente, para a indústria aeroespacial. No entanto, também, são usadas em aplicações de microeletrónica, vedação de tampas e ligação de cablagens. Têm como vantagens, o facto de poderem ser usadas em temperaturas da ordem dos 250 a 300°C em períodos longos e, até 500°C em períodos curtos. Ao nível das desvantagens apontam-se as seguintes:

- Custo elevado;
- Possuem uma baixa resistência ao choque;
- As juntas têm de ser realizadas sob vácuo para evitar a formação de ocos;
- Necessitam de elevadas temperaturas durante o processo de cura;
- Necessitam de solventes para permitir que o adesivo flua.

2.1.5.5 Adesivos epóxidos

Este grupo de adesivos é muito versátil, pode ser utilizado numa vasta gama de aplicações, o que se deve ao facto de se ligarem facilmente a uma variedade elevada de substratos, podendo também ser alteradas as suas propriedades com junção de outros componentes [7].

2.1.5.5.1 Epóxidos de poliamida

Estes compostos são de uso geral, são caracterizados por uma cura lenta à temperatura ambiente e podem ser ligados a um variado número de substratos, tais como plásticos, vidro e elastómeros. Em comparação com outros adesivos epóxidos não modificados possuem uma maior flexibilidade e resistência ao arrancamento. Têm também como vantagens a possibilidade de operar a baixas temperaturas (-70°C) e uma boa resistência à fadiga e ao impacto. Têm, porém, uma baixa resistência à água e ao álcool.

2.1.5.5.2 Epóxidos de polisulfureto

Sempre que haja necessidade de ligar materiais com coeficientes de dilatação diferentes, os epóxidos de polisulfureto são os recomendados. Têm como vantagens uma boa resistência química e ao impacto e, como consequência, são normalmente utilizados em aplicações que exijam resistência ao choque e às vibrações.

2.1.5.5.3 Epóxidos fenólicos

São obtidos a partir da mescla de compostos fenólicos com resinas epóxicas, de forma a melhorar a sua resistência ao serviço em temperaturas elevadas. Como vantagens salienta-se uma boa resistência à tração e ao corte. Em contraponto, e pela natureza dos seus constituintes, esta resina tem geralmente pouca resistência ao arrancamento e ao impacto, possuindo também limitada resistência ao choque térmico.

2.1.5.5.4 Epóxidos de poliuretano

Os adesivos de epóxido com poliuretano foram criados para terem um bom comportamento a solicitações do tipo arrancamento, semelhante à dos adesivos de epóxido de poliamida. São também caracterizados por uma boa resistência ao choque, a vibrações e à fadiga.

2.1.5.5.5 Epóxido-nitrilo

Resultam da mistura de resinas epóxicas com borracha de nitrilo. Devido à fragilidade das resinas epóxicas, torna-se por vezes necessário a adição de pequenas inclusões que melhorem as suas propriedades. Neste caso, a adição de borracha traduz-se num aumento da tenacidade e resistência ao impacto do composto final. Estas pequenas partículas de borracha atuam também como escudos contra a propagação de fissuras. Como utilização principal destaca-se a manutenção e construção de aviões.

2.2 Determinação das propriedades dos adesivos

A resistência coesiva de uma junta depende em parte das características do adesivo. Nesse sentido, é de extrema importância conhecer o seu comportamento quer quando em bruto, quer quando ligado com outros materiais. Para esse efeito, existem atualmente alguns ensaios mecânicos normalizados que estabelecem procedimentos e comportamentos a observar aquando da execução dos mesmos. Seguidamente, elaborou-se um resumo de alguns dos ensaios mais importantes para esse efeito.

2.2.1 Ensaios de adesivo maciço

2.2.1.1 *Elaboração de provetes maciços*

Na fabricação dos provetes maciços existem sempre alguns problemas associados à sua execução. No momento do seu fabrico podem ocorrer imperfeições provocadas quer por bolhas de ar, quer por alguns defeitos associados ao próprio processo de cura. Com o intuito de eliminar esses defeitos, existem alguns procedimentos e dispositivos que tentam eliminar esses problemas. Um desses dispositivos encontra-se ilustrado na

Figura 11. Trata-se de um sistema de moldação rotacional. Os moldes (componentes 1) são colocados na extremidade do dispositivo (componente 2) que usa a força centrífuga para eliminar eventuais bolhas de ar.

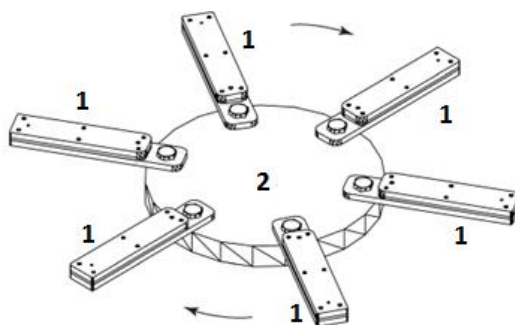


Figura 11 - Dispositivo de moldação rotacional, adaptado de [17]

Outra forma de obter provetes maciços consiste em utilizar uma prensa hidrostática com uma pressão da ordem dos 2 MPa, de acordo com a norma Francesa (NF), NF T 76-142. Desta forma, pode-se produzir placas de adesivo sem porosidade [17]. Nesta técnica, coloca-se um aro de silicone tendo no seu interior a forma do provete a executar [17]. O aro ajusta o adesivo permitindo que lhe seja aplicada uma pressão hidrostática. Devido à quase incompressibilidade do silicone, este é também usado como limitador de espessura do provete. Geralmente são usadas folhas de silicone com 2 mm de espessura [17]. Na Figura 12 representa-se uma perspetiva em vista explodida do referido dispositivo.

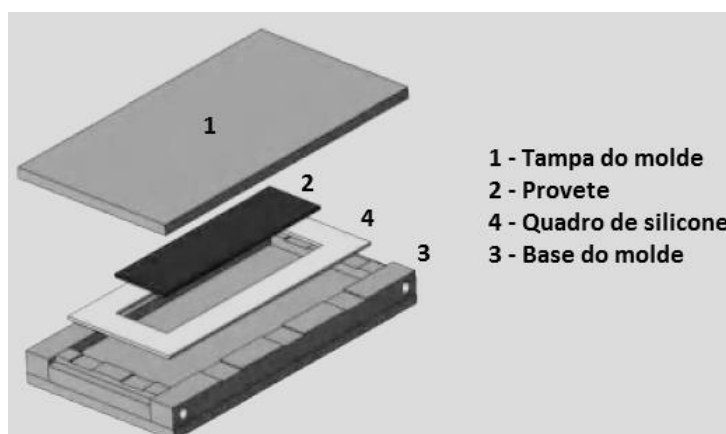


Figura 12 - Dispositivo de moldação por prensa hidrostática, adaptado de [17]

2.2.1.2 Ensaio de tração

Uma das formas mais usuais para a determinação das propriedades de um adesivo é o uso do ensaio de tração [7, 17]. Este ensaio para adesivos maciços encontra-se normalizado pela *International Organization for Standardization (ISO)*, norma ISO 527-

2, e pressupõe provetes com a configuração em forma de “osso de cão” [7]. Existem duas dimensões para os provetes, uma curta e uma mais longa, cuja escolha é realizada mediante a rigidez do adesivo. Se for utilizado um adesivo mais rígido as deformações são menores, logo o provete de maiores dimensões é a escolha mais adequada para este tipo de adesivo [7]. O ensaio em si é um ensaio normal de tração, em que ao provete é aplicado um esforço de tração no sentido longitudinal até à rotura do mesmo. Simultaneamente, são registadas as curvas $P-\delta$. Com estas é possível obter algumas propriedades do adesivo das quais se destaca o módulo de elasticidade do adesivo.

Na Figura 13 está representado um exemplo de um ensaio de tração a um provete maciço.



Figura 13 - Ensaio de tração [18]

Seguidamente, na Figura 14, esquematiza-se as dimensões gerais dos provetes para o ensaio de tração de acordo com a norma ISO 572-2.

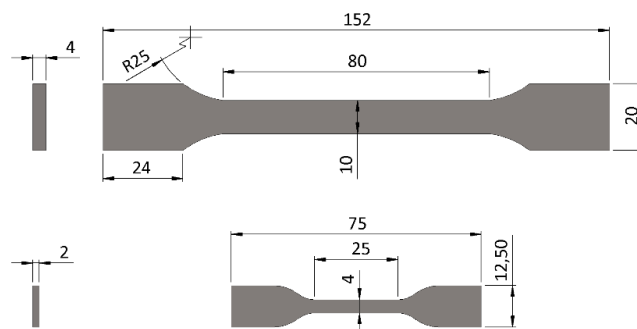


Figura 14 - Dimensões gerais dos provetes para ensaio de tração de acordo com a norma ISO 572-2 [19]

2.2.1.3 Ensaio de compressão

O ensaio de compressão, cujo dispositivo se demonstra na Figura 15, é usado entre outras funcionalidades para a obtenção da tensão de cedência compressiva e do módulo de elasticidade. Na Figura 16 apresenta-se a curva tensão extensão típica desta metodologia. Este ensaio é normalizado pela *American Society for Testing and Materials* (ASTM), norma ASTM D695.



Figura 15 - Dispositivo de ensaio de compressão segundo a norma ASTM D695 [20]

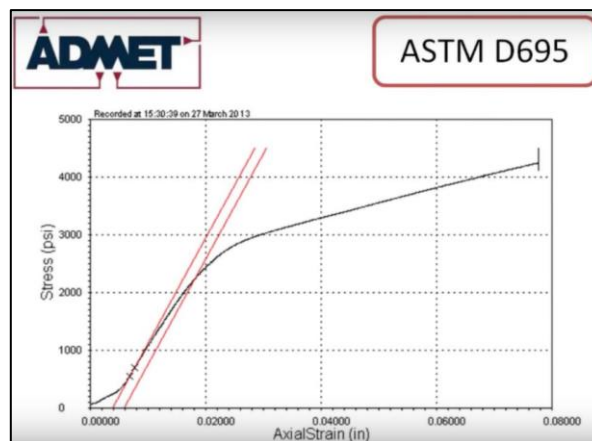


Figura 16 - Curva tensão-deformação do ensaio de compressão pela norma ASTM D695 [20]

Na Figura 17 e na Figura 18 ilustram-se as dimensões de alguns provetes usados na norma NFT51-10 (A) e na norma ASTM D695 (B).

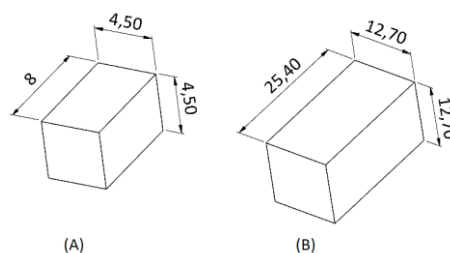


Figura 17 - Provetes para ensaio de compressão segundo as normas NFT51-10 (A) e ASTM D695 (B)

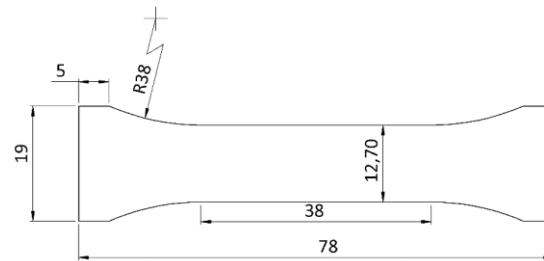


Figura 18 - Provete plano para ensaio de compressão norma ASTM D695 [7]

2.2.1.4 Ensaio Notched plate shear method (ARCAN)

O ensaio *Notched Plate Shear Method* (ARCAN) é usado para estimar as propriedades ao corte dos adesivos. Para tal, é usado um provete em forma de “borboleta”, como se mostra na Figura 19. Os dados obtidos experimentalmente reproduzem, com bastante fiabilidade, as características de todos os tipos de adesivos, mesmo os mais dúcteis.

Este provete é fixo em duas amarras (Figura 20) e colocado numa máquina universal, de onde é induzido um deslocamento axial que provoca um esforço de corte na secção entre os dois entalhes. A medição da deformação é normalmente efetuada com recurso a um sistema externo, por exemplo máquina fotográfica, evitando dessa forma esforços adicionais sob o provete [14].

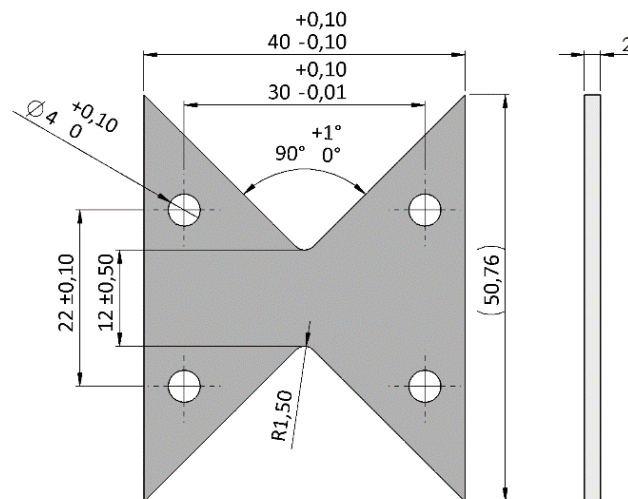


Figura 19 - Dimensões gerais do provete para o ensaio ARCAN [13]

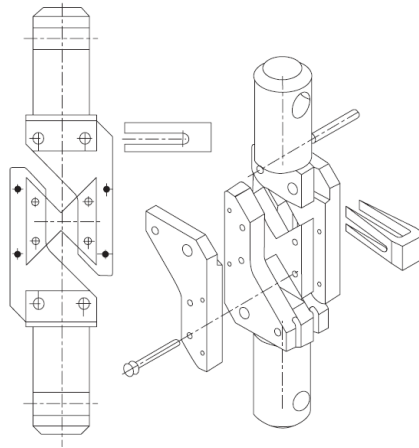
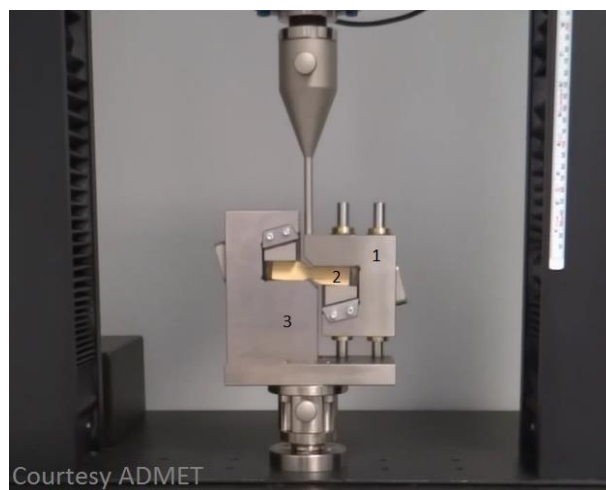


Figura 20 - Esquema das fixações com provete no ensaio de ARCAN, adaptado de [17]

2.2.1.5 Ensaio Iosipescu ou V-Notched beam shear method

O ensaio de Iosipescu (Figura 21) pode ser usado quer em provetes em bruto de adesivo, quer em juntas adesivas. Este ensaio foi inicialmente concebido com o intuito de estudar o comportamento ao corte dos metais. No entanto, na sequência de trabalhos desenvolvidos por Adams and Walrath [21], este foi adotado pela norma ASTM D5379 para o estudo de laminados e compósitos [7, 17].

O provete do ensaio é retangular, cujas dimensões são indicadas na Figura 22. Este ensaio tem algumas vantagens relativamente a outros métodos, já que o provete é facilmente executável e é relativamente fácil de obter as propriedades ao corte do adesivo.



1-Peça móvel

2-Provete

3-Base fixa

Figura 21 - Esquema do dispositivo de ensaio Iosipescu, adaptado de [22]

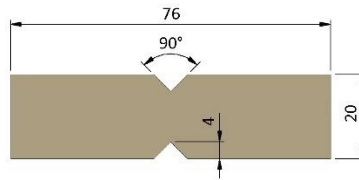


Figura 22 - Dimensões do provete ensaio Iosipescu [7]

2.2.2 Ensaios de adesivo em junta adesiva

A realização de ensaios em juntas adesivas é fundamental para determinação das suas características. Existem, desde há longos anos, inúmeros ensaios normalizados pelas normas ISO e ASTM para as situações mais diversas. Cabe ao projetista a definição do ensaio mais adequado para a obtenção das propriedades pretendidas. Nos tópicos seguintes apresentam-se os ensaios mais comumente utilizados.

2.2.2.1 Ensaio *Thick Adherend Shear Test*, (TAST)

Na determinação das propriedades ao corte, o ensaio *Thick Adherend Shear Test* (TAST) é um dos mais utilizados, devido à simplicidade de execução dos provetes e do próprio ensaio em si [7, 17]. Este teste encontra-se normalizado pela norma ASTM D3983 [23] e pela norma ISO 11003-2 [24] nos Estados Unidos da América (EUA) e na Europa, respetivamente [17]. A diferença entre os dois ensaios referidos reside no tamanho dos provetes, já que a norma Americana define o seu provete com sensivelmente o dobro do tamanho da norma ISO 11003-2 [24]. Os provetes utilizados por estas normas são de aço (ver geometria na Figura 23) para que, tendo em conta a elevada rigidez, se consiga obter um estado de tensão praticamente puro nos adesivos [7, 17]. Outro fator que contribui para a rigidez dos provetes é a sua considerável espessura e reduzido comprimento.

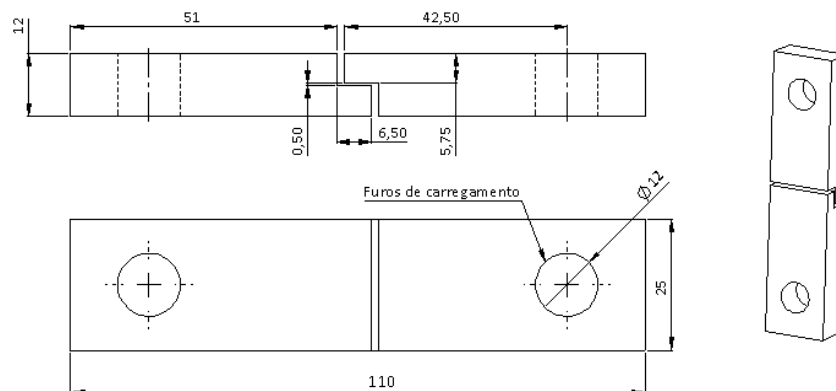


Figura 23 - Dimensões gerais do provete para ensaio de TAST segundo a norma ISO11003-2.2

2.2.2.2 Ensaio ao corte em juntas de sobreposição simples (JSS)

Na obtenção das propriedades dos adesivos ao corte, o ensaio de tração em JSS é talvez o mais utilizado. É fácil e barato de executar [7], pode ser realizado em máquinas de tração universal (como se exemplifica na Figura 24) e, para além disso, a maioria das ligações adesivas trabalham com sobreposição de aderentes [7]. Existem algumas normativas para este ensaio, todavia as mais utilizadas são as normas, ASTM D1002 e ISO 4587. Com o resultado deste ensaio é obtida a tensão de corte média no instante da rotura do provete.



Figura 24 - Ensaio à tração de uma JSS [25]

2.2.2.3 Ensaio de arrancamento

Os ensaios de arrancamento são, desde há longos anos, uns dos mais utilizados, pois os seus resultados permitem diferenciar os adesivos dúcteis dos frágeis [7]. Podem ser utilizados em várias combinações de carga tanto em modo I como em modo II [7, 17]. Existem diversas metodologias de ensaio e de seguida exemplificam-se alguns dos ensaios mais utilizados.

2.2.2.3.1 Ensaio de arrancamento em junta T

Este ensaio, normalizado pela norma ASTM D1876 (Figura 25), permite caracterizar a resistência ao arrancamento de substratos flexíveis. Como se pode verificar na mesma figura, a junta é colocada numa máquina de tração universal, que através da deslocação das amarras provoca o arrancamento dos substratos. Ao mesmo tempo, é registada a curva $P-\delta$ do respetivo ensaio.



Figura 25 - Ensaio de arrancamento pela norma ASTM D1876 [26]

2.2.2.3.2 Ensaio de arrancamento em ângulo

O ensaio de arrancamento, exibido na Figura 26, é normalizado pela ASTM D903. É usado, essencialmente, para retirar as características de adesivos não estruturais, o que pressupõe grande flexibilidade de um dos substratos, de forma a que este possa ser dobrado com um ângulo de 180°, a partir da sua posição inicial [7]. Na Figura 26 pode-se verificar que o substrato rígido se encontra imobilizado na máquina ao passo que o efeito de arrancamento é efetuado no substrato flexível representado a azul (Figura 26 e Figura 27). Este ensaio, juntamente com o ensaio de arrancamento a 90° proposto pela norma ASTM D6252 (Figura 27) são bastante utilizados em testes de arrancamento de etiquetas [27].

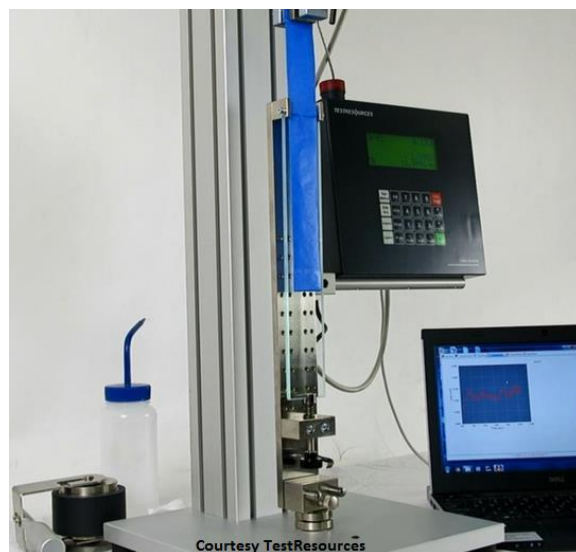


Figura 26 - Ensaio de arrancamento a 180° pela norma ASTM D903, adaptado de [28]



Figura 27 - Ensaio de arrancamento a 90° pela norma ASTM 6252, adaptado de [29]

Deste ensaio é retirada a curva $P-\delta$, como se pode observar na Figura 28.

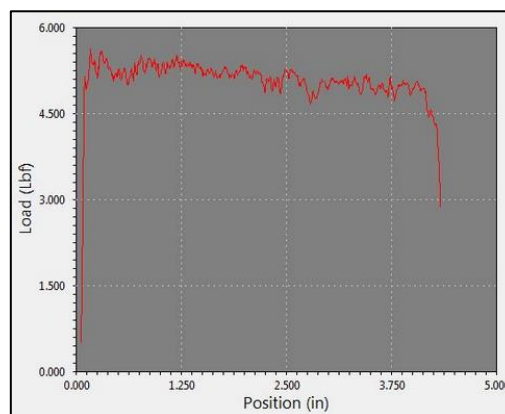


Figura 28 - Curva $P-\delta$ do ensaio de arrancamento a 90° ASTM 6252, adaptado de [30]

2.2.2.3.3 Ensaio Climbing Drum

O ensaio *Climbing Drum*, representado na Figura 29, é utilizado para a caracterização de juntas adesivas entre dois substratos com propriedades físicas distintas [31], como por exemplo as estruturas do tipo *Sandwich*. Este método, no caso das estruturas *sandwich*, tem como objetivo a determinação da resistência ao arrancamento entre as peles e o núcleo. Este ensaio encontra-se normalizado pela norma ASTM D1781. Como variáveis deste ensaio obtêm-se, entre outras, o binário médio de arrancamento e a carga média de arrancamento [31].



Figura 29-Ensaio *Climbing Drum* ASTM D1781, adaptado de [31]

2.2.2.3.4 Ensaio de rolete flutuante ou *floating roller test*

Esta técnica, normalizada pela norma ASMT D3167 [7, 17], cujo exemplo se encontra ilustrado na Figura 30, é empregue na determinação da resistência ao arrancamento numa ligação onde se usem como aderentes um flexível e um rígido. A sua configuração utiliza um rolete fixo e um ajustável, permitindo variar o ângulo de arrancamento. Contudo, durante o ensaio o ângulo é mantido constante. Como resultado deste ensaio obtém-se a carga média registada no momento da execução do ensaio[7].

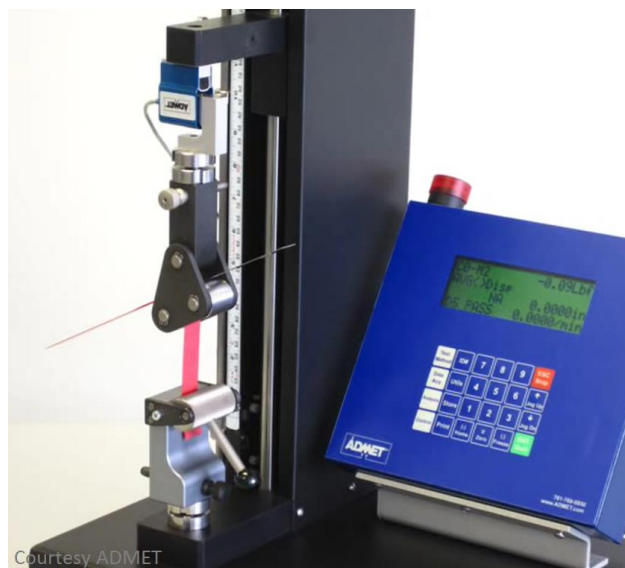


Figura 30 - Ensaio de rolete flutuante, adaptado de [32]

Na Figura 31 exibe-se um gráfico típico $P-\delta$ obtido por este ensaio.

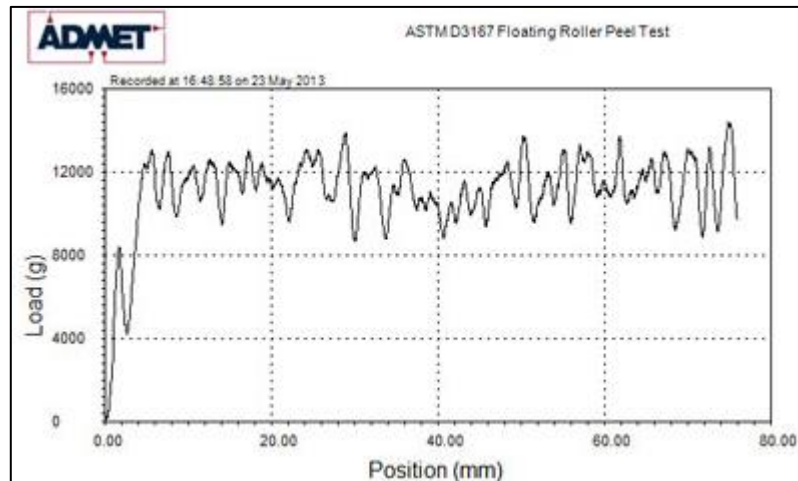


Figura 31 - Curva Força/deslocamento do ensaio de rolete flutuante, adaptado de [32]

2.2.2.4 Ensaio à fadiga

Uma das características mais interessantes das ligações adesivas reside na sua capacidade de resistir a cargas cíclicas de fadiga. Nesta perspetiva, é de extrema relevância para os projetistas conhecer o seu comportamento ao longo do tempo de vida da ligação. Uma das formas para prever esse comportamento é através da obtenção dos diagramas S-N, ilustrados na Figura 32. A norma ASTM D3166-99 estabelece os procedimentos para a análise de JSS. Estes ensaios são realizados em máquinas servo-hidráulicas (Figura 33) capazes de induzir os mais diversos ciclos de carregamento com diferentes acessórios. Para o estudo devem ser considerados cinco ou mais níveis de tensão de forma a que a rotura ocorra com regular espaçamento, esta deve ocorrer de 2000 (valor mínimo) a pelo menos 10 milhões de ciclos. A cada nível considerado são testados pelos menos 5 provetes [7, 17].

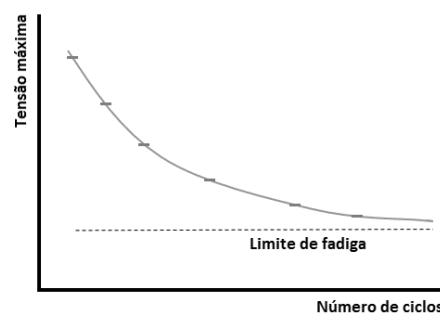


Figura 32 - Diagrama S-N, adaptado de [7]



Figura 33 - Máquina Servo-hidráulica de ensaio de fadiga [33]

2.2.2.5 Ensaio de impacto

O estudo dos esforços causados por impactos é muito importante em ligações adesivas, pois estas são bastantes sensíveis às variações de velocidade de deformação [7]. A normativa ASTM D950-78 define regras e procedimentos para a realização destes ensaios. Um destes foi desenvolvido por Harris and Adams [17, 34], e trata-se de um instrumento de impacto por pêndulo para JSS, apresentado na Figura 34. De acordo com a mesma figura, a barra de impacto (1) é conectada a uma máquina que induz a carga ao dispositivo, por sua vez o fixador (4) desliza numa chumaceira de baixo atrito (3) e transmite a carga ao provete (5). No extremo oposto o provete (5) é fixo através do fixador (6), sendo a carga registada no transdutor de força (7). Uma das técnicas de realização deste ensaio consiste em colocar um acelerómetro ou laser na extremidade e registar a força e movimento, permitindo dessa forma obter o comportamento [17].

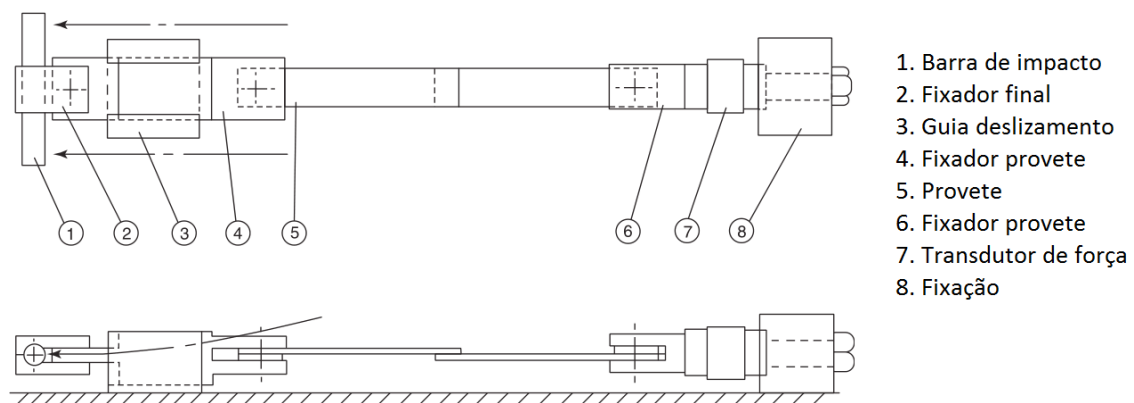


Figura 34 - Esquema de fixação do ensaio de impacto, adaptado de [17]

2.2.2.6 Ensaio de durabilidade

A maioria das ligações adesivas conhecidas encontram-se sujeitas a condições ambientais adversas, tais como temperatura, humidade, contaminantes e exposição solar; e a sua resistência depende fortemente dessas condições. É fundamental conseguir-se prever o seu comportamento no decorrer do projeto da ligação, de forma a garantir que a ligação é capaz de suportar as cargas a que se destina dentro do tempo de vida estipulado. Existem alguns ensaios que permitem estimar essas condições em laboratório. O ensaio *wedge test* (norma ASTM D3762), que está esquematizado na Figura 35, é um desses ensaios. A sua metodologia consiste em introduzir uma cunha que é forçada a entrar na camada adesiva, criando assim uma força de arrancamento. A medida da rigidez do adesivo está relacionada com a força que é necessária para separar os substratos [7].

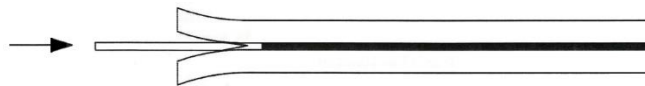


Figura 35 - Esquema do ensaio *wedge test*, pela norma ASTM D3762, adaptado de [7]

Outro destes ensaios é a metodologia de efeitos combinados (norma ASTM 2919), representado na Figura 36. Neste método o provete, com uma JSS, é submetido a uma carga de tração provocada por molas, depois é colocado nas condições ambientais em estudo e, seguidamente, são registadas as observações periódicas dos provetes até que estes atinjam a rotura. Este ensaio tem como resultado o tempo total até à rotura [7].

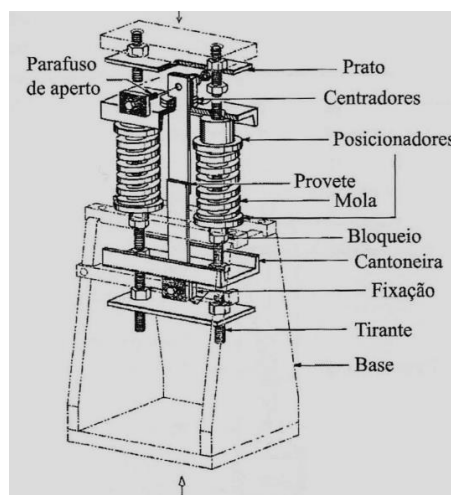


Figura 36 - Esquema de dispositivos para o ensaio de durabilidade em JSS, pela norma ASTM D2919, adaptado de [7]

Quando se pretende estudar a durabilidade de juntas com substratos flexíveis, a norma ASTM 2918 estabelece um método para o efeito. O mecanismo de ensaio, pode ser efetuado tanto em câmara com atmosfera controlada (como se mostra na Figura 37),

como por imersão em banhos com temperatura controlada seguindo um esquema, como mostra a Figura 38, sendo a sua metodologia regulada pela norma ASTM D1828. Após a colocação em serviço do ensaio, ou seja, nas condições de carregamento às condições ambientais desejadas, é efetuado o registo do comprimento da junta T ao longo do tempo.



Figura 37 - Ensaio de tração em câmara ambiental [35]

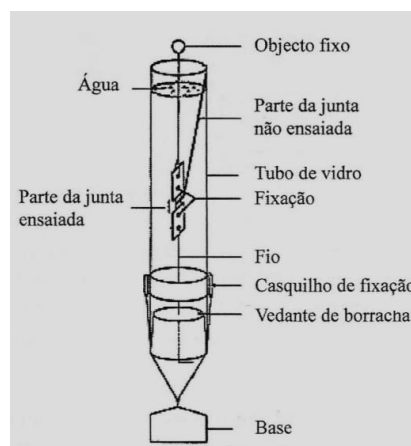


Figura 38 - Esquema de dispositivos para o ensaio de durabilidade em juntas T, adaptado de [7]

2.2.2.7 Ensaio de fluência

Durante o período de aplicação de carga, e se este for longo, pode ocorrer uma variação dimensional que resulta da fluência do adesivo. Para o estudo deste fenómeno são

usados ensaios de fluência. Nestes são utilizados normalmente provetes de JSS com dimensões previstas na norma ASTM D1002 [7]. Estes provetes são carregados com níveis de tensões conhecidos e a sua deformação é registada em função do tempo, até que haja rotura completa dos mesmos. O dispositivo de ensaio usa um sistema de molas (Figura 39) para garantir uma tensão constante na junta [7].

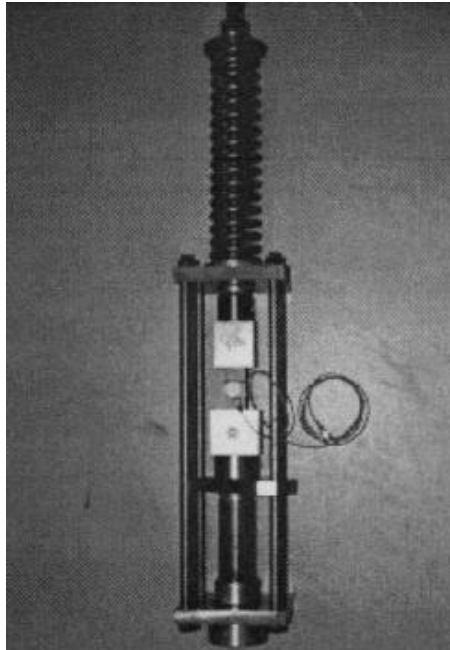


Figura 39 - Dispositivo de fixação para o ensaio de fluência, adaptado de [7]

2.3 Ensaios de caracterização à fratura

Como referido anteriormente, o estudo das propriedades mecânicas das juntas adesivas é fundamental para se conseguir prever o comportamento deste tipo de ligação quando colocado em serviço. É também sabido que, numa junta adesiva, podem ocorrer defeitos provenientes do próprio fabrico. Nesse sentido, a mecânica da fratura oferece vantagens relativamente a outros métodos, pois tem em conta o facto de poderem existir essas imperfeições [16, 36]. De facto o seu objetivo é tentar prever se essas imperfeições provocarão ou não a rotura da ligação [16]. Como se pode constatar na Figura 40, existem três modos fundamentais de propagação da fenda, Modo I, Modo II e Modo III. No Modo I, o adesivo está sujeito a esforços de tração, ao passo que nos Modos II e III, a junta está submetida a esforços de corte [7].

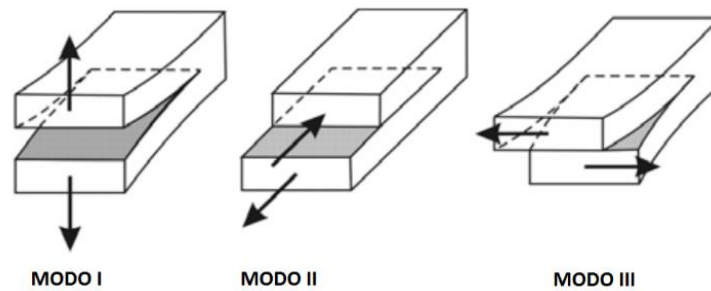


Figura 40 - Modos de propagação de rotura [37]

Existem alguns critérios para o cálculo da tenacidade à fratura. Uns utilizam o critério do fator de intensidade de tensão (K), outros utilizam o critério da taxa de libertação de energia (G). Porém, estudos realizados por Kinloch [38] e da Silva et al. [7] sugerem duas vantagens no uso de G em juntas adesivas: em primeiro lugar o fator K não é facilmente calculável se a fenda se aproximar da interface; em segundo lugar o valor de G representa um importante significado físico [7]. Quando se utilizam provetes de adesivo maciço, a fenda tem tendência a propagar em Modo I, independente da sua orientação inicial. Não obstante, quando se estuda os adesivos em junta verifica-se que os aderentes restringem o crescimento da fenda, originando que a sua propagação se efetue em modo misto (I+II). Nestas condições, a mixicidade pode ser tratada por critérios energéticos de modo misto com o expresso na equação (1) [7, 16]:

$$\left(\frac{G_I}{G_{Ic}}\right)^A + \left(\frac{G_{II}}{G_{IIc}}\right)^B = 1, \quad (1)$$

onde $A=B=1$ para um critério linear $A=B=2$ para um critério quadrático.

2.3.1 Modo I

Os ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) (Figura 41) e *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) (Figura 42) são dos mais utilizados para a determinação de G_{Ic} . Seguidamente, apresentam-se algumas das características mais importantes destes ensaios.

2.3.1.1 Ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB)

Como se pode observar na Figura 41, o ensaio DCB utiliza dois substratos, tendo na extremidade uma zona sem adesivo, correspondente à pré-fenda. Salientam-se duas normativas que regulam este ensaio: a ASTM D3433 e a ISO 25217. Ao contrário da norma ASTM D3433, a norma ISO 25217 não define dimensões de comprimento e largura para os provetes, mas sim orientações relativas à espessura do adesivo [39].

Nestes ensaios a aplicação da carga pode ser efetuada de três formas: furos nos substratos (Figura 41), em blocos furados aplicados na parte superior dos substratos ou

através da colocação de dobradiças nos aderentes. A velocidade de aplicação da carga deve estar compreendida entre os 0,5 e 3 mm/min, sendo este valor dependente da geometria e materiais empregues. Durante o ensaio vão sendo registados os valores de força (P) e deslocamento (δ) para os respetivos comprimentos de fenda (a) [7].



Figura 41 - Esquema de um provete do ensaio DCB pela norma ASTM D3433, adaptado de [36]

2.3.1.2 Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam (TDCB)

O ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) esquematizado na Figura 42 e na Figura 43 é muito similar ao ensaio DCB, contudo difere na geometria dos provetes, já que estes são dotados de uma forma especial, não retangular, de forma a permitir que a flexibilidade (C) permaneça constante durante o ensaio, de acordo com a equação (2) [39]:

$$\frac{dC}{da} = Cte \quad (2)$$

Deste modo, é possível obter a G_{Ic} independentemente do valor de a [7]. De acordo com a norma ASTM D3433, esta taxa pode ser calculada como demonstrado na equação (3):

$$G_{Ic} = \frac{4P_{\max}^2 m}{EB^2}, \quad (3)$$

sendo o declive m (representado na Figura 42) uma constante que define o valor de a e h como demonstrado na equação (4):

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

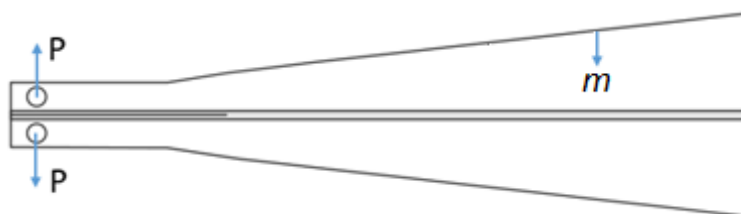


Figura 42 - Esquema de um provete do ensaio TDCB, pela norma ISO 25217, adaptado de [36]

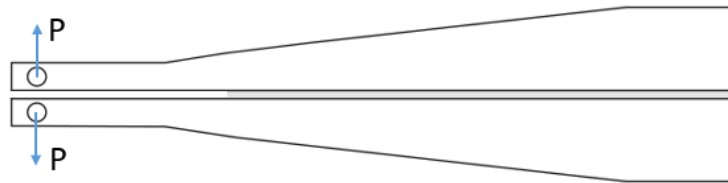


Figura 43 - Esquema de um provete do ensaio TDCB, pela norma ASTM D3433, adaptado de [36]

2.3.2 Modo II

Não existem, até à presente data, normativas que regulamentem os ensaios à fratura em Modo II para juntas adesivas. No entanto, têm sido adaptadas das normativas *Japanese Industrial Standards (JIS)* e *Association of European Aircraft and Component Manufacturers (AECMA)* com sucesso para o ensaio ENF as normas JIS 7086 e AECMA prEN 6034 relativas a materiais compósitos [39]. Na secção que se segue descreve-se, de forma mais detalhada, os ensaios que mais se destacam no cálculo de G_{IIc} , nomeadamente, ENF, 4ENF, *End Loaded Split (ELS)*.

2.3.2.1 Ensaio End Notched Flexure (ENF)

O ensaio ENF (Figura 44) consiste numa viga simplesmente apoiada nas extremidades, com aplicação da carga colocada a meio vão, de intensidade variável e com velocidade constante durante todo o ensaio. Tem numa das extremidades uma pré-fenda de valor a_0 . Este ensaio é provavelmente o mais utilizado, graças à sua simplicidade para a caracterização de juntas adesivas em Modo II [7, 17]. Apesar da simplicidade do ensaio, este apresenta algumas desvantagens, tais como [7, 17]:

- Propagação instável da fenda;
- Difícil medição da fenda no decorrer do ensaio devido à não existência de abertura dos aderentes durante o ensaio;
- Sempre que a propagação se der perto dos substratos podem ocorrer erros não desprezáveis na medição de G_{IIc} .

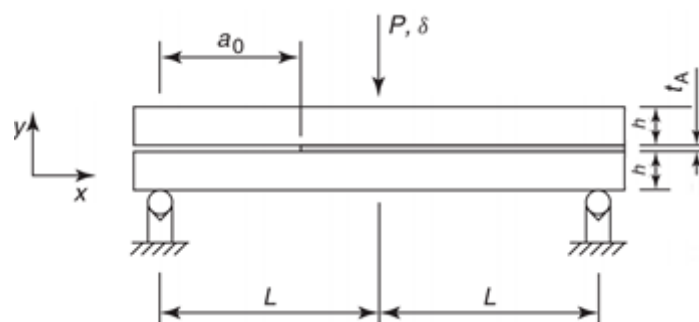


Figura 44 - Esquema do ensaio ENF, adaptado de [17]

2.3.2.2 Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)

O ensaio 4ENF (Figura 45) foi proposto inicialmente por Martin e Davidson [40, 41], com o objetivo de obter uma propagação da fenda mais estável, comparativamente ao ensaio ENF. Ao nível de método de ensaio, é muito semelhante ao ENF, diferindo apenas na aplicação da carga. Neste caso, a carga é aplicada em dois pontos distanciados a uma distância L , enquanto o provete é simplesmente apoiado em dois pontos de apoio a uma distância $2L$, como se pode observar na Figura 45. Como neste ensaio (4ENF) a barra de solicitação pode rodar livremente, a aplicação da carga é efetuada uniformemente entre os dois cilindros de carga. Ora como a propagação da fenda se dá no meio destes, esta vai estar sempre sob uma linha carga constante, originando que a fenda se propague de uma forma estável, esta é a principal vantagem deste ensaio. Não obstante da vantagem mencionada, esta metodologia acarreta as seguintes desvantagens:

- Implica um dispositivo de ensaio mais elaborado [17];
- Tem problemas relacionados com a influência do atrito na região da pré-fenda [42];
- Ainda não se encontra normalizado.

