



Modelação numérica dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais

JOÃO MIGUEL DIAS TEIXEIRA

Outubro de 2016

MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS ENSAIOS DCB E TDCB PARA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE EM TRAÇÃO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS

João Miguel Dias Teixeira

1140176

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



MODELAÇÃO NUMÉRICA DOS ENSAIOS DCB E TDCB PARA DETERMINAÇÃO DA TENACIDADE EM TRAÇÃO DE ADESIVOS ESTRUTURAIS

João Miguel Dias Teixeira

1140176

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 Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho.

2016

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



JÚRI

Presidente

A definir

Orientador

Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho

Professor adjunto, ISEP

Arguente

A definir

AGRADECIMENTOS

Ao meu orientador, Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela disponibilidade, passagem de conhecimentos e apoio prestado durante toda a realização do presente trabalho.

À minha família e amigos pelo apoio e encorajamento oferecido durante a elaboração da presente dissertação.

Finalmente ao Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP) pelos conhecimentos transmitidos e pela disponibilização de meios para que a realização deste trabalho fosse possível.

PALAVRAS CHAVE

Double-Cantilever Beam; Tapered Double-Cantilever Beam; Modelos de dano coesivo; Adesivos Estruturais; Método de Elementos Finitos; Taxa crítica de liberação de energia.

RESUMO

As juntas adesivas estão em constante desenvolvimento e expansão. Por isso cada vez mais têm vindo a ser utilizadas nas mais diversas indústrias. Devido a esta evolução, estas têm vindo a substituir os métodos tradicionais de ligação. Este desenvolvimento deve-se muito à evolução que os modelos de dano têm vindo a sofrer ao longo dos anos. Os modelos de dano coesivo (MDC) são uma técnica da mecânica do dano e são aplicados como suplemento na análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF), e têm revelado bons resultados em previsões do comportamento de juntas adesivas.

Neste trabalho realizou-se um estudo numérico, por MEF e MDC, de forma a realizar uma comparação entre os ensaios DCB e TDCB para a determinação de G_{IC} . Foi efetuado o tratamento de dados experimentais já existentes relativamente aos dois tipos de ensaio e para os três adesivos selecionados. O principal objetivo deste trabalho consistiu na modelação numérica dos referidos ensaios no sentido de reproduzir os resultados experimentais obtidos e avaliar a adequabilidade de cada método de redução na determinação de G_{IC} . Esta comparação foi realizada através da comparação das curvas força-deslocamento ($P-\delta$) experimentais e numéricas. Após a obtenção das curvas $P-\delta$ foi realizado um estudo de sensibilidade para averiguar a influência dos parâmetros t_n^0 e G_{IC} no comportamento dos modelos numéricos DCB e TDCB. Através dos resultados obtidos pelo estudo numérico, foi possível verificar que as curvas $P-\delta$ por este obtidas reproduzem satisfatoriamente as curvas experimentais. Com a realização do estudo de sensibilidade, observou-se que o parâmetro G_{IC} é o parâmetro que mais influencia as curvas $P-\delta$ e que o parâmetro t_n^0 apenas tem influência na rigidez antes do pico.

KEYWORDS

Double-Cantilever Beam; Tapered Double-Cantilever Beam; Cohesive Zone Models; Finite Element Method; Critical rate of energy release.

ABSTRACT

Adhesive joints are in constant development and expansion, so they are being increasingly used in various industries. Because of this evolution, they are now replacing traditional joining methods. This development owes much to the evolution that damage models have been suffering over the years. Cohesive zone models (CZM) are a damage mechanics technique and are applied as a supplement to the analyses by the Finite Element Method (FEM), and have shown good results in joints' behavior predictions.

In this work, a numerical study by finite element method was carried out to make a comparison between the DCB and TDCB tests to estimate the value of G_{IC} . A treatment of experimental data existing for the two types of test and selected three adhesives was undertaken. The main objective of this work is the numerical modeling of the tests in order to reproduce the experimental results and evaluate the suitability of each method in determining G_{IC} . This comparison was made by comparing the experimental and numerical P - δ curves. After obtaining the P - δ curves, a sensitivity analysis was performed to investigate the influence of the parameters t_n^0 and G_{IC} on the behavior of the numerical DCB and TDCB models. With the results obtained by the numerical study, it was possible to verify that the obtained P - δ curves satisfactorily reproduce the experimental curves. With the sensitivity study, it was observed that the parameter G_{IC} is the one that most influences the P - δ curve, while the parameter t_n^0 only affects the stiffness before the peak.

LISTA DE SÍMBOLOS E ABREVIATURAS

Lista de Abreviaturas

2D	Duas Dimensões
3D	Três Dimensões
4ENF	Four-point End Notched Flexure
ADCB	Asymmetric Double Cantilever Beam
ASTM	American Society for Testing and Materials
ATDCB	Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam
CBBM	Compliance Based Beam Method
CBT	Corrected Beam Theory
CCM	Compliance Calibration Method
CLS	Cracked Lap Shear
CT	Compact Tension
DBT	Direct Beam Theory
DCB	Double Cantilever Beam
DGEBA	Diglycidyl Ether of Bisphenol A
DIN	Deutsches Institut für Normung
ELS	End Loaded Split
EN	European Normalization
ENF	End Notched Flexure
ISEP	Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISO	International Standard Organization
MDC	Modelos de Dano Coesivo
MEF	Método de Elementos Finitos
MEFX	Método de Elementos Finitos Extendido
MFLE	Mecânica da Fratura Linear Elástica
MMB	Mixed-Mode Bending
MMF	Mixed-Mode Flexure
NF	Norma Francesa
SBT	Simple Leg Bending
SENB	Single Edge Notched Bend
SLB	Single Leg Bending
TAST	Thick Adherent Shear Test
TDCB	Tapered Double Cantilever Beam
T _f	Temperatura de fusão
T _g	Temperatura de transição vítrea
ZPF	Zona de Processo de Fratura

Símbolos Gregos

\varnothing	Diâmetro
\varnothing	Grau de rácio de modos
γ_f	Deformação de rotura ao corte
δ	Deslocamento

Δ	Fator de correção do comprimento de fenda
δ_n	Deslocamento em tração
δ_n^0	Deslocamento de carga máxima à tração
δ_{nc}	Deslocamento dos aderentes
δ_s	Deslocamento em corte
δ_s^0	Deslocamento de carga máxima ao corte
ε_f	Deformação de rotura
θ_0	Rotação dos aderentes na ponta da fenda
θ_p	Rotação relativa dos aderentes no ponto de solicitação P
ν	Coeficiente de Poisson
σ_f	Tensão de rotura
σ_y	Tensão de cedência
τ_f	Tensão de rotura de corte
τ_y	Tensão de cedência ao corte

Símbolos Romanos

a	Comprimento de fenda
a_0	Comprimento de fenda inicial
a_{eq}	Comprimento de fenda equivalente
B	Largura do substrato
b	Largura do substrato
C	Flexibilidade do substrato
c	Metade da espessura do aderente

E	Módulo de Young
E_1	Módulo de Young dos substratos
E_f	Módulo de flexão equivalente
G	Energia de fratura
G_I	Taxa de libertação de energia em modo I
G_{IC}	Taxa crítica de libertação de energia em modo I
G_{IIc}	Taxa crítica de libertação de energia em modo II
G_k	Espessura de adesivo
G_b	Espessura do aderente
h, h_1, h_2	Espessura do substrato
I	Momento de Inércia
J	Taxa de energia libertada não linear
L_0	Comprimento de Sobreposição
L_T	Comprimento de Junta
K	Tenacidade à fratura
K_{COHE}	Matriz que relaciona as tensões e deformação em tração e corte nos elementos coesivos
m	Fator de geometria para provetes TDCB (declive)
M_f	Momento Fletor
P	Carga
$P_{máx}$	Carga máxima
P_u	Carga aplicada por unidade de largura dos aderentes
R_T	Resistência ao corte

T	Carga máxima de início da propagação da fenda majorada em 150%
t_a	Espessura do aderente
T_p	Espessura do adesivo
t_n^0	Tensão máxima à tração
t_s^0	Tensão máxima ao corte
V	Esforço transversal em cada braço do provete
V_c	Velocidade de Corte
V_f	Velocidade de avanço da mesa
W	Largura dos provetes
z	Número de dentes da fresa