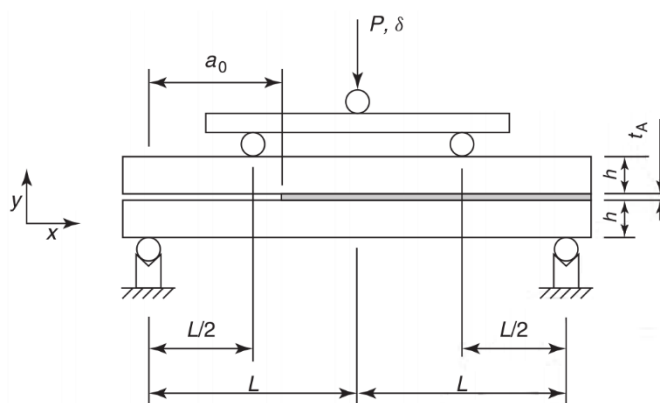


Figura 45 - Esquema do ensaio 4ENF, adaptado de [17]

2.3.2.3 Ensaio End-loaded split (ELS)

O ensaio ELS (Figura 46) é caracterizado por uma viga em consola fixa na extremidade por dois blocos de aperto, guiados por rolamentos, anulando eventuais esforços horizontais. A carga é aplicada numa das extremidades, como se verifica na Figura 46. Este ensaio surgiu da necessidade de se obter um ensaio onde a propagação da fenda fosse mais estável que no ensaio ENF. No entanto, possui a desvantagem de surgirem complicações na aplicação dos métodos de redução para o cálculo de G_{IIc} , em virtude dos grandes deslocamentos e condições de aperto [7]. Outro aspeto importante é o facto de se ter de garantir que a rigidez dos substratos é superior à do adesivo, de modo a que a propagação de fenda se registre para pequenos deslocamentos [7].

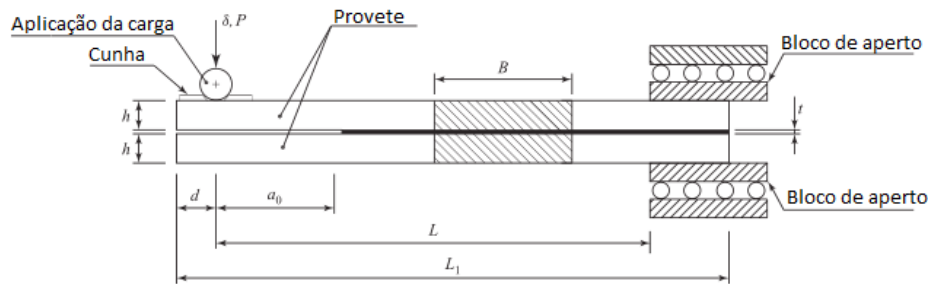


Figura 46 - Esquema do ensaio ELS, adaptado de [17]

2.3.3 Modo misto I + II

Uma junta adesiva a trabalhar em condições reais está geralmente submetida a esforços combinados, tração e corte. Nesse sentido, é imperativo estudar e prever esses efeitos. De seguida, resume-se alguns dos ensaios mais utilizados para a caracterização das juntas adesivas quando sujeitas aos esforços referidos.

2.3.3.1 Ensaio *Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)*

Este ensaio (Figura 47) é muito similar ao anteriormente estudado (DCB), porém este possui um substrato com maior espessura. Esta diferença de espessuras origina esforços de tração e esforços de corte na extremidade da fenda. Uma das desvantagens deste ensaio reside no facto de que, para variar o rácio G_I/G_{II} , é necessário alterar a geometria dos provetes [7, 17].

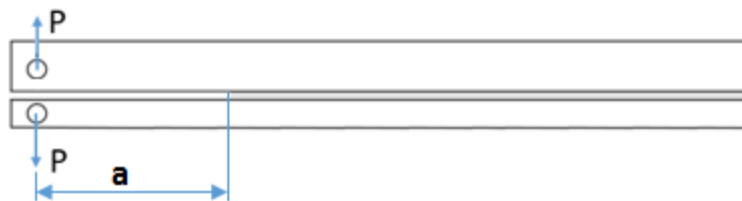


Figura 47 - Esquema do ensaio ADCB, adaptado de [7, 17]

2.3.3.2 Ensaio *Mixed-Mode Flexure (MMF)*

O ensaio *Mixed-Mode Flexure (MMF)*, esquematizado na Figura 48 e regulado pela normativa ASTM D2004, é muito similar ao ensaio ENF. Todavia, numa das extremidades o substrato inferior não se encontra apoiado, devido ao seu comprimento ser inferior relativamente ao substrato superior. A metodologia deste ensaio provoca o surgimento de esforços de corte e de tração. Como desvantagem partilha a descrita no ensaio *Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB)*, ou seja, a geometria dos provetes tem que ser revista sempre que seja necessário, alterar o rácio G_I/G_{II} .

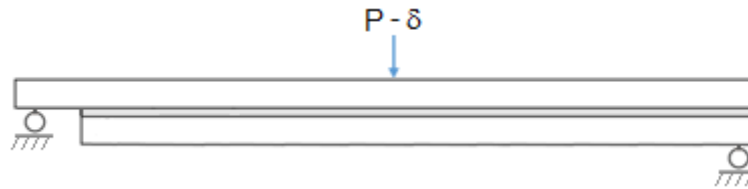


Figura 48 - Esquema do ensaio MMF, adaptado de [7, 17]

2.3.3.3 Ensaio Mixed-Mode Bending (MMB)

O ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB) resulta da combinação do ensaio DCB com o ensaio ENF. Como é possível verificar na Figura 49, este ensaio é similar ao ensaio ENF, tendo, no entanto, um braço alavanca que provoca esforços de abertura e de corte na junta coesiva. Esta técnica encontra-se normalizada para a caracterização da fratura interlaminar de compósitos em modo misto, através da normativa ASTM D6671. A distância C representada na Figura 49 serve para definir o rácio relativo entre a sollicitação de corte e de tração [7, 17]. Uma das vantagens deste ensaio consiste no facto de se poder alterar o rácio de forças, atrás referidas, sem ter de efetuar provetes com geometrias distintas [7, 17]. Consta-se que a propagação da fenda, apesar de instável na fase inicial, se mantém estável durante o decorrer do ensaio [7, 17].

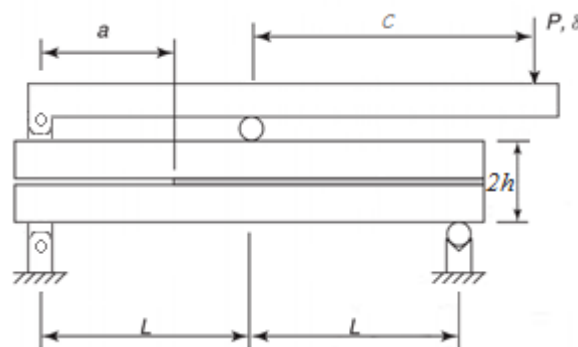


Figura 49 - Esquema do ensaio MMB, adaptado de [7, 17]

2.4 Métodos de determinação de G_{IIC}

No presente subcapítulo pretende-se exibir alguns dos métodos mais usados tendo em vista a determinação de G_{IIC} nos ensaios ENF e 4ENF.

2.4.1 Ensaio End-Notched Flexure (ENF)

Existem alguns tipos de metodologias com o intuito de determinar G_{IIC} no ensaio ENF (Figura 44):

- Metodologias baseadas na medição de α ;

- Metodologias baseadas no comprimento de fenda equivalente a_{eq} ;
- Método do integral-J.

2.4.1.1 Metodologias analíticas de cálculo de G_{IIC} baseadas na medição de a

Estes métodos necessitam da medição da a durante a sua propagação e, baseiam-se na teoria das vigas. Para o cálculo, assume-se que os dois braços do provete na zona da fenda têm o comportamento de duas vigas independentes, suportando cada uma delas metade da carga aplicada [7]. Estes métodos quando aplicados em adesivos dúcteis apresentam alguns problemas, devido a estes possuírem uma Zona de Processo de Fratura (ZPF) de dimensões consideráveis na frente da fenda. Esta zona pode conter plasticidade e pontos de iniciação de micro-fendas. Estes fatores dificultam a correta medição da extremidade da fenda, originando significativos erros no cálculo dos valores de tenacidade à fratura [43-45].

2.4.1.1.1 Método Compliance Calibration Method (CCM)

Nesta metodologia, o valor de G_{IIC} é obtido através da equação (5) de Irwin-Kies [45]:

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2B} \times \frac{dC}{da}, \quad (5)$$

onde a flexibilidade é dada por:

$$C = \frac{\delta}{P}, \quad (6)$$

e B é a largura do provete (6). Como podem surgir problemas na medição de a , dependendo da junta e adesivo, podem ser introduzidos erros de cálculo. A flexibilidade pode ser obtida em função de a , da seguinte forma (7):

$$C = f(a). \quad (7)$$

Com vista ao ajustamento da curva anterior é utilizado o polinómio (8) [44]:

$$C = C_0 + C_1a + C_2a^2 + C_3a^3, \quad (8)$$

o que conduz à expressão final de cálculo de G_{IIC} , por este método:

$$G_{IIC} = \frac{P^2}{2B} \times (C_1 + 2C_2a + 3C_3a^2). \quad (9)$$

2.4.1.1.2 Método Direct Beam Theory (DBT)

Os resultados obtidos por este método resultam da aplicação direta da teoria das vigas. A expressão final de cálculo de G_{IIC} é dada pela equação (10) [44]:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 \delta a^2}{2B(2L^3 + 3a^3)} \quad (10)$$

onde L é metade do comprimento do provete, como se pode verificar na Figura 44.

2.4.1.1.3 Método Corrected Beam Theory (CBT)

Neste método, a expressão de cálculo de G_{IIc} é dada pela equação (11) [45]:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2(a + 0,42\Delta_I)^2}{16B^2h^3E_1}, \quad (11)$$

onde Δ_I é o fator de correção do comprimento de fenda

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E_1}{11G_{13}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (12)$$

onde E_1 é o módulo de elasticidade longitudinal dos aderentes, h é igual à espessura do substrato (observar Figura 44) (12). Por último, Γ é dado pela expressão que se segue, onde E_3 e G_{13} são os módulos de elasticidade longitudinal na direção fora do plano e de corte, respetivamente [45]:

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

2.4.1.2 Metodologias baseadas no comprimento de fenda equivalente (a_{eq})

Como foi referido na caracterização geral do ensaio ENF, os métodos CCM, CBT e DBT necessitam de uma correta medição da fenda no decorrer do ensaio. Ora, como é sabido, este valor nem sempre é fácil de ser obtido devido aos fenómenos, explicados anteriormente, que ocorrem na ZPF [45]. Com o intuito de solucionar os problemas atrás relatados, foi proposto em 2008 um novo método, *Compliance-Based Beam Method* (CBBM) por de Moura et al. [45].

Este método baseia-se no conceito de um comprimento de fenda equivalente a_{eq} (Figura 50). O valor de a_{eq} é calculado em função da flexibilidade total do provete, ou seja, o seu valor é diretamente obtido a partir da curva $P-\delta$. Então a_{eq} toma o valor $a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF}$, onde Δ é o fator de correção da fenda inicial a_0 , obtido a partir da regressão linear ao valor da flexibilidade ($C^{1/3} = f(a_0)$).

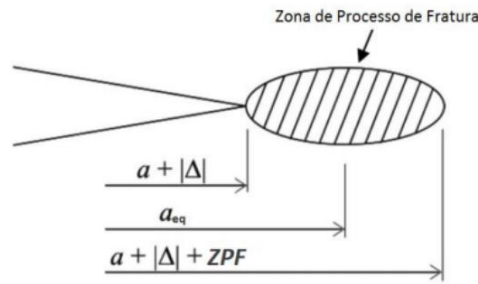


Figura 50 - Zona de propagação de fratura (ZPF) do método CBBM, adaptado de [46]

Tendo em conta a teoria de vigas e os efeitos da flexibilidade, pode escrever-se:

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E_1 B h^3} + \frac{3L}{10G_{13} B h} \quad (14)$$

O módulo à flexão dos provetes (E_f) (expressão (15)) desempenha um papel fundamental nos valores das curvas P - δ , e pode ser calculado a partir da expressão (14), da flexibilidade inicial C_0 e do comprimento de fenda inicial a_0 :

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8Bh^3 C_{0corr}}, \quad (15)$$

onde o valor de C_{0corr} é obtido através de:

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G_{13} B h}, \quad (16)$$

Os efeitos da ZPF podem ser considerados tendo em conta a flexibilidade e o comprimento de fenda equivalente. Se for substituído E_f (equação (15)) e a_e no lugar de E_1 e a respetivamente obtém-se a seguinte expressão:

$$a_{eq} = a + \Delta a_{ZPF} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{\frac{1}{3}}, \quad (17)$$

Por fim, a G_{IIc} pode ser obtida a partir da seguinte expressão (18):

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_{eq}^2}{16B^2 h^3 E_f}. \quad (18)$$

2.4.1.3 Metodologia baseada no integral-J

Em virtude da dificuldade na caracterização da fenda na sua extremidade, foi deduzido por Rice [47] o integral-J. Este integral (expressão (19)), é um integral de contorno deduzido para um comportamento elástico não linear do material [7]. Com esta expressão, evita-se as dificuldades que caracterizam o estado de tensão na extremidade

da fenda. O seu valor é independente do contorno escolhido na extremidade da fenda, desde que esta esteja contida dentro do referido contorno [7]:

$$J = \int_{\Gamma} \left(W_e dy - T_i \frac{\partial u_i}{\partial x} dS \right), \quad (19)$$

na expressão (19) Γ representa a curva a rodear a ponta da fenda, S indica o comprimento do arco, w_e é a densidade de energia, u_i o vetor deslocamento, T_i é o vetor de tração e por último y e x o sistema de coordenadas.

Têm sido muitos os investigadores que se debruçaram no estudo deste método para o cálculo de G_{IIc} [48-50]. Esta técnica consiste em medições simultâneas do integral- J e δ_s . Para o cálculo de G_{IIc} pelo ensaio ENF, foi formulada a seguinte expressão por Leffler et al. [49]:

$$G_{II} = \frac{9}{16} \times \frac{(P_u a)^2}{E_1 t_p^3} + \frac{3}{8} \times \frac{P_u \delta_s}{t_p}, \quad (20)$$

onde:

- P_u define carga por unidade de largura;
- a define o comprimento de fenda;
- t_p define a espessura dos aderentes;
- E_1 define o módulo de elasticidade dos aderentes;
- δ_s define o deslocamento entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda.

A precisão da expressão anterior requer um comportamento elástico dos aderentes, que deve ser aferido após a realização de cada ensaio [51]. Segundo este método, ao longo de um qualquer contorno que contenha a ZPF pode escrever-se:

$$G_{II} = \int_0^{\delta_s^f} t_s(\delta_s) d\delta_s, \quad (21)$$

onde δ_s e δ_s^f correspondem ao deslocamento atual em corte na ponta de fenda e ao deslocamento de rotura na ponta de fenda respetivamente e t_s define a tensão de corte máxima. Diferenciado a expressão (21) obtem-se:

$$t_s(\delta_s) = \frac{\partial G_{II}}{\partial \delta_s}. \quad (22)$$

Por fim, se se atender à expressão (22), verifica-se que é possível obter uma lei coesiva ao corte no adesivo, através da diferenciação do valor de G_{IIc} em função do deslocamento δ_s medido no decorrer do ensaio.

2.4.2 Ensaio 4Point End-Notched Flexure (4ENF)

O ensaio 4ENF, representado na Figura 45, foi apresentado inicialmente por Martin e Davidson [40, 41] com vista à obtenção de um ensaio onde a propagação a fenda fosse mais estável. Para este ensaio, existem fundamentalmente dois tipos de métodos para a determinação de G_{IIc} , uns que dependem da medição do comprimento de fenda aquando do ensaio, outros que não necessitam desta medição. Contrariamente ao ensaio ENF, no ensaio 4ENF ainda não existe literatura para o uso do método do Integral- J [17].

2.4.2.1 Métodos baseados na medição de a

De acordo com estudos realizados [42, 52], a determinação de G_{IIc} com recurso ao ensaio 4ENF pode ser realizada através do método CCM, onde o valor de G_{IIc} é obtido pela equação (23):

$$G_{II} = \frac{P^2}{2B} \times \frac{dC}{da} \quad (23)$$

Para o ensaio 4ENF, e ainda de acordo com [42, 52], a flexibilidade (C) pode escrever-se da seguinte forma:

$$C_{(4ENF)} = C_0 + C_1 a \quad (24)$$

Finalmente, o valor de G_{IIc} , pode ser obtido através da seguinte equação:

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2B} \times C_1 \quad (25)$$

2.4.2.2 Métodos que não necessitam da medição de a

Conforme o estudo Wang et al. [52], através do método CBT o valor de G_{IIc} pode ser calculado com recurso à seguinte expressão:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 S^2}{16E_1 B^2 h^3} \left(1 - \frac{8\mu h}{3S} + \frac{16\mu^2 h^2}{9S^2} \right), \quad (26)$$

onde E_1 é o módulo de elasticidade longitudinal e S é igual ao L representado na Figura 45 e μ é o coeficiente de atrito.

Schuecker and Davidson [42], num estudo realizado, concluíram que a variação dos valores de G_{IIc} obtidos no estudo da delaminação de compósitos nos ensaios ENF e 4ENF tem como uma das causas plausíveis o efeito do maior atrito entre os substratos na zona da pré-fenda no ensaio 4ENF. Por outro lado, este valor tende a aumentar sempre que o rácio entre o vão superior (L_i) e o vão inferior ($2L$) aumenta (ver Figura 45). Não obstante, Arrese and Mujika [53], consideram que os efeitos do atrito não são relevantes o suficiente para provocar as discrepâncias nos valores obtidos [42, 54]. Num artigo

Arrese and Mujika [53] verificaram que a utilização do método CBT com recurso à expressão (27) para o cálculo de G_{IIc} origina que seu valor seja estimado em demasia, pois este não considera os efeitos da rotação dos aderentes. Foi também concluído que o aumento de a_0 induz um aumento de G_{IIc} caso não sejam efetuadas correções:

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 L_i^2}{64E_1 B^2 h^3}, \quad (27)$$

Pelo atrás exposto, Arrese and Mujika [53] propuseram a seguinte correção (28) em percentagem no caso de um comportamento linear para o ensaio 4ENF:

$$\chi_{4ENF}^1 (\%) = \frac{R}{h} [\varepsilon_1 + \varepsilon_2] \left[6a_0^3 - 18a_0^2 + \frac{115}{4}a_0 - 5 \right] \cdot 100, \quad (28)$$

onde R é o raio dos suportes e ε_1 e ε_2 , a deformação nas respetivas direções.

2.5 Modelos de dano coesivo

Os MDC têm sido bastante utilizados nos últimos anos. A sua utilização remonta ao período de 1959 a 1962, onde Barenblatt [55, 56] e Dugdale [57] propuseram o conceito de zona coesiva para descrever o dano na extremidade da fenda sobre cargas estáticas.

Este método, contrariamente à abordagem clássica da mecânica da fratura, possui como principal vantagem o facto de não ser necessário um defeito inicial para dar origem ao dano. De facto com esta metodologia, o dano ocorre sem interferência do utilizador [14].

Esta técnica tem como princípio de funcionamento o efeito de amaciamento das tensões em função dos deslocamentos relativos entre as faces da fenda, simulando dessa forma a degradação progressiva das características dos materiais. Estes modelos consideram a progressão do dano de forma macroscópica, eliminando dessa forma fenómenos microscópicos presentes no início da fenda através leis de tensão-deslocamento ($t-\delta$) relativo também conhecidas por leis coesivas [58].

2.5.1 Leis de dano coesivo

As leis coesivas podem ser adequadas aos materiais e simulações em questão [59]. Nesse sentido, ao longo dos anos têm vindo a ser desenvolvidos diferentes modelos coesivos, dos quais se destacam:

- Triangular Alfano and Crisfield [60];
- Linear parabólico Allix and Corigliano [61];
- Exponencial [62];
- Polinomial [63];
- Trapezoidal (Kfkalidis e Thouless) [64].

Em ligações adesivas, a lei triangular é a mais usada, devido à fácil introdução de parâmetros, simplicidade e fiabilidade nos resultados obtidos para a maioria das situações [65]. Contudo, verifica-se que para adesivos dúcteis a lei trapezoidal é a que melhor se adequa [59]. Seguidamente, resume-se algumas das características mais importantes das leis triangular e trapezoidal tendo em conta estas serem as mais usadas nas ligações adesivas.

2.5.1.1 Lei triangular

O modelo de dano triangular (Figura 51) apresenta dois modos (modo puro e modo misto). No modo puro o dano ocorre num conjunto de nós análogos quando as tensões são anuladas nas respetivas leis coesivas, no modo misto são usados critérios energéticos em conjunto com critérios de tensão a combinar os efeitos de tração e corte nos modos puros [59].

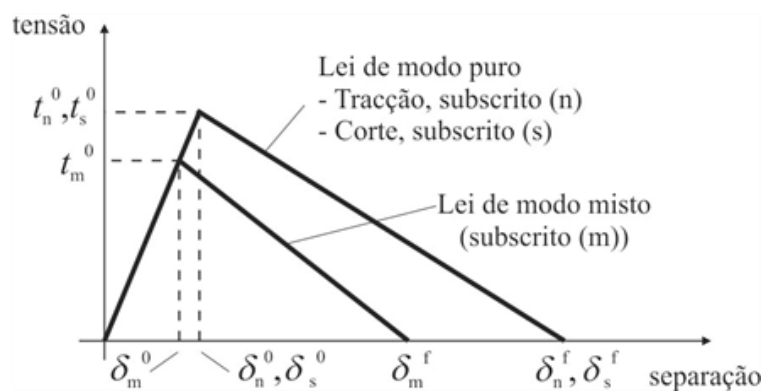


Figura 51 - Modelo coesivo de dano triangular [66, 67]

2.5.1.2 Lei trapezoidal

A lei trapezoidal surge com o objetivo de colmatar as dificuldades na simulação de camadas finas de adesivos dúcteis. Como no modelo triangular, nesta lei é usado um MDC em modo puro e outro em modo misto. Como se pode visualizar na Figura 52, nesta lei é considerado um patamar na lei coesiva no nível máximo de tensão (em modo puro ou misto), permitindo desta forma simular com mais detalhe o comportamento de adesivos dúcteis devido à sua maior plastificação [67].

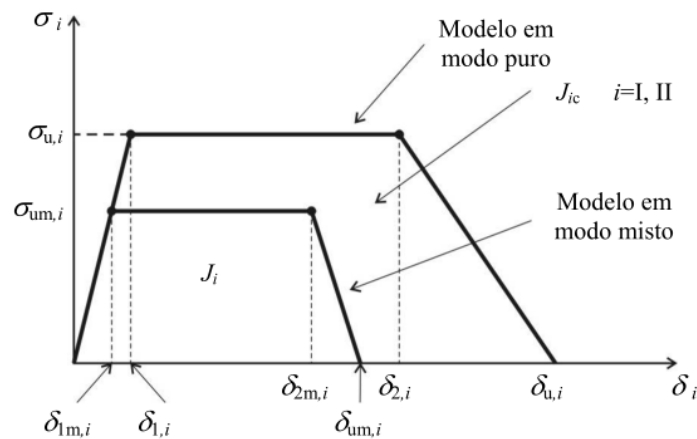


Figura 52 - Modelo coesivo de dano trapezoidal [59]

2.5.2 Métodos de determinação dos parâmetros coesivos

Os MDC são uma ferramenta valiosa para estudar o comportamento à fratura das ligações adesivas atuais. No entanto, estes necessitam de algum cuidado no ajuste e validação dos dados experimentais, de forma a garantir uma correta simulação do dano Carlberger and Stigh [48]. De facto, não existem até ao momento métodos devidamente normalizados para a determinação de t_n^0 (resistência coesiva à tração) e t_s^0 (resistência coesiva ao corte) [68]. Nos últimos anos têm sido publicados diversos estudos sobre a definição dos parâmetros coesivos t_n^0 , t_s^0 , G_{Ic} e G_{IIc} . Contudo existem apenas alguns métodos para esse efeito: sejam método inverso, método direto e método de definição individual de parâmetros, que apresentam, diferentes graus de complexidade e precisão.

A escolha da metodologia depende da definição dos parâmetros coesivos realizada através de testes adequados para o efeito. Com objetivo de validar o MDC em modo misto, alguns testes [50, 64] utilizaram os ensaios DCB e ENF em modo puro e conseguiram bons resultados.

A seguir, resumem-se alguns dos aspetos mais importantes que definem os três métodos atrás referidos.

2.5.2.1 Método inverso

Este método tem por base um procedimento iterativo de ajuste entre os dados experimentais e os respetivos dados obtidos através do MEF, considerando a geometria precisa dos provetes usados na parte experimental. De acordo com Campilho [37], a caracterização pelo método inverso deve ser efetuada a cada provete por forma a ter em conta as pequenas variações geométricas que possam existir entre estes. A técnica deste ensaio traduz-se na utilização de métodos de redução para obter os valores de G_I

ou G_{II} através das curvas $P-\delta$ experimentais. Seguidamente estes valores são introduzidos nos modelos criados no programa de MEF em conjunto com valores estimativos de t_n^0 e t_s^0 . Finda esta etapa, é iniciado o processo iterativo de ajuste até que a curva $P-\delta$ numérica coincida com a sua homóloga experimental. As curvas $P-\delta$ apresentadas na Figura 53 representam o processo de ajuste efetuado num provete ENF, realizado por Campilho [37], relativo ao comportamento de ligações adesivas com o adesivo Araldite®2015, utilizando uma espessura da camada adesiva de 0,2 mm.

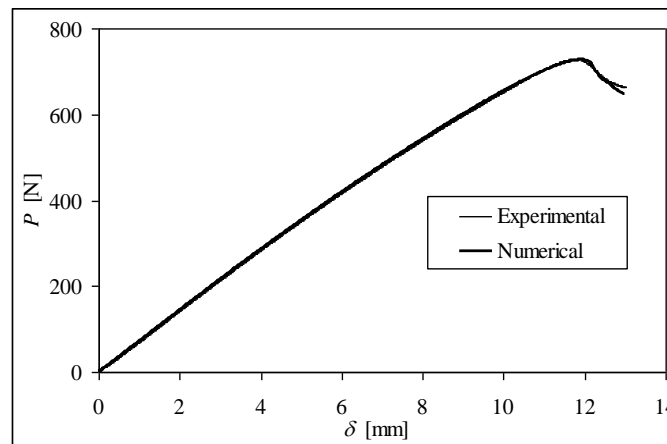


Figura 53 - Comparação entre curvas $P-\delta$ numérica e experimental de um ensaio ENF, após processo iterativo de ajuste [37]

2.5.2.2 Método direto

Neste método, é possível obter a forma exata da lei coesiva, uma vez que esta é obtida através da diferenciação das curvas $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$, adquiridas através de dados experimentais de testes à fratura, como por exemplo o DCB ou o ENF. De acordo com Carlberger and Stigh [48], para o ensaio DCB e tendo por base o pressuposto da existência de uma lei coesiva e a independência do contorno do integral- J , é possível obter uma relação entre a carga aplicada e a lei coesiva da fenda. Nesse sentido, baseando-se em critérios energéticos e na teoria das vigas, obtém-se o valor de G_I através da seguinte expressão (29) (partindo do princípio que o valor de G_I é obtido pelo integral- J) [69] :

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{E_a t_p^3} + P_u \theta_0 \quad \text{ou} \quad G_I = P_u \theta_p, \quad (29)$$

Na expressão (29), e de acordo com a Figura 54, o valor P_u representa a carga aplicada por unidade de largura, E_a representa o módulo de elasticidade dos aderentes, θ_0 a rotação dos aderentes na extremidade da fenda e θ_p a rotação relativa dos aderentes no alinhamento da carga. Na expressão (29), Campilho [51] considerou θ_0 em detrimento de θ_p , uma vez ser mais fácil obter esse valor com recurso ao método ótico.

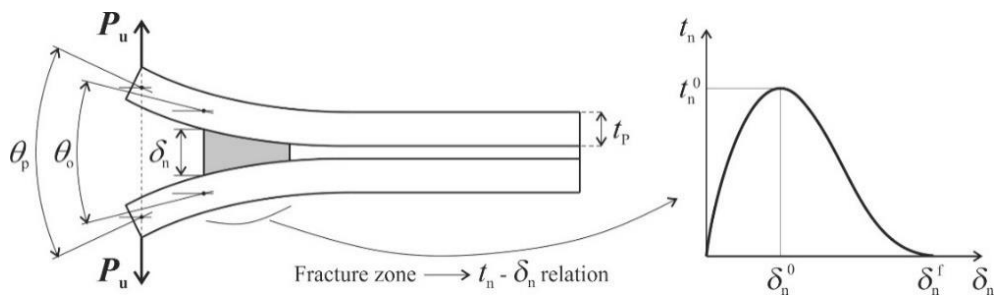


Figura 54 - Provete DCB com aplicação de carga

Com base na equação fundamental do integral- J (expressão (19)), definido por Rice [47] e Carlberger and Stigh [48] o valor de G_I pode ser obtido de acordo com a expressão (30), onde δ_n^f (deslocamento máximo em tração) é medido na ponta de fenda inicial.

$$G_I = \int_0^{\delta_n^f} t_n(\delta_n) d\delta_n, \tag{30}$$

Pela diferenciação da lei anterior, obtêm-se a lei coesiva em modo puro (31):

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_I}{\partial \delta_n}. \tag{31}$$

Pelo anterior exposto o procedimento do ensaio consiste em medir o histórico de P , a, δ_n e θ_0 , sendo a lei coesiva estimada através da diferenciação do ajuste polinomial da representação gráfica de G_I da expressão (29) em função de δ_n [48].

Se for usado o ensaio ENF (Figura 55), para a caracterização à fratura em modo II e de acordo com Leffler [49], é possível obter o valor de G_{II} com recurso às expressões (20) ou (21), descritas no subcapítulo 2.4.1.3. A partir da diferenciação da expressão (21) é possível obter a lei coesiva ao corte (expressão (22)) [49].

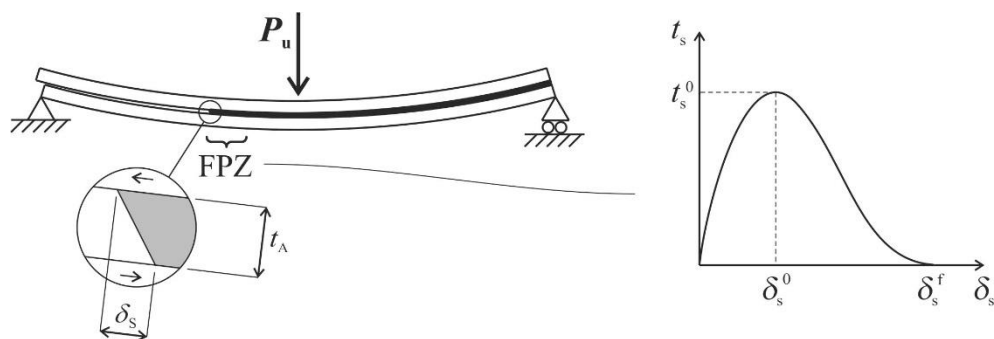


Figura 55 - Provete ENF com aplicação de carga [70]

2.5.2.3 Método de definição individual de parâmetros

A utilização deste método pressupõe que sejam conhecidos os parâmetros coesivos e a lei coesiva a utilizar, e que pelo menos um desses dados de entrada seja obtido com recurso a dados de adesivo em maciço.

Campilho [59], baseado na evidência de Andersson and Stigh [71] que indicava que t_n^0 era da mesma ordem de grandeza da tensão de cedência do adesivo em bruto, e que δ_n^s e δ_s^s não afetavam significativamente a simulação numérica, utilizou os valores de t_n^0 e δ_n^s a partir das curvas tensão-deformação (σ - ϵ). No mesmo estudo, o valor de t_s^0 foi estimado a partir de t_n^0 , considerando critério de Von Mises para materiais isotrópicos.

Os valores de G_{Ic} e G_{IIc} foram obtidos *a posteriori* a partir dos ensaios DCB e ENF, respetivamente. Pese as aproximações efetuadas, o estudo produziu boa concordância na rigidez elástica e curva P - δ . Não obstante, os autores efetuaram um estudo de sensibilidade numérica, tendo concluído que os valores de δ_n^s e δ_s^s das leis MDC não influenciam de forma aparente o modo de rotura das juntas adesivas.

2.5.3 Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo

Como referido anteriormente, presentemente a utilização de MDC em programas MEF são uma ferramenta importantíssima para a previsão do comportamento das juntas quando sujeitas às condições de serviço. Acrescenta-se o facto de nem sempre ser possível ter os meios adequados para a realização de ensaios experimentais. Nesse contexto, e de forma a simular esses ensaios, convém perceber quais os procedimentos e diferentes estratégias com vista à definição dos modelos numéricos. Seguidamente, resumem-se alguns exemplos de modelação numérica para diferentes ensaios em modo puro e modo misto.

2.5.3.1 Ensaios de fratura em modo puro

Neste subcapítulo é abordada uma descrição sobre os ensaios DCB e ENF, por serem os mais comumente utilizados em modo puro.

2.5.3.1.1 Ensaio Double Cantilever Beam (DCB)

Na Figura 56 é apresentado um modelo numérico do ensaio DCB, criado por de Moura [43], com o objetivo de simular numericamente ensaios experimentais efetuados para a determinação das propriedades à tração de um adesivo dúctil. Na modelação dos aderentes foram utilizados elementos sólidos de 8 nós (CPE8 do ABAQUS®), ao passo que o adesivo foi modelado com elementos coesivos de 6 nós (COH2D4 do ABAQUS®), onde foi aplicada uma lei de amaciamento trapezoidal em modo misto, de forma a melhor simular o comportamento do adesivo dúctil em modo I.

Foi aplicado o método inverso para determinação dos parâmetros coesivos. O valor de G_{IC} , obtido da média do patamar das curvas de resistência, foi introduzido no ABAQUS®, tendo sido iniciado um processo iterativo de ajuste, que permitiu obter uma boa similitude entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais (como representado na Figura 57). Com o objetivo de verificar a adequabilidade dos métodos de redução para a obtenção de G_{IC} , aos valores de $P-\delta-a$ numéricos foram aplicados vários métodos de redução, demonstrados na Figura 58, tendo sido obtida uma boa concordância de valores.

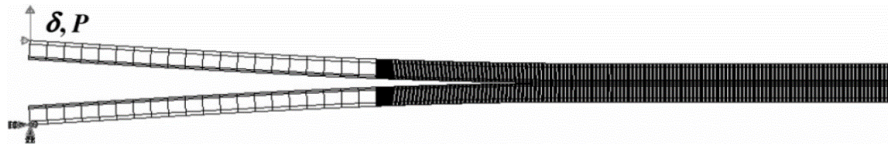


Figura 56 - Esquema do ensaio numérico DCB [43]

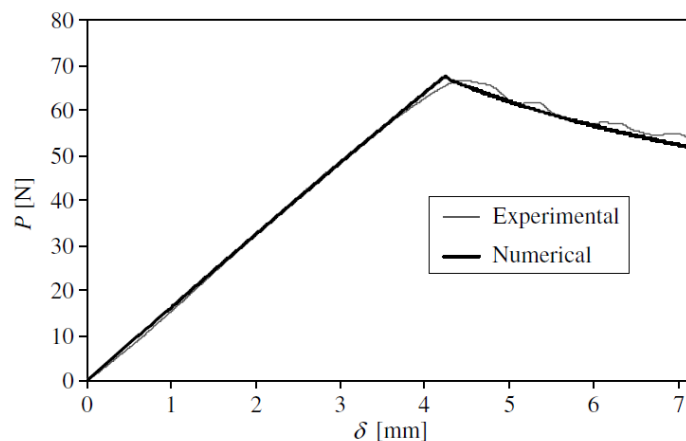


Figura 57 - Comparação da curva $P-\delta$ numérica e experimental do ensaio DCB [43]

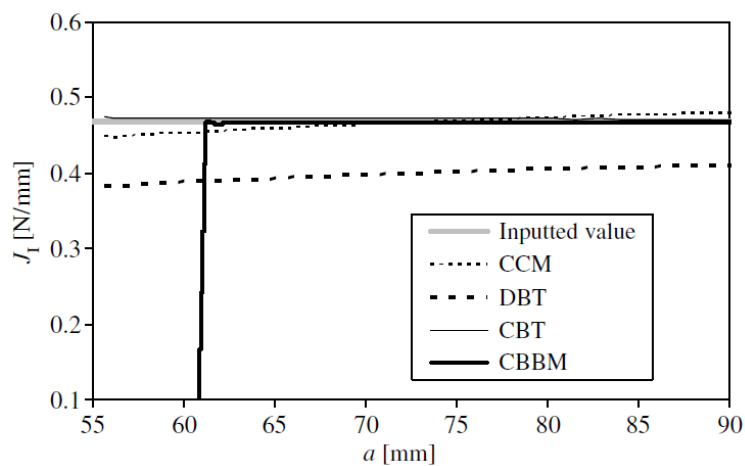


Figura 58 - Curvas-R numéricas obtidas após aplicação dos vários métodos de redução [43]

2.5.3.1.2 Ensaio End Notched Flexure (ENF)

Azevedo et al. [72] elaborou um estudo de avaliação numérica do ensaio ENF usando o código comercial ABAQUS®. Neste estudo foram usados elementos sólidos em estado plano de deformação (CPE4 do ABAQUS®) para a modelação dos aderentes, ao passo que a junta adesiva foi modelada por um elemento de 4 nós COH2D4 do mesmo programa (ver modelo na Figura 59). Para obtenção da lei coesiva foi usado o método inverso, descrito anteriormente, em conjunto com uma lei de dano triangular.

Inicialmente, o autor elaborou os modelos numéricos tendo por base as dimensões geométricas dos provetes experimentais e as respectivas fendas iniciais a_0 , introduzindo em paralelo a estimativa do valor de t_s^0 , obtido através de ensaios de adesivo maciço, em conjunto com o valor de G_{IIc} , obtido através do método de redução CBBM às curvas $P-\delta$ experimentais. Finda esta etapa, foi efetuado um processo iterativo de ajuste até fazer coincidir a curva $P-\delta$ numérica com a curva experimental, como se exemplifica na Figura 53. Com o intuito de validar os resultados obtidos, foi realizado outro estudo: aos valores de $P-\delta-a$ de um ensaio numérico foram aplicados métodos de redução (CCM, DBT, CBT e CBBM) de forma a estimar o valor de G_{IIc} em comparação com o valor inserido no modelo numérico, tendo sido obtida uma boa concordância entre valores, como se pode constatar na Figura 60 .

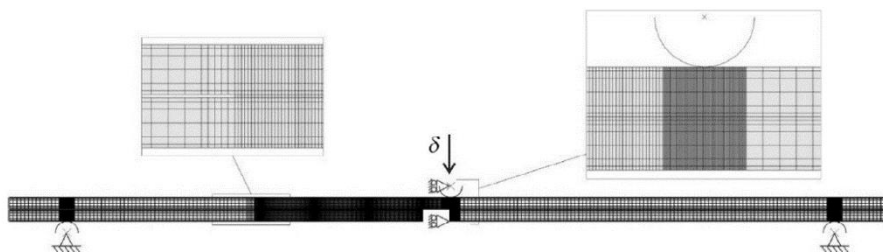


Figura 59 - Esquema de um modelo numérico do ensaio ENF [72]

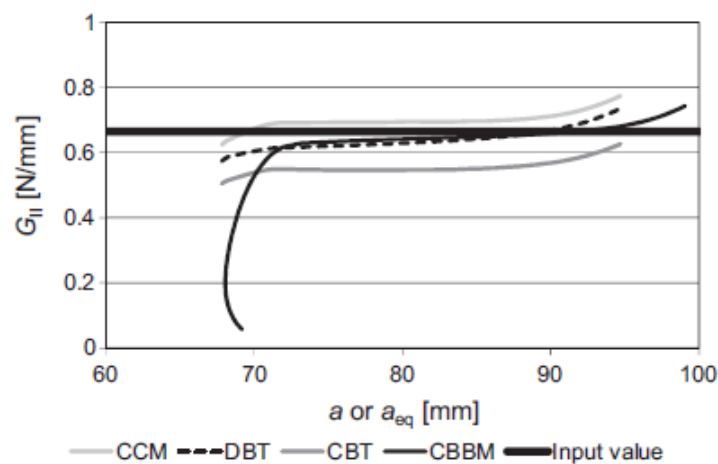


Figura 60 - Curvas-R do ensaio ENF [72]

2.5.3.1.3 Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)

de Moraes and Pereira [73] num estudo realizado com o intuito de avaliar o método *effective crack method* (ECM), realizaram três tipos de ensaios: DCB, ENF e 4ENF. Para cada ensaio, foram elaboradas as respectivas simulações numéricas por MDC utilizando o código comercial ABAQUS®. Relativamente ao ensaio 4ENF os modelos foram construídos em 2D (como se pode verificar na Figura 61) tendo por base as dimensões geométricas precisas dos provetes. Os rolos de suporte e de carga foram considerados como corpos rígidos, tendo 5 mm de diâmetro cada. A carga foi aplicada a meio vão dos dois rolos superiores, estando estes ligados através de braço rígido (Figura 61). Foram também definidas superfícies de contacto, nas zonas de contacto entre os rolos e os substratos. Às curvas $P-\delta$ resultantes do MEF foram aplicadas as seguintes expressões, (32) e (33).

$$E_1 = \frac{(2L - L_i)^2(L_i - 4L + 9a)}{32bh^3C_{f0}}, \quad (32)$$

$$G_{IIc} = \frac{9P^2(2L - L_i)^2}{64b^2E_1h^3}, \quad (33)$$

onde C_{f0} é a flexibilidade flexural inicial. Os valores E_1 e G_{IIc} daí resultantes foram depois comparados com os mesmos introduzidos através *virtual crack closure technique* (VCCT) tendo havido uma boa concordância de valores. Como resultados deste estudo foi possível verificar que o método ECM produz bons resultados no cálculo de G_{IIc} no ensaio ENF. Todavia, no ensaio 4ENF este método apresenta valores de G_{IIc} substancialmente maiores. Verificou-se através do MEF que esta diferença se deve ao efeito do maior atrito presente neste ensaio.

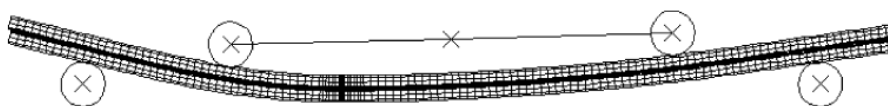


Figura 61 - Modelo numérico do ensaio 4ENF [73]

2.5.3.2 Ensaios de fratura em modo misto

Com o intuito de criar um método de redução utilizando o comprimento de fenda equivalente em sollicitações em modo misto, Chaves et al. [74] modificaram um dispositivo, inicialmente criado por Fernlund and Spelt [75], para efetuar ensaios em modo misto. Para validar a eficácia deste dispositivo e o método de redução proposto, foram criados vários modelos numéricos em conformidade com os modelos

experimentais. Foram ensaiadas várias configurações de carga ($G_I/G_{II} > 1$; $G_I/G_{II} < 1$; $G_I/G_{II}=1$) através da variação das distâncias s_1 e s_4 , como exemplificado na Figura 62.

Os modelos numéricos foram desenvolvidos num programa de MEF, usando uma lei de amaciamento trapezoidal. Os provetes foram modelados usando 3600 elementos quadriláteros planos de 8 nós. Para a camada adesiva foram usados 280 elementos de 8 nós de espessura nula. Para validar os resultados numéricos, foram-lhes aplicados os métodos de redução CCM e CBBM, tendo havido uma boa concordância entre os valores de energia de fratura total (G_T) obtidos pelos métodos e aqueles introduzidos inicialmente nos modelos numéricos, como é possível verificar-se na Figura 63.