ÍNDICE DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISCIPLINAS ENVOLVIDAS NA CIÊNCIA DA ADESÃO [5]	6
FIGURA 2 - ELEMENTOS ESTRUTURAIS DE UMA JUNTA ADESIVA [5]	7
FIGURA 3 - APLICAÇÃO DE ADESIVOS NA INDÚSTRIA AEROESPACIAL [9]	9
FIGURA 4 - APLICAÇÃO DE ADESIVOS NA INDÚSTRIA AUTOMÓVEL [9]	9
FIGURA 5 - ADESIVOS NA INDÚSTRIA NAVAL [9]	10
FIGURA 6 - ESFORÇO DE TRAÇÃO E RESPECTIVA DISTRIBUIÇÃO DA TENSÃO [11]	11
FIGURA 7 - ESFORÇO DE COMPRESSÃO E RESPECTIVA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO [11]	11
FIGURA 8 - ESFORÇO DE CORTE E RESPECTIVA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO [11]	11
FIGURA 9 - ESFORÇO DE CLIVAGEM E RESPECTIVA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO [11]	12
FIGURA 10 - ESFORÇO DE ARRANCAMENTO E RESPECTIVA DISTRIBUIÇÃO DE TENSÃO [11]	12
FIGURA 11 - ROTURA COESIVA [11]	13
FIGURA 12 - ROTURA ADESIVA [11]	13
FIGURA 13 - ROTURA MISTA [11]	13
FIGURA 14 - ROTURA DO SUBSTRATO [11]	13
FIGURA 15 - JUNTAS TOPO A TOPO COM MODIFICAÇÕES TÍPICAS [5]	14
FIGURA 16 - JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO COM MODIFICAÇÕES TÍPICAS [5]	14
FIGURA 17 - JUNTAS DE TIRA (<i>STRAP JOINTS</i>) [5]	15
FIGURA 18 - JUNTAS CILÍNDRICAS: (A) PARA VARÕES; (B) PARA TUBOS [5]	16
FIGURA 19 - JUNTAS DE REFORÇO – A) DIMINUIR ESFORÇOS DE ARRANCAMENTO B) DIMINUIR ESFORÇOS DE CLIVAGEM [5]	16
FIGURA 20 - JUNTAS EM T [5]	17
FIGURA 21 - JUNTAS DE CANTO [5]	18
FIGURA 22 - FAMÍLIAS DE ADESIVOS [3]	19
FIGURA 23 - OBTENÇÃO DE PROVETES MACIÇOS (NF T 76-142) [13]	33
FIGURA 24 - GEOMETRIA DOS PROVETES MACIÇOS (NORMA EN ISO 527-2) [15]	33
FIGURA 25 - TÍPICO GRÁFICO TENSÃO-DEFORMAÇÃO [15]	34
FIGURA 26 – PROVETE PARA ENSAIO IOSIPESCU [16]	35

FIGURA 27 - ENSAIO IOSIPESCU [16]	35
FIGURA 28 - PROVETE ARCAN [1]	36
FIGURA 29 - ESQUEMA DO ENSAIO ARCAN [17]	37
FIGURA 30 - GEOMETRIA DE UMA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [18]	38
FIGURA 31 - GEOMETRIA TOPO A TOPO [19]	38
FIGURA 32 - PROVETE TAST [21]	39
FIGURA 33 - POSICIONAMENTO PROVETE ENSAIO TAST [20]	39
FIGURA 34 - ENSAIO TAST [20]	40
FIGURA 35 - ENSAIO DE ARRANCAMENTO EM JUNTA DO TIPO T [6]	40
FIGURA 36 - PROVETE PARA ENSAIO DE TRAÇÃO EM JUNTA TOPO A TOPO (COM ESPAÇADOR) [22].....	41
FIGURA 37 - ESQUEMA DE ENSAIO DE TRAÇÃO DE JUNTAS TOPO A TOPO [22]	42
FIGURA 38 - MODOS DE CARREGAMENTO [23]	42
FIGURA 39 - PROVETES PARA ENSAIO SENB (ESQUERDA) E CT (DIREITA) [24]	43
FIGURA 40 - PROVETE DCB [25].....	44
FIGURA 41 - ESQUEMA DE ENSAIO DCB [5].....	44
FIGURA 42 - PROVETE TDCB [25].....	45
FIGURA 43 - ESQUEMA DE ENSAIO ENF [27].....	46
FIGURA 44 - ESQUEMA DE ENSAIO ELS [28].....	47
FIGURA 45 - ESQUEMA DE ENSAIO 4ENF [27]	47
FIGURA 46 - ESQUEMA DE ENSAIO ADCB [29]	48
FIGURA 47 - ESQUEMA DE ENSAIO ATDCB [29]	48
FIGURA 48 - ESQUEMA DO ENSAIO MMB [5].....	49
FIGURA 49 - ESQUEMA DE ENSAIO MMF [1].....	49
FIGURA 50 - ESQUEMA DE ENSAIO CLS [1].....	50
FIGURA 51 - REPRESENTAÇÃO DA ZPF [35]	52
FIGURA 52 - ENSAIO DCB EM CARREGAMENTO COM VARIÁVEIS DO MÉTODO INTEGRAL J [36]	53
FIGURA 53 - ELEMENTOS COESIVOS PARA SIMULAR CAMINHOS DE ROTURA DE ESPESSURA ZERO: APROXIMAÇÃO LOCAL (A) E MODIFICAÇÃO DE UMA CAMADA FINA DE ADESIVO: APROXIMAÇÃO CONTÍNUA (B) [41].....	56
FIGURA 54 - MODELO COESIVO TRIANGULAR [41]	58