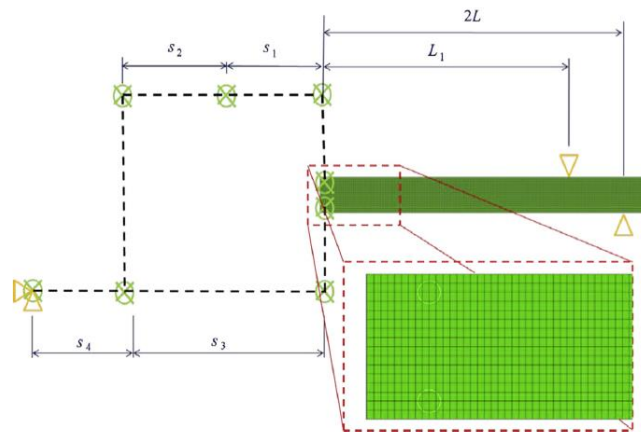


Figura 62 - Grelha e condições fronteira do ensaio [74]

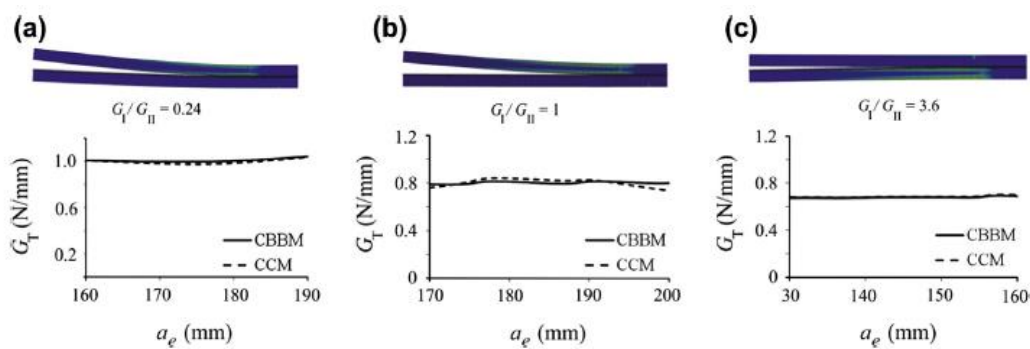


Figura 63 - Curvas $G_T(a_{eq})$ para $G_I/G_{II} > 1$; $G_I/G_{II} < 1$; $G_I/G_{II}=1$ [74]

2.5.3.3 Juntas usadas em aplicações de modo misto

Como já mencionado, o uso de juntas adesivas tem vindo a aumentar progressivamente, de forma consistente nos últimos anos, pois devido às suas vantagens estas têm vindo a substituir, em diversas aplicações, o uso dos métodos clássicos de união mecânica. Nas últimas décadas, o uso de programas de MEF em conjunto com MDC tem permitido prever de forma bastante realista o comportamento prático à fratura deste tipo de ligações. Recentemente, tem vindo também a ser utilizado o Método de Elementos

Finitos Estendido (MEFX) tendo como vantagem o facto de a fenda não necessitar de uma trajetória pré-definida para propagar. Existem diversas configurações típicas de juntas adesivas, todavia as JSS e JSD são provavelmente as mais utilizadas, devido à sua simplicidade de execução. Neste contexto, têm havido múltiplos estudos com objetivo de simular o comportamento desse tipo de juntas. Num desses estudos, Campilho et al. [76] efetuou uma análise comparativa entre os valores obtidos através de dados experimentais com os homólogos numéricos, usando duas técnicas: MDC com modelo de dano triangular e MEFX. A modelação numérica foi efetuada por meio do programa ABAQUS®. Na Figura 64 estão esquematizados dois gráficos representativos das curvas P - δ numéricas (obtidas através de um MDC triangular) e experimentais dos ensaios nas JSD e JSS, respetivamente.

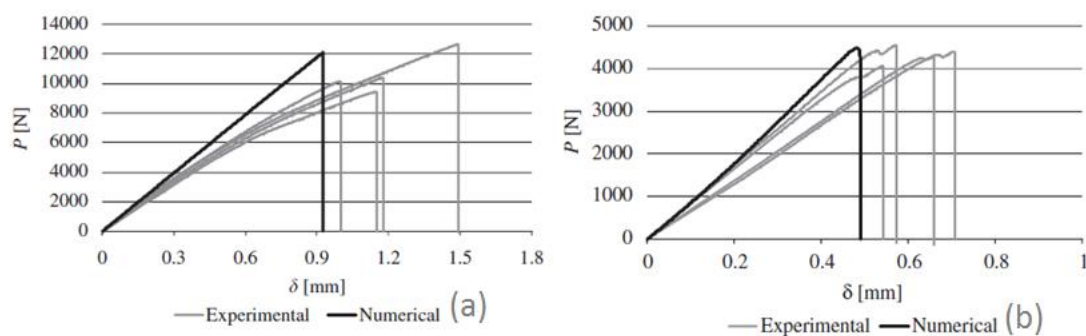


Figura 64 - Curvas P - δ numéricas e experimentais nas JSD(a) e JSS (b)[76]

Fernandes et al. [77], com o intuito de avaliar qual a família de adesivos mais adequada em JSS com diferentes comprimentos de sobreposição (L_0), e fornecer ferramentas numéricas, de forma a proporcionar esse efeito, elaboraram um estudo com recurso ao ABAQUS®. Para o estudo em questão foram usados três tipos de adesivos, Araldite®AV138, Araldite®2015 e Sikaforce® 7888. Os aderentes em alumínio foram modelados tendo em conta as suas características elasto-plásticas, enquanto a camada adesiva foi modelada de duas formas. Uma usando um MDC do tipo triangular em modo misto utilizando o critério energético para a iniciação do dano (expressão (36)) e a outra utilizando MEFX. Em ambos os casos os modelos foram modelados como elementos sólidos em estado plano de tensão (CPE4 do ABAQUS®). Foram também usadas malhas com diferentes refinamentos tendo em conta o efeito *bias* para reduzir o esforço computacional, como se pode averiguar na Figura 65. Foram consideradas malhas bastante refinadas (0,02x0,02 mm) na camada adesiva, todavia na direção da espessura do adesivo foi considerado apenas um elemento de 0,2x0,2 mm.

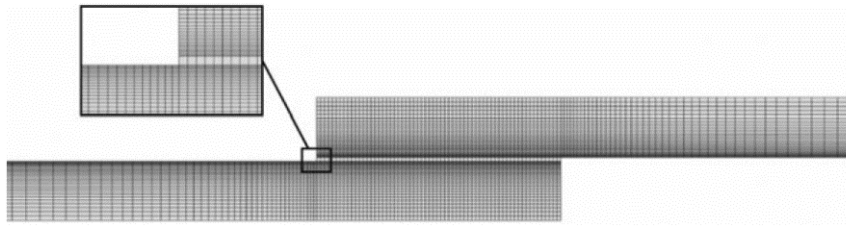


Figura 65 - Exemplo do refinamento da malha numa JSS [77]

Na Figura 66 ilustram-se as curvas P - δ numéricas (obtidas através de um MDC) e experimentais. Como se pode constatar, na figura referida foi possível obter uma boa concordância nas curvas no adesivo Araldite®2015 (Figura 66 (a)), todavia no adesivo Sikaforce® 7888 (Figura 66 (b)) não foi possível obter uma tão boa concordância de valores devido ao facto de ter sido usada uma lei triangular para caracterizar um adesivo mais dúctil [67]. Foi concluído que as propriedades de um adesivo (ductilidade, rigidez e resistência) têm larga influência no seu comportamento. Um adesivo mais resistente não é sinónimo de uma ligação com mais resistência, pois um adesivo com baixa rigidez proporciona uma maior distribuição dos esforços na junta.

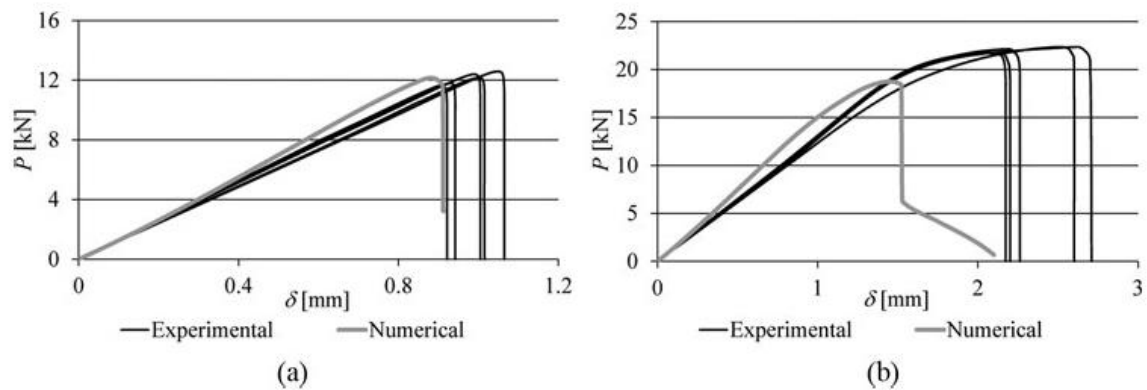


Figura 66 - Curvas P - δ numéricas e experimentais de ensaios em JSS (usando MDC), $L_0 = 37,5$ mm Araldite®2015 (a) e $L_0 = 50$ mm Sikaforce® 7888 (b) [77]

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Neste subcapítulo é apresentado o trabalho experimental, materiais, ferramentas e técnicas empregues para a realização dos ensaios ENF e 4ENF, efetuados por Azevedo [2] e de Oliveira [1], respetivamente, no âmbito de dissertações de mestrado apresentadas ao Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). Todo o tratamento dos dados destes ensaios a partir das curvas P - δ e respetiva análise foram realizados no âmbito da presente dissertação.

3.1.1 Materiais utilizados

Para a realização do trabalho experimental dos ensaios ENF e 4ENF foram utilizados diversos materiais. Ambos os ensaios partilharam os mesmos adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. Todavia, no que respeita aos substratos, no ensaio ENF foi utilizada uma liga de alumínio de elevada resistência e no ensaio 4ENF foi utilizado um material compósito de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono.

3.1.1.1 Substratos do ensaio experimental ENF

Para a realização dos substratos deste ensaio foi utilizada uma liga de alumínio da série 6000, mais concretamente a AW 6082-T651, cujas propriedades químicas e mecânicas se demonstram na Tabela 5 e Tabela 6, respetivamente. Esta liga apresenta excelente resistência à corrosão e boa soldabilidade, tem por base química 82% de alumínio e como principais elementos de liga, magnésio e silício.

Tabela 5 - Composição química da liga de alumínio AW 6082-T651 [2].

	Si	Mg	Mn	Fe	Cr	Zn	Ti	Cu	Al
%Mínimo	0,70	0,60	0,40	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	---
% Máxima	1,30	1,20	1,00	0,50	0,25	0,20	0,10	0,05	Resto

Tabela 6 - Propriedades mecânicas da liga de alumínio AW 6082-T651 [2].

Espessura [mm]	6,00-12,50
Tensão de rotura mínima [MPa]	300
Tensão de cedência 0,2% mínima [MPa]	255
Alongamento mínimo [%]	9
Dureza Brinell valor Mínimo [%]	91
Módulo de elasticidade [GPa]	70

De acordo com o estudo realizado por Campilho et al. [76], foram obtidas as curvas σ - ε (Figura 67) para a liga de alumínio AW 6082-T651. Os ensaios experimentais foram efetuados respeitando a norma ASTM-E8M-04, resultando nas seguintes propriedades: módulo de elasticidade (E) de $70,07 \pm 0,83$ GPa, tensão de cedência (σ_y) de $261,67 \pm 7,65$ MPa, tensão de rotura (σ_f) de $324 \pm 0,16$ MPa e deformação de rotura à tração (ε_f) de $21,70 \pm 4,24\%$. Também foi elaborada uma análise numérica de forma a comparar os resultados experimentais, como é possível verificar-se na Figura 67.

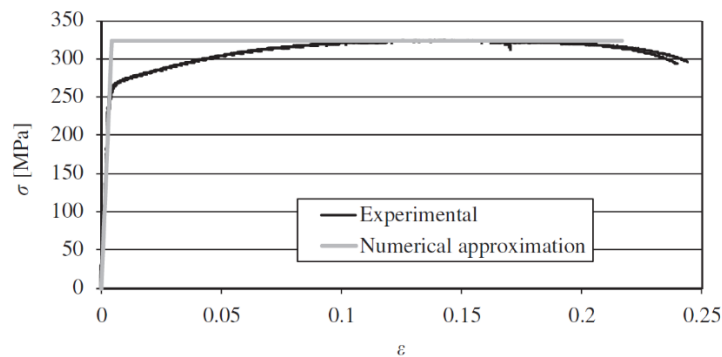


Figura 67 - Curvas σ - ε da liga de alumínio AW 6082-T651 e respetiva aproximação para a análise numérica [76]

3.1.1.2 Substratos do ensaio experimental 4ENF

Como já mencionado, neste ensaio foram utilizados aderentes em material composto de matriz polimérica de resina epóxida reforçada com fibras de carbono, na forma de pré-impregnado unidirecional (SEAL®Texipreg HS 160 RM). A escolha deste material foi baseada num estudo elaborado por de Oliveira [1]. Na Tabela 7 estão expostas as propriedades mecânicas do composto.

Tabela 7 - Propriedades elásticas ortotrópicas do composto [1]

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

3.1.1.3 Adesivos

Neste subcapítulo descrevem-se os três adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, usados no trabalho experimental, sendo os dois primeiros epóxidos e o último poliuretano. Todos são bi-componentes (resina e endurecedor), o que se traduz numa mais valia, pois permitem uma maior facilidade na escolha da espessura da camada adesiva e, ao mesmo tempo, possibilitam compensar a eventual falta de planeza dos substratos [1]. A sua aplicação é fácil, graças à relativa baixa viscosidade. Estes adesivos foram escolhidos por apresentarem diferentes ductilidades: um frágil, um

intermédio e um dúctil, respetivamente, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752.

3.1.1.3.1 Araldite® AV138

Na Figura 68 observa-se o adesivo Araldite® AV138 e o endurecedor HV998. Este adesivo é estrutural de base epóxida, termoendurecível de dois componentes e é fabricado pela *Huntsman Advanced Materials*. Apresenta-se como uma 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 [2]. Na Figura 69 apresentam-se as curvas (σ - ϵ) deste adesivo [78, 79]. Na Tabela 8 estão indicadas as propriedades mecânicas e de fratura mais importantes deste adesivo, obtidas em trabalhos realizados anteriormente.



Figura 68 - Adesivo epóxido Araldite® AV138/HV998 [2]

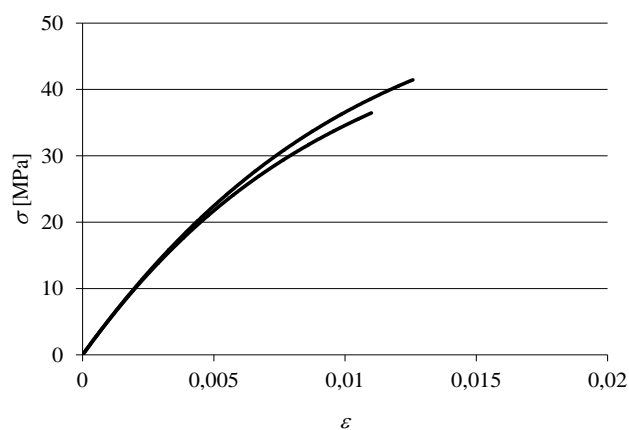


Figura 69 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® AV138 [78]

Tabela 8 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® AV138, adaptado de [78, 79]

Propriedades	Araldite® AV138
Módulo de 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 corte, 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 [80]

3.1.1.3.2 Araldite® 2015

Este adesivo (Figura 70), fabricado pela *Huntsman Advanced Materials*, é considerado estrutural. Trata-se de uma resina epóxida, termoendurecível de dois componentes, apresentada sob a forma de pasta tixotrópica de cura à temperatura ambiente. É caracterizada pela baixa contração de volume, alta resistência ao corte e clivagem e ductilidade moderada. Para se promover uma boa ligação com esta resina, é necessário que as superfícies a unir se encontrem limpas. Para esse efeito devem ser usados desengordurantes, tais como acetona, isopropanol (para plásticos) ou outros agentes desengordurantes [2]. Na Figura 71 ilustra-se as curvas σ - ϵ de provetes maciços, obtidas por Campilho et al. [78] a partir de ensaios à tração.



Figura 70 - Adesivo epóxido Araldite® 2015 [2]

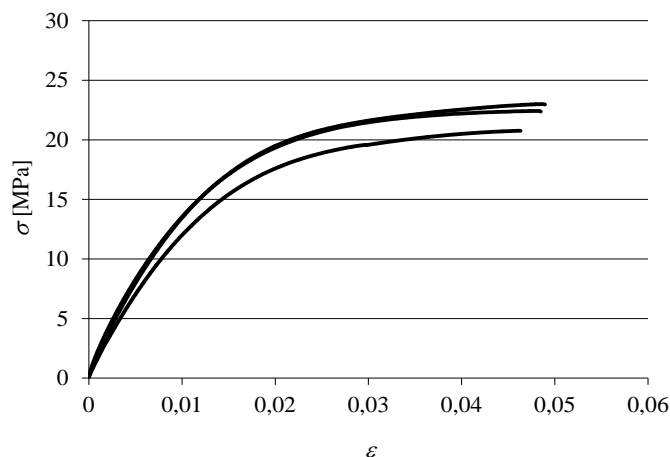


Figura 71 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo Araldite® 2015 [78]

Quando se efetua uma comparação direta dos valores de resistência à tração e corte, verifica-se que o adesivo Araldite® 2015 apresenta valores menores que o Araldite® AV138. Contudo, como se trata de um adesivo mais dúctil, este possibilita uma melhor redistribuição de tensões com especial enfoque nas extremidades, devido ao efeito de deformação diferencial dos aderentes [78]. Tendo como referência a Tabela 8 e a Tabela 9, constata-se que o Araldite® AV138 possui uma deformação de rotura ao corte quase seis vezes inferior ao Araldite® 2015. Por outro lado, as tensões de rotura à tração e ao corte do Araldite® AV138 são praticamente o dobro das do Araldite® 2015. Na Tabela 9 estão também indicadas as propriedades mecânicas mais importantes obtidas por Campilho et al. [78].

Tabela 9 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo Araldite® 2015 [78]

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de 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 corte, 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	

3.1.1.3.3 Sikaforce® 7752

Este adesivo, representado na Figura 72, é um adesivo estrutural à base de poliuretano tixotrópico de dois componentes: uma resina de polioli e um endurecedor isocianato. É bastante usado na ligação de metais, cerâmica, madeira e derivados. As suas características mais relevantes são [2]:

- Baixa emissão de gases voláteis;
- Boa resistência a altas temperaturas;
- Cura à temperatura ambiente;
- Boa resistência ao envelhecimento e à exposição química;
- Grande resistência ao impacto e bastante flexível a baixas temperaturas.

Como se pode verificar em valores de tenacidade anteriores [81], trata-se de um adesivo bastante dúctil. Na Figura 73 apresenta-se as curvas σ - ϵ dos provetes maciços ensaiados à tração [81].



Figura 72 - Adesivo SikaForce® 7752 [2]

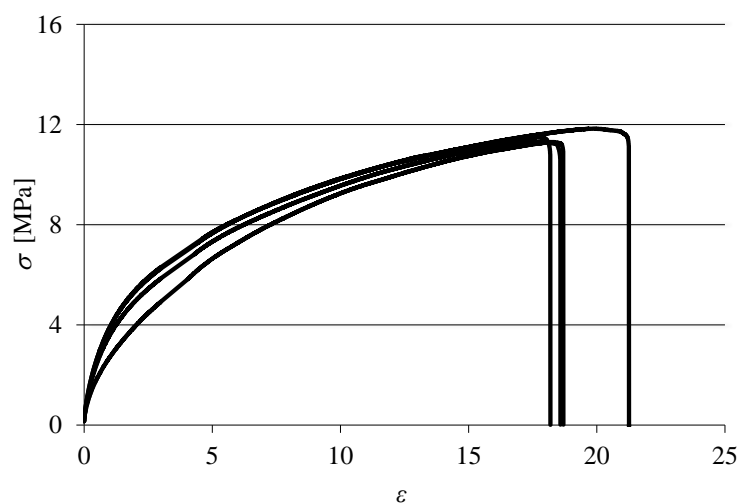


Figura 73 - Curvas σ - ϵ de provetes maciços do adesivo SikaForce® 7752 [81]

Na Tabela 10 estão exibidas as propriedades mecânicas e de fratura mais relevantes presentes num trabalho efetuado anteriormente [81].

Tabela 10 - Propriedades mecânicas e de fratura do adesivo SikaForce® 7752 [81]

Propriedades	SikaForce® 7752
Módulo de 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 corte, 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_{IIc} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41±0,47

^a valor do fabricante

3.1.2 Geometria das juntas

3.1.2.1 Ensaio End Notched Flexure (ENF)

Para a realização deste ensaio foram elaborados 24 provetes, cuja geometria se ilustra na Figura 74. Como já referido, para o fabrico dos substratos foi utilizada a liga de alumínio AW 6082-T651, adquirida em chapa com 3 mm de espessura e 25 mm de largura. A partir destas chapas foram cortados 48 substratos, com comprimento de 230 mm, com recurso a uma guilhotina existente nas oficinas do ISEP. Como a largura é um parâmetro de entrada para o cálculo de G_{IIc} , e como este depende do quadrado desta, foi efetuado um controlo dimensional em vários pontos através da utilização de um paquímetro, cujas dimensões podem ser consultadas na Tabela 11.

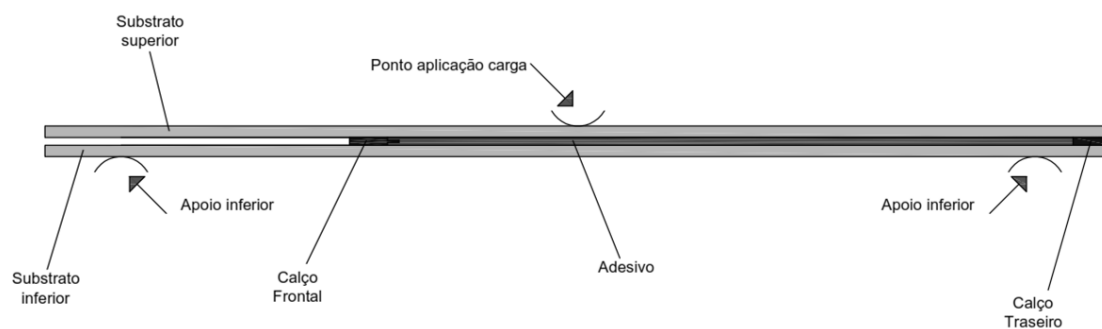


Figura 74 - Representação da geometria da junta com posicionamento dos calços, do ensaio ENF [1]

Tabela 11 - Controlo dimensional dos substratos de alumínio (mm) [2]

Comprimento dos substratos (L)	$230 \pm 0,5$
Largura dos substratos (B)	$25 \pm 0,05$
Espessura dos substratos (h)	$3 \pm 0,05$

3.1.2.2 Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)

Para a realização deste ensaio foram elaborados 21 provetes, cujo exemplo se encontra esquematizado na Figura 75. Os aderentes foram elaborados através de um material compósito de matriz polimérica reforçada com fibras de carbono, obtendo-se as dimensões representadas na Tabela 12, após controlo dimensional.

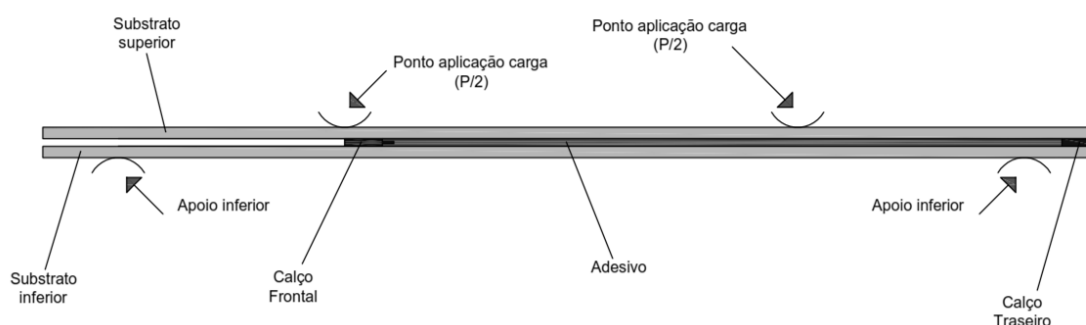


Figura 75 - Representação da geometria da junta com posicionamento dos calços, do ensaio 4ENF [1]

Tabela 12 - Controlo dimensional dos substratos de fibra de carbono [2]

Comprimento dos substratos (L)	$280,0 \pm 2,0$
Largura dos substratos (B)	$15,0 \pm 0,41$
Espessura dos substratos (h)	$3,0 \pm 0,04$

3.1.3 Processo de fabrico

3.1.3.1 Fabrico dos provetes ENF

No fabrico dos provetes do ensaio ENF foram utilizados substratos de alumínio. Os provetes foram limpos, com recurso a uma granalhadora (Figura 76 e Figura 77), existente no laboratório do ISEP. Todos os restantes procedimentos (fabrico dos adesivos, aplicação dos mesmos, cura, espessura da camada adesiva, aplicação das escalas e pré-fenda) foram idênticos ao 4ENF, cujos procedimentos serão apresentados de seguida. Não obstante, estes podem ser consultados no trabalho realizado por Azevedo [2].



Figura 76 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S [2]

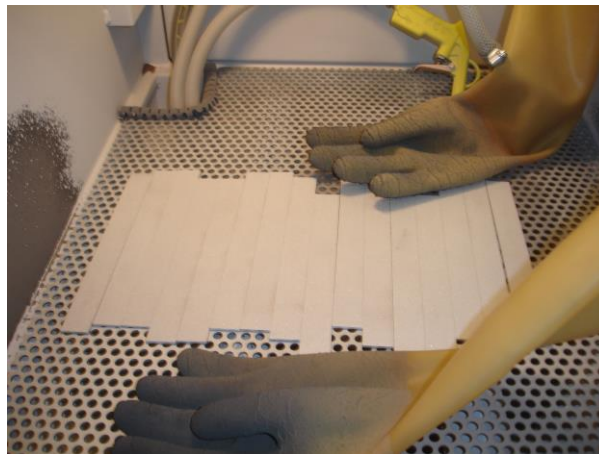


Figura 77 - Granalhagem mecânica dos substratos a seco [2]

Na Tabela 13 estão presentes os valores de pré-fenda a_0 , obtidos após propagação manual de fenda, nos provetes do ensaio ENF.

Tabela 13 - Tabela com valores de pré-fenda dos provetes do ensaio ENF [2]

Provete	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	65,90	48,84	49,92
2	51,65	53,87	60,13
3	50,60	51,60	58,02
4	84,80	48,76	58,84
5	66,10	49,67	53,31
6	64,15	48,93	51,49
7	67,80	52,19	54,53
8	66,15	51,22	55,97
Pré-fenda a_0 (mm)			

3.1.3.2 Fabrico dos provetes 4ENF

Para fabricar os provetes foram produzidas placas de material compósito de carbono-epóxico de 3 mm de espessura. Para esse efeito, foi utilizado um pré-impregnado unidirecional da SEAL® Texipreg HS160 RM, com uma sequência de empilhamento de [0]₂₀. As placas foram fabricadas de acordo com os seguintes procedimentos [1]:

1. Primeiramente, o rolo com o material compósito foi retirado da arca congeladora, ficando a estabilizar durante alguns minutos à temperatura ambiente.
2. Com a ajuda de uma placa metálica de 300x300 mm² foram cortadas as tiras de pré-impregnado.
3. Após dimensionar as folhas (300x610 mm²), foram cortadas 10 tiras com o auxílio de um x-ato (Figura 78).



Figura 78 - Corte das tiras de carbono-epóxico com um x-ato [1]

4. De modo a obter 20 folhas de 300x300 mm², foram cortadas as tiras anteriores.
5. Seguidamente, foi efetuado o empilhamento, tendo sido consideradas todas as camadas a 0°. Foram colocadas duas folhas de carbono-epóxico, em cima da mesa de trabalho, e em cada uma destas foi passada uma pistola de calor (2 vezes por folha), como se demonstra na Figura 79.



Figura 79 - Passagem de pistola de calor [1]

6. Depois, as folhas foram sobrepostas e foi aplicada pressão manualmente.
7. A fim de evitar a formação de vazios entre camadas, foi usado um calço rígido para efetuar a compressão das folhas.
8. Com o auxílio de um x-ato foi removida a folha de revestimento.
9. Findo este processo, repetiram-se os passos anteriores até se obterem 20 camadas, obtendo-se uma placa final de 3,00 mm de espessura (Figura 80).

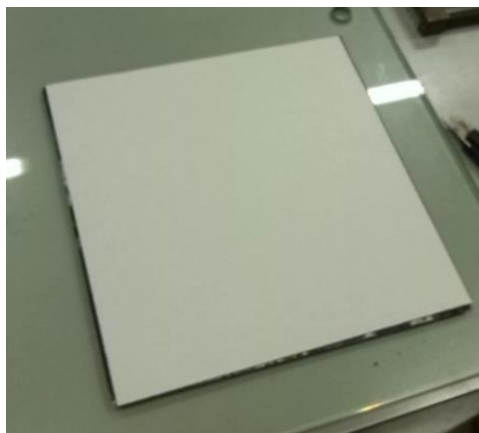


Figura 80 - Placa compósita [1]

10. De seguida, foi efetuada a preparação do molde, tendo este sido limpo de forma a evitar que qualquer resíduo pudesse afetar a forma final da placa.

11. Posteriormente, foi colocado o desmoldante nas duas placas, à moldura e às tiras metálicas. Este processo foi repetido 3 vezes de cada lado.
12. Finalmente, a placa foi colocada numa prensa de pratos quentes (Figura 81), existente no laboratório de materiais compósitos do ISEP, tendo as condições de temperatura e pressão sido controladas de acordo com as especificações do fabricante.

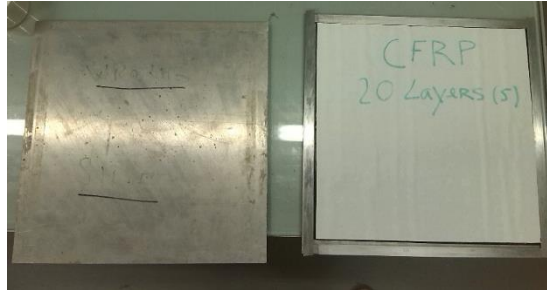


Figura 81 - Placa compósita inserida no molde [1]

Após a cura das placas, estas foram cortadas através de uma máquina de corte (Figura 82) existente no Laboratório de Materiais Compósitos do ISEP. Cortaram-se 42 aderentes [1].



Figura 82 - Máquina de corte BATISTI MECCANICA S.R.L DV25 [1]

De modo a ser obtida uma boa adesão entre os componentes, é fundamental uma boa preparação e limpeza das superfícies a unir. Como esta é uma das etapas mais importantes para a execução da junta colada, os substratos foram limpos com acetona, e foi executada uma lixagem manual (Figura 83). No final, foi realizada uma avaliação

visual ao estado das superfícies a ligar, com o cuidado de não haver contaminação durante este processo [1].



Figura 83 - Limpeza e lixagem dos substratos [1]

De seguida, procedeu-se ao fabrico e preparação dos calços a introduzir no interior dos provetes (Figura 84). Estes foram produzidos através de fita calibrada de 0,05 mm de espessura. No calço frontal, para além da fita referida foi usada uma lâmina de barbear com 0,1 mm de espessura de modo a efetuar a pré-fenda, no seu topo e base foram coladas com Loctite® Super Cola 3, duas tiras de fita calibrada de 0,05 mm, perfazendo um total de 0,2 mm. O calço traseiro foi executado apenas com recurso a tiras de fita calibrada coladas. A introdução destes calços permitiu que a espessura da camada adesiva (t_A) permanecesse constante, tendo o seu valor final 0,2 mm. De seguida, os calços foram levados ao forno a uma temperatura de 100°C durante 15 minutos. Finda esta etapa, foi-lhes aplicado um desmoldante Loctite® 770-NC (Figura 85) [1].

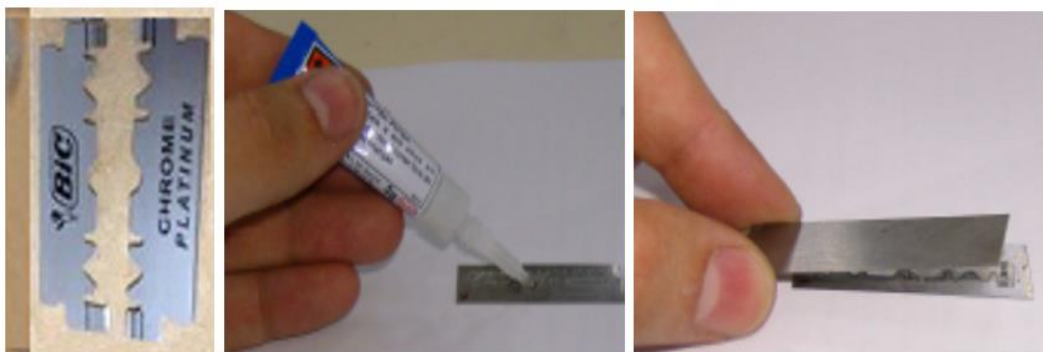


Figura 84 - Montagem do conjunto Fita Calibrada + Lâmina de Barbear [1]



Figura 85 - Aplicação do desmoldante Loctite® 770-NC [1]

Com os aderentes identificados, foram colocados os calços nos substratos inferiores, de maneira a garantir uma espessura uniforme do adesivo (Figura 86).

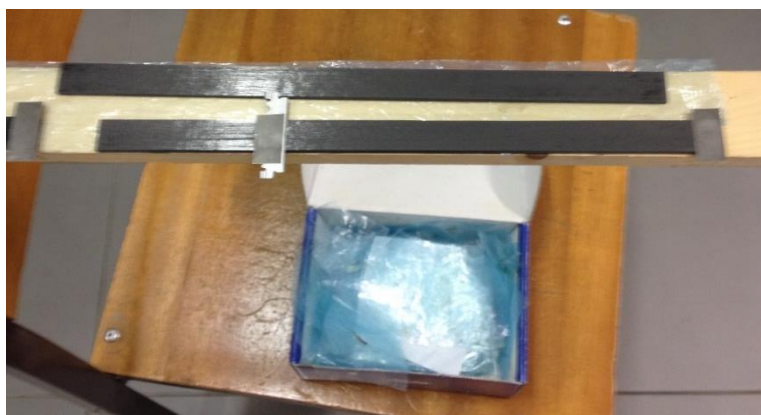


Figura 86 - Esquema de montagem dos calços nos provetes [1]

Acabada a preparação dos calços e substratos, procedeu-se à produção dos adesivos. Para o fabrico do adesivo Araldite® AV138 (Figura 87) foi efetuada uma mistura de relação mássica de 10:4 entre o adesivo e o endurecedor, respetivamente. Quanto ao Araldite® 2015, não houve necessidade de efetuar uma mistura pois este adesivo vem pronto a aplicar de fábrica. Por último, no fabrico do SikaForce® 7752 foi realizada uma mistura mássica de 5:1 entre o adesivo e o endurecedor respetivamente. Os dois adesivos em preparação foram misturados manualmente até completa homogeneização [1].



Figura 87 - Dosagem realizada na preparação do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF [1]

Na Figura 89, na Figura 88 e na Figura 90 ilustra-se a aplicação dos adesivos nos aderentes inferiores, respetivamente, Araldite® AV138, Araldite® 2015, SikaForce® 7752. Na aplicação do adesivo Araldite® 2015 usou-se o método de “Zigue-Zague”, nos restantes o adesivo foi aplicado com uma espátula [1]. De forma a dar início ao processo de cura, foram aplicados grampos nos provetes (Figura 91), com o objetivo de manter a espessura uniforme. O processo de cura foi realizado à temperatura ambiente, rondando os 20 a 22°C.



Figura 88 - Aplicação do adesivo Araldite® AV138 [1]



Figura 89 - Aplicação do adesivo Araldite® 2015 [1]



Figura 90 - Aplicação do adesivo SikaForce® 7752 [1]



Figura 91 - Fixação dos provetes para início da cura [1]

Como a lâmina de barbear, na sua extremidade, possui um raio e este não é desprezável, foi necessário propagar a fenda manualmente, com o auxílio de uma chave de fendas. Após a limpeza dos bordos dos provetes (Figura 92), foi efetuada a medição da fenda.



Figura 92 - Alisamento dos bordos dos provetes [1]

Com o propósito de melhorar a visualização do crescimento da fenda no decorrer do ensaio, foi pintada uma das faces dos provetes, com tinta de corretor. Para monitorar a propagação da fenda, foram coladas escalas graduadas de 0 a 100 mm, uma no substrato inferior, outra no substrato superior, como se pode observar na Figura 93.

Durante este processo, houve o cuidado de manter alinhadas as escalas nos substratos. As escalas foram colocadas de modo a que a marcação 10 mm coincidisse com a posição do extremo da fenda [1].



Figura 93 - Provetes do ensaio 4ENF, com as escalas coladas nas faces laterais dos provetes [1]

Na Tabela 14, estão presentes os valores de pré-fenda a_0 , obtidos após propagação manual de fenda nos provetes do ensaio 4ENF.

Tabela 14 - Tabela com valores de pré-fenda dos provetes do ensaio 4ENF [1]

Provete	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	61,02	60,95	60,35
2	60,70	60,83	60,41
3	60,57	62,14	60,52
4	59,76	61,39	59,80
5	64,72	62,34	59,79
6	62,57	69,24	60,26
7	63,45	61,34	58,36
Pré-fenda a_0 (mm)			

3.1.4 Ensaio das juntas

Os ensaios ENF e 4ENF foram executados no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP, utilizando a máquina de ensaios SHIMADZU AG-X 100 (Figura 94). Esta foi configurada para a realização de ensaio de flexão de 3 pontos. A medição da força foi feita através de uma célula de carga de 100 KN. A força sobre os provetes foi aplicada de forma contínua, porém a velocidade dos ensaios foi variável, dependendo do adesivo. Os dados força-deslocamento foram registados num computador externo, conectado à

máquina. A velocidade dos testes foi escolhida de acordo com a deformação desejada e adequada de modo a permitir a correta medição da fenda durante a propagação. Como esta ocorre a um valor constante de G_{IIc} , foram efetuadas 20 a 30 medições para se conseguir construir a curva resistente (curva-R) [82]. Todos os ensaios foram elaborados sob condições de temperatura e humidade ambiente [2].



Figura 94 - Máquina de ensaios SHIMADZU AG-X 100 [2]

3.1.4.1 Esquema do ensaio experimental ENF

a Figura 95 ilustra-se o ensaio experimental ENF. Este ensaio assemelha-se a uma viga simplesmente apoiada, com uma carga concentrada a meio vão. Os rolos inferiores de suporte são rolamentos que rolam praticamente sem atrito em torno de um veio, para que os provetes possam deformar livremente durante a solitação. Os rolos de suporte foram espaçados a uma distância $2L$ (ou seja, 200 mm), através de uma marca efetuada para o efeito. A propagação da fenda foi monitorizada utilizando uma câmara de alta resolução. Esta foi colocada de forma paralela ao provete [2], apoiada sob uma base sólida e espaçada 120 mm do provete, de forma a ser possível visualizar a escala desde o início até ao cilindro de carga. As imagens do ensaio (Figura 95) foram registadas à taxa de 5 Hz, até que a fenda atingisse o ponto de carregamento, ou seja, quando houvesse uma ação combinada do corte com compressão na fenda, o que inviabiliza a medição correta de G_{IIc} [2].

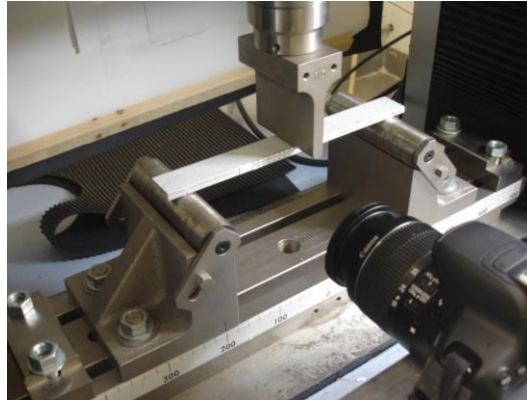


Figura 95 - Esquema do ensaio experimental ENF [2]

Nas figuras seguintes, apresenta-se um exemplo do processo de aquisição de imagens, referente ao provete 7 do ensaio ENF, com o adesivo SikaForce® 7752. Na Figura 96 é ilustrado o provete antes do início do ensaio, na Figura 97 mostra-se a propagação da fenda e na Figura 98 está exibida a fenda no ponto de carregamento, ou seja, no momento em que a fenda deixa de sofrer esforços puramente de corte e passa a sofrer também esforços de compressão pois, devido à proximidade da fenda da ferramenta de carga, esta tende a comprimir a camada adesiva.

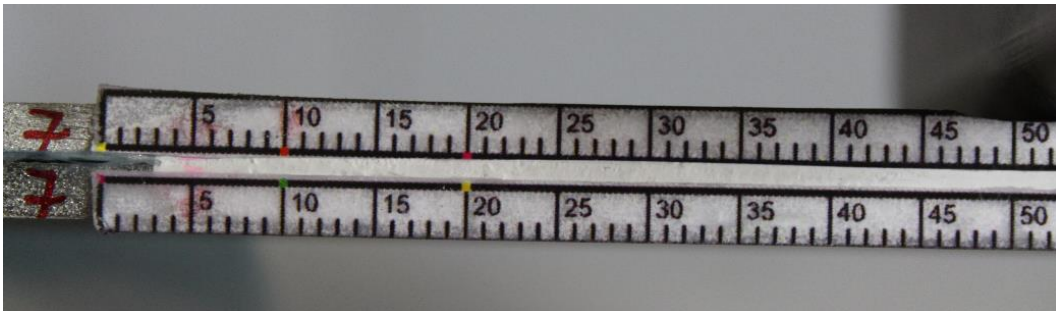


Figura 96 - Primeira imagem do provete 7 do ensaio ENF [2]



Figura 97 - Imagem do provete 7 no decorrer do ensaio ENF [2]

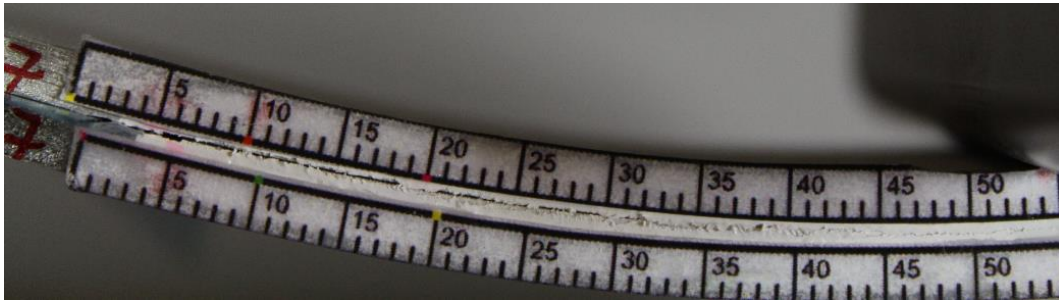


Figura 98 - Imagem final do provete 7 do ensaio ENF [2]

3.1.4.2 Esquema do ensaio experimental 4ENF

O ensaio representado na Figura 99, ao nível dos pontos de apoio, é idêntico ao ensaio ENF. Contudo, neste a aplicação da carga é efetuada por dois roletes superiores. Para o efeito, foi realizada uma ferramenta especial desenvolvida por de Oliveira [1] (Figura 100), para induzir a carga sobre o provete.

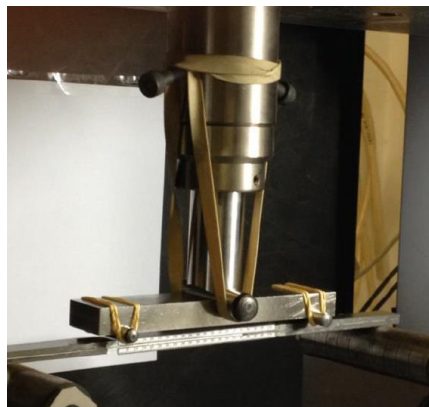


Figura 99 - Esquema do ensaio experimental 4ENF [1]



Figura 100 - Ferramenta para aplicação de carga do ensaio 4ENF [1]

Similarmente ao ensaio ENF, as imagens do ensaio foram obtidas a uma taxa de 5 Hz e o posicionamento relativo entre a câmara e o provete foi também idêntico cerca de 120

mm. Na colocação da câmara houve o cuidado de garantir que esta se encontrava paralela à linha do adesivo. [1].

3.1.5 Resultados obtidos

Neste subcapítulo começa-se por apresentar os dados experimentais obtidos dos ensaios ENF e 4ENF realizados por Azevedo [2] e de Oliveira [1], respetivamente. Seguidamente, exhibe-se um estudo efetuado aos dados referidos, com o objetivo de determinar G_{IIc} para os dois ensaios e para cada adesivo. Na parte final, é elaborada uma análise crítica aos resultados adquiridos.

3.1.5.1 Curvas força-deslocamento ($P-\delta$)

Como já mencionado, os dados $P-\delta$ experimentais foram obtidos com recurso a um sistema de aquisição de dados, instalado no equipamento de ensaio SHIMADZU AG-X 100 atrás descrito. De seguida, apresenta-se os resultados adquiridos para cada ensaio e respetivo adesivo. Após análise dos provetes e do respetivo registo fotográfico dos ensaios, observou-se que a rotura se deu de forma coesiva para ambos os ensaios, ENF e 4ENF (Figura 101, Figura 102), demonstrando, dessa forma, que a execução das juntas e todos os processos inerentes se realizaram de forma correta, antevendo-se bons resultados experimentais.

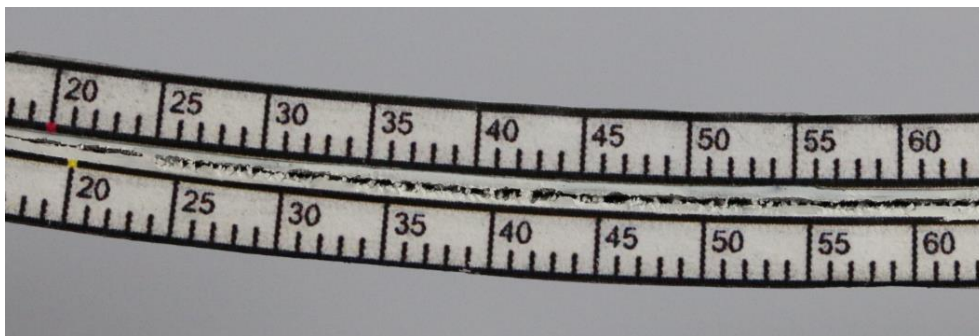


Figura 101 - Exemplo representativo do modo de rotura do provete 7, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF [1]

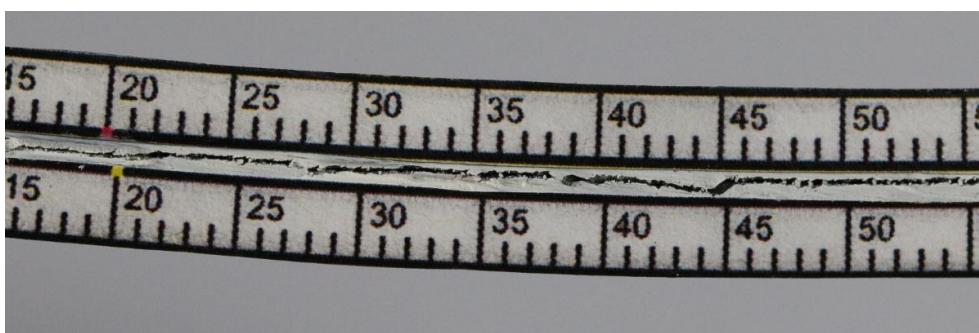


Figura 102 - Exemplo representativo do modo de rotura do provete 1, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF [1]

3.1.5.1.1 Curvas P - δ do ensaio ENF, do adesivo Araldite® AV138

Na Tabela 15 transcrevem-se os valores de carga máxima (P_{\max}) e respetivo deslocamento máximo (δ_{\max}) obtidos para este ensaio, observando-se que o valor de $P_{\max}=681,58$ N, enquanto que $\delta_{\max}=8,99$ mm. A velocidade do ensaio foi de 0,75 mm/min. Como se pode verificar na Figura 103, as curvas apresentam uma boa concordância entre elas, exceto em dois casos, provete 2 e provete 3. Esta diferença foi provocada por um problema de fabrico, em que o valor de a_0 realizado manualmente foi bastante inferior que os restantes, o que originou que o pico de carga fosse mais elevado [2]. Este fator foi, no entanto, tido em conta nos cálculos que se seguem, não afetando o valor de G_{IIc} . Pela análise das curvas, percebe-se que se trata de um adesivo frágil pois, logo a seguir ao valor de P_{\max} , houve uma queda abrupta no seu valor. Devido à rigidez, tipologia do ensaio e baixa ductilidade do adesivo, nota-se que o comportamento da propagação da fenda se deu de forma instável. Não obstante, na zona elástica, as curvas têm um comportamento muito similar entre elas.

Tabela 15 - Valores de carga máxima e deslocamento máximo do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

Provete	P_{\max} (N)	δ_{\max} (mm)
1	458,96	4,30
2	681,58	4,97
3	671,01	4,55
4 ^{a)}	451,04	8,99
5	471,29	4,07
6	464,54	4,08
7	439,53	4,06
8	431,89	4,04
Valor médio	508,73	4,88
Desvio padrão	104,24	1,69
^{a)} Ensaio não validado		

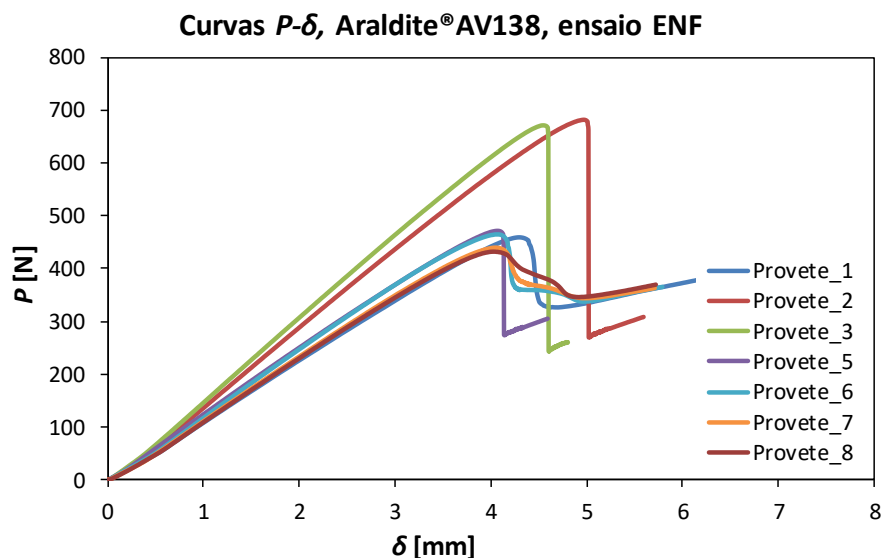


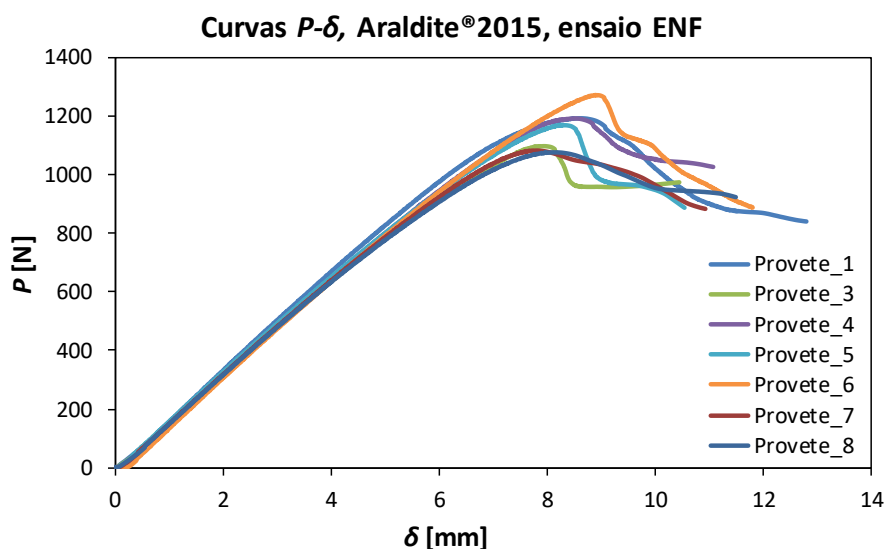
Figura 103 - Curvas P - δ do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

3.1.5.1.2 Curvas P - δ do ensaio ENF, do adesivo Araldite® 2015

Após análise dos dados e curvas, apresentados na Tabela 16 e na Figura 104 respetivamente, é possível constatar que foi registado um valor de $P_{\max}=1193,22$ N e de $\delta_{\max}=9,31$ mm. A velocidade considerada para este ensaio foi de 2 mm/min. Contrariamente ao exemplo anterior, este adesivo apresenta uma maior ductilidade. Esta condição é perceptível na zona de P_{\max} , onde se verifica uma maior suavização das curvas nessa zona. Genericamente, as curvas apresentam uma boa concordância entre elas, tanto ao nível da zona elástica, como na zona de propagação de fenda. Este adesivo evidencia, também, um processo de deformação até à rotura dividido em três etapas. Na primeira etapa, observa-se um comportamento linear-elástico do material onde existe reversibilidade da deformação; na segunda etapa, verifica-se a perda de linearidade que corresponde ao início da plastificação do adesivo; e na terceira e última etapa, dá-se a plastificação até à rotura completa da junta. O resultado do provete 2 não foi considerado válido.

Tabela 16 - Valores de carga máxima e deslocamento máximo do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Provete	P_{\max} (N)	δ_{\max} (mm)
1	1193,22	8,49
2 ^{a)}	1162,62	9,31
3	1097,85	7,94
4	1192,65	8,52
5	1170,06	8,27
6	1272,76	8,89
7	1082,77	7,82
8	1076,84	7,97
Valor médio	1156,10	8,40
Desvio padrão	67,20	0,51
^{a)} Ensaio não validado		

Figura 104 - Curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

3.1.5.1.3 Curvas P - δ do ensaio ENF, do adesivo SikaForce® 7752

Este ensaio, cujos valores e curvas P - δ se demonstram na Tabela 17 e na Figura 105, respetivamente, em comparação com as juntas adesivas anteriores, mostra uma maior ductilidade, sendo esta característica visível tanto nas curvas P - δ , como no valor de δ_{\max} . É também perceptível, pelas curvas, os três patamares referidos no adesivo Araldite® 2015, no ensaio ENF. Contudo, neste caso, esta característica está melhor definida. Este ensaio registou um valor de $P_{\max} = 1191,70$ N e de $\delta_{\max} = 15,67$ mm. A velocidade considerada foi de 2 mm/min. De acordo com o registo fotográfico, não foi possível realizar a leitura da propagação de fenda, o que se deve ao facto da camada de tinta romper primeiro que o adesivo [2], levando a leituras erradas dos valores de

comprimento de fenda. Pelo exposto, para este ensaio, o valor de G_{IIc} foi calculado apenas pelo método CBBM.

Tabela 17 - Valores de carga máxima e deslocamento máximo do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

Provete	P_{max} (N)	δ_{max} (mm)
1	1191,70	15,16
2	1106,93	13,03
3	1103,61	14,87
4	1079,21	13,72
5	1127,82	14,78
6	1187,12	15,67
7	1181,81	13,67
8 ^{a)}	1062,62	13,65
Valor médio	1130,10	14,32
Desvio padrão	50,86	0,92
a) Ensaio não validado		

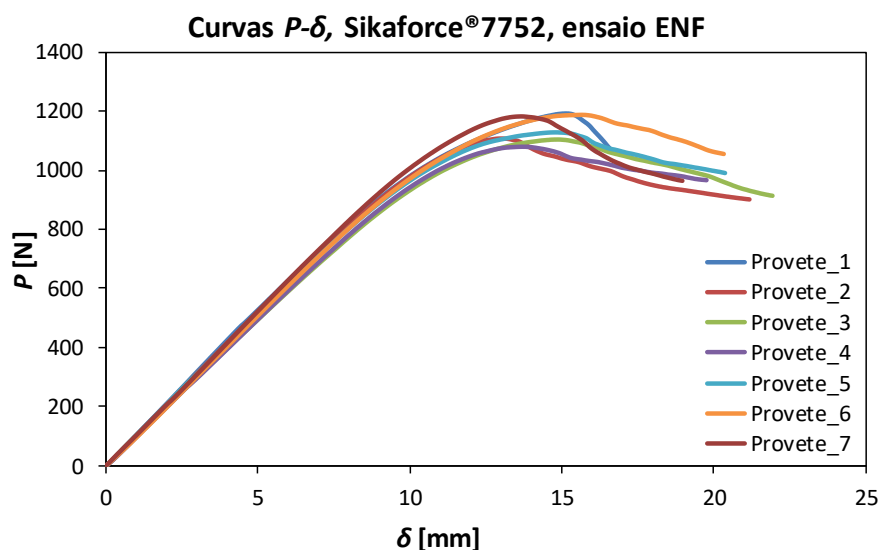


Figura 105 - Curvas P - δ do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

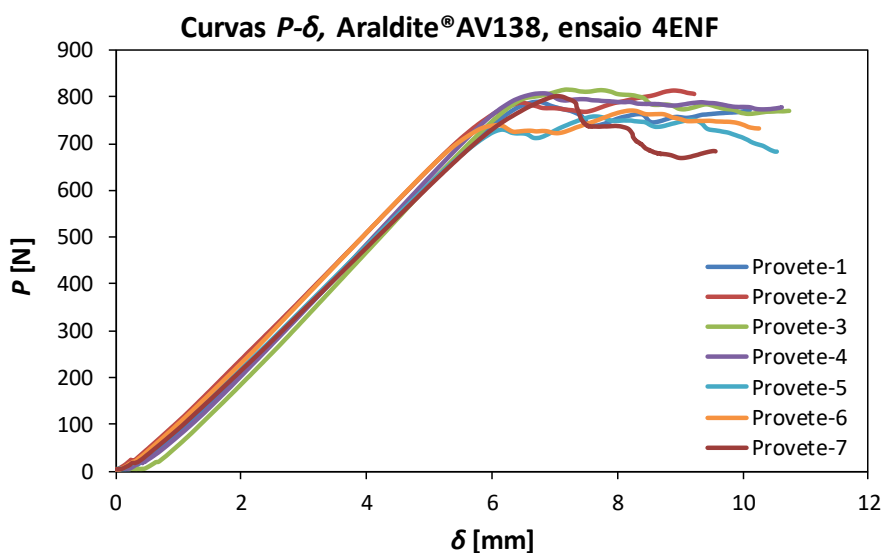
3.1.5.1.4 Curvas P - δ do ensaio 4ENF, do adesivo Araldite® AV138

Na Tabela 18 apresentam-se os valores de P_{max} e respetivo δ_{max} , obtidos dos provetes do ensaio 4ENF ligados com o adesivo Araldite® AV138, obtendo-se os seguintes valores: $P_{max}=815,42$ N e $\delta_{max}=8,90$ mm. A velocidade considerada para este ensaio foi de 1,5 mm/min.

Tabela 18 - Valores de carga máxima e deslocamento máximo do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Provete	P_{\max} (N)	δ_{\max} (mm)
1	789,32	6,74
2	813,36	8,90
3	815,42	7,19
4	807,39	6,81
5	757,96	7,63
6	770,63	8,22
7	801,28	7,06
Valor médio	793,62	7,51
Desvio padrão	22,11	0,80

Na Figura 106 é possível observar-se as curvas P - δ deste ensaio. Estas apresentam uma boa similitude entre elas, tanto ao nível da rigidez no domínio elástico, como nos valores de P_{\max} e respetivo δ_{\max} , sugerindo que os provetes foram testados em condições muito semelhantes. Outro fator a evidenciar é o patamar na zona de P_{\max} , que mostra uma propagação de fenda estável.

Figura 106 - Curvas P - δ do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

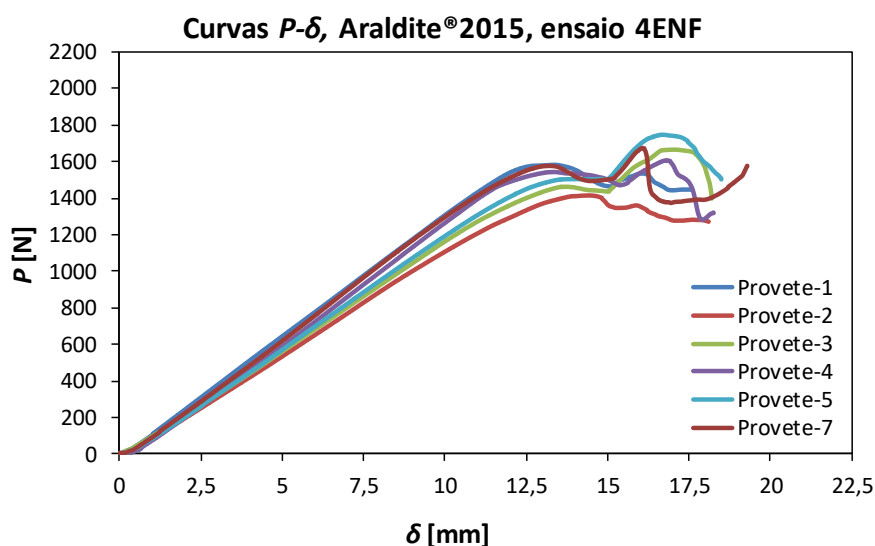
3.1.5.1.5 Curvas P - δ do ensaio 4ENF, do adesivo Araldite® 2015

Na Tabela 19 podem-se visualizar os valores de P_{\max} e respetivo δ_{\max} das juntas, com o adesivo Araldite® 2015. Tendo-se obtido os seguintes valores: $P_{\max}=2081,06$ N e $\delta_{\max}=17,46$ mm. Estes valores são referentes ao provete 6, e como este apresentou um comportamento muito distinto dos seus pares, tanto ao nível da propagação de fenda, como nos valores de carga, não foi considerado neste estudo. A velocidade considerada para este ensaio foi de 2,5 mm/min.

Tabela 19 - Valores de carga máxima e deslocamento máximo do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Provete	P_{\max} (N)	δ_{\max} (mm)
1	1582,94	13,34
2	1415,17	14,44
3	1665,97	17,05
4	1607,47	16,80
5	1747,7	16,67
6 ^{a)}	2081,06	17,46
7	1675,00	16,07
Valor médio	1682,19	15,98
Desvio padrão	204,30	1,52
a) Ensaio não validado		

Na Figura 108 apresentam-se as curvas P - δ que, retirando o provete previamente assinalado, mostram uma boa concordância entre elas, tanto ao nível da rigidez no domínio elástico, como nos valores de P_{\max} e respetivo δ_{\max} .

Figura 107 - Curvas P - δ do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

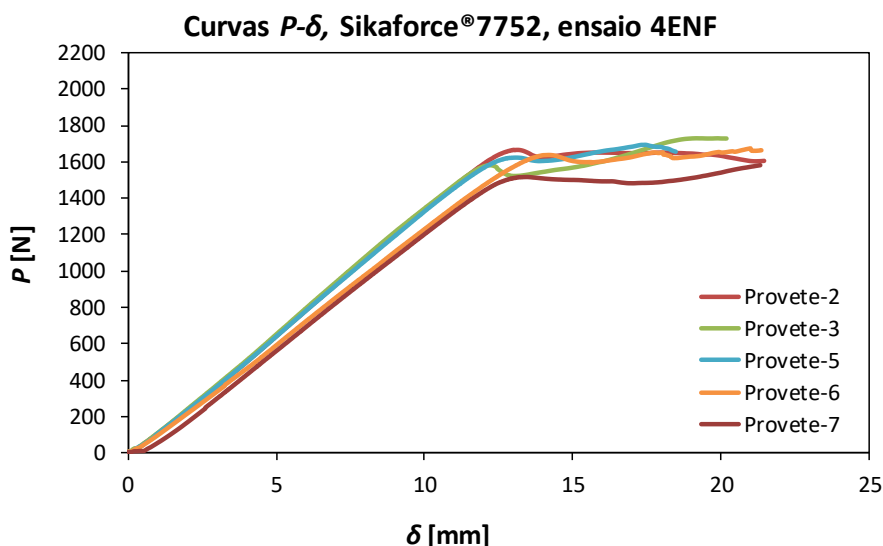
3.1.5.1.6 Curvas P - δ do ensaio 4ENF, do o adesivo SikaForce® 7752

Seguidamente, na Tabela 20, estão expostos os valores de P_{\max} e respetivo δ_{\max} das juntas com o adesivo SikaForce® 7752. Como é observável, os valores de P_{\max} e δ_{\max} são, respetivamente, $P_{\max} = 1914,58$ N e $\delta_{\max} = 21,81$ mm. Como no adesivo anterior foi considerada uma velocidade de 2 mm/min para este ensaio.

Tabela 20 - Valores de carga máxima e deslocamento máximo do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

Provete	P_{\max} (N)	δ_{\max} (mm)
1 ^{a)}	1832,79	21,81
2	1666,05	13,12
3	1729,95	19,17
4 ^{a)}	1914,58	20,12
5	1694,17	17,44
6	1674,19	21,00
7	1581,78	21,33
Valor médio	1727,64	19,14
Desvio padrão	111,84	3,04
^{a)} Ensaios não validados		

Neste ensaio, cujas curvas se encontram representadas na Figura 108, não foram considerados válidos para efeitos de estudo, os provetes 1 e 4. Tirando estes dois casos, as curvas apresentam uma boa semelhança entre elas. Nota-se, também, que a partir do ponto de P_{\max} o patamar se mantém, sendo indicador da estabilidade da propagação da fenda.

Figura 108 - Curva P - δ do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

3.1.5.2 Comparativo dos valores obtidos através das curvas P - δ dos ensaios ENF e 4ENF

Na Figura 109 ilustra-se um comparativo entre os valores médios de carga para os dois ensaios em estudo e respetivos adesivos. Como é observável, no ensaio ENF os valores médios de carga máxima foram em média 34% inferiores, relativamente aos respetivos valores no ensaio 4ENF. Esta diferença era expetável, por causa do efeito do atrito

presente neste ensaio [17]. As cargas médias máximas nos adesivos SikaForce® 7752 e Araldite® 2015 foram muito idênticas, não sendo por isso possível caracterizar de imediato o tipo de adesivo. Todavia, após análise dos deslocamentos máximos médios da Figura 110, torna-se evidente aumento do deslocamento médio à carga máxima pelo aumento da flexibilidade do adesivo.

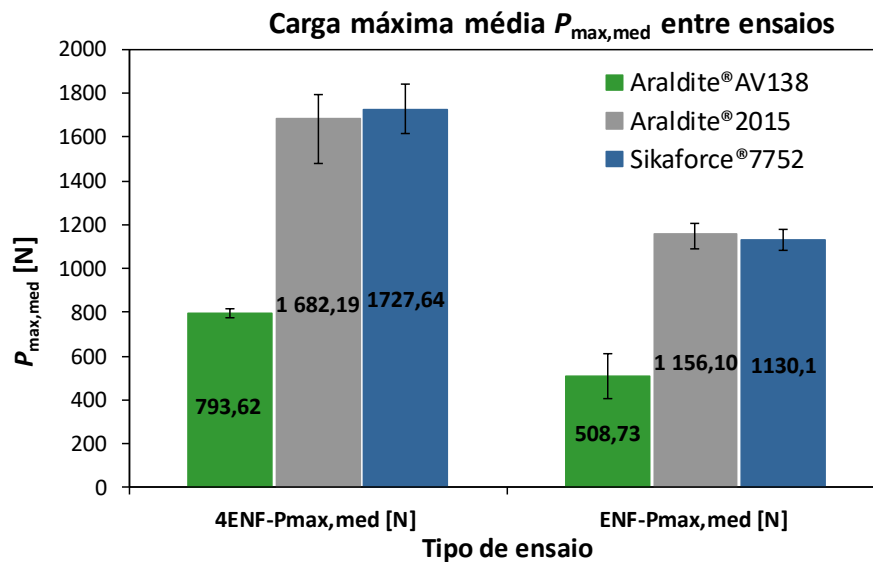


Figura 109 - Comparativo da carga máxima média ($P_{\max,med}$) nos ensaios ENF e 4ENF

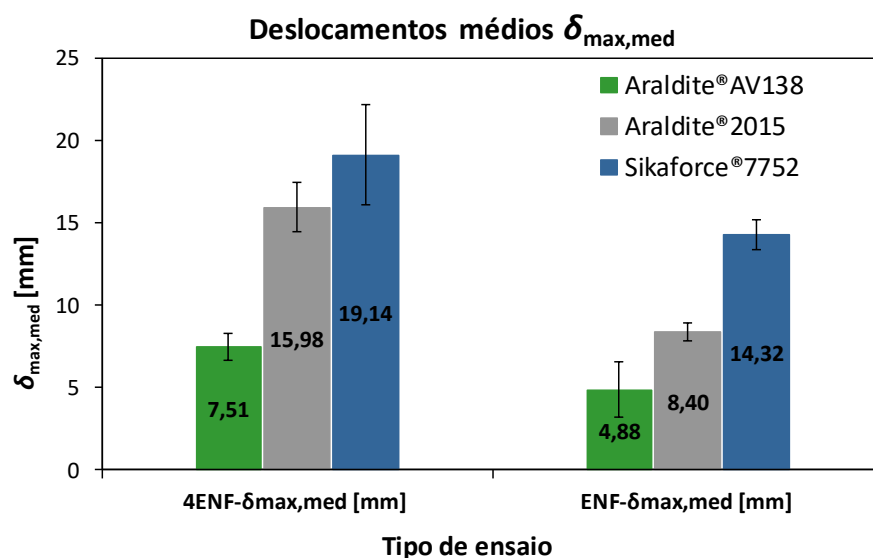


Figura 110 - Comparativo entre deslocamentos máximos médios ($\delta_{\max,med}$) nos ensaios ENF e 4ENF

3.1.5.3 Tenacidade ao corte em modo II

Atualmente, existem diversos métodos de redução com intuito da medição de G_{IIc} , entre os quais se destacam: CCM, DBT, CBT e CBBM. Estes baseiam-se na evolução de G_{IIc} , em

função do comprimento de fenda (curvas- R), para extrair esse valor. Nos dois ensaios em estudo (ENF e 4ENF) é expectável que este valor seja constante durante a propagação da fenda desde o seu início até ao ponto onde a punção começa a exercer compressão sobre os substratos. A partir do ponto referido torna-se mais difícil a medição do comprimento de fenda.

Neste trabalho foram utilizados os quatro métodos referidos para a medição de G_{IIc} no ensaio ENF; ao passo que no ensaio 4ENF foram apenas utilizados os métodos CCM e CBT, devido ao facto de serem os únicos disponíveis. Pese, no entanto, o facto da metodologia CCM ter tendência a apresentar melhores resultados devido à sua menor insensibilidade a variações geométricas e características dos materiais [17]. No método CBT no ensaio 4ENF foi utilizada a correção do atrito, de acordo com de Oliveira [1]. A não utilização deste origina discrepâncias elevadas entre os valores de G_{IIc} , pois este método neste ensaio tende a sobreavaliar o valor de G_{IIc} , sendo assim foram usados os seguintes coeficientes de atrito (μ): $\mu=13,5$, $\mu=12$, $\mu=8$, para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente, de acordo com de Oliveira [1]. No ensaio 4ENF, o método de referência utilizado foi o CCM, ao passo que no ensaio ENF foi usado o método CBBM. Pode encontrar-se a formulação destes métodos no subcapítulo 2.3.2. No ensaio ENF e no caso particular do adesivo SikaForce® 7752, só foi utilizado o método CBBM, porque este não precisa da medição do comprimento de fenda, condição necessária, tendo em conta o problema atrás referido, em que a tinta rompeu primeiro que a camada adesiva, tornando impossível a leitura da fenda no decorrer do ensaio. Nos próximos subcapítulos serão apresentados e discutidos os resultados obtidos através da utilização destas metodologias de cálculo.

3.1.5.3.1 Valores de G_{IIc} do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

Na Tabela 21 são apresentados os valores de G_{IIc} , respetiva média e desvio padrão, obtidos através da aplicação dos diferentes métodos de redução aos provetes validados, ligados com adesivo Araldite® AV138.

Na Figura 111 e na Figura 112 são ilustradas duas curvas- R (proвете 6 e provete 7) representativas dos valores de G_{IIc} obtidos. Como se pode verificar, todas apresentam uma boa concordância e repetibilidade no valor de patamar. Como se pode constatar nos dois exemplos apresentados, o método CBT tende a subestimar o valor de G_{IIc} [45], enquanto o método CCM exibe dificuldade no ajuste do polinómio $c=f(a)$. O método CBBM, para além das vantagens referidas em capítulos anteriores, demonstra ser bastante robusto, pois apresenta um patamar estável em todos os provetes.

Tabela 21 - Valores de G_{IIC} [N/mm] obtidos por diferentes métodos do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

Provete	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	0,460	0,471	0,412	0,542
2	(a)	0,644	0,567	0,812
3	(a)	0,477	0,478	0,696
5	(a)	0,457	0,455	0,583
6	0,572	0,543	0,488	0,562
7	0,576	0,570	0,494	0,572
8	0,668	0,578	0,503	0,581
4	Ensaio não considerado			
(a) Não foi possível o ajuste do polinómio $c = f(a)$				
Valor Médio	0,569	0,534	0,485	0,621
Desvio padrão	0,085	0,069	0,047	0,098

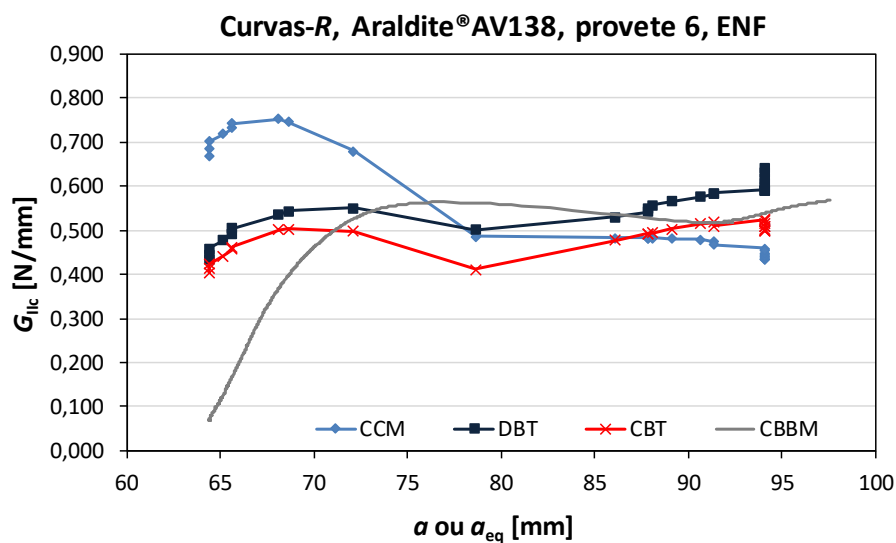


Figura 111 - Curvas-R do provete 6 obtidas por diferentes métodos, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

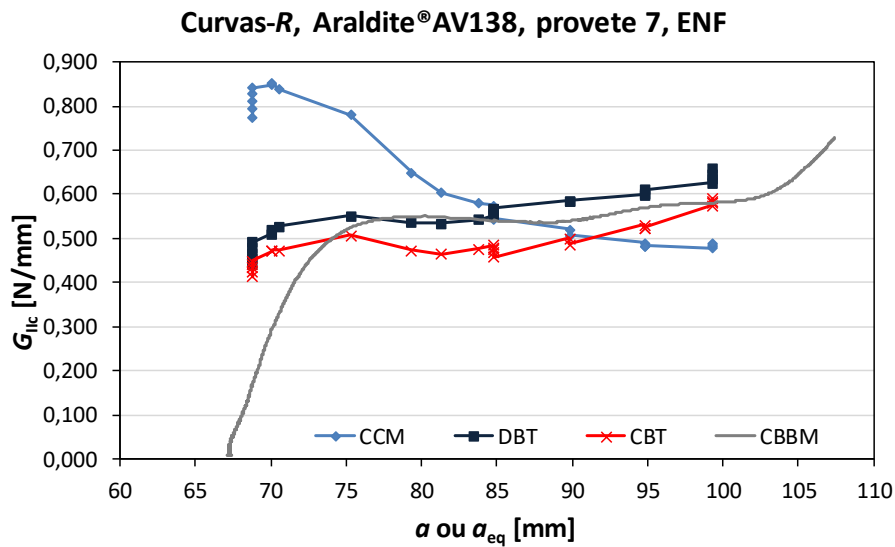


Figura 112 - Curvas-R do provete 7 obtidas por diferentes métodos, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

A Figura 113 e a Figura 114 mostram uma melhor visualização dos resultados obtidos de G_{IIc} , apresentados na Tabela 21. Como é verificável, as curvas da Figura 113 mostram uma tendência de crescimento a patamar aproximadamente constante, com um bom acordo entre os métodos, não havendo grandes flutuações de valores.

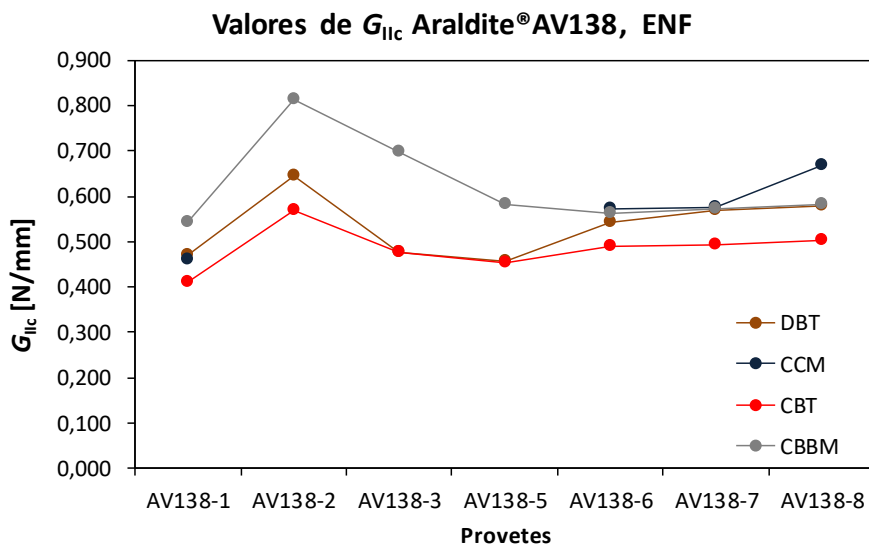


Figura 113 - Valores de G_{IIc} obtidos por diferentes métodos, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

A Figura 114 mostra, de uma forma mais detalhada, a comparação entre os valores médios. Se se considerar o CBBM como o método de referência [45] devido à sua robustez na estimativa dos valores de G_{IIc} , pode concluir-se que o CCM apresenta um valor 8,37% inferior, o DBT exibe um valor 13,98% inferior e, por último, o CBT revela um valor 21,87% inferior, confirmando, deste modo, que este método tende a

subestimar o valor de G_{IIC} [45]. Resumindo, os valores médios e respectivos desvios são muito semelhantes, afirmando a boa execução e fiabilidade dos ensaios.

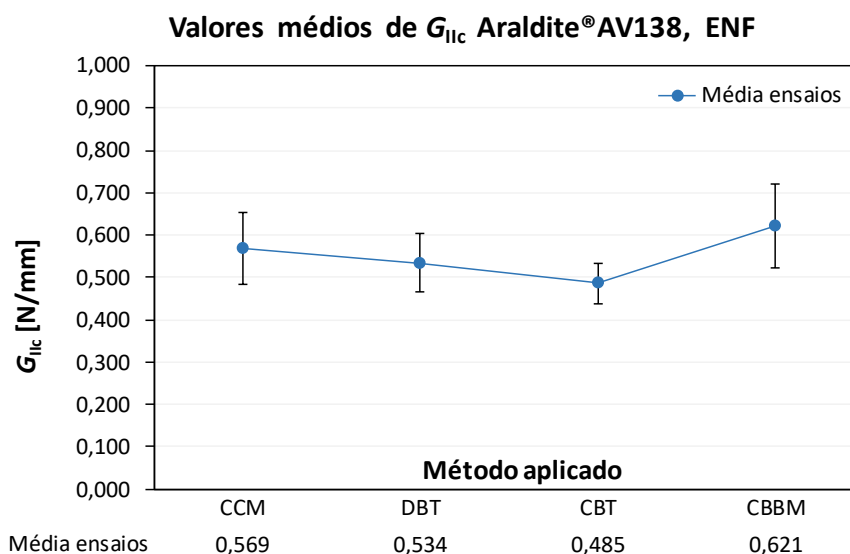


Figura 114 - Valores médios de G_{IIC} obtidos por diferentes métodos, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

3.1.5.3.2 Valores de G_{IIC} do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Na Tabela 22 resume-se os dados de G_{IIC} obtidos a partir dos ensaios válidos, observando-se uma boa similitude entre amostras.

Tabela 22 - Valores de G_{IIC} [N/mm] obtidos por diferentes métodos, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Provete	CCM	DBT	CBT	CBBM
1	3,702	3,273	2,876	3,410
2	Ensaio não considerado			
3	3,346	2,315	2,306	2,561
4	3,720	2,886	2,680	2,967
5	3,814	2,773	2,636	2,636
6	4,112	3,061	2,734	3,131
7	3,263	2,716	2,709	2,904
8	4,261	2,780	2,579	2,898
Valor Médio	3,746	2,829	2,646	2,929
Desvio padrão	0,365	0,299	0,176	0,287

Tal como sucedido com o adesivo anterior (Araldite® AV138) as curvas- R , na sua generalidade e nos exemplos apresentados (Figura 115 e Figura 116), mostram um patamar praticamente constante, todavia a sua extensão é substancialmente inferior, o que é explicado pela maior ductilidade do adesivo Araldite® 2015. O fator agora referido

traduz-se num aumento da ZPF à frente da fenda, levando a que os efeitos compressivos da punção de carregamento se façam sentir antes do observado no adesivo anterior (Araldite® AV138).

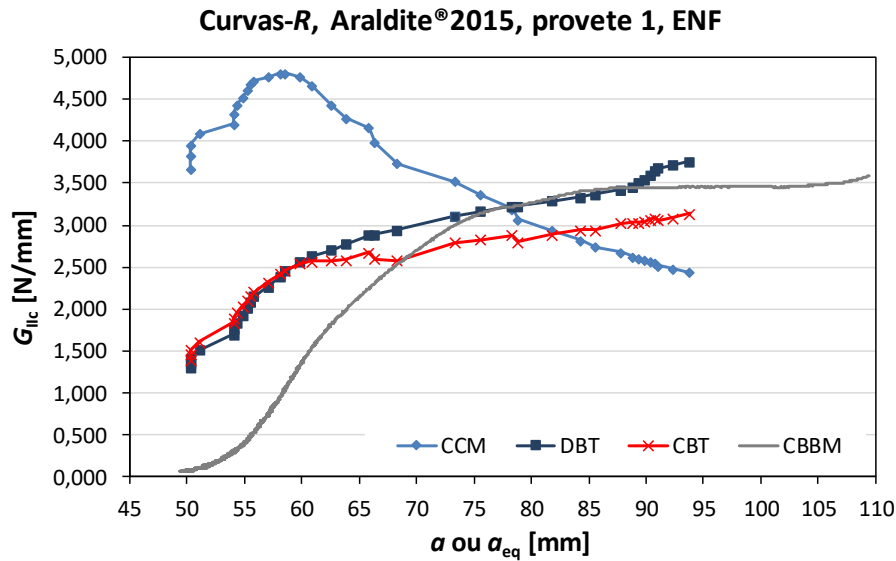


Figura 115 - Curvas-R do provete 1 obtidas por diferentes métodos, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

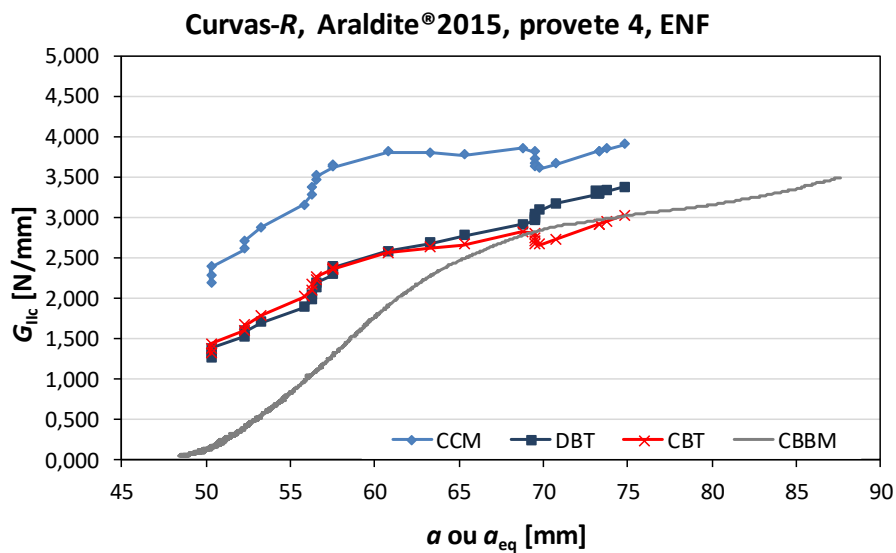


Figura 116 - Curvas-R do provete 4 obtidas por diferentes métodos, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Seguidamente, na Figura 117, observa-se a tendência de valores de G_{IIc} . Tal como no adesivo anterior, verifica-se um bom comportamento entre as curvas e entre os valores obtidos.

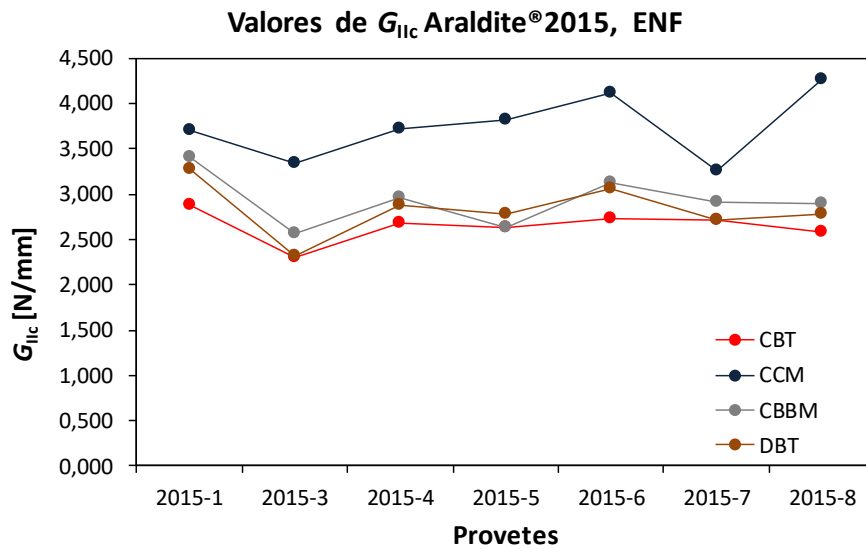


Figura 117 - Valores de G_{IIC} obtidos por diferentes métodos, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Tomando como método de referência o CBBM [45], os diferentes métodos apresentam os seguintes desvios percentuais: o CCM 27,86% superior, o DBT 3,43% inferior e o CBT 9,69% inferior, evidenciando que este método tem tendência a subestimar o valor de G_{IIC} [45].

Sumariamente, e como se verifica, os valores médios e respetivos desvios são muito similares, atestando, assim, a boa execução e robustez dos ensaios. Como é possível observar-se na Figura 118, o método CCM registou o maior valor médio de G_{IIC} , o que se deve às flutuações registadas, por causa da dificuldade no ajuste do polinómio $c=f(a)$.