FIGURA 55 - MODELO COESIVO TRAPEZOIDAL [3]	58
FIGURA 56 - LOCALIZAÇÃO DE ELEMENTOS COESIVOS [41]	60
FIGURA 57 - PROVETE ENF DEFORMADO DURANTE PROPAGAÇÃO, COM LIMITES E CONDIÇÕES DE CARGA [41].....	62
FIGURA 58 - CURVAS $P-\Delta$ E NUMÉRICA SOBREPOSTAS DE UM PROVETE ENSAIADO [41].....	63
FIGURA 59 - MÉDIA DA LEI DE CORTE DO MDC E DESVIO APÓS APLICAÇÃO DOS PRINCÍPIOS DE MODELAÇÃO INVERSA A CINCO PROVETES [41]	63
FIGURA 60 - EXTRAPOLAÇÃO LINEAR DE G_{IC} E G_{IIC} DE ENSAIO EM MODO MISTO [41].....	64
FIGURA 61 - GEOMETRIA DAS JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO TESTADAS [55].....	65
FIGURA 62 - MODELO NUMÉRICO DA JUNTA DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES [55]	66
FIGURA 63 - REPRESENTAÇÃO ESQUEMÁTICA DO COMPORTAMENTO CONSTITUTIVO, INÍCIO DE DANO E A EVOLUÇÃO DO ADESIVO [55]	66
FIGURA 64 – RESISTÊNCIA DA JUNTA ADESIVA EM CORTE: (1) TITÂNIO - TITÂNIO, (2) COMPÓSITO - COMPÓSITO, (3) TITÂNIO – COMPÓSITO [55]	67
FIGURA 65 - RESISTÊNCIA DA JUNTA ADESIVA EM CORTE: (1) ALUMÍNIO - ALUMÍNIO, (2) COMPÓSITO - COMPÓSITO, (3) ALUMÍNIO – COMPÓSITO [55]	67
FIGURA 66 - CURVAS $\Sigma-E$ EXPERIMENTAIS DO ALUMÍNIO E APROXIMAÇÃO PARA A ANÁLISE DE MEF [56]	69
FIGURA 67 - CURVAS $\Sigma-E$ EXPERIMENTAIS PARA O ARALDITE® AV138 [56].....	69
FIGURA 68 - MALHA UTILIZADA PARA: JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO SIMPLES (A) E JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO DUPLA (B).....	70
FIGURA 69 - VALORES DE P_M EM FUNÇÃO DE L_0 (A) E ESTUDO DE DEPENDÊNCIA DE MALHA (B) [56]	70
FIGURA 70 - CURVA $\Sigma-E$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA PARA O ALUMÍNIO [57]	71
FIGURA 71 - GEOMETRIA DAS JUNTAS DE SOBREPOSIÇÃO TESTADAS [57].....	71
FIGURA 72 - REFINAMENTO DE MALHA PARA A ANÁLISE DE ROTURA PELO MDC E MEFX [57]	72
FIGURA 73 - CURVAS $P-\Delta$ EXPERIMENTAIS E NUMÉRICAS POR MDC PARA: (A) ARALDITE® 2015 COM $L_0=37,5$ MM, (B) SIKAFORCE® 7888 COM $L_0=50$ MM [57]	72
FIGURA 74 - RESINA ARALDITE® AV 138 E ENDURECEDOR HV 998 [60]	76
FIGURA 75 - ADESIVO ARALDITE® 2015 [63]	78
FIGURA 76 - ADESIVO SIKAFORCE® 7752 [64]	79
FIGURA 77 - GEOMETRIA DOS PROVETES TDCB [1]	81
FIGURA 78 - PROVETE TDCB SEGUNDO A NORMA ASTM D 3433-99 [1]	81

FIGURA 79 - CENTRO DE MAQUINAGEM HAAS VF2 [1]	82
FIGURA 80 - GRANALHADORA CIDBLAST RT 6S [1]	86
FIGURA 81 - SUBSTRATOS DCB APÓS A GRANALHAGEM [1].....	86
FIGURA 82 - EXTREMIDADE DO PROVETE DCB (LOCAL DA CRIAÇÃO DA PRÉ-FENDA) [1]	87
FIGURA 83 - ESPAÇADORES NO FORNO [1].....	87
FIGURA 84 - APLICAÇÃO DE DESMOLDANTE NOS ESPAÇADORES [1]	88
FIGURA 85 - POSICIONAMENTO DOS CALÇOS NOS SUBSTRATOS DCB [1].....	88
FIGURA 86 - PREPARAÇÃO DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 L60 (A) ADESIVO; (B) PESAGEM DO ADESIVO NUMA BALANÇA DIGITAL [1]	89
FIGURA 87 - APLICAÇÃO DO ADESIVO ARALDITE® 2015 [1].....	90
FIGURA 88 - MÓ UTILIZADA PARA REMOÇÃO DE EXCESSO DE ADESIVO NAS FACES LATERAIS DOS PROVETES [1]	90
FIGURA 89 - PROVETE TDCB COM CORRETOR APLICADO NA FACE LATERAL [1]	90
FIGURA 90 - PROVETES PREPARADOS: DCB (A); TDCB (B) [1]	91
FIGURA 91 - MÁQUINA DE ENSAIO SHIMADZU AG-X 100 [1]	91
FIGURA 92 - AMARRAS EM U [1]	92
FIGURA 93 - ENSAIOS: (A) DCB; (B) TDCB [1].....	92
FIGURA 94 - MÁQUINA FOTOGRÁFICA UTILIZADA PARA A MEDIÇÃO DO COMPRIMENTO DE FENDA [1] 93	
FIGURA 95 - CURVA $P-\Delta$ RELATIVAS AO ADESIVO ARALDITE® AV 138	95
FIGURA 96 - ROTURA DO ADESIVO ARALDITE® AV 138 NO ENSAIO DCB (A) PROVETE 1 (B) PROVETE 2 (C) PROVETE 3 (D) PROVETE 4 (E) PROVETE 5 [1].....	96
FIGURA 97 - CURVAS $P-\Delta$ RELATIVAS AO ADESIVO ARALDITE® 2015	97
FIGURA 98 - ROTURA DO ADESIVO ARALDITE® 2015 NO ENSAIO DCB (A) PROVETE 1 (B) PROVETE 2 (C) PROVETE 3 (D) PROVETE 4 (E) PROVETE 5 [1].....	97
FIGURA 99 - CURVAS $P-\Delta$ RELATIVAS AO ADESIVO SIKAFORCE® 7752	98
FIGURA 100 - ROTURA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NO ENSAIO DCB (A) PROVETE 1 (B) PROVETE 2 (C) PROVETE 3 (D) PROVETE 4 (E) PROVETE 5 [1].....	98
FIGURA 101 - CURVA-R RELATIVA AO PROVETE 1.....	99
FIGURA 102 - CURVA-R RELATIVA AO PROVETE 2.....	101
FIGURA 103 - CURVA-R RELATIVA AO PROVETE 2.....	102
FIGURA 104 - CURVAS $P-\Delta$ RELATIVAS AO ADESIVO ARALDITE® AV 138.....	104