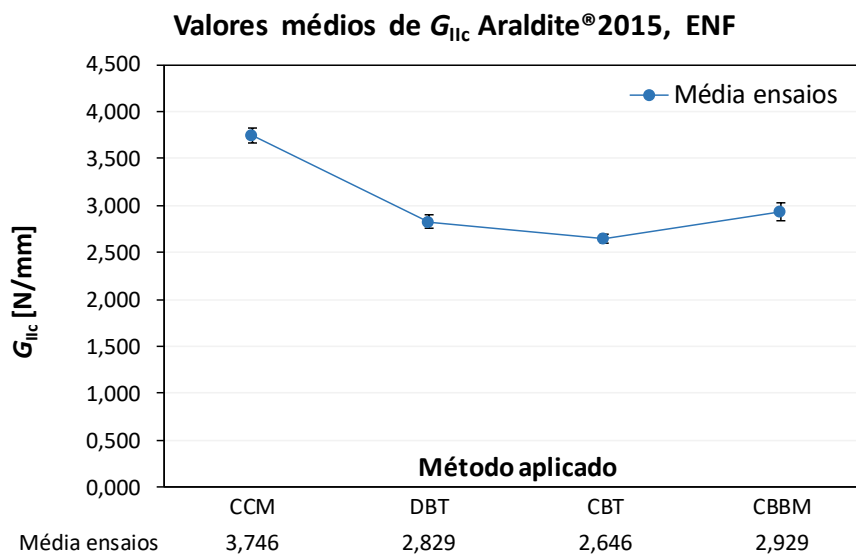


Figura 118 - Valores médios de G_{IIC} obtidos por diferentes métodos, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

3.1.5.3.3 Valores de G_{IIC} do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

Como já foi referido, não foi possível efetuar a leitura do valor da fenda nos provetes com este adesivo, devido à tinta usada para melhorar a visualização da fenda estalar prematuramente relativamente à propagação da mesma. Nesse sentido, só houve a possibilidade de realizar o estudo de G_{IIC} através do método CBBM, cujos valores obtidos se podem visualizar na Tabela 23.

Tabela 23 - Valores de G_{IIC} [N/mm] obtidos pelo método CBBM, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

Provete	CBBM
1	5,825
2	5,852
3	5,467
4	4,839
5	5,652
6	5,675
7	5,613
8	Ensaio não considerado
Valor Médio	5,560
Desvio padrão	0,344

Nos ensaios com este adesivo foi mais difícil a medição de G_{IIC} com recurso às curvas-R pois este adesivo, sendo mais dúctil, apresenta um patamar mais reduzido do que nos casos anteriores, como é observável na Figura 119 e na Figura 120, representativas dos provetes. Todavia, apesar deste fator, foi possível obter valores bastantes coerentes com uma boa concordância entre si.

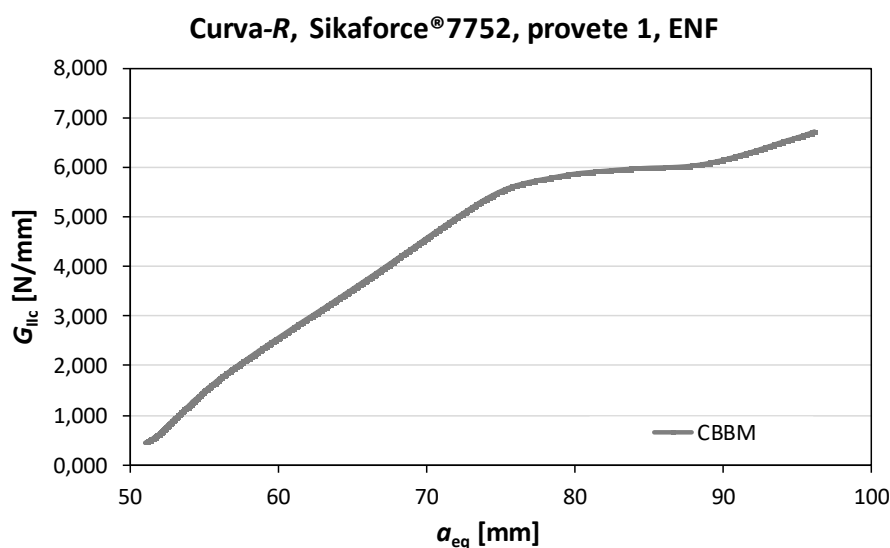


Figura 119 - Curva-R do provete 1 obtidas pelo método CBBM, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

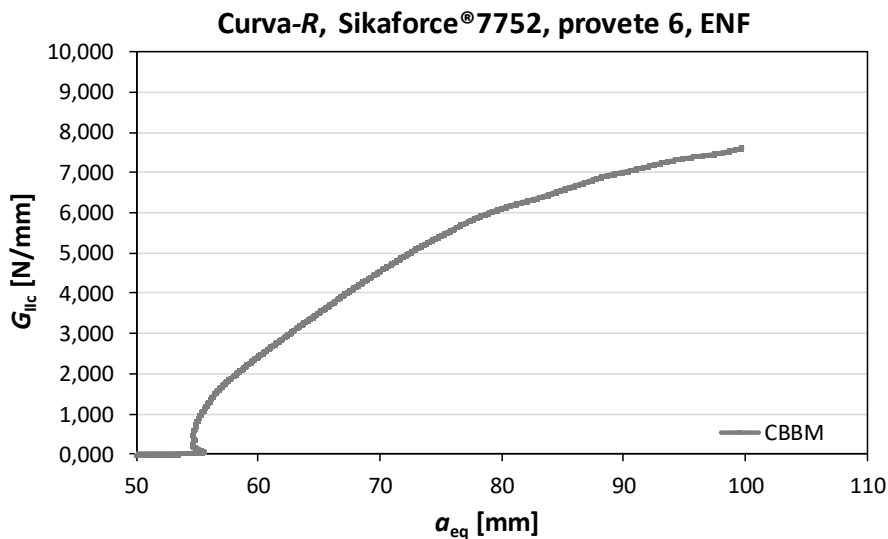


Figura 120 - Curva-R do provete 6 obtidas pelo método CBBM, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

De seguida (Figura 121) mostra-se a curva tendência de G_{IIc} , obtida dos vários provetes. Após análise, é possível verificar que houve uma boa semelhança de valores com exceção do provete 4, que apresenta um valor inferior aos seus pares. Mais uma vez se confirma a coerência dos resultados.

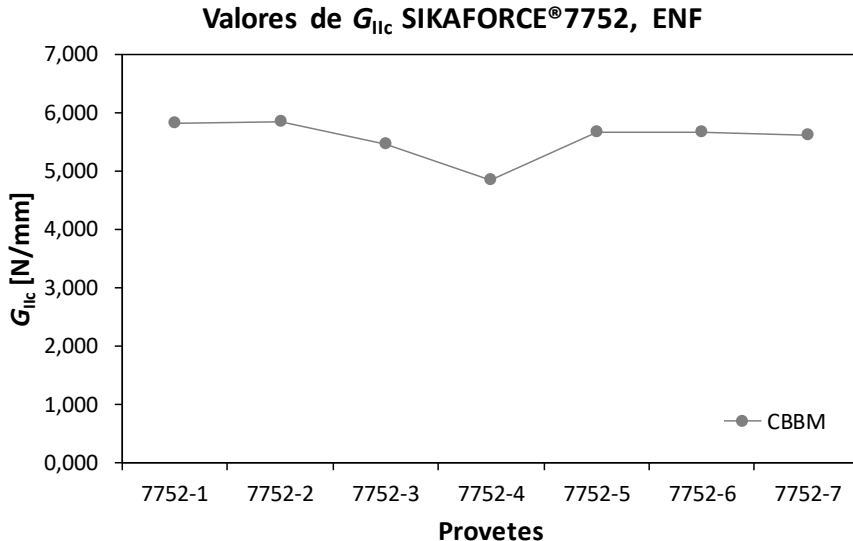


Figura 121 - Valores de G_{IIc} obtidos pelo método CBBM, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

De modo a efetuar uma análise global ao ensaio ENF, de seguida (Tabela 24 e Figura 122) transcreve-se e figura-se respetivamente os valores médios e respetivos desvios padrão de G_{IIc} , adquiridos pelos diferentes métodos de redução. Como é observável, o adesivo SikaForce® 7752 é claramente o mais dúctil, seguindo-se os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138, sendo este último o mais frágil. De uma forma global, e tendo

por base a Figura 122, os valores médios não apresentam uma grande discordância entre si, validando assim os ensaios efetuados. Por outro lado, confirma-se a tendência do método CBT em subestimar o valor de G_{IIC} [45], registrando-se também o valor discordante de G_{IIC} pelo método CCM, por via da dificuldade no ajuste do polinómio $c=f(a)$.

Tabela 24 - Valores médios e respetivos desvios de G_{IIC} [N/mm] obtidos pelos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM do ensaio ENF

	CCM	DBT	CBT	CBBM
Araldite® AV138	0,569±0,085	0,534±0,069	0,485±0,047	0,621±0,098
Araldite® 2015	3,746±0,365	2,829±0,299	2,646±0,176	2,929±0,287
SikaForce® 7752	-	-	-	5,560±0,344

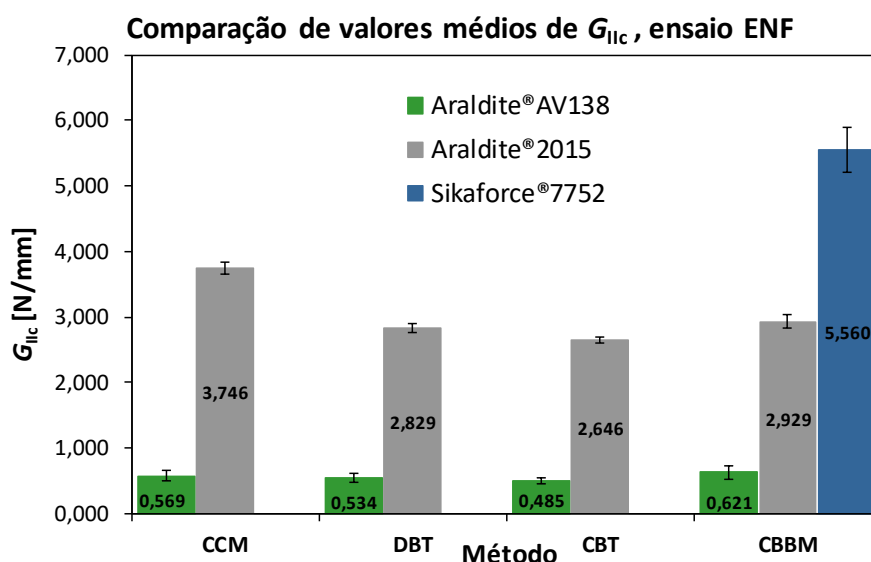


Figura 122 - Comparação de valores médios de G_{IIC} dos 3 adesivos obtidos pelos diferentes métodos, do ensaio ENF

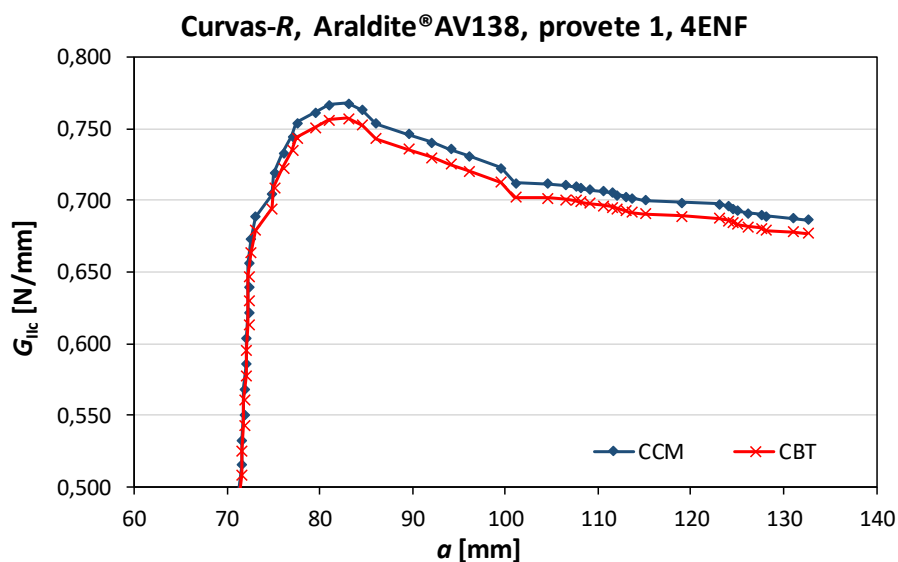
3.1.5.3.4 Valores de G_{IIC} do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Neste ensaio foram utilizados dois métodos de redução (CCM e CBT), em virtude de serem os únicos disponíveis. No método CBT foi efetuada uma correção do atrito de acordo com Wang et al. [52], tendo sido adotado para este adesivo o valor de $\mu = 13,5$, de acordo com de Oliveira [1]. Na Tabela 25 transcrevem-se os valores obtidos após a aplicação dos métodos referidos.

Tabela 25 - Valores de G_{IIC} [N/mm] obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Provete	CCM	CBT ($\mu = 13,5$)
1	0,712	0,668
2	0,671	0,752
3	0,722	0,798
4	0,714	0,771
5	0,647	0,638
6	0,818	0,645
7	0,794	0,692
Valor Médio	0,726	0,709
Desvio padrão	0,062	0,064

Na Figura 123 e na Figura 124 reproduzem-se duas curvas- R (provete 1 e provete 4) representativas dos ensaios efetuados. Globalmente, todas as curvas apresentaram bons resultados, com patamares estáveis, sendo possível obter valores bastante coerentes de G_{IIC} .

Figura 123 - Curvas- R do provete 1 obtidas pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

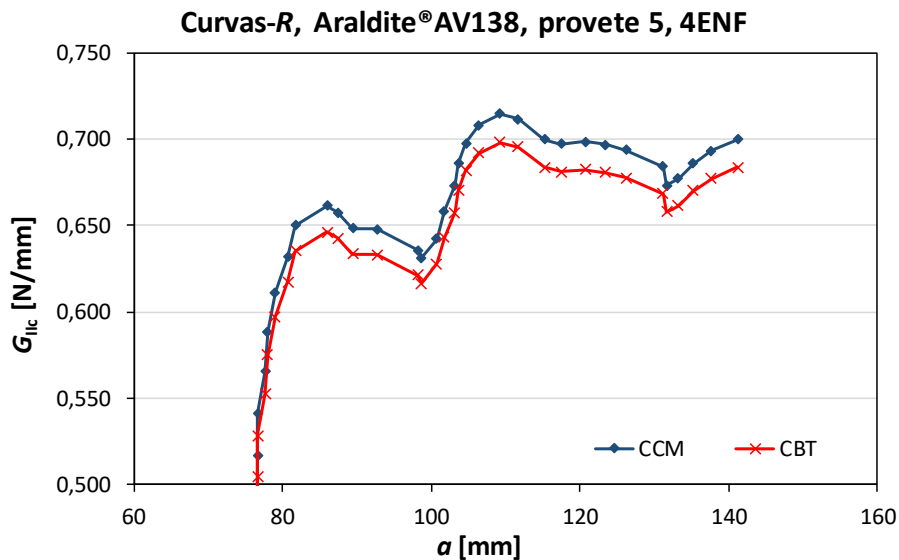


Figura 124 - Curvas-R do provete 5 obtidas pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4 ENF

Expõem-se de seguida as curvas tendência de G_{IIc} (Figura 125) pelos vários ensaios, adquiridas pelos dois métodos. Evidencia-se que, neste adesivo, os dois métodos exibem valores bastante equivalentes, provando a adequabilidade do valor de coeficiente de atrito, $\mu=13,5$.

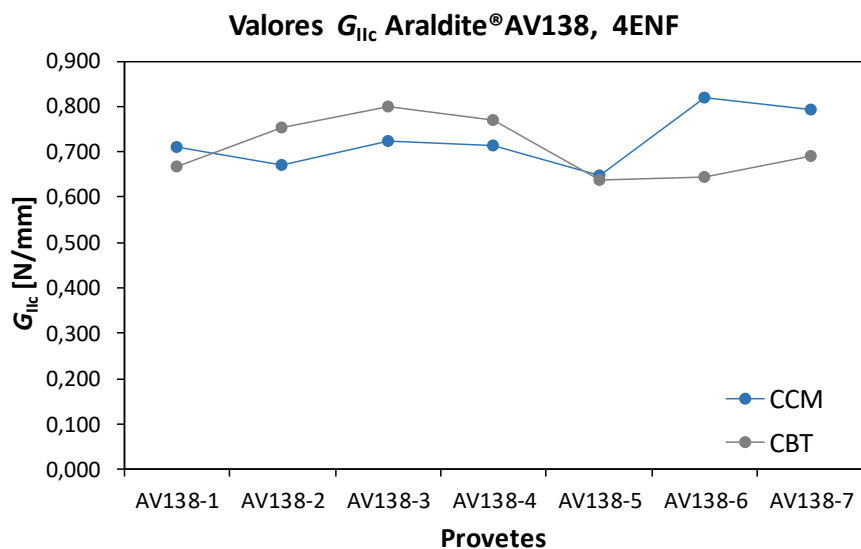


Figura 125 - Valores de G_{IIc} obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Na Figura 126 visualizam-se os valores médios de G_{IIc} e respetivo desvio padrão, resultado da aplicação dos métodos CBT e CCM. Como é possível verificar, não houve uma grande discrepância nos resultados entre ensaios, tendo o método CCM apresentado um valor médio superior em 2,39%, comparativamente ao método CBT. Regista-se, também, que o desvio padrão foi idêntico para os dois métodos de redução.

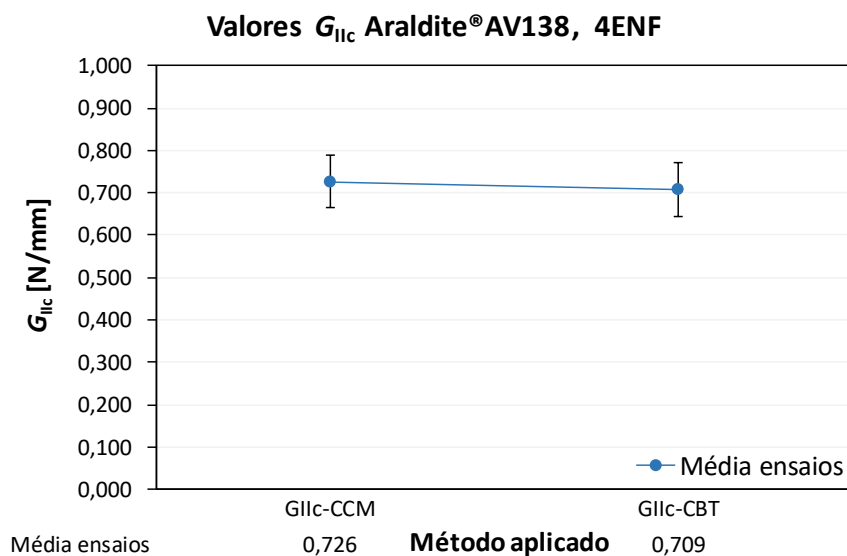


Figura 126 - Valores médios de G_{IIC} obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

3.1.5.3.5 Valores de G_{IIC} do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Analogamente ao ensaio anterior, neste também foram usados os dois métodos CCM e CBT. Não obstante, neste caso, efetuou-se uma correção de atrito, utilizando um coeficiente de atrito diferente ($\mu=12$), obtido através de um estudo realizado por de Oliveira [1]. Na Tabela 26 exibem-se os valores de G_{IIC} adquiridos, respetiva média e desvio padrão.

Tabela 26 - Valores de G_{IIC} [N/mm] obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Provete	CCM	CBT ($\mu=12$)
1	3,364	3,230
2	3,209	2,585
3	2,762	3,281
4	3,036	3,169
5	2,927	3,411
6	Ensaio não considerado	
7	3,152	3,327
Valor Médio	3,075	3,167
Desvio padrão	0,214	0,297

Na Figura 127 e na Figura 128, é possível visualizar duas curvas- R , relativas aos provetes 4 e 5. Fazendo uma análise comparativa a todas as curvas- R deste ensaio com este adesivo, verificou-se que todas apresentaram um patamar estável e sem grandes desvios entre elas, possibilitando, deste modo, uma fácil obtenção de G_{IIC} .

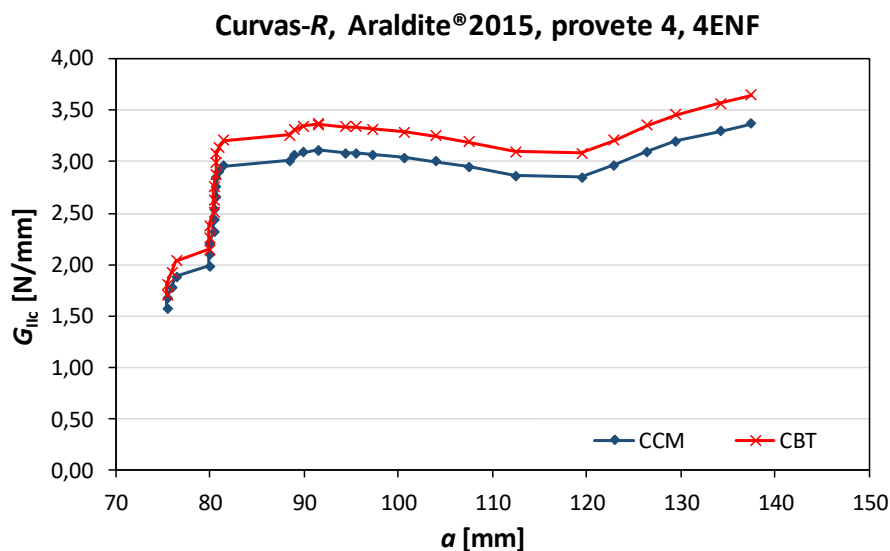


Figura 127 - Curvas-R do provete 4 obtidas pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

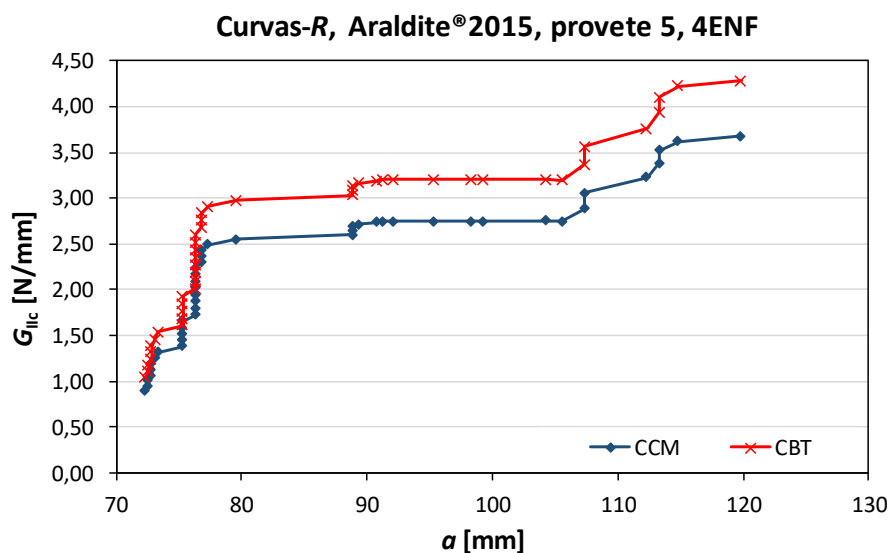


Figura 128 - Curvas-R provete 5 obtidas por diferentes métodos, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Os valores que se representam na Figura 129 correspondem aos valores médios obtidos dos vários provetes, com recurso à metodologia de cálculo de G_{IIc} nos métodos CCM e CBT. Como é perceptível na mesma figura, os valores são bastantes semelhantes, não havendo grandes desvios entre si, com exceção dos valores de G_{IIc} do provete 2 obtido pelo método CBT e dos provetes 1 e 2 obtidos pelo método CCM.

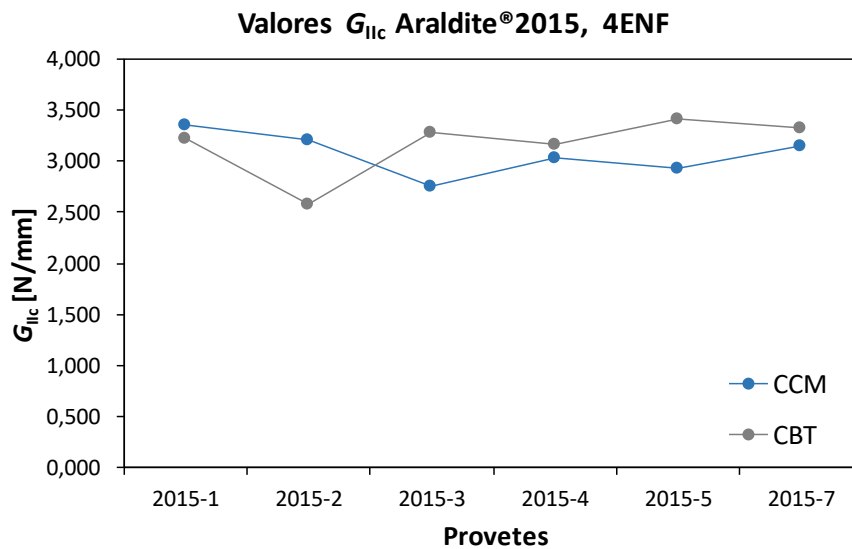


Figura 129 - Valores de G_{IIC} obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4 ENF

Finalizando a análise deste ensaio, são apresentados na Figura 130 os valores médios resultantes da aplicação dos métodos CCM e CBT. Como se pode atestar pela figura, obteve-se uma boa relação de valores registando-se apenas uma diferença de 2,99% nos valores médios entre métodos. Outra nota a reter é o facto do método CBT, com a correção de atrito, apresentar um valor médio superior ao obtido pelo método CCM.

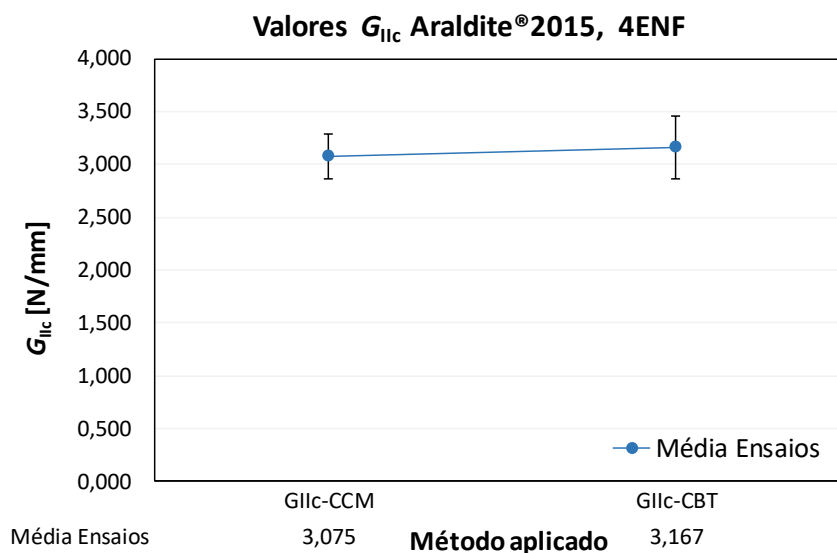


Figura 130 - Valores médios de G_{IIC} obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

3.1.5.3.6 Valores de G_{IIC} do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

Na Tabela 27 são apresentados os valores de G_{IIC} , respetivas médias e desvios padrão, resultantes da aplicação dos métodos de redução CCM e CBT aos diferentes provetes.

Os ensaios com os provetes 1 e 4 não foram considerados para o presente estudo, pelas razões anteriormente explicadas. Como nos casos antecedentes, foi efetuada uma correção de atrito utilizando um coeficiente de atrito distinto dos usados para os outros dois adesivos ($\mu=8$), obtido através do estudo realizado por de Oliveira [1].

Tabela 27 - Valores de G_{IIC} [N/mm] obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

Provete	CCM	CBT ($\mu = 8$)
1	Ensaio não considerado	
2	5,299	5,496
3	5,297	5,062
4	Ensaio não considerado	
5	5,331	5,513
6	5,555	5,322
7	5,286	4,509
Valor Médio	5,354	5,180
Desvio padrão	0,114	0,417

Na Figura 131 e na Figura 132 apresentam-se duas curvas-R, relativas ao provete 5 e provete 6, em representação das restantes para este adesivo. Como é possível comprovar nas imagens, foi possível obter um patamar estável para medição de G_{IIC} , característica comum a todas as curvas-R deste ensaio.

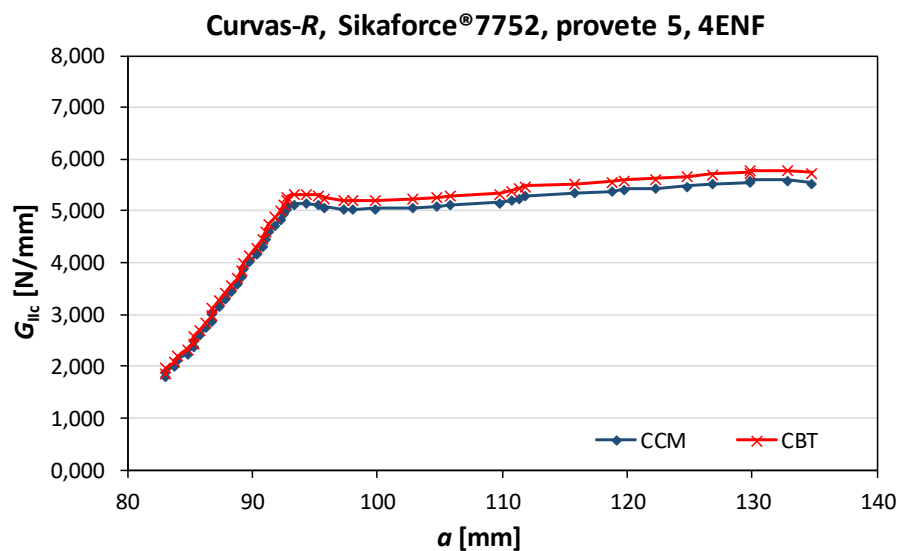


Figura 131 - Curvas-R do provete 5 obtidas pelos métodos CCM e CBT, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

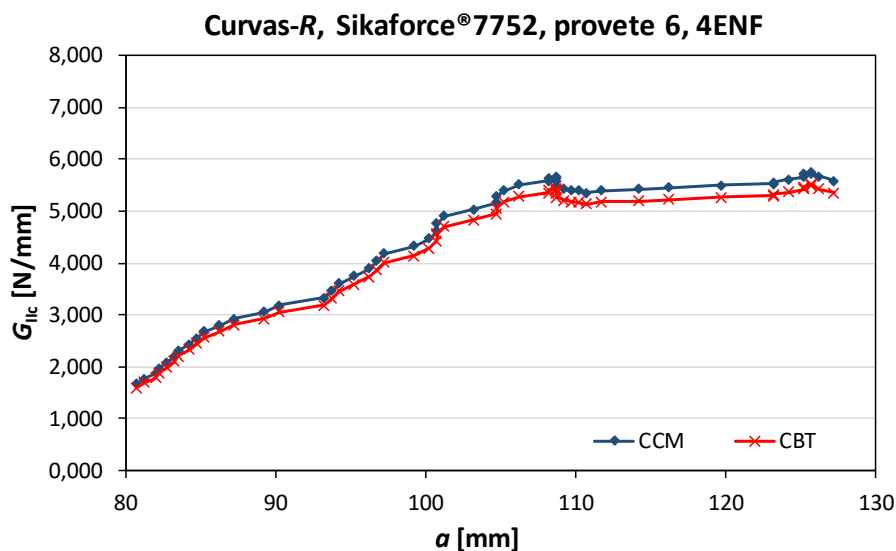


Figura 132 - Curvas-R do provete 6 obtidas pelos métodos CCM e CBT, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

Na Figura 133 ilustram-se os resultados médios obtidos aos vários provetes, com recurso aos métodos de cálculo CCM e CBT. Os dois métodos de redução apresentaram valores bastante concordantes entre si, como é possível comprovar nas curvas tendência representadas na mesma figura. É importante realçar que, neste caso, o método CCM mostrou um patamar estável, demonstrando uma boa adequabilidade do método, assim como a boa realização dos ensaios.

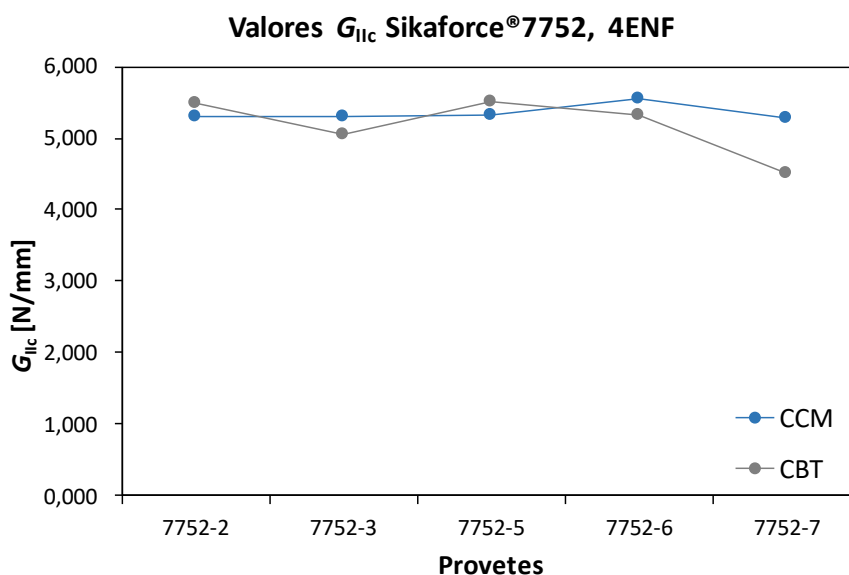


Figura 133 - Valores de G_{IIc} obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

Como referido no tópico anterior, os resultados obtidos pela aplicação dos métodos CCM e CBT foram bastante semelhantes, registando-se um diferencial em termos

percentuais aos valores médios de 3,35 %. Como se observa na Figura 133 e na Figura 134, o método CCM foi bastante estável, como se comprova no valor de desvio padrão.

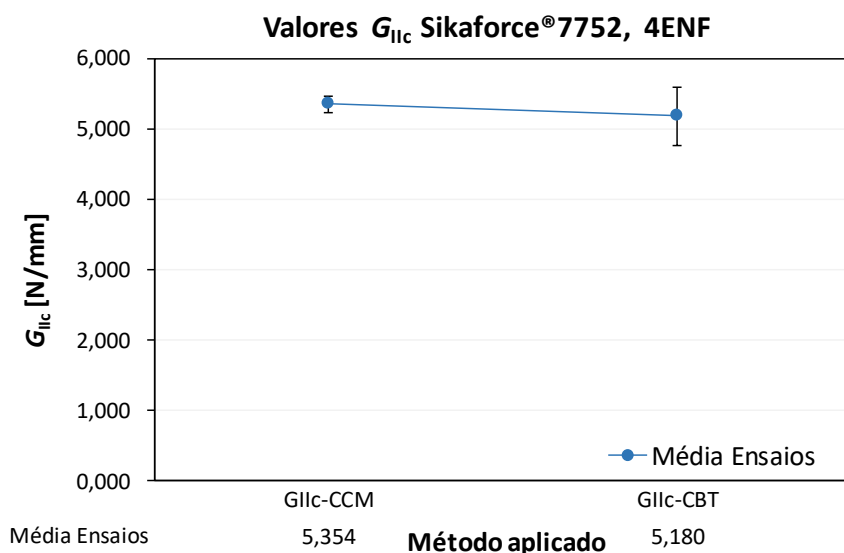


Figura 134 - Valores médios de G_{IIc} obtidos pelos métodos CCM e CBT, do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

Tendo por base a Tabela 28 e a Figura 135, efetua-se, de seguida, uma análise aos valores médios e respetivos desvios padrão de G_{IIc} , adquiridos pelos métodos de redução CCM e CBT no ensaio 4ENF. Verifica-se que o adesivo SikaForce® 7752 é o mais dúctil, seguindo-se os adesivos Araldite® 2015 e Araldite® AV138, sendo este último o mais frágil, como verificado anteriormente no ensaio ENF. Os valores de G_{IIc} não apresentam grandes flutuações entre si, tendo-se registado uma variação máxima em termos percentuais de $\pm 3,35\%$ no adesivo SikaForce® 7752, enquanto nos restantes adesivos foi registada uma variação de $\pm 2,99\%$ (Araldite® 2015) e de $\pm 2,34\%$ (Araldite® AV138). Esta pequena variação, a par da boa concordância entre valores, é indicativa da boa execução dos ensaios e sua respetiva validade.

Tabela 28 - Valores médios e respetivos desvios de G_{IIc} [N/mm] obtidos pelos métodos CCM e CBT, do ensaio 4ENF

	CCM	CBT	Δ (%)
Araldite® AV138	0,726 \pm 0,062	0,709 \pm 0,064	$\pm 2,34$
Araldite® 2015	3,075 \pm 0,214	3,167 \pm 0,297	$\pm 2,99$
SikaForce® 7752	5,354 \pm 0,114	5,180 \pm 0,417	$\pm 3,35$

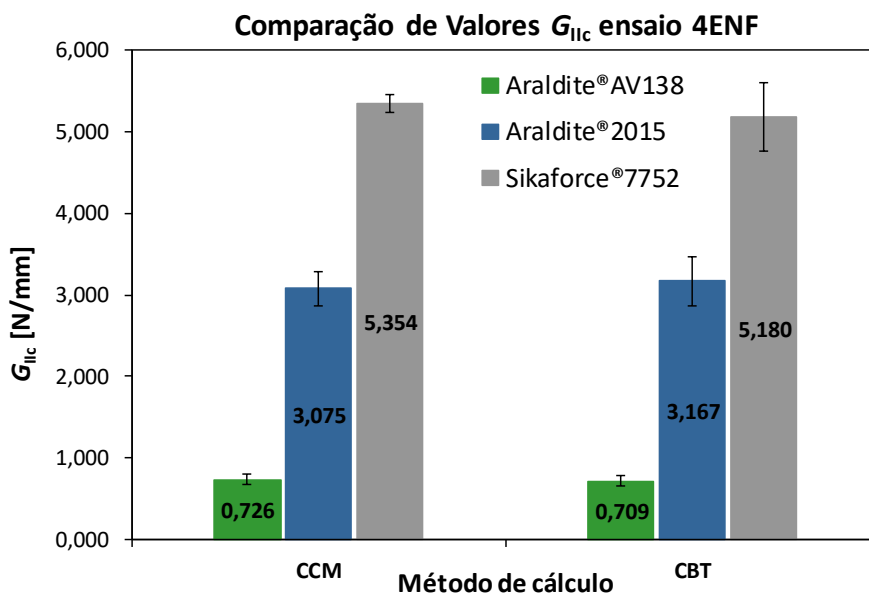


Figura 135 - Comparação de valores médios de G_{IIC} obtidos pelos métodos CCM e CBT do ensaio 4ENF

3.1.5.4 Análise dos resultados obtidos

De forma a realizar uma análise crítica aos resultados obtidos neste presente trabalho, na Tabela 29 transcrevem-se os valores médios e respetivos desvios em percentagem obtidos pelo método CCM para o ensaio 4ENF e CBBM para o ensaio ENF. A escolha destes deve-se ao facto de, atualmente, serem os métodos que oferecem uma melhor robustez nos resultados para cada ensaio [17].

Tabela 29 - Média e respetivo desvio padrão de G_{IIC} [N/mm] obtido pelos métodos CCM (do ensaio ENF) e CBBM (no ensaio 4ENF)

	Média CCM-4ENF	Média CBBM-ENF	Δ (%)
Araldite® AV138	0,726±0,062	0,621±0,098	±16,9
Araldite® 2015	3,075±0,214	2,929±0,287	±4,98
SikaForce® 7752	5,354±0,114	5,560±0,344	±3,86

A partir dos dados da Tabela 29 apresenta-se de seguida um gráfico para uma melhor interpretação dos mesmos (Figura 136).

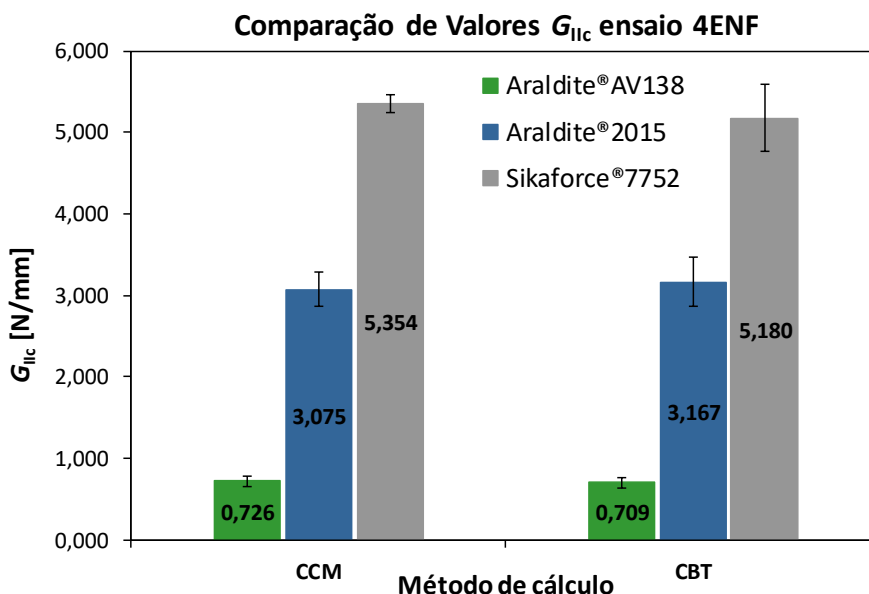


Figura 136 - Comparação de valores médios de G_{IIC} entre os ensaios ENF e 4ENF

Na Tabela 30 são apresentados os valores de G_{IIC} adquiridos noutros estudos [72, 83] através dos métodos CBBM e integral-J para o ensaio ENF aqui tratado.

Tabela 30 - Valores de G_{IIC} [N/mm] pelo método CBBM e Integral-J, [70, 72]

	CBBM	Integral-J
Araldite® AV138	0,618±0,069	0,580±0,09
Araldite® 2015	2,967±0,273	3,123±0,203
SikaForce® 7752	5,562±0,356	5,667±0,459

Na Tabela 32 e Tabela 31 elaborou-se um pequeno estudo com o objetivo de comparar os resultados de G_{IIC} obtidos neste trabalho com outros resultados apresentados em trabalhos anteriores (Tabela 30). Como se pode comprovar, as variações em percentagem foram bastante reduzidas com exceção dos valores obtidos para o adesivo Araldite® AV138 no ensaio 4ENF. Neste caso, a variação ascendeu a 25%, o que pode dever-se a dificuldades no ajuste do polinómio $c=f(a)$. Em suma, os dados obtidos são coerentes, validando todos os procedimentos de cálculo realizados.

Tabela 31 - Desvios em percentagem dos resultados obtidos pelo método CBBM no ensaio ENF, relativamente a dados obtidos, pelos métodos CBBM e integral-J em estudos anteriores [72, 83]

	Δ (%)	Δ (%)
Araldite® AV138	0,49	7,07
Araldite® 2015	1,30	6,62
SikaForce® 7752	0,04	1,92
	CBBM(ENF)-CBBM (ENF)(*)	CBBM(ENF)-Integral-J(ENF)(*)

Tabela 32 - Desvios em percentagem dos resultados obtidos pelo método CCM no ensaio 4ENF, relativamente a dados obtidos, pelos métodos CBBM e Integral-J em estudos anteriores [72, 83]

	Δ (%)	Δ (%)
Araldite® AV138	17,48	25,17
Araldite® 2015	3,64	1,56
SikaForce® 7752	3,88	5,85
	CCM(4ENF)-CBBM(ENF)(*)	CCM(4ENF)-Integral-J(ENF)(*)

(*) Dados obtidos de estudos anteriores ([72, 83]) a partir do mesmo ensaio ENF tratado neste trabalho.

Para terminar este subcapítulo, e depois de uma análise comparativa entre a P_{max} e os valores de G_{IIC} obtidos para os diferentes adesivos, conclui-se que as propriedades destes têm muita influência na resistência das juntas testadas. Referindo genericamente o comportamento de juntas adesivas, um adesivo com uma maior tensão de cedência pode não oferecer uma maior resistência [77]. Um adesivo resistente mas frágil apresenta uma tensão elevada nas extremidades da ligação, não permitindo que se redistribua o esforço para o interior desta [84] apresentando, assim como no Araldite® AV138, uma tensão de corte média na rotura reduzida. Por norma, os adesivos com grande ductilidade e de baixo módulo de elasticidade são pouco resistentes. Contudo como apresentam baixa rigidez, deformam mais plasticamente, possibilitando uma melhor uniformidade na distribuição de tensões ao longo da junta no momento da rotura (Figura 137). Sendo assim, em juntas com adesivos dúcteis mas com resistência inferior a resistência pode ser superior relativamente às que utilizam adesivos mais resistentes e frágeis. A sua resistência à tração e cortes são inferiores, porém a sua ductilidade é maior. Assim, nestas condições, depois de alcançado o limite elástico do adesivo, tem lugar uma maior redistribuição de tensões na camada do adesivo o que é favorável a uma tensão de corte média superior e, subseqüentemente, a uma resistência superior da junta [77]. Concluindo, os adesivos frágeis são mais sensíveis à propagação da fenda e os dúcteis mais resistentes à sua propagação. A resistência à fadiga de juntas coladas é menor para adesivos frágeis, pois estes apresentam maior sensibilidade a fissuras e defeitos [84]. Nas juntas coladas com adesivos dúcteis há uma distribuição de tensões mais uniforme no adesivo e maior amortecimento, logo estes são capazes de suportar melhor esforços de clivagem e de arrancamento.