FIGURA 105 - ROTURA DO ADESIVO ARALDITE® AV138 NO ENSAIO TDCB (A) PROVETE 1 (B) PROVETE 2 (C) PROVETE 3 (D) PROVETE 4 (E) PROVETE 5 [1].....	105
FIGURA 106 - CURVAS $P-\Delta$ RELATIVAS AO ADESIVO ARALDITE® 2015.....	106
FIGURA 107 - ROTURA DO ADESIVO ARALDITE® 2015 NO ENSAIO TDCB (A) PROVETE 1 (B) PROVETE 2 (C) PROVETE 3 (D) PROVETE 4 (E) PROVETE 5 [1].....	106
FIGURA 108 - CURVAS $P-\Delta$ RELATIVAS AO ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	107
FIGURA 109 - ROTURA DO ADESIVO SIKAFORCE® 7752 NO ENSAIO TDCB (A) PROVETE 1 (B) PROVETE 2 (C) PROVETE 3 (D) PROVETE 4 (E) PROVETE 5 [1].....	108
FIGURA 110 - CURVA-R RELATIVA AO PROVETE 2.....	109
FIGURA 111 - CURVA-R RELATIVA AO PROVETE 2.....	110
FIGURA 112 - CURVA-R RELATIVA AO PROVETE 5.....	112
FIGURA 113 - VALORES DE G_{Ic} OBTIDOS PELO ENSAIO DCB.....	115
FIGURA 114 - VALORES DE G_{Ic} OBTIDOS PELO ENSAIO TDCB.....	116
FIGURA 115 - REFINAMENTO GERAL DE MALHA DO MODELO UTILIZADO NOS PROVETES DCB.....	117
FIGURA 116 - DETALHE DO REFINAMENTO DE MALHA NA PROXIMIDADE DA EXTREMIDADE DA FENDA NO PROVETE DCB.....	118
FIGURA 117 - REFINAMENTO GERAL DE MALHA DO MODELO UTILIZADO NOS PROVETES TDCB.....	118
FIGURA 118 - DETALHE DO REFINAMENTO DE MALHA NA PROXIMIDADE DA EXTREMIDADE DA FENDA NO PROVETE DTCB.....	119
FIGURA 119 - DETALHE DO REFINAMENTO DE MALHA NA ZONA DE DECLIVE.....	119
FIGURA 120 – LEI TRIANGULAR DO MODELO DE DANO COESIVO.....	120
FIGURA 121 - CURVA $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DCB PARA O PROVETE 1 COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	125
FIGURA 122 - CURVA $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DCB PARA O PROVETE 5 COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® AV138.....	126
FIGURA 123 - CURVA $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DCB PARA O PROVETE 1 COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	127
FIGURA 124 - CURVA $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DCB PARA O PROVETE 4 COLADO COM O ADESIVO ARALDITE® 2015.....	128
FIGURA 125 - CURVA $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DCB PARA O PROVETE 4 COLADO COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	129
FIGURA 126 - CURVA $P-\Delta$ EXPERIMENTAL E NUMÉRICA DO ENSAIO DCB PARA O PROVETE 5 COLADO COM O ADESIVO SIKAFORCE® 7752.....	130

4	CONCLUSÕES.....	157
5	BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO.....	163

INTRODUÇÃO

1 INTRODUÇÃO

1.1 Contextualização

A utilização de ligações adesivas em detrimento dos outros métodos tradicionais, tais como soldadura, rebiteagem e ligações aparafusadas, tem vindo a aumentar principalmente devido a algumas vantagens apresentadas em relação a estes. Algumas dessas vantagens são o bom comportamento a cargas cíclicas ou de fadiga, ligação de materiais diferentes, menores concentrações de tensões e estruturas mais leves. Apesar das vantagens referidas as ligações adesivas também possuem desvantagens, tais como a impossibilidade de desmontagem, por vezes tempos de cura elevados e condições de utilização limitadas.

De forma a aumentar a confiança dos projetistas, importa prever com precisão a resistência mecânica das ligações adesivas. A resistência e comportamento das ligações adesivas dependem de diversos fatores, como por exemplo do tipo de adesivo utilizado, tipo de junta utilizado, material utilizado nos substratos e de fatores dimensionais. Neste contexto, são utilizadas técnicas da Mecânica da Fratura, frequentemente aplicadas por análise energética. A taxa crítica de libertação de energia (G_{IC}) é um dos parâmetros mais importantes para a previsão da resistência das juntas. Na maioria dos trabalhos publicados, tendo como objetivo a caracterização à fratura em tração, é utilizado o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB). A utilização do ensaio DCB, além de ser simples, permite obter o valor de G_{IC} através da Teoria de Vigas. O ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) permite obter o valor de G_{IC} através de métodos que não necessitam da medição do comprimento de fenda durante o ensaio.

Os modelos de dano coesivo (MDC) são uma técnica da mecânica do dano e são aplicados como suplemento na análise pelo Método de Elementos Finitos (MEF), e têm revelado bons resultados em previsões do comportamento de juntas. Os MDC combinam critérios da resistência dos materiais para a iniciação do dano e conceitos da mecânica da fratura para a propagação da fenda. Os MDC consistem em estabelecer leis de tração-separação (leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas. A forma da lei coesiva influencia a previsão da resistência da junta. Neste âmbito, a lei triangular e trapezoidal são as mais utilizadas. Contudo, a lei triangular é a mais aplicada, devido à sua simplicidade e implementação mais generalizada em *softwares* de MEF.

1.2 Objetivos

Neste trabalho é proposto um estudo numérico, pelo MEF, de comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinação de G_{IC} . Pretende-se com este trabalho efetuar o tratamento de dados experimentais já existentes para dois tipos de ensaio e relativos a

três adesivos de ductilidade distinta [1]. O objetivo inicial do trabalho é o estudo comparativo de diversos métodos para obtenção deste parâmetro para ambos os tipos de provetes (métodos tradicionais que requerem a medição do comprimento da fenda e métodos baseados no comprimento de fenda equivalente), para verificar as potencialidades e limitações de cada um. O segundo objetivo consiste na modelação numérica dos referidos ensaios no sentido de reproduzir os resultados experimentais obtidos e avaliar a adequabilidade de cada método na determinação de G_{IC} . De forma a confirmar os resultados numérico obtidos, é realizado um estudo da adequabilidade dos métodos de redução de G_{IC} . Com o intuito de verificar a influência dos parâmetros G_{IC} e t_n^0 nas curvas força-deslocamento ($P-\delta$), foi realizado um estudo de sensibilidade em que, através da variação destes parâmetros, se compara o comportamento das curvas $P-\delta$.

1.3 Organização do relatório

Esta tese contém 4 capítulos distintos, de modo a que a compreensão da mesma seja realizada mais facilmente.

No capítulo 1 é apresentado o enquadramento geral da tese, onde são referidos o contexto, os principais objetivos e a organização da mesma.

O capítulo 2 descreve a revisão bibliográfica, onde são abordados os temas referentes ao trabalho, tais como ligações adesivas, tipos de juntas adesivas e esforços das mesmas, técnicas de avaliação de propriedades dos adesivos, ensaios de caracterização à fratura, métodos para determinação de G_{IC} e modelos de dano coesivo.

No subcapítulo 3.1 é feita referência ao trabalho experimental realizado na tese de Ricardo Lopes [1], onde são apresentados os dados experimentais por ele obtidos que irão ser analisados e trabalhados nesta dissertação. É também descrito modo de preparação dos adesivos, das juntas e todo o restante processo experimental realizado.

O subcapítulo 3.2 refere todo o trabalho numérico realizado no Abaqus®, incluindo as condições da análise numérica, estimativa da lei coesiva, análise da adequabilidade dos métodos de determinação de G_{IC} e análise dos resultados obtidos. Neste subcapítulo é também apresentado um estudo de sensibilidade para verificar a influência dos parâmetros G_{IC} e t_n^0 nas curvas $P-\delta$ numéricas.