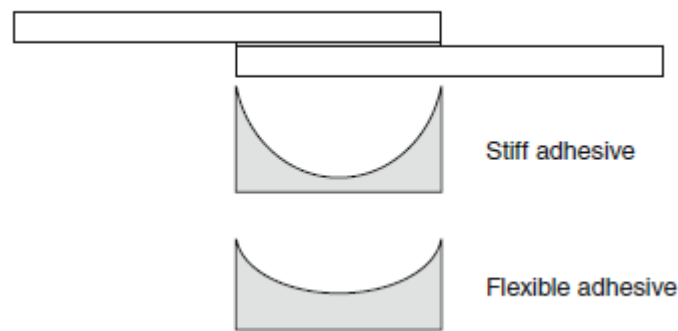


Figura 137 - Efeito da rigidez na distribuição de tensões em JSS, entre um adesivo frágil e um dúctil [84]

3.2 Trabalho numérico

Nesta parte do presente trabalho apresentar-se-á os resultados numéricos, utilizando leis de dano triangulares para através destas, prever a resistência das juntas adesivas com os três adesivos utilizados. Os ensaios foram realizados com recurso ao MEF e MDC.

3.2.1 Condições da análise numérica

Para se conseguir efetuar uma previsão do comportamento das juntas em ensaios ENF e 4ENF, foi utilizado o software ABAQUS®, devido a este código comercial de MEF ter integrado um módulo de MDC. Utilizaram-se elementos sólidos em estado plano de deformação para modelar os aderentes (CPE4 do ABAQUS®) modelando-se, assim, as juntas em duas dimensões. Na Figura 138 apresenta-se o modelo numérico usado no ensaio ENF e na Figura 139 está representado o modelo numérico do 4ENF.

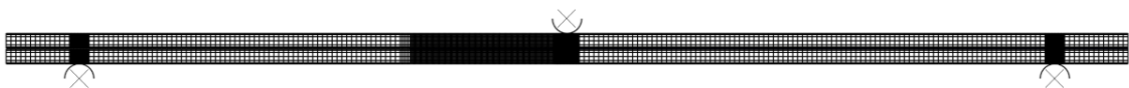


Figura 138 - Esquema do modelo numérico no ensaio ENF

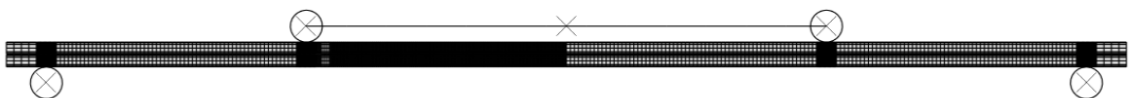


Figura 139 - Esquema do modelo numérico no ensaio 4ENF

As dimensões geométricas dos provetes numéricos e a respetiva fenda inicial foram consideradas individualmente de acordo com os provetes testados experimentalmente. Analogamente a estudos anteriores [76] simulou-se a junta adesiva recorrendo a um elemento coesivo de quatro nós (COH2D4 do ABAQUS®) considerando uma lei triangular

de amaciamento. Considerou-se um único elemento na direção da espessura do adesivo para os elementos MDC na camada do adesivo, como representado na Figura 140 para o ensaio ENF e na Figura 141 para o ensaio 4ENF.

Com o objetivo de analisar a rotura por MDC, nos modelos foram usadas malhas bastante refinadas, com elementos dimensões de 0,2 mm×0,2 mm na camada adesiva. Foram também consideradas não linearidades geométricas. Como a zona da pré-fenda (Figura 140) não sofre grandes picos de tensões, a malha utilizada foi menos refinada no sentido do comprimento dos provetes. Para se conseguir um maior refinamento perto do adesivo e modelar o adesivo com exatidão, utilizou-se o efeito *bias* (gradação do tamanho dos elementos) na direção da espessura, para obter uma maior precisão das condições de contacto com os cilindros de suporte e carregamento e diminuição do esforço computacional, sem comprometer os resultados da simulação.

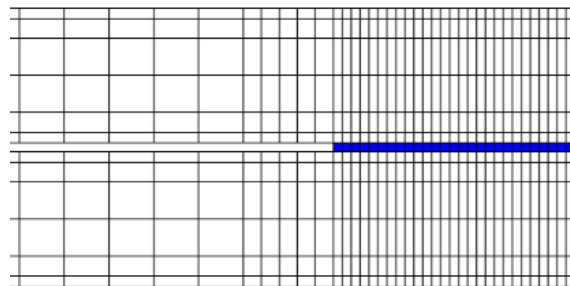


Figura 140 - Esquema da malha utilizada no ensaio ENF, na zona da pré-fenda

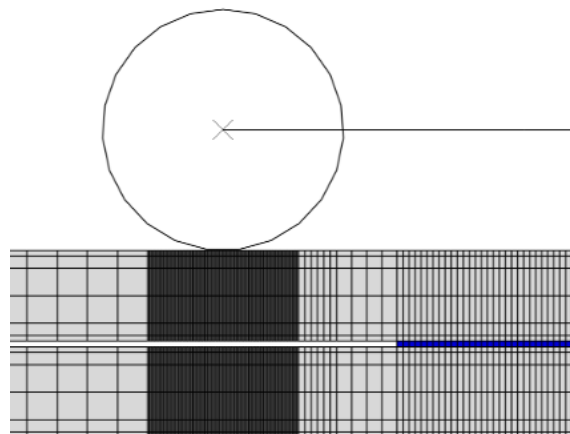


Figura 141 - Esquema da malha utilizada no ensaio 4ENF, na zona da pré-fenda e punção de carregamento

Nos ensaios ENF e 4ENF foram utilizados elementos com comprimento de 0,05 mm nas zonas de apoio e carregamento, como pode ser verificado na Figura 142.

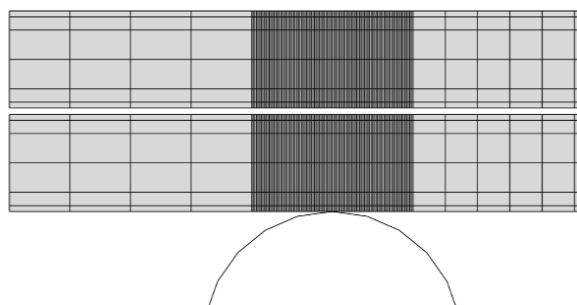


Figura 142 - Esquema da malha na zona dos apoios, nos ensaios ENF e 4ENF

De modo a modelar as condições reais dos ensaios experimentais, e como condições fronteira restringiram-se os cilindros de suporte nas duas direções e rotação do plano, de carregamento na direção horizontal em ambos os ensaios. Nos ensaios ENF (Figura 143) e 4ENF (Figura 144) foi aplicado um deslocamento vertical com sentido descendente. Foi também restringido um nó a meio do comprimento do provete na direção horizontal para que não houvesse deslocamento horizontal deste.

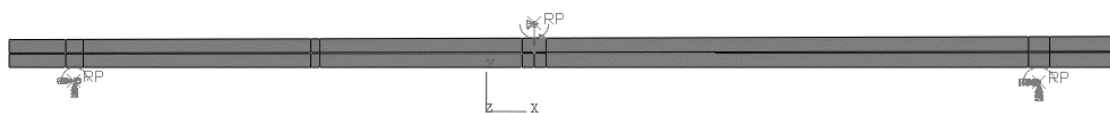


Figura 143 - Esquema das condições fronteira, no ensaio ENF

No ensaio 4ENF foi considerada uma viga indeformável a unir os 2 cilindros de solicitação sem criação de momento fletor. A esta viga de união dos 2 cilindros de solicitação foi aplicada uma restrição em x , sendo-lhe aplicado um deslocamento vertical descendente.

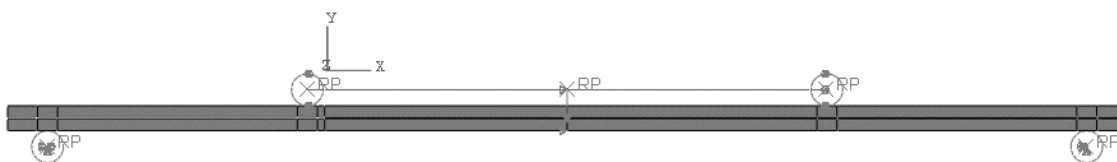


Figura 144 - Esquema das condições fronteira, no ensaio 4ENF

De forma a garantir a não indentação da punção de carregamento nos substratos e o deslizamento sem atrito na zona da pré-fenda, foi necessário introduzir condições de contacto. Nesse sentido, utilizou-se a formulação de pequeno deslizamento *surface to surface*, um comportamento tangencial sem fricção e um comportamento normal do tipo *hard contact*.

3.2.2 Modelos de dano coesivo

Como referido no capítulo anterior, os MDC têm sido bastante utilizados nos últimos anos para o estudo da resistência das juntas adesivas. Estes apresentam como vantagem o facto de aliarem metodologias de resistência dos materiais e da mecânica da fratura permitindo, dessa forma, prever a resistência das juntas adesivas e a propagação do dano até à rotura. Estes modelos têm por base o pressuposto que é possível introduzir defeitos artificialmente através da inclusão de descontinuidades no campo de deslocamentos. A técnica consiste em induzir a degradação progressiva através do efeito do amaciamento das tensões, em função dos deslocamentos relativos entre faces da fenda. Este efeito é conhecido por lei coesiva ou lei tensão deslocamento ($t-\delta$). Como já foi referido, existem diferentes tipos leis coesivas: Triangular [60], Linear-Parabólico [61], Exponencial [62], Polinomial [63] e Trapezoidal [64]. Para a simulação numérica deste trabalho foi escolhida a lei coesiva triangular (Figura 51), pela sua simplicidade e facilidade na introdução dos parâmetros [65] e por estar integrada no programa de MEF usado (ABAQUS®). Nesta lei, distinguem-se dois modos. O modo puro caracteriza-se por a propagação do dano ocorrer num conjunto específico de nós homólogos quando os valores das tensões no modo respetivo são anulados na lei coesiva respetiva. Em modo misto, são utilizados critérios de tensões e energéticos para combinar a tensão e corte [59]. Através da cinemática dos elementos coesivos, são determinadas as componentes de deformação em tração (ε_n) e corte (ε_s). Em camadas finas de adesivo, entre aderentes rígidos, as tensões existentes na membrana são desprezadas. Antes da ocorrência do dano, a relação entre tensões e deformações é definida pela matriz \mathbf{K}_{COH} , a qual relaciona as tensões e deformações em tração e corte através dos elementos coesivos. Esta matriz é definida da seguinte forma:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} K_{nn} & K_{ns} \\ K_{ns} & K_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{COH} \cdot \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (34)$$

Esta matriz contém os parâmetros de rigidez da ligação adesiva, cuja definição depende da formulação utilizada. Caso seja uma formulação local, esta é usada para simular fraturas de espessura nula, em que os parâmetros da matriz possuem valores extremamente elevados, com a finalidade de não haver deformações na estrutura induzidas pela presença dos elementos coesivos [78]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn}=E, K_{ss}=G, K_{ns}=0, \quad (35)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando esses parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [59]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\langle \frac{t_n}{t_n^0} \right\rangle^2 + \left\langle \frac{t_s}{t_s^0} \right\rangle^2 = 1, \quad (36)$$

$\langle \rangle$ 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 [85]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 51), 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 51) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{Ic} e G_{IIc} :

$$\frac{G_I}{G_{Ic}} + \frac{G_{II}}{G_{IIc}} = 1. \quad (37)$$

3.2.3 Estimativa da lei coesiva ao corte nos ensaios ENF e 4ENF

Com vista à obtenção das leis coesivas representativas do comportamento ao corte dos três adesivos, estudados nos dois ensaios (ENF e 4ENF), foram realizadas simulações numéricas de acordo com parâmetros descritos anteriormente. Pretende-se obter leis coesivas médias para cada adesivo que possam posteriormente ser aplicadas na previsão da resistência de juntas adesivas sujeitas a um carregamento arbitrário, desde que também esteja disponível a respetiva lei coesiva em tração. Para o efeito foi utilizado o método inverso descrito no subcapítulo 2.5.2.1. Como valores de entrada para o estudo foram usados os valores de G_{Ic} obtidos através dos métodos CBBM e CCM para os ensaios ENF e 4ENF, respetivamente. O valor de G_{Ic} , E , ν , G e o valor inicial de t_s^0 foram obtidos através de valores de referência para o adesivo a simular. Após a inserção de todos os parâmetros necessários para a simulação foi iniciado um processo iterativo de ajuste (através da variação de t_s^0) até fazer coincidir a curva P - δ numérica com a respetiva curva experimental. Este processo foi repetido para cada provete dos três adesivos. Com os valores finais obtidos de t_s^0 após ajustamento das curvas P - δ , foram elaboradas as respetivas leis coesivas triangulares construídas a partir dos parâmetros δ_s^f , δ_s^0 , G_{IIc} e t_s^0 para cada provete, onde δ_s^f e δ_s^0 resultam das expressões (38) e (39):

$$\delta_s^0 = \frac{t_s^0 \times t_A}{E}, \quad (38)$$

$$\delta_s^f = 2 \times \frac{G_{IIc}}{t_s^0}. \quad (39)$$

Finalmente foi elaborada uma lei coesiva triangular média para cada adesivo.

3.2.3.1 Ensaios End Notched Flexure (ENF)

Nesta parte serão revelados os valores resultantes das simulações numéricas efetuadas e das respetivas leis coesivas triangulares determinadas para todos os provetes ENF.

Graficamente serão apresentados exemplos representativos das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais resultantes após o processo de ajuste efetuado para cada provete, e também as leis coesivas triangulares de todos os provetes e a respetiva lei coesiva média para cada adesivo.

3.2.3.1.1 Adesivo Araldite® AV138

Na Tabela 33 estão apresentados os valores iniciais usados para cada provete das juntas ligadas com o adesivo Araldite® AV138, no início da simulação numérica do ensaio ENF.

Tabela 33 - Dados de entrada dos modelos numéricos, do ensaio ENF, do adesivo Araldite® AV138

Provete	G_{IIC} [N/mm]	G_{Ic} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]
1	0,542	0,2	4890	1560	39,45	30,2
2	0,812	0,2	4890	1560	39,45	30,2
3	0,696	0,2	4890	1560	39,45	30,2
4	Ensaio não considerado					
5	0,583	0,2	4890	1560	39,45	30,2
6	0,562	0,2	4890	1560	39,45	30,2
7	0,572	0,2	4890	1560	39,45	30,2
8	0,581	0,2	4890	1560	39,45	30,2

De seguida são exibidos dois gráficos (Figura 145 e Figura 146) com as curvas $P-\delta$ numérica e experimental, representativas do processo de ajuste efetuado aos provetes ENF ligados com o adesivo Araldite® AV138. Como se pode observar, foi possível obter curvas numéricas bastante similares às experimentais. Na zona elástica foi possível obter um elevado grau de concordância nas curvas $P-\delta$ até à zona de P_{max} . Todavia, após iniciação do dano verifica-se que a rotura nas curvas numéricas se dá de uma forma mais estável, ou seja, os valores da carga diminuem mais gradualmente após a propagação da fenda, contrariamente ao que foi verificado nas curvas experimentais, cujo valor decai de forma mais abrupta (característica de adesivos frágeis). Nas curvas $P-\delta$ dos outros provetes foi possível efetuar um ajuste muito semelhante ao apresentado na Figura 145.

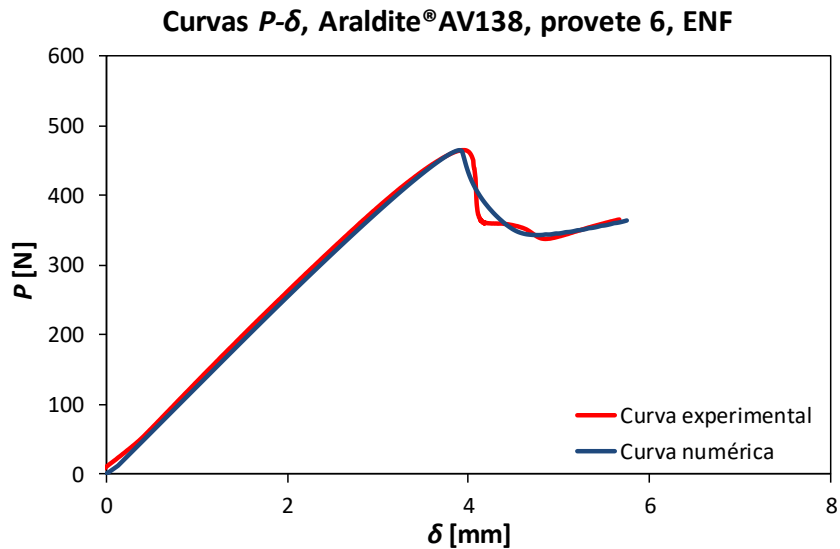


Figura 145 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® AV138 do provete 6, do ensaio ENF

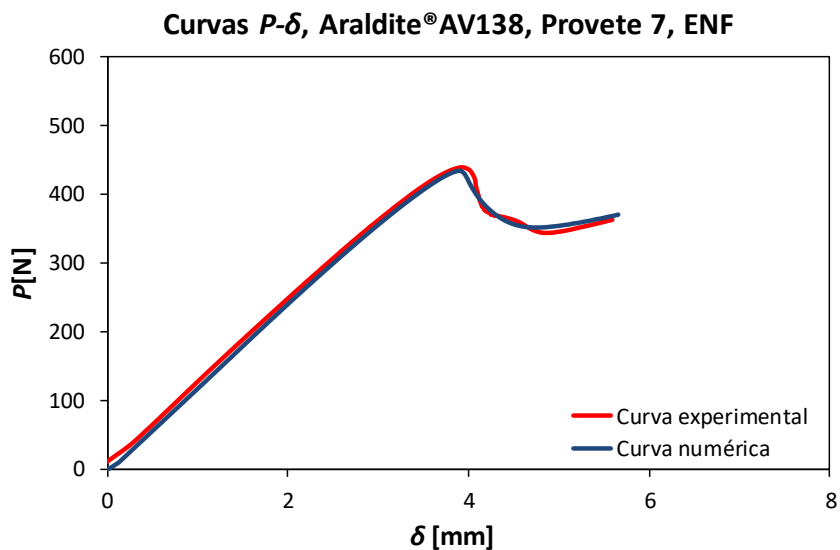


Figura 146 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® AV138 do provete 7, do ensaio ENF

Na Tabela 34 são exibidos os valores finais de G_{IIc} , δ_s^0 , δ_s^f e t_s^0 resultantes das leis coesivas triangulares para todos os provetes válidos, obtidas pelo processo de ajuste efetuado. São também apresentados os valores médios e respetivo desvio padrão. Relativamente aos desvios percentuais verifica-se que o valor de t_s^0 apresenta um desvio acentuado, de cerca de $\pm 26\%$. Todavia, no valor de G_{IIc} observa-se um desvio de $\pm 16\%$, sendo este valor mais aceitável. Ao nível do desvio de δ_s^0 e δ_s^f registam-se desvios de $\pm 26\%$ e $\pm 22\%$ respetivamente. Apesar do desvio de δ_s^0 ser elevado, este é coerente com o desvio em percentagem de t_s^0 . Pese as flutuações apresentadas é possível concluir que os ensaios e simulação numérica obtiveram bons resultados.

Tabela 34 - Dados obtidos pela lei triangular do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
1	0,584	0,001022	0,046720	25,00
2	0,812	0,001145	0,058000	28,00
3	0,715	0,001186	0,049310	29,00
4	Ensaio não considerado			
5	0,583	0,001145	0,041643	28,00
6	0,562	0,000818	0,056200	20,00
7	0,575	0,000654	0,071875	16,00
8	0,550	0,000613	0,073333	15,00
Média	0,626	0,000941	0,054422	23,00
Desvio Padrão	0,099	0,000243	0,012178	5,944

Na Figura 147 exibem-se as leis coesivas triangulares obtidas através do ajuste, atrás referido, aos sete provetes válidos. Na mesma figura é também apresentada a lei coesiva média para este adesivo. Como é possível constatar na Figura 147, e pelos dados da Tabela 34, para ser efetuado o ajuste às curvas P - δ experimentais foi necessário proceder à variação do valor de t_s^0 , resultando alguma disparidade nos seus valores. Comparando com o valor de entrada verifica-se que t_s^0 é $\pm 31\%$ superior ao valor médio de t_s^0 obtido pelo processo de ajuste. Tendo por base os resultados obtidos pode afirmar-se que as leis coesivas resultantes são de um modo geral concordantes entre si. Do mesmo modo pode também afirmar-se que a lei triangular é adequada para a obtenção de uma lei coesiva ao corte para o adesivo Araldite® AV138 utilizando o ensaio ENF.

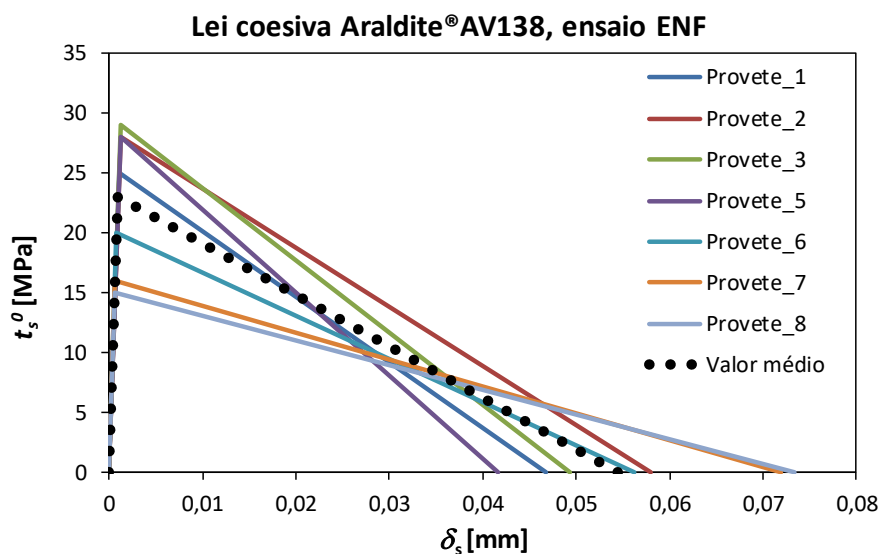


Figura 147 - Lei coesiva do adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

3.2.3.1.2 Araldite® 2015

Na Tabela 35 indicam-se os valores de entrada usados para início da simulação numérica das juntas do ensaio ENF com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 35 - Dados de entrada dos modelos numéricos do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	G_{Ic} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]
1	3,410	0,43	1850	560	21,63	17,9
2	Ensaio não considerado					
3	2,561	0,43	1850	560	21,63	17,9
4	2,967	0,43	1850	560	21,63	17,9
5	2,636	0,43	1850	560	21,63	17,9
6	3,131	0,43	1850	560	21,63	17,9
7	2,904	0,43	1850	560	21,63	17,9
8	2,898	0,43	1850	560	21,63	17,9

Após o processo de ajuste obtiveram-se curvas P - δ numéricas e experimentais bastante similares, como é perceptível nas comparações efetuadas na Figura 148 e na Figura 149, para dois provetes representativos do comportamento global dos provetes ENF testados com o adesivo Araldite® 2015. Para os restantes provetes foi possível ajustar de igual modo as curvas aqui demonstradas. Neste adesivo verifica-se um elevado grau de concordância, desde a zona elástica até à zona de P_{max} nos dois casos apresentados e em todos os restantes provetes. Todavia, após iniciação do dano, o primeiro caso apresentado (Figura 148) foi o que mais se aproximou da realidade, verificando-se em todos os outros provetes que a curva P - δ numérica tende a divergir da correspondente curva P - δ experimental a partir de um determinado ponto na zona de propagação de fenda, como é possível verificar na Figura 149. Em todos os provetes, com exceção do apresentado na Figura 148, verificou-se que o valor de carga das curvas numéricas apresenta um decaimento mais acentuado do que nas curvas experimentais. Globalmente, conclui-se que foi possível reproduzir de forma bastante satisfatória numericamente os ensaios experimentais.

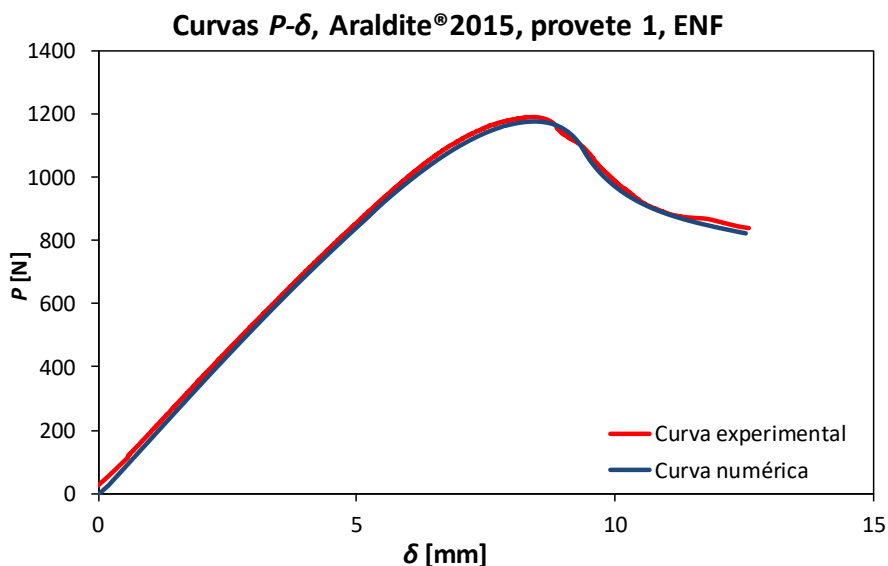


Figura 148 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® 2015 do provete 1, do ensaio ENF

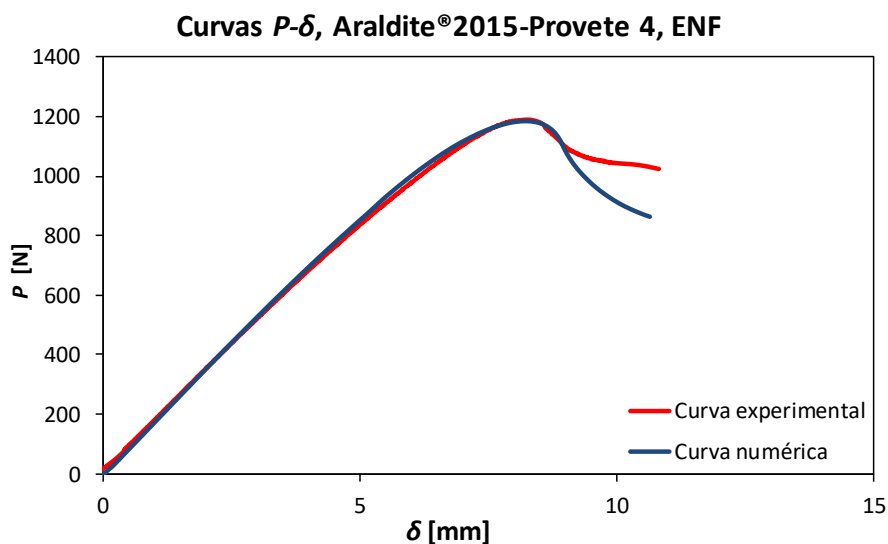


Figura 149 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® 2015 do provete 4, do ensaio ENF

Na Tabela 36 encontram-se todos os valores resultantes das leis coesivas triangulares obtidas para cada provete. Após análise verifica-se que o valor de t_s^0 regista um desvio percentual de $\pm 15\%$, ao passo que G_{IIC} apresenta um desvio de $\pm 12\%$. Os valores de deslocamento apresentam também valores aceitáveis, tendo δ_s^f apresentado um desvio de $\pm 16\%$ e δ_s^0 de $\pm 15\%$. Estes desvios são bastante aceitáveis e indicadores da robustez e veracidade dos valores obtidos.

Tabela 36 - Dados obtidos pela lei triangular do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
1	3,410	0,001838	0,401176	17
2	Ensaio não considerado			
3	2,800	0,002000	0,302703	18,50
4	3,200	0,001968	0,351648	18,20
5	2,753	0,002486	0,239391	23,00
6	3,600	0,002595	0,300000	24,00
7	2,904	0,001838	0,341647	17,00
8	2,700	0,001935	0,301676	17,90
Média	3,052	0,002094	0,315147	19,37
Desvio Padrão	0,353	0,000313	0,050977	2,89

Na Figura 150 mostram-se as leis coesivas triangulares obtidas para todos os provetes, após processo final de ajuste às curvas $P-\delta$ das juntas ligadas com o adesivo Araldite® 2015. No mesmo sentido é também apresentada uma lei coesiva triangular média. Como é possível observar, estas leis apresentam um elevado grau de concordância, com valores de t_s^0 bastante similares, excetuando os provetes 5 e 6, cujos valores t_s^0 são um pouco superiores aos seus pares. Comparativamente com o valor de entrada constata-se que o valor médio de t_s^0 obtido após processo de ajuste é $\pm 8\%$ superior. Aquando da realização do processo de ajuste não foram sentidas grandes dificuldades na obtenção das curvas $P-\delta$ ajustadas numericamente. Como tal, e tendo em conta a coerência dos resultados, pode afirmar-se que a lei de dano triangular apresenta resultados fiáveis na caracterização deste adesivo em ensaios ENF.

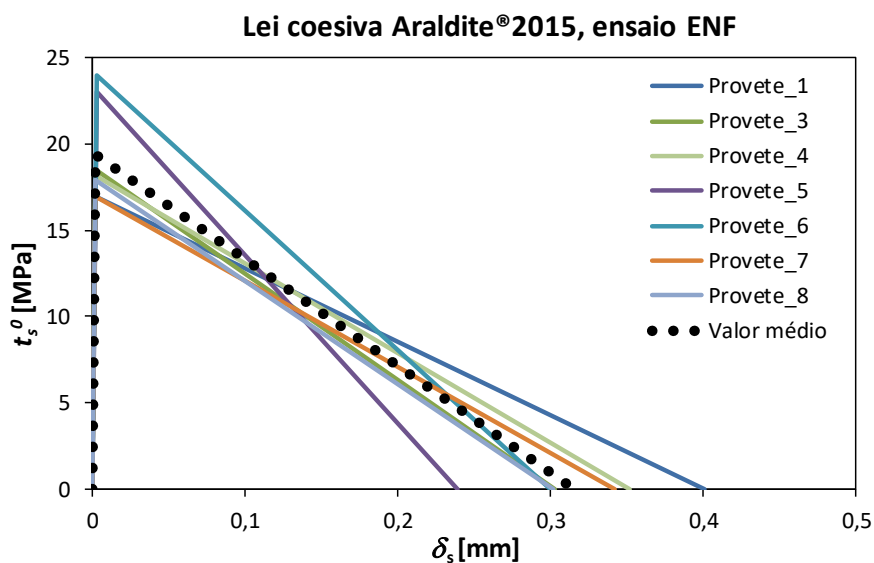


Figura 150 - Lei coesiva do adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

3.2.3.1.3 SikaForce® 7752

Para terminar a caracterização do comportamento das juntas adesivas no ensaio ENF, mostram-se de seguida, na Tabela 37, os dados utilizados para o início das simulações numéricas dos provetes ENF ligados com o adesivo SikaForce® 7752.

Tabela 37 - Dados de entrada dos modelos numéricos do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	G_{Ic} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]
1	5,825	2,36	494	188	11,49	10,17
2	5,852	2,36	494	188	11,49	10,17
3	5,467	2,36	494	188	11,49	10,17
4	4,839	2,36	494	188	11,49	10,17
5	5,652	2,36	494	188	11,49	10,17
6	5,675	2,36	494	188	11,49	10,17
7	5,613	2,36	494	188	11,49	10,17
8	Ensaio não considerado					

Na Figura 151 e Figura 152 exibem-se dois exemplos em representação do processo de ajuste efetuado aos provetes ENF ligados com o adesivo SikaForce® 7752. Como é observável pelas figuras referidas foi possível obter curvas bastante concordantes entre si. Na zona elástica foi possível obter um ajuste muito bom até à zona de P_{max} . Todavia, a partir dessa faixa, que corresponde ao início da propagação da fenda, as curvas numéricas tendem a ser mais estáveis no processo de rotura. Globalmente, e apesar do uso de uma lei triangular para caracterizar uma junta com um adesivo dúctil, constatou-se que todas as curvas $P-\delta$ (numéricas e experimentais) apresentam um comportamento bastante similar em todos os provetes estudados. Assim sendo, é possível afirmar que as curvas obtidas numericamente caracterizam bem as homólogas experimentais em todos os provetes estudados. De acordo com estudos anteriores [72] e do verificado neste trabalho constatou-se uma maior dificuldade no ajuste das curvas neste adesivo relativamente aos dois anteriores devido à sua maior ductilidade, pese os bons resultados obtidos.

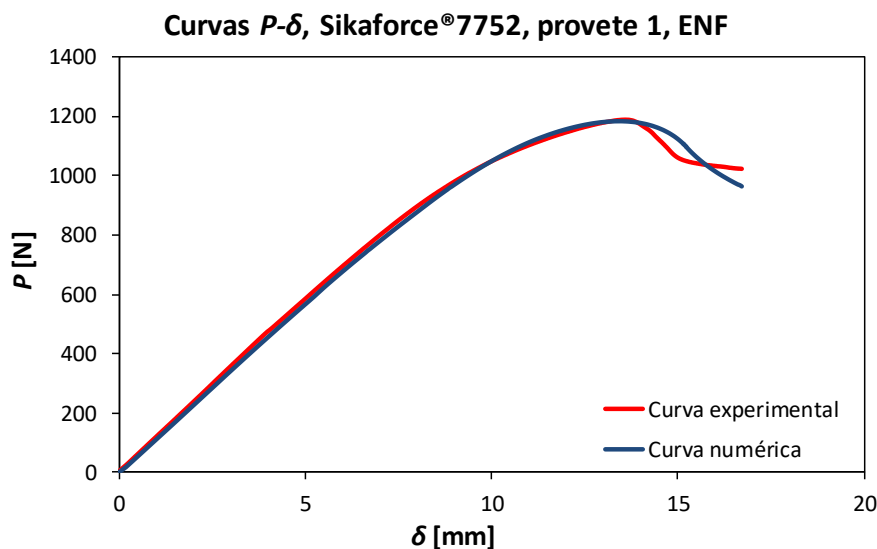


Figura 151 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo SikaForce® 7752 do provete 1, do ensaio ENF

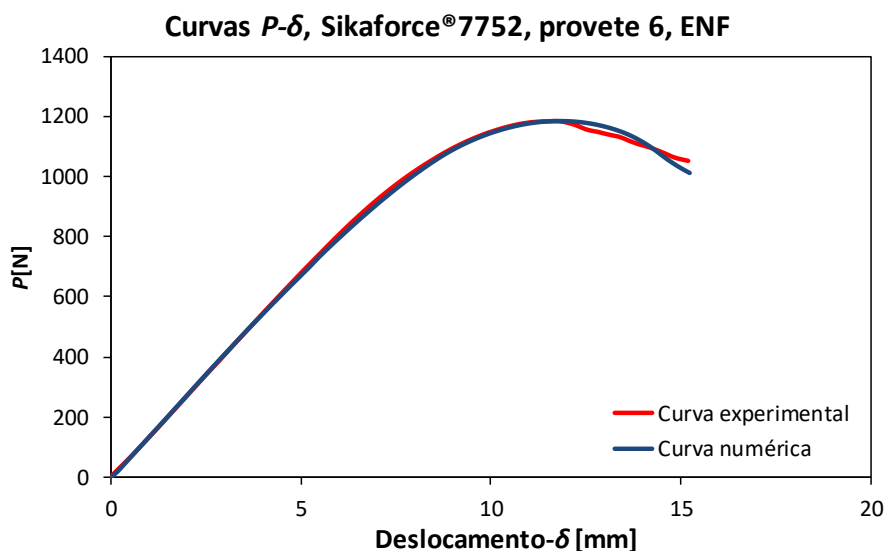


Figura 152 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo SikaForce® 7752 do provete 6, do ensaio ENF

Na Tabela 38 apresentam-se os valores dos parâmetros coesivos e respetivos deslocamentos (δ_s^0 , δ_s^f) adquiridos após aplicação da lei coesiva triangular aos dados resultantes do processo iterativo de ajuste. Atendendo à Tabela 38 é possível verificar uma boa concordância de valores. No que toca aos desvios percentuais, G_{IIc} apresentou um desvio de $\pm 6\%$ e t_s^0 um desvio de $\pm 9\%$. Relativamente a δ_s^0 registou-se um desvio percentual de $\pm 9\%$ e a δ_s^f um desvio de $\pm 12\%$. Face aos resultados e desvios percentuais obtidos é possível concluir que tanto no trabalho experimental, como no numérico os provetes apresentam um comportamento semelhante.

Tabela 38 - Dados obtidos pela lei triangular do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
1	5,825	0,007490	0,629730	18,50
2	5,852	0,008502	0,557333	21,00
3	5,467	0,008300	0,533366	20,50
4	4,839	0,008097	0,483900	20,00
5	5,652	0,006478	0,706500	16,00
6	5,675	0,007449	0,616848	18,40
7	5,613	0,007490	0,606811	18,50
8	Ensaio não considerado			
Média	5,560	0,007687	0,585749	18,99
Desvio Padrão	0,344	0,000684	0,072667	1,69

Na Figura 153 estão ilustradas as leis coesivas triangulares adquiridas após o processo de ajuste individual a cada provete, assim como a lei coesiva média obtida através das médias de G_{IIC} e de t_s^0 dos sete provetes válidos deste ensaio. Através da Figura 153 é possível observar que houve um bom nível de acordo nas leis coesivas. Como se pode verificar, os valores são um pouco dispares pois, devido à heterogeneidade das curvas $P-\delta$, foi necessário ajustar o valor de t_s^0 de forma a ir ao encontro das suas características específicas. Se se atender ao valor médio de t_s^0 obtido após processo de ajuste verifica-se que este foi $\pm 86\%$ superior ao valor de entrada. Esta diferença é explicável devido ao facto de ter sido necessário elevar bastante os valores de t_s^0 para conseguir que a curvatura da curva numérica se aproximasse da experimental. Não obstante das dificuldades encontradas em efetuar o ajuste às curvas é possível concluir que, com recurso a uma lei de dano triangular, é possível reproduzir o comportamento deste adesivo num ensaio ENF.

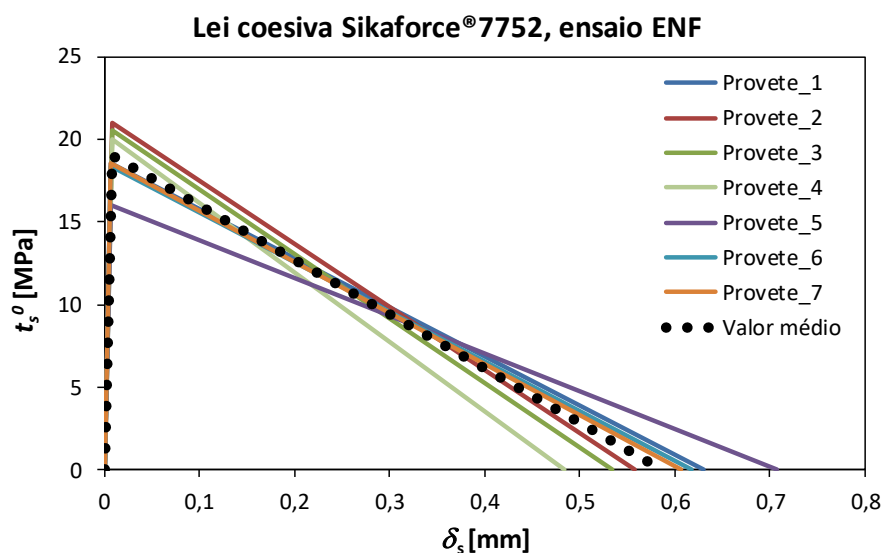


Figura 153 - Lei coesiva do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

3.2.3.2 Ensaios Four-Point End Notched Flexure (4ENF)

Tal como realizado no ensaio ENF, nesta parte serão apresentados todos os valores resultantes do processo de ajustamento numérico às curvas $P-\delta$ experimentais, assim como as respetivas leis coesivas triangulares para todos os provetes e a resultante média dessas leis. Graficamente também serão exibidos exemplos representativos do processo de ajuste e a representação das leis coesivas triangulares para cada um dos provetes considerados válidos no ensaio 4ENF.

3.2.3.2.1 Araldite® AV138

A Tabela 39 resume os parâmetros de entrada para o início da simulação numérica dos provetes 4ENF ligados com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 39 - Dados de entrada dos modelos numéricos do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	G_{Ic} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]
1	0,712	0,2	4890	1560	39,45	30,2
2	0,671	0,2	4890	1560	39,45	30,2
3	0,722	0,2	4890	1560	39,45	30,2
4	0,714	0,2	4890	1560	39,45	30,2
5	0,647	0,2	4890	1560	39,45	30,2
6	0,818	0,2	4890	1560	39,45	30,2
7	0,794	0,2	4890	1560	39,45	30,2

Na Figura 154 e na Figura 155 expõem-se dois exemplos de curvas $P-\delta$ em representação do processo de ajuste numérico efetuado a todos os provetes ligados com o adesivo Araldite® AV138 considerados válidos. Como é possível constatar, foi possível obter um bom grau de concordância entre curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, o que foi extensível a todos os provetes deste ensaio com este adesivo. Observou-se que após o início do dano este ocorre de uma forma bastante estável nas curvas $P-\delta$ numéricas. Não foi, todavia, possível recriar com exatidão as curvas $P-\delta$ experimentais pois, ao contrário das numéricas, observam-se algumas flutuações na zona de propagação de fenda. Na zona elástica foi possível obter uma boa similaridade entre as curvas $P-\delta$ em todos os provetes deste adesivo.

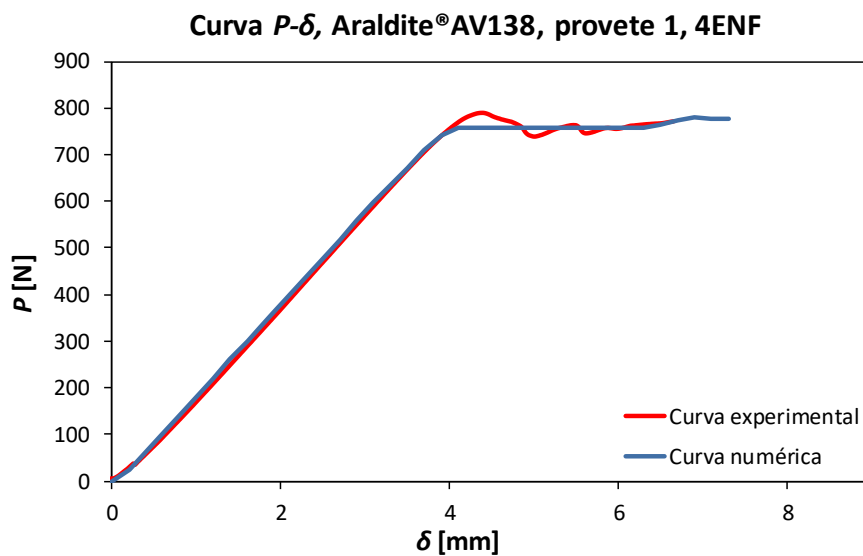


Figura 154 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® AV138 do provete 1, do ensaio-4ENF

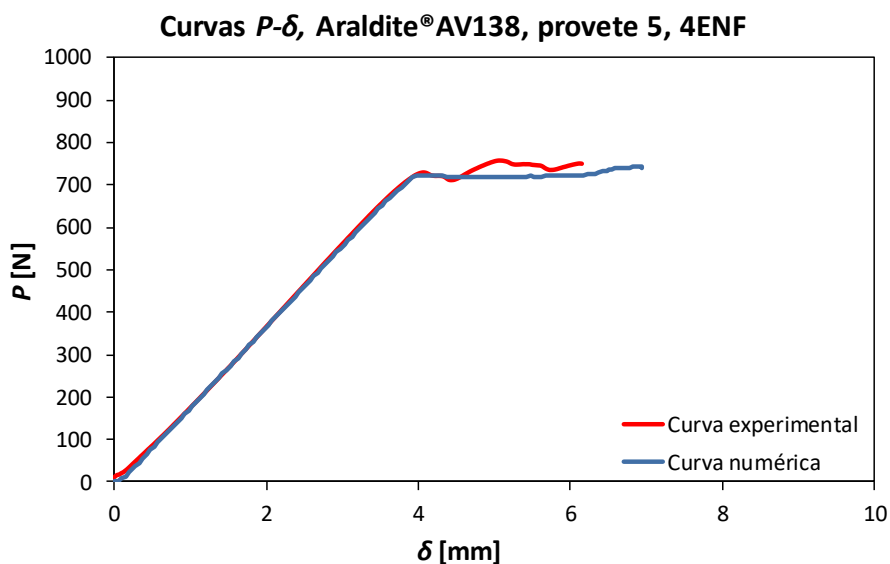


Figura 155 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® AV138 do provete 5, do ensaio 4ENF

Na Tabela 40 transcrevem-se os parâmetros coesivos resultantes do processo de ajustamento numérico efetuado, tendo-se registado um desvio percentual de $\pm 7\%$ em G_{IIc} , ao passo que tanto t_s^0 como δ_s^0 apresentaram um desvio $\pm 3\%$. Finalmente, δ_s^f registou um desvio de $\pm 7\%$.