No capítulo 4 são apresentadas todas as conclusões retiradas ao longo da realização deste trabalho e apresentadas sugestões de trabalhos futuros.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Ligações adesivas

Desde os tempos da pré-história que a humanidade tem vindo a juntar materiais de forma a obter utensílios mais eficazes e úteis [2]. A ligação de materiais através de adesivos não é uma técnica de ligação recente, pois os egípcios já empregavam colas à base de gelatina, ovo e resinas extraídas de árvores que aplicavam em trabalhos feitos em madeira e em pedra, isto quinze séculos antes de Jesus Cristo [3].

Um adesivo pode ser definido como um material que, quando aplicado a superfícies de materiais pode juntá-las e resistir à separação. Esta definição foi proposta por Kinloch [4]. A tecnologia de ligação por adesivos estruturais é uma tecnologia emergente que permite solucionar muitos problemas associados às técnicas tradicionais (parafusos, rebites, soldadura, etc.) [5]. Os primeiros adesivos a serem utilizados eram denominados de adesivos naturais, e funcionavam bem exceto quando expostos a ambientes húmidos. Quando expostos a ambientes húmidos estes absorviam a água, tornavam-se frágeis e libertavam odores desagradáveis, odores estes que permitiam aos engenheiros identificar o estado de degradação em que o adesivo se encontrava [5]. A fraca durabilidade dos adesivos baseados em produtos naturais foi ultrapassada nos anos 40 com a introdução de adesivos sintéticos poliméricos [5]. A fragilidade dos primeiros adesivos usados foi também ultrapassada nos anos 40 por de Bruyne e seus colegas, que modificaram a química dos adesivos adicionando polímeros com uma boa tenacidade como, por exemplo, a combinação de polivinilo formal com resol fenólico [5]. Esta invenção fez com que a tecnologia dos adesivos sofresse um grande avanço e permitiu assim que a ligação de materiais metálicos e de madeira fosse realizada com muito mais sucesso [5].

São várias as disciplinas científicas fundamentais para a compreensão das ligações adesivas, o que faz com que estas sejam um tema pluridisciplinar. Para formar as disciplinas de ciência das superfícies, materiais poliméricos e projeto de junta que são importantes para a ciência da adesão, as ciências primárias de física, mecânica e química sobrepõem-se em certas áreas [5]. Cada uma dessas disciplinas contribuem significativamente para a ciência da adesão e para a sua aplicação na indústria[5]. A sobreposição dessas disciplinas é considerada como a ciência necessária para que a aplicação de adesivos seja efetuada com sucesso[5]. Na Figura 1 estão representadas as disciplinas envolvidas na ciência da adesão assim como a sobreposição destas.

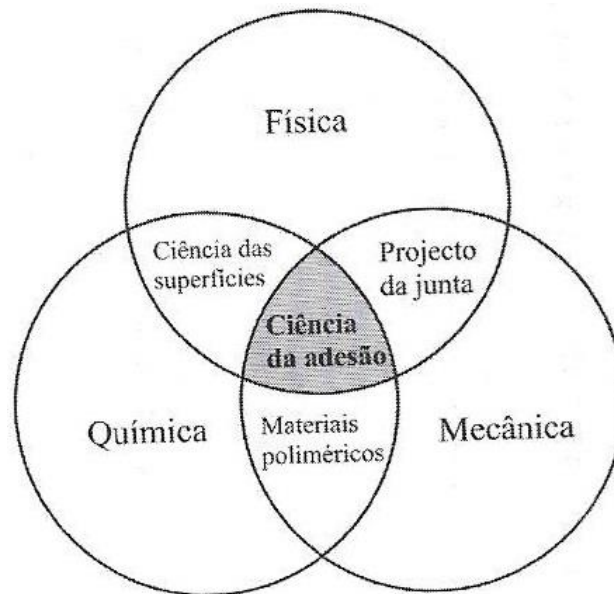


Figura 1 - Disciplinas envolvidas na ciência da adesão [5]

Hoje em dia é cada vez mais comum e diversificada a aplicação de ligações adesivas na indústria, sendo que atualmente os adesivos são todos baseados em polímeros sintéticos, tais como fenólicos, epóxidos, acrílicos e uretanos. Estes polímeros são geralmente alterados de forma a melhorar a sua tenacidade [6].

A grande responsável pelo maior desenvolvimento das ligações adesivas foi a indústria aeronáutica, mas estas são cada vez mais aplicadas noutras indústrias tais como a indústria automóvel (devido à preocupação em reduzir substancialmente o peso de forma a obter melhores consumos e aumentar velocidades), indústria naval, construção civil e até mesmo no desporto (bicicletas, raquetas de ténis, tacos de golfe, etc.) [6].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

É chamada de junta adesiva uma união realizada com recurso a um adesivo. Os elementos estruturais da junta, que estão ligados entre si pelo adesivo, são denominados de substratos ou aderentes. A região entre o adesivo e o aderente é chamada de interfase. Caso seja necessário melhorar a adesão ou proteger a superfície é aplicada uma substância denominada de primário [3]. Na Figura 2 está representado um exemplo básico de uma junta adesiva, de forma a identificar os elementos estruturais da mesma.