Tabela 40 - Dados obtidos pela lei triangular do adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
1	0,712	0,001268	0,045935	31,00
2	0,733	0,001227	0,048867	30,00
3	0,798	0,001235	0,052848	30,20
4	0,770	0,001288	0,048889	31,50
5	0,647	0,001227	0,043133	30,00
6	0,700	0,001186	0,048276	29,00
7	0,692	0,001309	0,043250	32,00
Média	0,722	0,001249	0,047281	30,529
Desvio Padrão	0,051	0,000042	0,003472	1,027

Na Figura 156 estão ilustradas as leis coesivas triangulares resultantes do processo de ajuste aos provetes ligados com o adesivo Araldite® AV138. Como se pode observar, as leis triangulares obtidas foram muito semelhantes. Salienta-se também que não foi necessário variar muito o valor de t_s^0 para se conseguir efetuar o ajuste das curvas P - δ , tendo-se verificado que o valor médio final de t_s^0 foi apenas 1% superior ao valor inicial introduzido para início da simulação. No decorrer do processo de ajuste não foram sentidas grandes dificuldades e, tendo em conta os bons resultados obtidos, pode afirmar-se que a lei coesiva triangular permite estimar de forma fiável o comportamento ao corte do adesivo Araldite® AV138 utilizando o ensaio 4ENF.

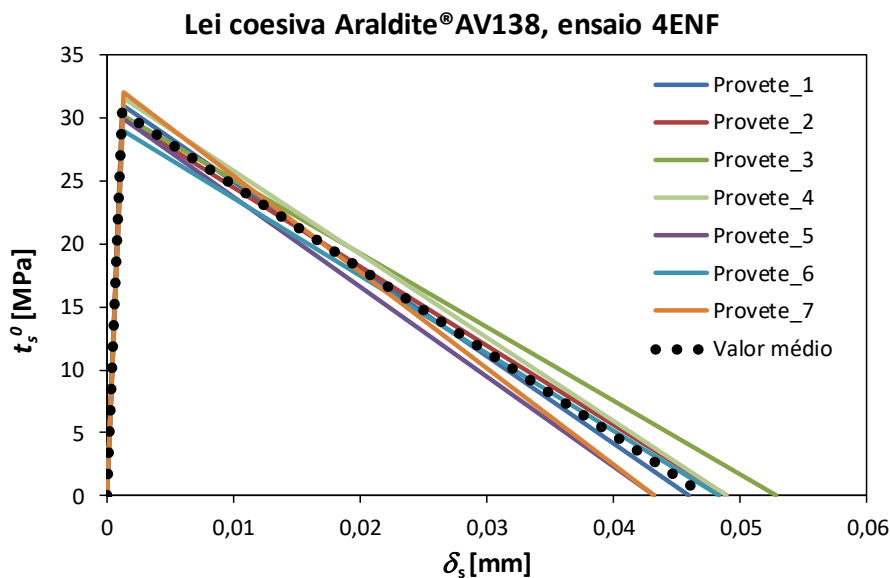


Figura 156 - Lei coesiva Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

3.2.3.2.2 Araldite® 2015

Na Tabela 41 apresentam-se os dados de entrada para o início do processo de ajuste numérico aos resultados experimentais obtidos dos ensaios 4ENF, aos provetes ligados com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 41 - Dados de entrada dos modelos numéricos do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	G_{Ic} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]
1	3,364	0,43	1850	560	21,63	17,9
2	3,209	0,43	1850	560	21,63	17,9
3	2,762	0,43	1850	560	21,63	17,9
4	3,036	0,43	1850	560	21,63	17,9
5	2,927	0,43	1850	560	21,63	17,9
6	Ensaio não considerado					
7	3,152	0,43	1850	560	21,63	17,9

Seguidamente, na Figura 157 e na Figura 158 exibem-se dois exemplos representativos do ajuste efetuado. Factualmente, e analisando a globalidade entre os resultados das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, verificou-se uma concordância razoável entre curvas. Todavia, contrariamente às curvas experimentais, as curvas numéricas apresentaram um patamar estável em toda a sua extensão desde o início da propagação da fenda, que representa a zona de maior relevância no processo de ajustamento. As oscilações experimentais obtidas na zona de patamar, devem-se a fenómenos localizados de propagação instável da fenda, que, no entanto, se considera não invalidarem a medição de G_{IIC} . Na zona elástica verifica-se uma ligeira diferença nas curvas $P-\delta$, já que a curva experimental tende a apresentar uma ligeira curvatura até ao início do patamar. Globalmente é possível considerar que as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente, reproduzem com eficácia as homólogas experimentais de todos os provetes em estudo.

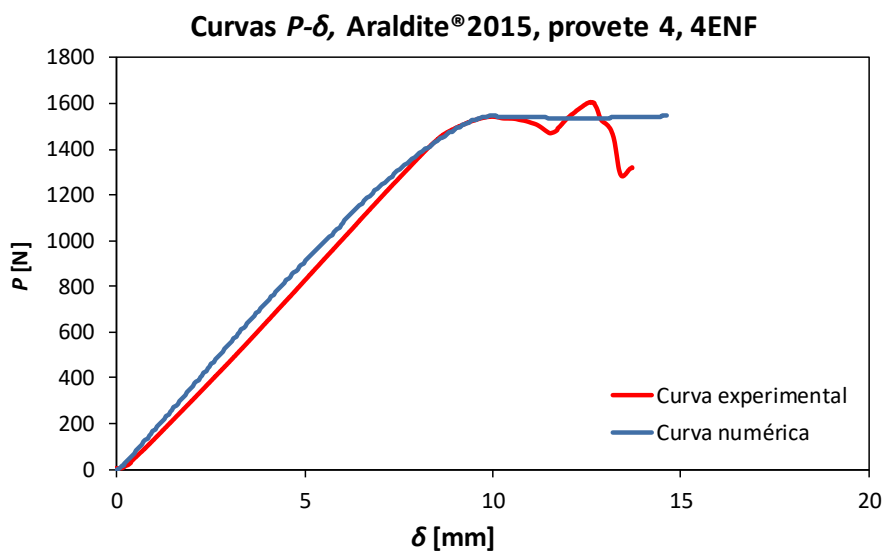


Figura 157 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® 2015 do provete 4, do ensaio 4ENF

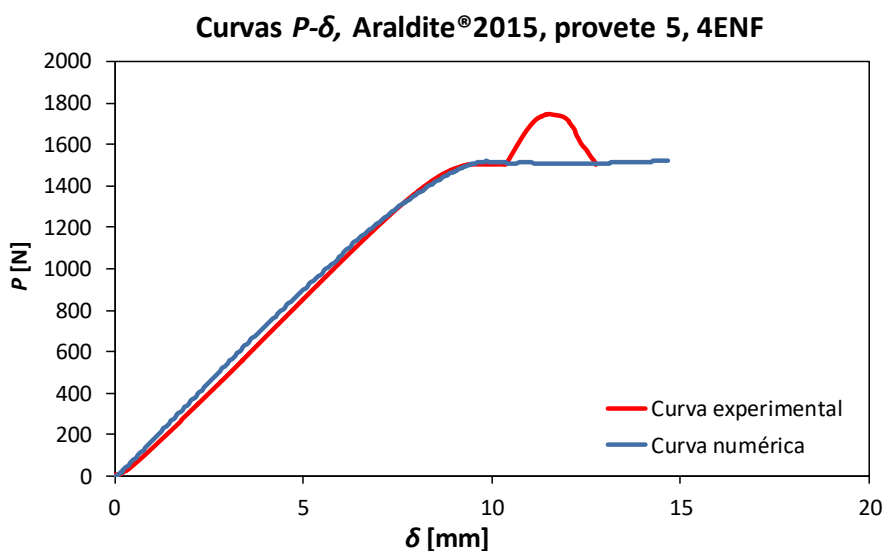


Figura 158 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo Araldite® 2015 do provete 5, do ensaio 4ENF

Na Tabela 42 indicam-se os valores resultantes do processo de ajustamento numérico efetuado. Foram obtidos os seguintes desvios percentuais: $\pm 8\%$ em G_{IIc} , $\pm 6\%$ em t_s^0 e nos deslocamentos, $\pm 6\%$ em δ_s^0 e $\pm 7\%$ em δ_s^f . Face aos valores obtidos e respetivos desvios é possível considerar que estes apresentam uma boa repetibilidade.

Tabela 42 - Dados obtidos pela lei triangular do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
1	3,230	0,001946	0,358889	18,00
2	2,580	0,001730	0,322500	16,00
3	2,762	0,002000	0,298595	18,50
4	3,030	0,002054	0,318947	19,00
5	2,927	0,002076	0,304896	19,20
6	Ensaio não considerado			
7	3,150	0,002011	0,338710	18,60
Média	2,947	0,001969	0,323495	18,217
Desvio Padrão	0,244	0,000126	0,022233	1,163

Na Figura 159 encontram-se ilustradas as leis coesivas triangulares resultantes dos valores da Tabela 42. Como é perceptível, todas as leis apresentam uma boa concordância entre elas. Com exceção do provete 2, que registou um valor de t_s^0 um pouco abaixo dos restantes, todos os outros registaram valores semelhantes. Se se comparar o valor médio de t_s^0 obtido através lei triangular com o valor correspondente de entrada regista-se um aumento pouco significativo, de cerca de $\pm 1,8\%$. Neste adesivo não foram necessárias muitas iterações para se obterem os resultados aqui apresentados, pelo que, nesse sentido, se pode concluir que a lei coesiva permite estimar de forma adequada o comportamento ao corte das juntas ligadas com este adesivo.

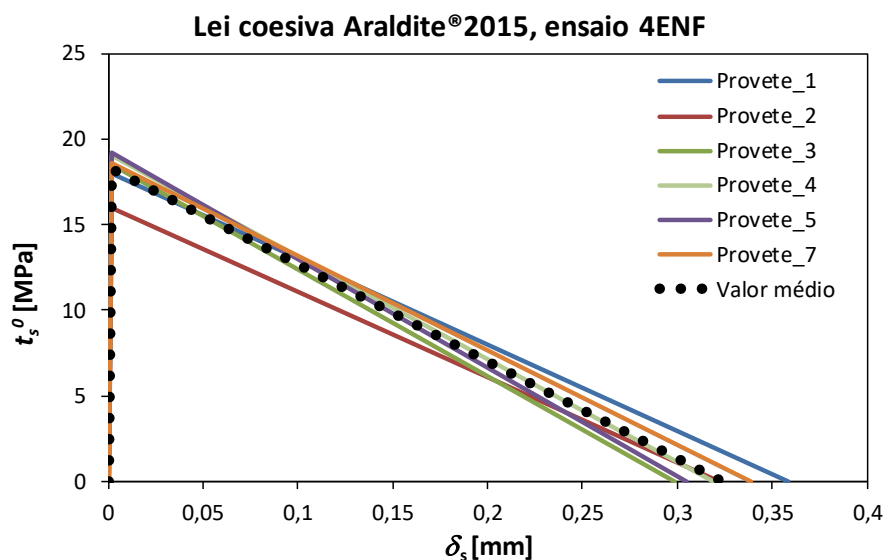


Figura 159 - Lei coesiva do adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

3.2.3.2.3 SikaForce® 7752

Na Tabela 43 transcrevem-se os valores usados para o arranque do processo de ajuste numérico aos dados experimentais, considerando o ensaio 4ENF e os provetes ligados com o adesivo SikaForce® 7752.

Tabela 43 - Dados de entrada dos modelos numéricos do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

Proвете	G_{IIC} [N/mm]	G_{Ic} [N/mm]	E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]
1	Ensaio não considerado					
2	5,299	2,36	494	188	11,49	10,17
3	5,297	2,36	494	188	11,49	10,17
4	Ensaio não considerado					
5	5,331	2,36	494	188	11,49	10,17
6	5,555	2,36	494	188	11,49	10,17
7	5,286	2,36	494	188	11,49	10,17

Na Figura 160 e na Figura 161 mostram-se dois exemplos do processo de ajuste efetuado às curvas P - δ experimentais. No decorrer do processo iterativo de ajuste foram sentidas algumas dificuldades em efetuar o ajustamento, devido ao facto de a lei triangular usada para obtenção dos parâmetros coesivos não ser a mais adequada para caracterizar adesivos dúcteis, como é o caso do SikaForce® 7752 [72]. Não obstante, foi possível após algumas iterações obter curvas que representam bastante razoavelmente as experimentais. Em todos os restantes provetes foi possível efetuar um ajuste muito semelhante ao apresentado na Figura 161.

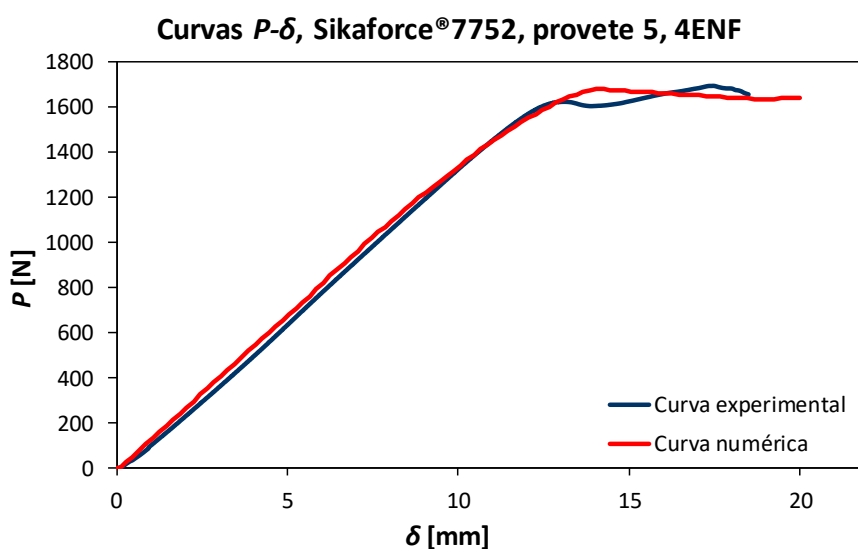


Figura 160 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo SikaForce® 7752 do provete 5, do ensaio 4ENF

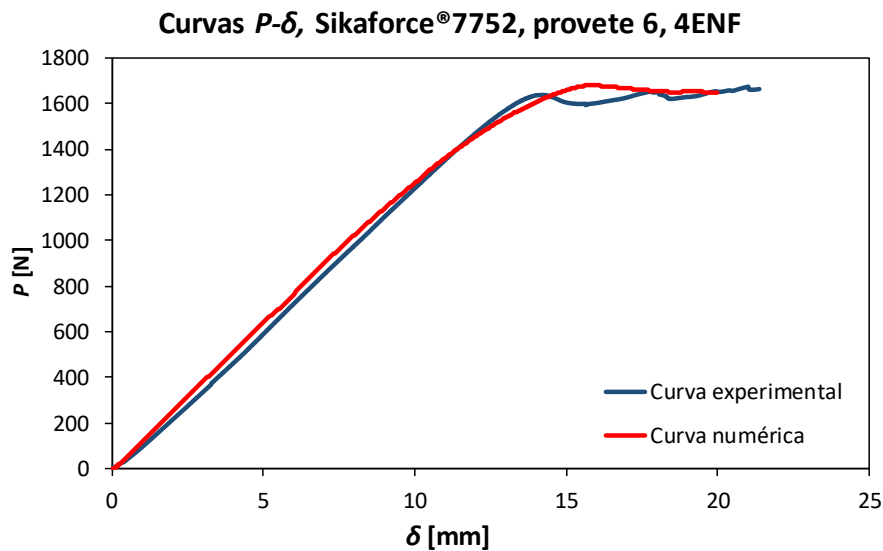


Figura 161 - Curvas P - δ numérica e experimental do adesivo SikaForce® 7752 do provete 3, do ensaio ENF

Exibem-se na Tabela 44 os dados referentes aos parâmetros coesivos e respectivos deslocamentos (δ_s^0 , δ_s^f) adquiridos após aplicação das leis coesivas triangulares. Atendendo à mesma tabela é possível comprovar a razoável concordância de valores. No que toca aos desvios percentuais registou-se em G_{IIC} um desvio de $\pm 4\%$ e em t_s^0 um desvio de $\pm 12\%$. Em relação aos deslocamentos verificou-se em δ_s^0 um desvio de $\pm 12\%$ e em δ_s^f um desvio de $\pm 10\%$.

Tabela 44 - Dados obtidos pela lei triangular do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

Provete	G_{IIC} [N/mm]	δ_s^0 [mm]	δ_s^f [mm]	t_s^0 [MPa]
1	Ensaio não considerado			
2	5,200	0,00810	0,52000	20,00
3	5,000	0,00810	0,50000	20,00
4	Ensaio não considerado			
5	4,800	0,00607	0,64000	15,00
6	5,400	0,00850	0,51429	21,00
7	5,100	0,00769	0,53684	19,00
Média	5,100	0,007692	0,536842	19,00
Desvio Padrão	0,224	0,000949	0,056228	2,345

A Figura 162 mostra as leis coesivas triangulares e lei coesiva média, obtidas para cada um dos provetes e adquiridas com recurso ao ajustamento das curvas P - δ experimentais do adesivo SikaForce® 7752. É possível verificar que as leis apresentadas manifestam um grau de concordância bastante razoável entre si, com exceção do provete 5 que apresenta um valor de t_s^0 um pouco mais baixo que os restantes. Comparativamente com o valor de t_s^0 introduzido, regista-se que o valor homólogo médio obtido após

processo de ajuste foi cerca de $\pm 87\%$ superior. Neste adesivo, devido às dificuldades atrás referidas foi necessário elevar bastante o valor de t_s^0 de forma a criar uma zona de patamar estável que se assemelhasse com o mesmo da curva $P-\delta$ experimental. Apesar das dificuldades sentidas no ajuste, foi possível através de uma lei coesiva triangular prever com alguma eficácia o comportamento da junta ligada com este adesivo.

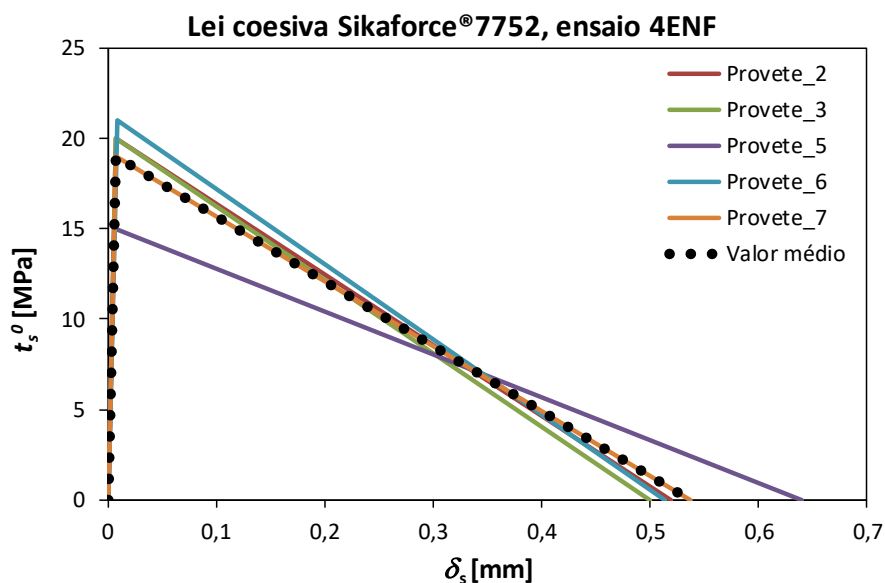


Figura 162 - Lei coesiva do adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

3.2.4 Análise de sensibilidade aos parâmetros coesivos

Em paralelo com o trabalho numérico foi efetuada uma análise de sensibilidade à variação dos parâmetros coesivos G_{IIC} e t_s^0 nos ensaios ENF e 4ENF, de forma a verificar o comportamento das curvas $P-\delta$ após a variação destes parâmetros e atestar o efeito dos mesmos no processo de ajuste e nos resultados. Seguidamente, são apresentados graficamente os resultados do estudo referido, assim como as respetivas conclusões.

3.2.4.1 Efeito da variação de G_{IIC} no ensaio ENF

Na Figura 163, na Figura 164 e na Figura 165 evidenciam-se os efeitos da variação G_{IIC} nos três adesivos estudados no ensaio ENF. Para o estudo foi considerado inicialmente o valor médio de G_{IIC} e t_s^0 , obtidos através do processo de ajuste, cujos valores se encontram na Tabela 34, na Tabela 36 e na Tabela 38. A partir destes valores foram efetuadas simulações tendo por base uma variação de -25%, -10%, +10% e +25%, a partir do valor médio. Na Figura 163 exibem-se os efeitos da variação referida no adesivo Araldite® AV138. Como se pode verificar, a variação de G_{IIC} exerce grande influência no comportamento das curvas. O aumento de G_{IIC} provoca um aumento da carga de pico e do deslocamento até à P_{max} . A diminuição de G_{IIC} provoca o efeito contrário, ou seja,

abaixamento do valor da P_{\max} , assim como a diminuição do deslocamento ao qual esta carga ocorre. A rigidez não é afetada pelos efeitos da variação de G_{IIC} .

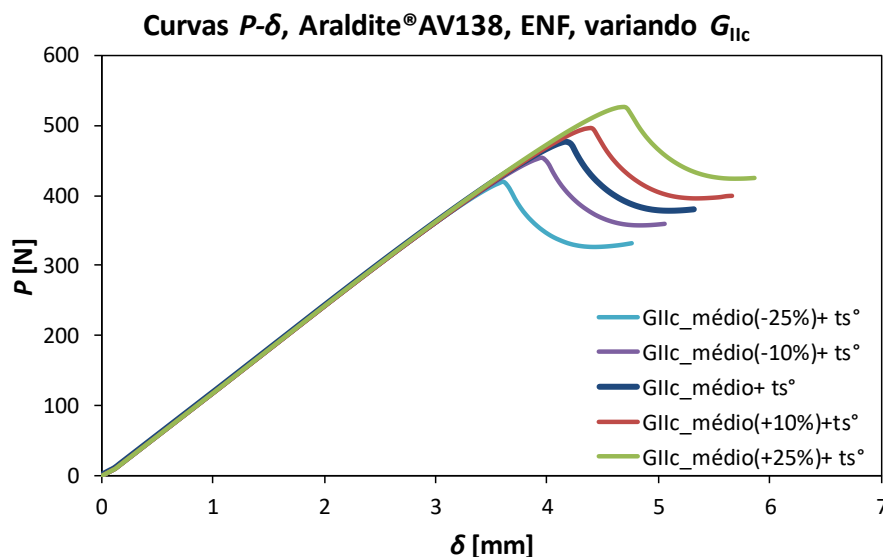


Figura 163 - Curvas P - δ da variação de G_{IIC} para o adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

Na Figura 164 apresentam-se os efeitos da variação de G_{IIC} no adesivo Araldite® 2015. Como se pode verificar, esta variação provoca os mesmos efeitos que no adesivo anterior, ou seja, o aumento de G_{IIC} induz um aumento no valor da P_{\max} e do respetivo deslocamento a que esta carga se dá, ao passo que a diminuição de G_{IIC} provoca o efeito contrário. Neste adesivo é perceptível que o aumento de G_{IIC} provoca um maior amaciamento da zona de P_{\max} . Neste adesivo, a rigidez também não é afetada de forma perceptível pelos efeitos da variação de G_{IIC} .

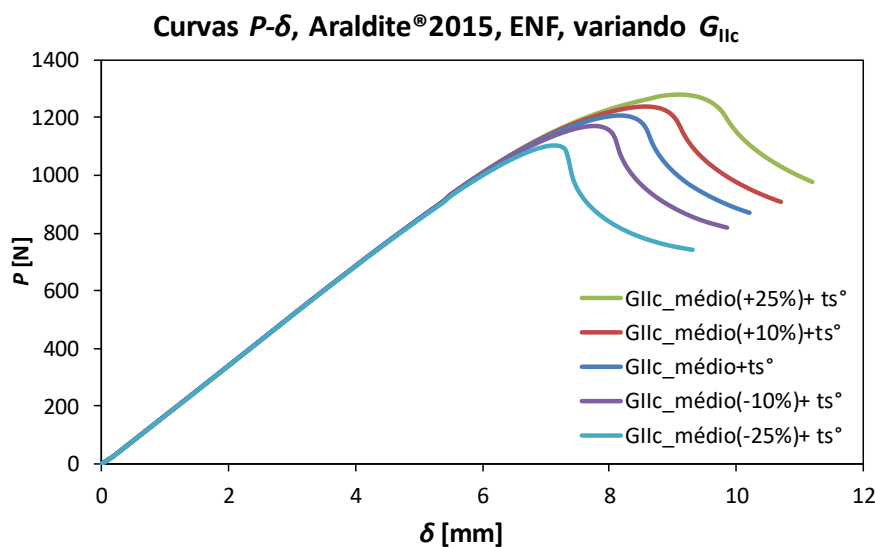


Figura 164 - Curvas P - δ da variação de G_{IIC} para o adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Como nos casos anteriores, na Figura 165 é apresentado o efeito da variação de G_{IIc} nas juntas ligadas com o adesivo SikaForce® 7752. Após análise da Figura 165 fica patente, mais uma vez, a grande sensibilidade das curvas $P-\delta$ à variação de G_{IIc} . O aumento de G_{IIc} provoca o aumento da carga de pico, assim como o aumento do deslocamento onde ocorre essa carga, ao passo que a diminuição de G_{IIc} provoca o efeito inverso. Como no adesivo anterior de ductilidade intermédia (Araldite® 2015) este adesivo apresenta um amaciamento das curvas na zona de P_{max} por aumento de G_{IIc} . Verifica-se também que a rigidez não é afetada de forma visível pelo aumento ou diminuição de G_{IIc} .

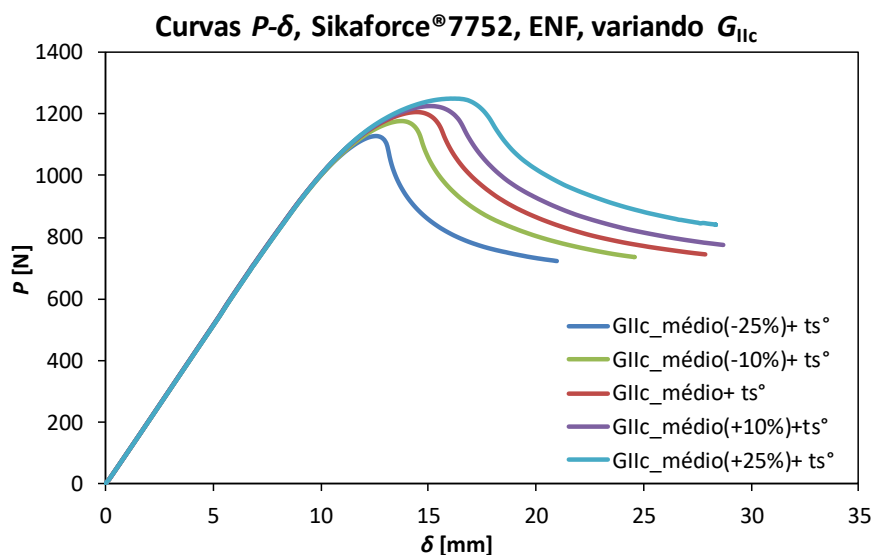


Figura 165 - Curvas $P-\delta$ da variação de G_{IIc} para o adesivo SikaForce® 7752, do ensaio ENF

3.2.4.2 Efeito da variação de t_s^0 no ensaio ENF

Para o estudo foi considerado inicialmente o valor médio de G_{IIc} e t_s^0 obtido através do processo de ajuste, que se encontram na Tabela 34, na Tabela 36 e na Tabela 38 para os adesivos, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce7752, respetivamente. A partir destes valores foram efetuadas simulações numéricas (Figura 166, Figura 167 e Figura 168) tendo por base uma variação de t_s^0 . As variações estudadas foram as seguintes: -50%, -10%, +10% e +50% a partir do valor médio de t_s^0 .

Na Figura 166 apresenta-se o efeito da variação de t_s^0 nas juntas ENF ligadas com o adesivo Araldite® AV138. Através da visualização da Figura 166, é possível constatar que o aumento progressivo de t_s^0 provoca um aumento da carga de pico necessária para o início da propagação da fenda, assim como o aumento da rigidez na zona pré-pico. Como era expectável, verifica-se que menores valores de t_s^0 originam um maior amaciamento das curvas $P-\delta$ e consequente diminuição do valor de P_{max} . A partir de um determinado patamar este amaciamento é mais perceptível.

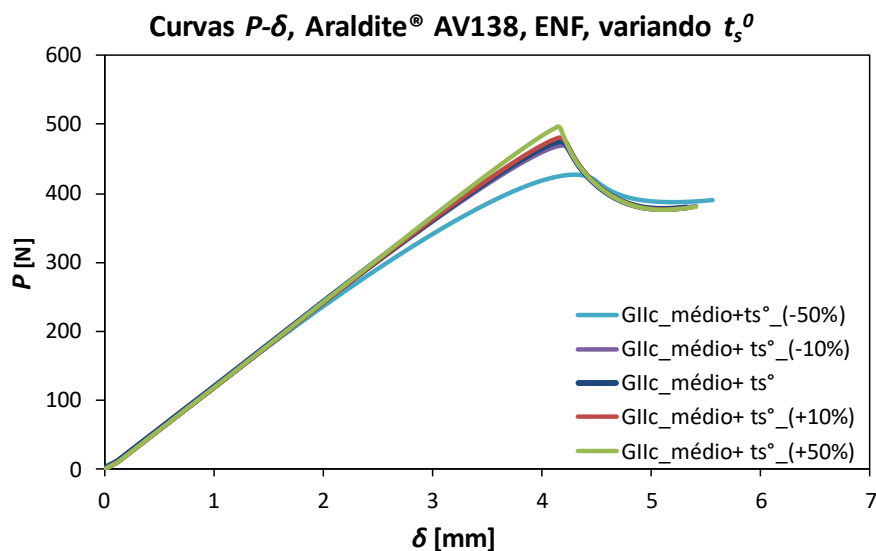


Figura 166 - Curvas P - δ da variação de t_s^0 para o adesivo Araldite® AV138, do ensaio ENF

De seguida, na Figura 167 exibem-se os efeitos da variação de t_s^0 para o adesivo Araldite® 2015. Como é perceptível, e comparando com o estudo anterior, os efeitos desta variação são muito similares aos apresentados anteriormente (adesivo Araldite® AV138). Não obstante, neste adesivo e devido à sua maior plasticidade, nota-se que a partir de um determinado valor de t_s^0 o valor da P_{max} sofre uma diminuição acentuada. Observa-se de igual modo um maior amaciamento das curvas P - δ na zona elástica para valores mais reduzidos de t_s^0 , comparativamente ao adesivo Araldite® AV138.

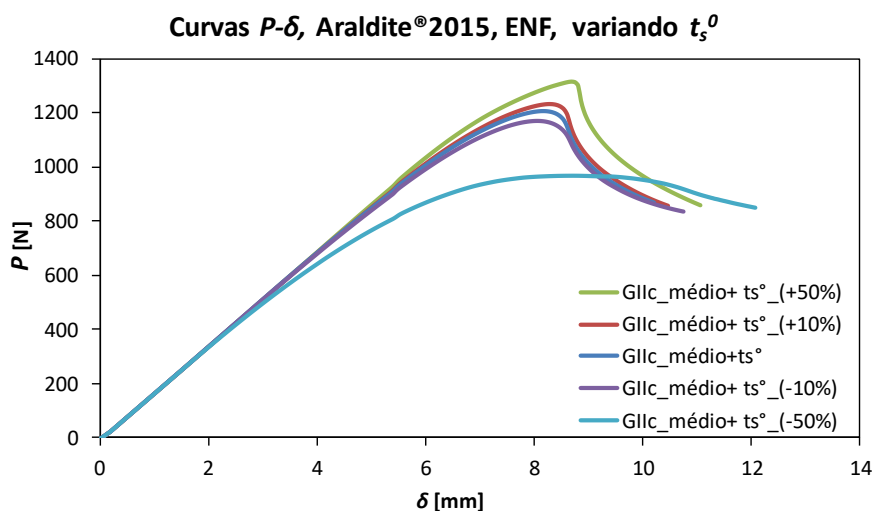


Figura 167 - Curvas P - δ , com a variação da t_s^0 para o adesivo Araldite® 2015, do ensaio ENF

Por último, na Figura 168 mostram-se os efeitos da variação de t_s^0 para o adesivo SikaForce® 7752. Neste caso, o comportamento das curvas P - δ com a variação de t_s^0 é muito similar ao registado no adesivo anterior (Araldite® 2015). No essencial verifica-se

que a variação de t_s^0 afeta em especial os valores da rigidez pré-pico. Outro aspeto a relevar é o facto que a partir de determinados valores de t_s^0 ocorre uma elevada diminuição do valor de P_{\max} .

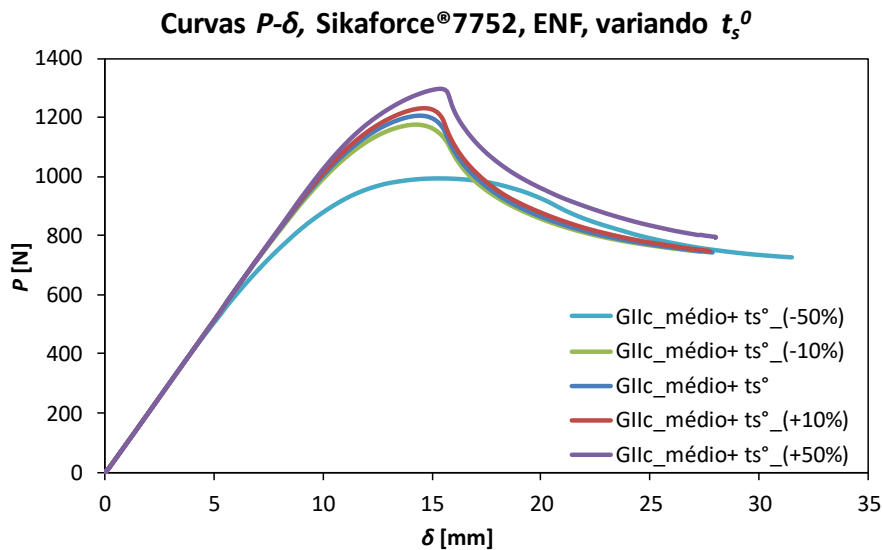


Figura 168 - Curvas P - δ da variação da t_s^0 para o adesivo SikaForce® 7752, no ensaio ENF

3.2.4.3 Efeito da variação de G_{IIC} no Ensaio 4ENF

Na Figura 169, na Figura 170 e na Figura 171 exibem-se as consequências da variação de G_{IIC} nas curvas P - δ dos ensaios 4ENF para os três adesivos. Para concretização do estudo foi inicialmente considerado o valor médio de G_{IIC} obtido através do processo iterativo de ajuste e os valores de referência de t_s^0 , descritos na Tabela 40, na Tabela 42 e na Tabela 44 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752, respetivamente. Com recurso a estes dados foram efetuadas simulações tendo por base uma variação da G_{IIC} de -25%, -10%, +10% e +25% a partir do valor médio.

Encontram-se ilustrados na Figura 169 os efeitos da variação de G_{IIC} . Como é possível verificar, a rigidez até à carga de início de propagação da fenda não varia com o aumento e diminuição de G_{IIC} , porém a P_{\max} e o deslocamento à carga máxima aumentam com o aumento de G_{IIC} , contrariamente ao que acontece com a diminuição de G_{IIC} , que provoca uma diminuição no valor de patamar. Como era expectável para este ensaio, verifica-se uma propagação estável da fenda após o início da sua propagação. Outro aspeto a salientar é que os patamares se mantêm estáveis com a variação de G_{IIC} , sendo o seu valor proporcional ao aumento ou diminuição de G_{IIC} .

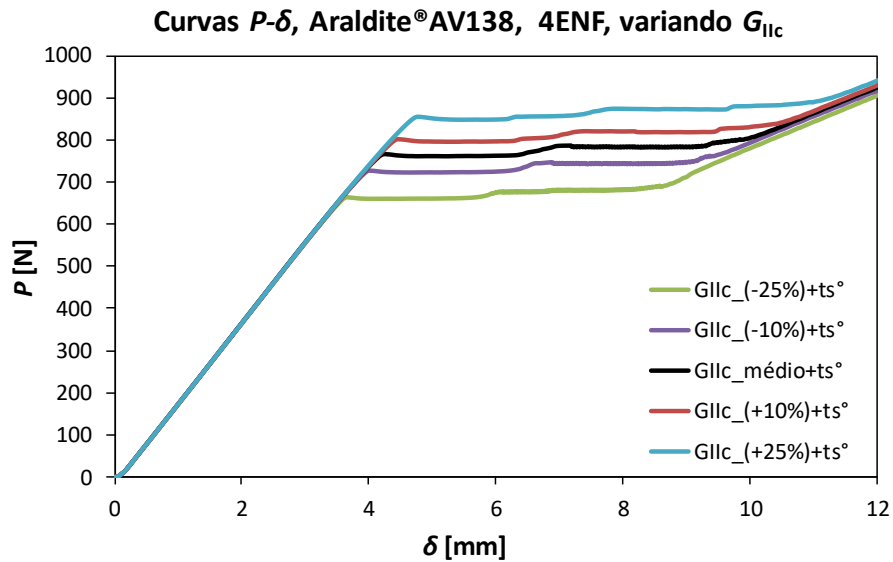


Figura 169 - Curvas P - δ da variação de G_{IIC} para o adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Na Figura 170 exibem-se as curvas P - δ , respeitantes à variação de G_{IIC} para o adesivo Araldite® 2015. Este adesivo apresenta o mesmo comportamento do adesivo Araldite® AV138, ou seja, o aumento ou diminuição de G_{IIC} , provoca em concordância o mesmo efeito no valor de patamar. Neste caso também não é perceptível uma a variação na rigidez por aumento ou diminuição de G_{IIC} . De referir que os valores de patamar crescem ou decrescem de forma proporcional ao aumento ou diminuição de G_{IIC} .

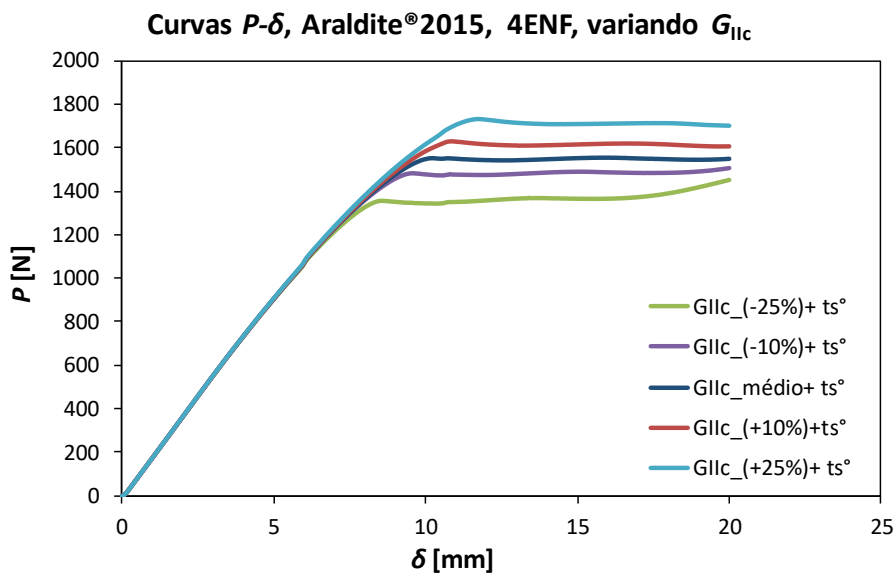


Figura 170 - Curvas P - δ da variação de G_{IIC} para o adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Na Figura 171 apresentam-se os efeitos da variação de G_{IIC} nas curvas P - δ respeitantes aos provetes ligados com o adesivo SikaForce® 7752. Constata-se que o aumento de G_{IIC}

provoca um aumento da P_{\max} . A rigidez não é especialmente afetada por esta variação durante o comportamento elástico do adesivo. A partir de um certo valor de G_{IIC} verifica-se um maior amaciamento da zona de pico, como é perceptível pela Figura 171. Devido à elevada ductilidade do adesivo e ao facto de ser utilizada uma lei triangular para o caracterizar [72, 83], só a partir de um determinado valor de G_{IIC} é que se verificam algumas semelhanças entre as curvas $P-\delta$ da Figura 171 em comparação com as curvas $P-\delta$ numéricas da Figura 108.

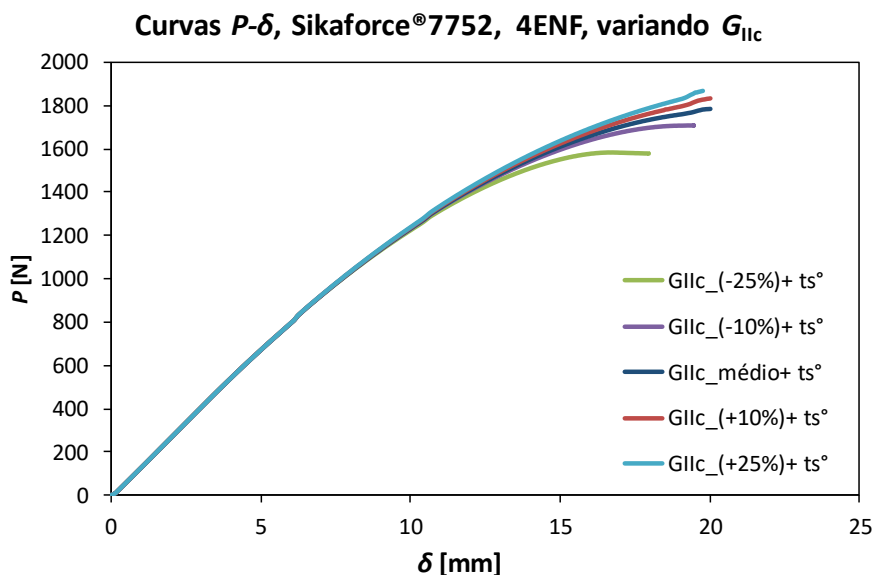


Figura 171 - Curvas $P-\delta$ da variação de G_{IIC} para o adesivo Sikaforce®AV138, do ensaio 4ENF

3.2.4.4 Efeito da variação de t_s^0 no Ensaio 4ENF

Analogamente ao estudo realizado no ensaio ENF, neste foi considerado inicialmente o valor médio de G_{IIC} obtido através do processo iterativo de ajuste, e o valor de referência de t_s^0 (Tabela 40, na Tabela 42 e na Tabela 44 para os adesivos Araldite® AV138, Araldite® 2015 e Sikaforce7752, respetivamente). Com os dados atrás mencionados foram efetuadas simulações tendo por base uma variação da t_s^0 de -50%, -10%, +10% e +50% a partir do valor de referência.

Na Figura 172 apresenta-se o efeito da variação de t_s^0 nas juntas deste ensaio ligadas com o adesivo Araldite® AV138. Através da visualização da mesma figura é possível constatar que o aumento progressivo de t_s^0 não provoca grandes variações nas curvas $P-\delta$. A variação de t_s^0 não altera o valor de início de propagação de fenda e o valor de patamar da curva $P-\delta$. No que respeita à rigidez esta sofre apenas uma ligeira diminuição para valores reduzidos de t_s^0 .

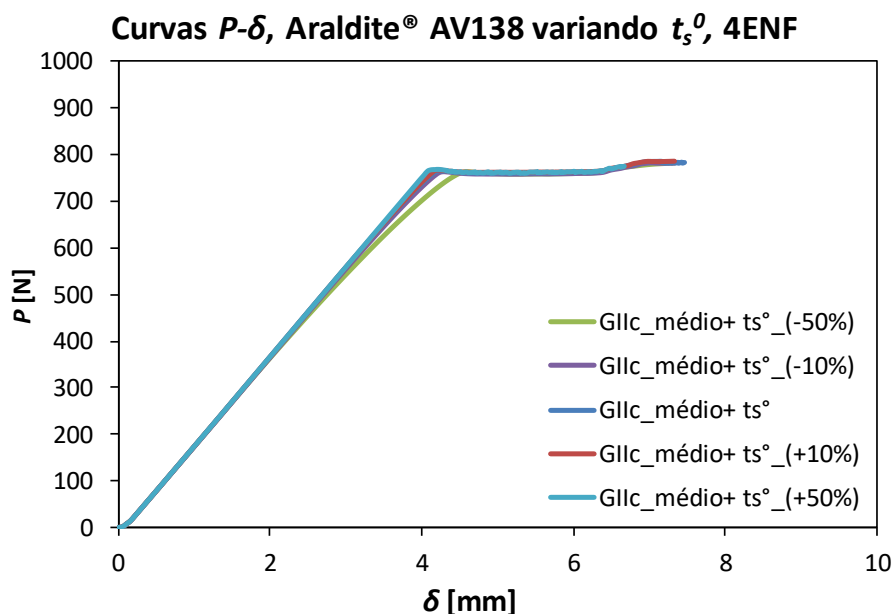


Figura 172 - Curvas P - δ da variação de t_s^0 para o adesivo Araldite® AV138, do ensaio 4ENF

Na Figura 173 apresenta-se o estudo da variação de t_s^0 nos provetes ligados com o adesivo Araldite® 2015. De forma semelhante ao adesivo anterior, o aumento ou diminuição de t_s^0 não afetam o valor da P_{max} . Porém, a diminuição de t_s^0 induz uma redução da rigidez e um maior amaciamento das curvas. Estes efeitos são mais perceptíveis a partir de um determinado valor de t_s^0 . Salienta-se também que a variação de t_s^0 não afeta o valor da carga de início de propagação da fenda assim como o comportamento do patamar, mantendo-se esta constante nas variações consideradas.

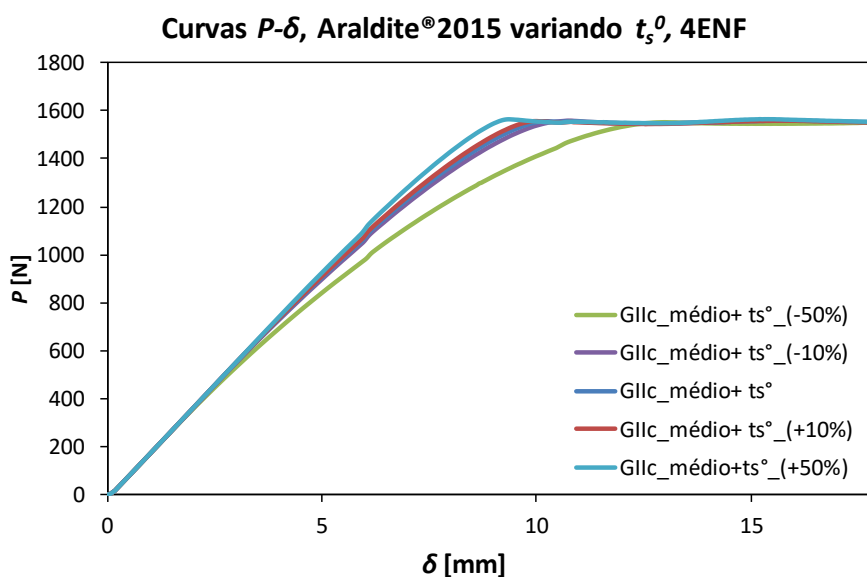


Figura 173 - Curvas P - δ da variação de t_s^0 para o adesivo Araldite® 2015, do ensaio 4ENF

Tal como referido anteriormente, o uso de uma lei de dano coesiva triangular para caracterizar um adesivo dúctil não é a mais adequada, pois é mais difícil conseguir ajustar os parâmetros coesivos a adesivos mais plásticos, o que é mais uma vez perceptível no estudo que se mostra na Figura 174, relativo ao adesivo SikaForce® 7752. Como se pode verificar, só para valores elevados de t_s^0 é que se consegue criar um patamar representativo do ensaio 4ENF. Com recurso à Figura 174, verifica-se que o aumento de t_s^0 provoca o aumento da rigidez. O valor de P_{max} não é muito afetado, todavia a partir de uma certa redução de t_s^0 esta sofre uma queda acentuada.

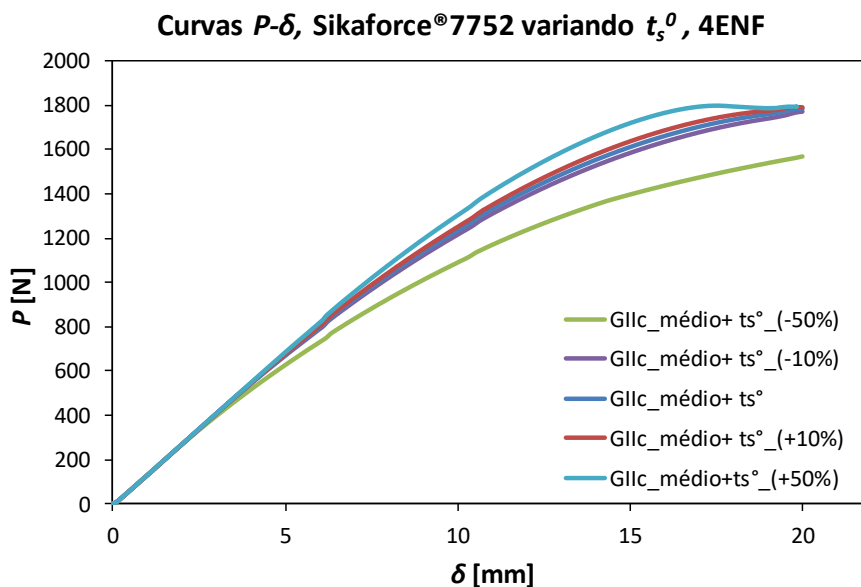


Figura 174 - Curvas P - δ da variação de t_s^0 para o adesivo SikaForce® 7752, do ensaio 4ENF

3.2.5 Validação dos métodos de redução de G_{IIC}

Com o intuito de validar o uso dos métodos de redução para o cálculo de G_{IIC} efetuou-se uma análise de adequabilidade de cada um desses métodos. Para esse efeito, foi feita uma simulação numérica para cada adesivo onde foi introduzido o valor médio de G_{IIC} . Este procedimento foi efetuado para os três adesivos e para os dois ensaios, ENF e 4ENF. Às curvas P - δ numéricas resultantes foram aplicados os métodos de redução utilizados para a determinação de G_{IIC} , a partir dos dados experimentais: CCM, CBT, CBBM e DBT no ENF e CCM e CBT no 4ENF. Foi realizada a medição do comprimento de fenda durante a propagação do dano no ABAQUS®, de forma a ser utilizada nos métodos CCM, CBT e DBT para o respetivo cálculo de G_{IIC} .

3.2.5.1 Ensaio End Notched Flexure (ENF)

Na Figura 175, Figura 176 e Figura 177 representam-se os dados obtidos após aplicação dos métodos de redução às curvas $P-\delta$ resultantes da simulação de um ensaio ENF, com cada um dos três adesivos em estudo.

3.2.5.1.1 Araldite® AV138

Neste adesivo (Figura 175) as curvas- R apresentam uma boa concordância com o valor introduzido de G_{IIC} nos modelos CCM, DBT e CBBM, ao passo que o método CBT tende a subestimar esse valor [37]. Constata-se que houve uma região com patamar bem definido, que corresponde à propagação de fenda com G_{IIC} constante nos quatro métodos de redução utilizados. Porém, no decorrer da simulação e devido ao facto da fenda se aproximar do cilindro de carga, verifica-se um comportamento crescente de G_{IIC} , que se deve à compressão da camada adesiva. Como é observável na mesma figura (Figura 175), o método CBBM é o que mais se aproxima do valor introduzido. Uma das causas plausíveis prende-se com o facto de este método não necessitar da medição manual do comprimento de fenda durante a sua propagação, sendo o seu valor obtido diretamente a partir das curvas $P-\delta$, contrariamente ao que acontece nos métodos CCM, DBT e CBT, o que tende a introduzir erros adicionais. Por outro lado, este método também contabiliza a ZPF [43].

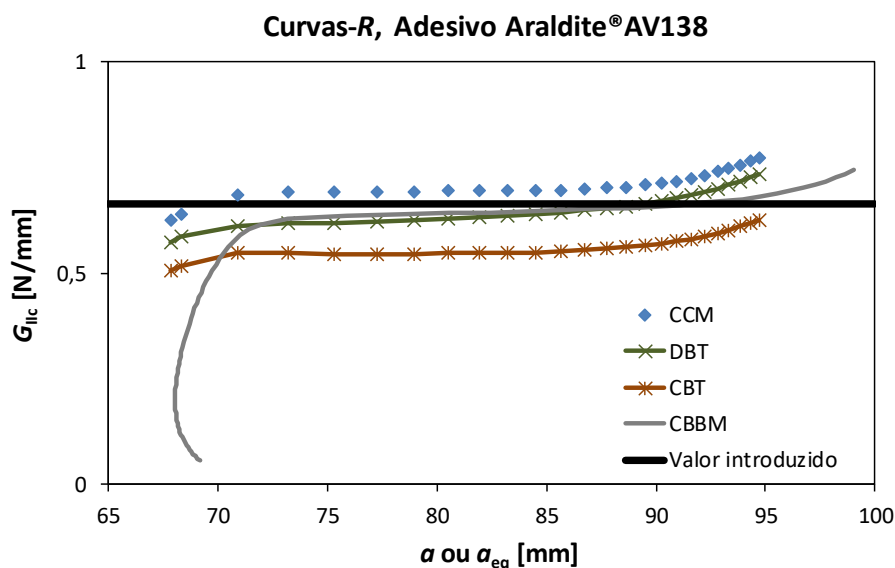


Figura 175 - Comparativo entre valores de G_{IIC} obtidos pelos diferentes métodos, no adesivo Araldite® AV138 no ensaio ENF

3.2.5.1.2 Araldite® 2015

Na Figura 176 exibem-se os dados referentes à aplicação dos quatro métodos de redução no adesivo Araldite® 2015. Analogamente ao adesivo anterior, todas as curvas

apresentam um patamar razoável para a medição de G_{IIc} . Porém, neste adesivo as curvas ficam um pouco abaixo do valor introduzido à exceção do CCM, que pode ser atribuído à plasticidade deste adesivo. Nota-se também uma redução do patamar comparativamente ao adesivo Araldite® AV138, que se deve ao facto de este adesivo possuir uma maior ductilidade, originado que a ZPF se estenda a um comprimento maior à frente da fenda. Assim sendo, os efeitos compressivos do cilindro de carregamento começam a ser observados antes do registado no adesivo anterior. Nota-se mais uma vez que o método CBBM é o que produz melhores resultados devido às razões explicadas no adesivo anterior.

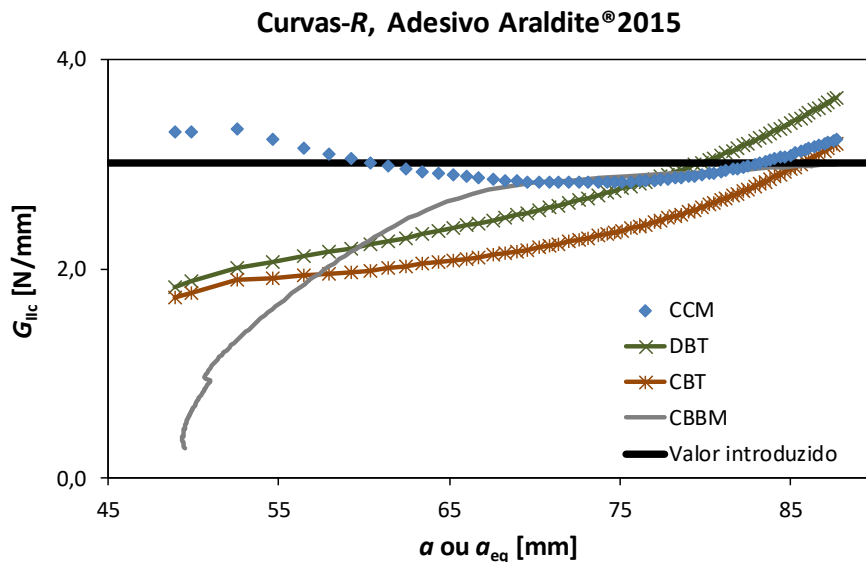


Figura 176 - Comparativo entre valores de G_{IIc} obtidos pelos diferentes métodos, no adesivo Araldite® 2015 no ensaio ENF

3.2.5.1.3 SikaForce® 7752

Na Figura 177 mostram-se as curvas-R obtidas pela aplicação dos métodos de redução no adesivo SikaForce® 7752. Como é visível, torna-se mais notória a diferença entre os valores de patamar das curvas e o valor introduzido e evidencia-se também uma redução no patamar de medição. Estas diferenças, comparativamente com os adesivos anteriores, explicam-se pela maior plasticidade deste adesivo. Como nos casos anteriores, o método CBBM evidencia ser o mais robusto.

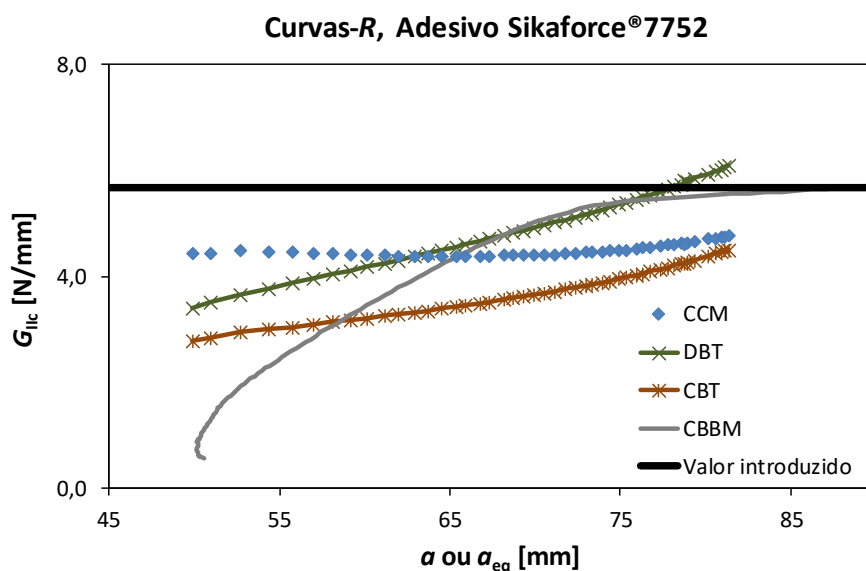


Figura 177 - Comparativo entre valores de G_{IIc} obtidos pelos diferentes métodos, no adesivo SikaForce® 7752 no ensaio ENF

3.2.5.2 Ensaio Four-Point End Notched Flexure (4ENF)

Na Figura 178, Figura 179 e Figura 180 exibem-se as curvas-R, obtidas através da aplicação dos métodos de redução CCM e CBT às curvas $P-\delta$ resultantes da simulação de ensaios 4ENF utilizando os três adesivos em estudo.

3.2.5.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 178 representam-se as curvas-R obtidas pela aplicação dos métodos de redução CCM e CBT para o adesivo Araldite® AV138. Como é perceptível pela figura, foi possível obter um patamar estável durante a propagação da fenda, sendo o seu valor bastante similar com o valor introduzido. Através da figura apresentada é possível verificar que houve uma região com patamar bastante estável, que corresponde à propagação de fenda com G_{IIc} constante em ambos os métodos de redução utilizados. Verifica-se este comportamento até à aproximação da fenda da zona de carregamento. Comparativamente com as curvas-R obtidas no ensaio ENF para o mesmo adesivo (Figura 175), observa-se neste caso um patamar bastante mais estável, sendo este fator uma das principais características do ensaio 4ENF.

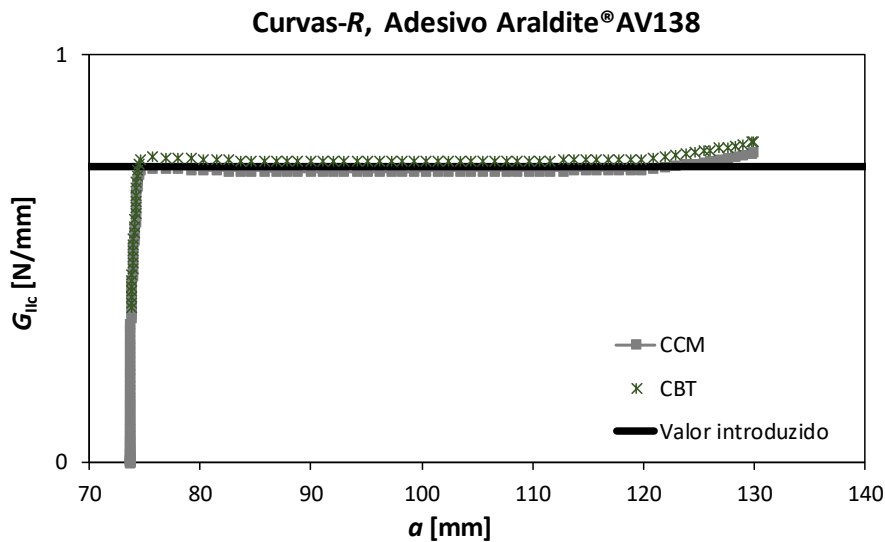


Figura 178 - Comparativo entre valores de G_{IIc} obtidos pelos diferentes métodos, no adesivo Araldite® AV138 no ensaio 4ENF

3.2.5.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 179 encontram-se representadas as curvas-R, referentes à aplicação dos métodos de redução CCM e CBT no adesivo Araldite® 2015. Os dois métodos apresentados registaram valores de patamar bastante similares ao valor introduzido. Como no caso anterior as curvas-R apresentam um patamar de G_{IIc} bastante estável durante todo o processo da propagação de fenda. Nota-se neste adesivo, comparativamente com o anterior, um aumento da curvatura da curva-R antes do início da propagação do dano, que se deve ao facto da maior ductilidade deste adesivo.

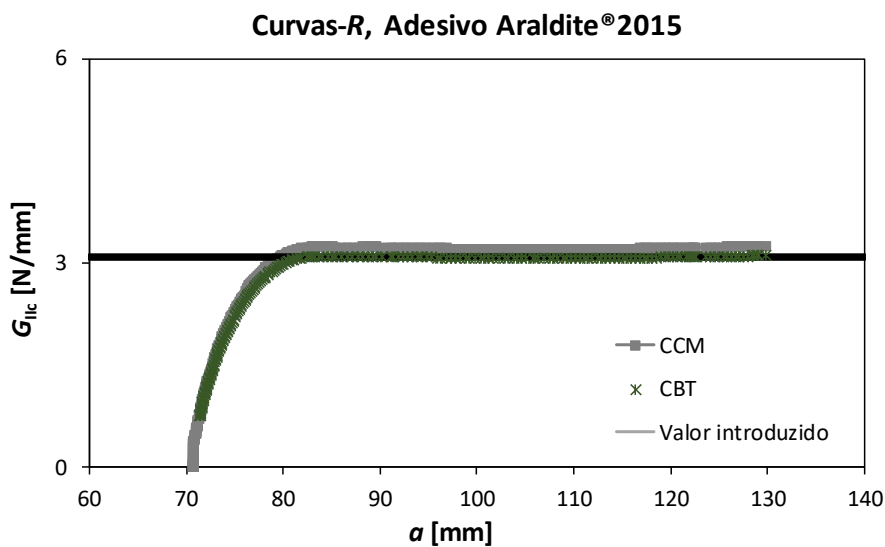


Figura 179 - Comparativo entre valores de G_{IIc} obtidos pelos diferentes métodos, no adesivo Araldite® 2015 no ensaio 4ENF

3.2.5.2.3 SikaForce® 7752

Na Figura 180 exibem-se as curvas-*R* resultantes da aplicação dos métodos de redução CCM e CBT, no adesivo SikaForce® 7752 como se pode visualizar pela figura não foi possível obter um patamar estável para a medição de G_{IIc} . Uma das causas plausíveis prende-se com o facto de a lei triangular não ser a mais adequada para caracterizar adesivos dúcteis [67]. Este comportamento foi verificado durante todo o processo de ajuste numérico. Não obstante nota-se que as curvas tendem a convergir para o valor introduzido.

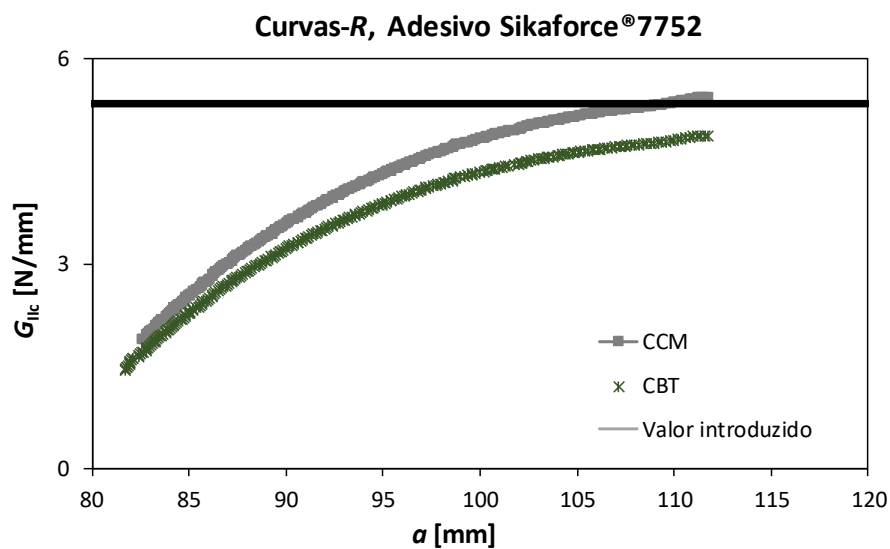


Figura 180 - Comparativo entre valores de G_{IIc} obtidos pelos diferentes métodos, no adesivo SikaForce® 7752 no ensaio 4ENF

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

Com este trabalho pretendeu-se efetuar uma avaliação numérica dos ensaios ENF e 4ENF para a medição do valor de G_{IIC} em juntas adesivas, considerando adesivos com diferentes ductilidades, do mais frágil para o mais dúctil, Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. O trabalho numérico foi realizado com recurso ao *software* ABAQUS®.

Inicialmente foram determinados os valores médios de G_{IIC} através de quatro diferentes métodos de redução (CCM, DBT, CBT e CBBM) no ensaio ENF, ao passo que no ensaio 4ENF foram utilizados os métodos de redução CCM e CBT, tendo neste último sido utilizada uma correção de atrito de acordo com o estudo realizado por de Oliveira [1].

No ensaio ENF obtiveram-se os seguintes valores médios de G_{IIC} para o adesivo Araldite® AV138: $0,569 \pm 0,085$ N/mm (CCM), $0,534 \pm 0,069$ N/mm (DBT), $0,485 \pm 0,047$ N/mm (CBT) e $0,621 \pm 0,098$ N/mm (CBBM), ao passo que para o adesivo Araldite® 2015 se registaram os seguintes valores: $3,746 \pm 0,365$ N/mm (CCM), $2,829 \pm 0,299$ N/mm (DBT), $2,646 \pm 0,176$ N/mm (CBT) e $2,929 \pm 0,287$ N/mm (CBBM). Por último, para o adesivo SikaForce® 7752, apenas foi usado o método CBBM, tendo-se obtido $5,560 \pm 0,344$ N/mm. No que concerne ao ensaio 4ENF obtiveram-se os seguintes valores médios de G_{IIC} para o adesivo Araldite® AV138: $0,726 \pm 0,062$ N/mm (CCM) e $0,709 \pm 0,064$ N/mm (CBT). Para o adesivo Araldite® 2015, obteve-se $3,075 \pm 0,214$ N/mm (CCM) e $3,167 \pm 0,297$ N/mm (CBT). Para o adesivo SikaForce® 7752 obtiveram-se os seguintes valores: $5,354 \pm 0,114$ N/mm (CCM) e $5,180 \pm 0,417$ N/mm (CBT). Face aos resultados obtidos pode afirmar-se que houve uma boa concordância de valores entre ensaios (ENF e 4ENF). De facto, estes revelaram boa reprodutibilidade tanto nas curvas $P-\delta$ como nas curvas- R , mostrando dessa forma a robustez dos resultados obtidos e a veracidade dos ensaios experimentais. No ensaio ENF, o método CBT apresentou sempre valores por defeito para todos os provetes em estudo, comparativamente aos restantes métodos. No ensaio 4ENF, a não contabilização do atrito no método CBT origina enormes discrepâncias nos valores de G_{IIC} comparativamente com o método CCM. O método CBT sobreavalia o valor de G_{IIC} . Tendo em conta os resultados obtidos de G_{IIC} (ENF e 4ENF) e estudos apresentados por outros autores [70, 72] para estes adesivos, o Araldite® AV138 revelou-se como expectável o mais frágil, seguindo-se o Araldite® 2015 e por fim o SikaForce® 7752. Evidenciou-se uma variação da extensão do patamar das curvas- R , que foi reduzindo desde o adesivo mais frágil para o mais dúctil, devido ao aumento da ZPF. De facto, com o aumento da ductilidade do adesivo, a ZPF exibiu uma dimensão crescente, chegando mais rapidamente à zona central de carregamento do provete. Nesta fase torna-se inviável a medição de G_{IIC} devido à adição de esforços de compressão ao estado de tensão que deveria ser de corte puro.

No ensaio ENF, posteriormente à análise dos dados obtidos pelos diversos métodos de redução, o CBBM pode ser considerado o mais robusto e fiável por dois motivos: em primeiro lugar não necessita da medição do comprimento de fenda e em segundo lugar contabiliza de modo mais rigoroso a plasticidade na medição de G_{IIC} . Os outros três métodos requerem a medição do comprimento de fenda, podendo este facto introduzir erros adicionais. O CCM, para além desta fonte de erro, revelou também dificuldades no ajuste do polinómio $C=f(a)$. No ensaio 4ENF, pode afirmar-se que a metodologia CCM foi a mais robusta e fiável. Como referido anteriormente, a não contabilização dos efeitos do atrito no método CBT origina elevadas discrepâncias. Não obstante, com as correções de atrito consideradas nos três adesivos foi possível obter um elevado grau de concordância entre os valores de G_{IIC} obtidos pelas duas metodologias referidas.

Ao efetuar a análise numérica foi possível determinar o valor de t_s^0 para cada ensaio através do método inverso, explicado no subcapítulo 2.5.2.1. Com os valores de t_s^0 e G_{IIC} daí obtidos foi possível elaborar uma lei coesiva média para cada ensaio representativa do adesivo. No ensaio ENF obtiveram-se os seguintes valores para o adesivo Araldite® AV138: $0,626 \pm 0,099$ N/mm (G_{IIC}), $23,00 \pm 5,944$ MPa (t_s^0), $0,000941 \pm 0,000243$ mm (δ_s^0) e $0,054422 \pm 0,012178$ mm (δ_s^f), ao passo que para o adesivo Araldite® 2015 foram obtidos os seguintes valores: $3,052 \pm 0,353$ N/mm (G_{IIC}), $19,37 \pm 2,89$ MPa (t_s^0), $0,002094 \pm 0,000313$ mm (δ_s^0) e $0,315147 \pm 0,050977$ mm (δ_s^f). Finalmente, para o adesivo SikaForce® 7752 foram obtidos os seguintes valores: $5,560 \pm 0,344$ N/mm (G_{IIC}), $18,99 \pm 1,69$ MPa (t_s^0), $0,007687 \pm 0,000684$ mm (δ_s^0) e $0,585749 \pm 0,072667$ mm (δ_s^f). No ensaio 4ENF foram obtidos os seguintes valores para o adesivo Araldite® AV138: $0,722 \pm 0,051$ N/mm (G_{IIC}), $30,529 \pm 1,027$ MPa (t_s^0), $0,001249 \pm 0,000042$ mm (δ_s^0) e $0,047281 \pm 0,003472$ mm (δ_s^f), ao passo que para o adesivo Araldite® 2015 foram obtidos os seguintes valores: $2,947 \pm 0,244$ N/mm (G_{IIC}), $18,217 \pm 1,163$ MPa (t_s^0), $0,001969 \pm 0,000126$ mm (δ_s^0) e $0,323495 \pm 0,022233$ mm (δ_s^f). Por fim, para o adesivo SikaForce® 7752 foram obtidos os seguintes valores: $5,100 \pm 0,224$ N/mm (G_{IIC}), $19,00 \pm 2,35$ MPa (t_s^0), $0,007692 \pm 0,000949$ mm (δ_s^0) e $0,536842 \pm 0,056228$ mm (δ_s^f).

No ensaio ENF foi possível efetuar aproximações às curvas $P-\delta$ experimentais de uma forma bastante precisa. No ensaio 4ENF, este ajuste não foi tão preciso. No ensaio 4ENF foram sentidas algumas dificuldades no ajuste das curvas $P-\delta$ nos dois adesivos mais dúcteis, o que se deveu ao facto da lei de dano triangular usada não ser a mais adequada para a caracterização de adesivos dúcteis [72, 83].

Neste trabalho foi também realizado um estudo de sensibilidade para averiguar o efeito da variação de G_{IIC} e t_s^0 na forma da curva $P-\delta$, tendo-se verificado que o valor de G_{IIC} é o parâmetro que mais condiciona as curvas $P-\delta$. De facto, a sua variação tem maior influência no valor da carga de pico, ao passo que t_s^0 influencia de uma forma mais significativa a rigidez na zona elástica. Concluindo, e face aos resultados obtidos, verifica-se que através do método inverso é possível obter leis coesivas em corte nos ensaios ENF e 4ENF.

Com o intuito de verificar a boa adequação dos quatro métodos de redução utilizados foi efetuado um estudo numérico, que consistiu na aplicação destes métodos a curvas $P-\delta$ numéricas daí extraídas. Este estudo permitiu obter bons resultados para o adesivo Araldite® AV138 e Araldite® 2015. Todavia, para o adesivo SikaForce® 7752 os resultados não foram tão satisfatórios devido à sua maior ductilidade, não obstante de se poder considerar que na globalidade os resultados foram aceitáveis.

Face ao exposto é possível concluir que:

- Os MDC são uma ferramenta bastante eficaz para o cálculo da resistência das juntas adesivas;
- Com o uso de uma lei de dano triangular foi possível obter leis de dano coesivas ao corte para os três adesivos em estudo;
- O ensaio 4ENF, apesar de pouco estudado para juntas adesivas, afigura-se como uma alternativa que oferece resultados bastante fiáveis e verosímeis.

Para trabalhos futuros sugere-se:

- Utilização da lei trapezoidal para o estudo numérico;
- Comparação dos ensaios ENF e 4ENF com o ensaio ELS;
- Realização de novos ensaios ENF e 4ENF com substratos de diferentes materiais aos apresentados de forma a averiguar as diferenças produzidas;
- Realização do ensaio 4ENF utilizando o mesmo material usado nos provetes estudados, mas com variações entre o rácio $2L/L_i$ de modo a analisar os seus efeitos;
- Realização de um estudo numérico tendo por base o ensaio referido no ponto anterior.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. de Oliveira, B.M.A., *Comparação dos métodos ENF e 4-ENF para determinação da tenacidade ao corte de juntas adesivas*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2016, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
2. Azevedo, J.C.S., *Determinação da tenacidade à fratura em corte (G_{IIc}) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
3. Koller, J., U. Baumer, and D. Mania, *High-Tech in the Middle Palaeolithic: Neandertal-Manufactured Pitch Identified*. *European Journal of Archaeology*, 2001. **366**: p. 385-397.
4. Wadley, L., *Compound-Adhesive Manufacture as a Behavioral Proxy for Complex Cognition in the Middle Stone Age*. The University of Chicago Press 2013.
5. Adams, R.D., *Adhesive bondage, science technology and applications*. 2005.
6. Petrie, E.M., *Handbook of adhesives and sealants*. 2000, New York: McGraw-Hill.
7. da Silva, L.F.M., A.G. de Magalhães, and M.F.S.F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007: Publindústria.
8. Hagerty, J.R. and M. Ramsey, *Super Glues Are the Secret to Making Cars Lighter*. *The Wall Street Journal*, Updated Sept. 8, 2014 1:21 p.m. ET
9. Adhesives.org. *Chemically-curing*. 2016 [cited 2016 05/10/2016]; Available from: <http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/adhesives-sealants-overview/adhesive-technologies/chemically-curing>.
10. Adhesives.org. *Transportation*. 2016 [cited 2016 05/10/2016]; Available from: <http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/market-overview-applications/transportation>.
11. Adhesives.org. *Building-construction*. 2016 [cited 2016 05/10/2016]; Available from: <http://www.adhesives.org/adhesives-sealants/market-overview-applications/building-construction>.
12. online, C. 2016 [cited 2016 05/10/2016]; Available from: <https://www.continente.pt/stores/continente/pt-pt/public/Pages/pageview/Casa/Bricolage/dicas-para-colar-isolar-fixar.aspx>.
13. Pinto, A.M.G., *Ligações Adesivas Entre Materiais Poliméricos com e sem Alteração Superficial dos Substratos*, in *Faculdade de Engenharia*. 2007, Universidade do Porto.
14. Pinto, A.M.G., *Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*, in *Departamento de Engenharia Mecânica e Gestão Industrial*. 2007, Universidade do Porto: Porto.
15. Pinto, A.G., *Classificação e processo de seleção dos adesivos*. 2016: Instituto superior de engenharia do Porto.
16. de Moura, M.F.S.F., A.B. de Morais, and A.G. de Magalhães, *Materiais compósitos -Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2011.
17. da Silva, L.F.M., et al., eds. *Testing Adhesive Joints*. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co.

18. TestResources. *314 Family Electromechanical Universal Test Machine - 100 kN*. 2016; Available from: <http://www.testresources.net/test-machines/314-family>.
19. 527-2, E.I., *EN ISO 527-2*. Determination of tensile properties of plastics Test and conditions for moulding and extrusion plastics, Berlin: German Standards (DIN-Normen), 1996.
20. ADMET, I. *ASTM D695, Plastics and Elastomers, Compression Testing*. 2016 [cited 2016 24-08-2016]; Available from: <http://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d695-rigid-plastic-compression-testing/>.
21. Adams, D.F. and D.E. Walrath, *Current status of the Iosipescu Shear test method*. Journal Composite Materials, 1987. **21**: p. 299.
22. ADMET, I. *Shear Testing on an eXpert 2600* 2016; Available from: <https://www.youtube.com/watch?v=IIJhF61Q7k>.
23. D3983, A., *Standard Test Method for Measuring Strength and Shear Modulus of Nonrigid Adhesives by the Thick-Adherend Tensile-Lap Specimen*. 1998.
24. 11003-2:2001, I., *Determination of shear behaviour of structural adhesives -- Part 2: Tensile test method using thick adherends*.
25. ADMET, I. *ASTM D1002 Adhesive Lap Joint Shear Testing*. 2016; Available from: <http://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d1002-adhesive-lap-joint-shear-testing/>.
26. TestResources. *ASTM D903 180 degree Peel Strip Strength of Adhesive Bonds* 2016 [cited 2016 23-08-2016]; Available from: <http://www.testresources.net/applications/standards/astm/astm-d903-180-degree-peel-strip-strength-of-adhesive-bonds>.
27. TestResources. *Peel Adhesion Bond Strength of Labels*. 2016 [cited 2016 23-08-2016]; Available from: <http://www.testresources.net/application/peel-adhesion-bond-strength-of-labels>.
28. TestResources. *ASTM D903 Peel Strength Testing of Adhesive Bonds* 2016; Available from: <https://youtu.be/wxCdtlisXxQ>.
29. TestResources. *ASTM D6252 90 Degree Peel Adhesion* 2016 [cited 2016 23-08-2016]; Available from: <http://www.testresources.net/applications/standards/astm/astm-d6252-90-degree-peel-adhesion-equipment-for-pressure-sensitive-label-stocks>.
30. TestResources, *90 Degree peel plot for ASTM D6252*. 2016.
31. Testing systems, A. *Climbing Drum Fixture Demonstration on an eXpert 2600* 2016; Available from: <http://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d1781-climbing-drum-peel-testing/>.
32. ADMET, I. *ASTM D3167 Floating Roller Peel Test* 2016 [cited 2016 22-08-2016]; Available from: <http://www.admet.com/testing-applications/testing-standards/astm-d3167-adhesive-floating-roller-peel-testing/>.
33. TestResources. *910 Family Servohydraulic Fatigue Test Machine*. 2016 [cited 2016 24-08-2016]; Available from: <http://www.testresources.net/test-machines/910-family>.
34. Ward, I.M., *Mechanical Properties of Solid Polymers*. 2nd ed. 1983: John Wiley & Sons, Ltd, Chichester.
35. ADMET, I., *New Heating and Cooling Chamber Allows Use of Long Travel Extensometer*. 2016.

36. da Silva, L.F.M., A. Öchsner, and R.D. Adams, eds. *Handbook of Adhesion Technology*. 2011.
37. Campilho, R.D.S.G., *Repair of composite and wood structures*, in *Faculty of Engineering*. 2009, Porto University.
38. Kinloch, A., *Adhesion and adhesives: science and technology*. . 1987, London: Chapman & Hall, London.
39. daSilva, *WILEY Ensaios DCB, TDCB e ENF*. WILEY 2012.
40. Martin, R.H. and B.D. Davidson. *Mode II fracture toughness evaluation using a four point bend end notched flexure test*. in *4th international conference on deformation and fracture of composites*. 1997. Manchester.
41. Martin, R.H. and B.D. Davidson, *Mode II fracture toughness evaluation using a four point bend end notched flexure test*. *Plastics, Rubber and Composites*, 1999.
42. Schuecker, C. and D. Davidson, *Evaluation of the accuracy of the four-point bend end-notched flexure test for mode II delamination toughness determination*. *Composites Science and Technology*, 2000.
43. de Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G., Gonçalves, J.P.M, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. *Composites Science and Technology*, 2008(68): p. pp 2224 - 2230.
44. de Moura, M.F.S.F., *Numerical simulation of the ENF test for the mode-II fracture characterization of bonded joints*. *J. Adhesion Sci. Technol.*, 2006. **20**: p. 37–52.
45. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints*. *International Journal of Solids and Structures*, 2008(46): p. 1589–1595.
46. de Moura, M.F.S.F., R.D.S.G. Campilho, and J.P.M. Gonçalves, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. *Composites Science and Technology*, 2008(68): p. 2224–2230.
47. Rice, J.R., *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks* *Journal of Applied Mechanics*, 1968. **35**: p. 379-386.
48. Carlberger, T. and U. Stigh, *Influence of layer thickness on cohesive properties of an epoxy-based*. *Journal of Adhesion*, 2010. **86**: p. 814–833.
49. Leffler, K., K.S. Alfredsson, and U. Stigh, *Shear behaviour of adhesive layers*. *International Journal of Solids and Structures* 2007: p. 530-545.
50. Zhu, Y., K.M. Liechti, and K. Ravi-Chandar, *Direct extraction of rate-dependent traction-separation laws for polyurea/steel interfaces*. *International Journal of Solids and Structures*, 2009. **46**: p. 31-2011.
51. Campilho, R.D.S.G., et al., *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. *Composites Part B: Engineering*, 2013. **50**: p. 120-126.
52. Wang, W.-X., et al., *Experimental investigation on test methods for mode II interlaminar fracture testing of carbon fiber reinforced composites*. Elsevier, 2009.
53. Arrese, A. and F. Mujika, *Influence of bending rotations on three and four-point bend end notched flexure tests*. *Engineering Fracture Mechanics*, 2008. **75**: p. 4234–4246.

54. Schuecker, C. and B.D. Davidson, *Effect of friction on the perceived mode II delamination toughness from three- and four-point bend end-notched Flexure tests*, in *Composite Structures: Theory and Practice*, C.Q.R. Peter Grant, Editor. 2000, ASTM STP1383, American Society for Testing and Materials. p. 334-344.
55. Barenblatt, G., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axially symmetric cracks.*, 1959. **23**: p. 622-636.
56. Barenblatt, G., *The mathematical theory of equilibrium cracks in brittle fracture*. *Advances in Applied Mechanics* 1962. **7**: p. 55-129.
57. Dugdale, D., *Yielding of steel sheets containing slits*. *Journal of Mechanics and Physics of Solids*, 1960. **8**: p. 100-104.
58. Zhao, X., R.D. Adams, and L.F.M. Da Silva, *Single lap joints with rounded adherend corners: experimental results and strength prediction*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2011. **25**: p. 837-856.
59. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. *International Journal of Solids and Structures*, 2008. **45**: p. 1497-1512.
60. Alfano, G. and M. Crisfield, *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. *International Journal of Numerical Methods in Engineering*. **50**: p. 1701-1736.
61. Allix, O. and A. Corigliano, *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. *International Journal of Fracture*, 1996. **77**: p. 111-140.
62. Chandra, N., et al., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. *International Journal of Solids and Structures*, 2002. **39**: p. 2827-2855.
63. Chen, J., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. *Journal of Thermoplastic Composite Materials*, 2002. **15**: p. 429-441.
64. Kafkalidis, M.S. and M.D. Thouless, *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.
65. Liljedahl, C.D.M., et al., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. *International Journal of Fracture*, 2006. **141**: p. 147-161.
66. de Moura, M.F.S.F., et al., *Prediction of compressive strength of carbon-epoxy laminates containing delamination by using a mixed-mode damage model*. *Composite Structures*, 2000. **50**: p. 151-157.
67. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Stress and failure analyses of scarf repaired CFRP laminates using a cohesive damage model*. *Journal of Adhesion Science and Technology*, 2007.
68. Lee, M.J., et al., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. *International Journal of Adhesion and Adhesives* 2010. **30**: p. 322-328.
69. Banea, M.D., L.F.M. Da Silva, and R.D.S.G. Campilho, *The Effect of Adhesive Thickness on the Mechanical Behavior of a Structural Polyurethane Adhesive*. *The Journal of Adhesion* 2014. **91**: p. 331-346.

70. Carvalho, U.T.F. and R.D.S.G. Campilho, *Application of the direct method for cohesive law estimation applied to the strength prediction of double-lap joints*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2016. **85**: p. 140–148.
71. Andersson, T. and U. Stigh, *The stress–elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004. **41(2)**: p. 413–434.
72. Azevedo, J.C.S., et al., *Cohesive law estimation of adhesive joints in mode II condition*. Theoretical and Applied Fracture Mechanics, 2015. **80**: p. 143–154.
73. de Morais, A.B. and A.B. Pereira, *Application of the effective crack method to mode I and mode II interlaminar fracture of carbon/epoxy unidirectional laminates*. Composites: Part A: applied science and manufacturing, 2006. **38**: p. 785–794.
74. Chaves, F.J.P., et al., *Numerical validation of a crack equivalent method for mixed-mode I + II fracture characterization of bonded joints*. Engineering Fracture Mechanics, 2013. **107**: p. 38–47.
75. Fernlund, G. and J.K. Spelt, *Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints*. Composites Science and Technology 1994. **50(4)**: p. 441–449.
76. 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 & Adhesives, 2011. **31**: p. 363–372.
77. Fernandes, T.A.B., et al., *Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimentation and Advanced Techniques for Strength Prediction*. The Journal of Adhesion, 2015. **91**: p. 841–862.
78. Campilho, R.D.S.G., et al., *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2013. **44**: p. 48–56.
79. Neto, J.A.B.P., R.D.S.G. Campilho, and L.F.M. da Silva, *Parametric study of adhesive joints with composites*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2012. **37**: p. 96–101.
80. Neto, J., A., B., P., *Estudo paramétrico de juntas adesivas em material compósito*. 2011, Tese de Mestrado. Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
81. Faneco, T., M., S., *Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, Tese de Mestrado. Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
82. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method*. International Journal of Adhesion & Adhesives., 2014. **53**: p. 15–22.
83. Leitão, A.C.C., R.D.S.G. Campilho, and D.C. Moura, *Shear Characterization of Adhesive Layers by Advanced Optical Techniques*. Experimental Mechanics, 2015. **56**: p. 493–506.
84. Packham, D.E., *Handbook of Adhesion Second Edition*. 2005: John Wiley & Sons, Ltd.
85. Campilho, R.D.S.G., M.F.S.F. de Moura, and J.J.M.S. Domingues, *Numerical prediction on the tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2009. **29**: p. 195–205.