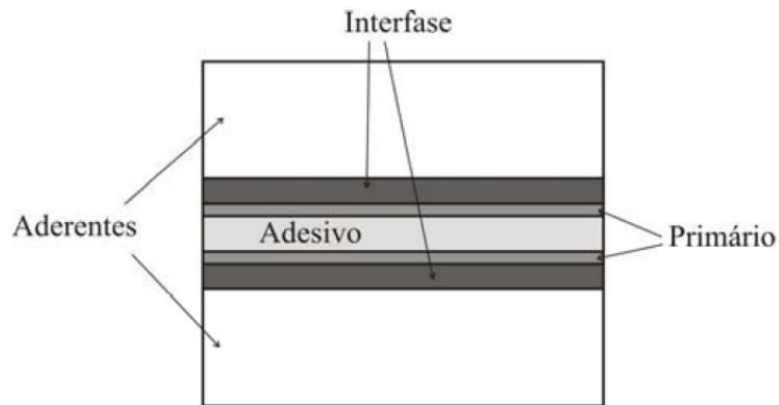


Figura 2 - Elementos estruturais de uma junta adesiva [5]

Uma ligação diz-se eficiente quando esta mantém a sua integridade estrutural sob solicitações estáticas e ou dinâmicas.

Devido às vantagens que apresentam, o uso de ligações adesivas tem vindo a crescer cada vez mais em detrimento dos outros métodos de ligação. As principais vantagens das ligações adesivas, relativamente aos restantes métodos de ligação, são as seguintes[5-7]:

- Distribuição mais uniforme das tensões;
- Maior resistência à fadiga;
- Grande capacidade de amortecimento de vibrações;
- Possível unir materiais distintos (como por exemplo metais com compósitos);
- Possível obter estruturas mais leves e rígidas;
- Custos mais reduzidos;
- Melhor resistência à corrosão;
- Possível fabricar peças com formas complexas;
- Melhor aparência superficial;
- Excelentes propriedades elétricas e térmicas.

Embora as ligações adesivas possuam um grande número de vantagens, possuem também algumas desvantagens tal como os outros processos de ligação. As principais desvantagens das ligações adesivas, em relação aos restantes métodos de ligação, são as seguintes[5-7]:

- Baixa resistência à temperatura e humidade;

- As ligações projetadas têm que eliminar ao máximo as forças de arrancamento e clivagem;
- Importante usar geometrias que evitem tensões localizadas e que garantam uma distribuição uniforme das tensões;
- Necessidade de utilização de ferramentas de fixação;
- Os adesivos necessitam por vezes de fazer cura a altas temperaturas (necessidade de forno, prensa, etc.);
- É necessária uma cuidada preparação das superfícies;
- Difícil controlo de qualidade e segurança;
- Não existe um critério de dimensionamento universal que permita dimensionar qualquer estrutura.

2.1.2 Aplicações comuns das juntas adesivas

Cada vez mais as juntas adesivas têm vindo a ser utilizadas e estão em constante desenvolvimento e expansão. Os adesivos são usados numa variedade de indústrias, tais como: automóvel, aeroespacial, naval, construção, embalagem, móveis, têxtil, entre outras. Neste tópico vai apenas ser detalhada alguma informação sobre as principais indústrias, isto é, automóvel, aeroespacial, naval e calçado (têxtil).

Industria aeroespacial

A indústria aeroespacial e os adesivos possuem uma relação longa e interessante. Mesmo com a evolução dos diversos tipos de transporte aéreo, as ligações adesivas têm sido cruciais para o desenvolvimento de cada novo tipo de veículo aéreo. As ligações adesivas são muito utilizadas na indústria aeroespacial devido ao seu reduzido peso, boa resistência à fadiga, amortecimento de vibração sónica e por facilmente se conseguir obter superfícies aerodinâmicas [8]. Na Figura 3 são apresentados os locais onde são as ligações adesivas são utilizadas na indústria aeroespacial, neste caso no avião SAAB 340.

Indústria automóvel

O uso de adesivos na indústria automóvel começou há décadas atrás na colagem de para-brisas. Mais tarde a sua utilização começou a ser aplicada noutros componentes, tais como as janelas traseiras. Ao mesmo tempo eram também aplicados em lacunas de soldadura de forma a evitar a corrosão [9]. Como resultado secundário da aplicação de adesivos para combater a corrosão, notou-se num acréscimo da rigidez do corpo do carro e, desta forma, começaram a ser utilizados adesivos de alto módulo para otimizar a resistência à torção [9]. Na Figura 4 apresenta-se a aplicação dos adesivos em automóveis modernos.

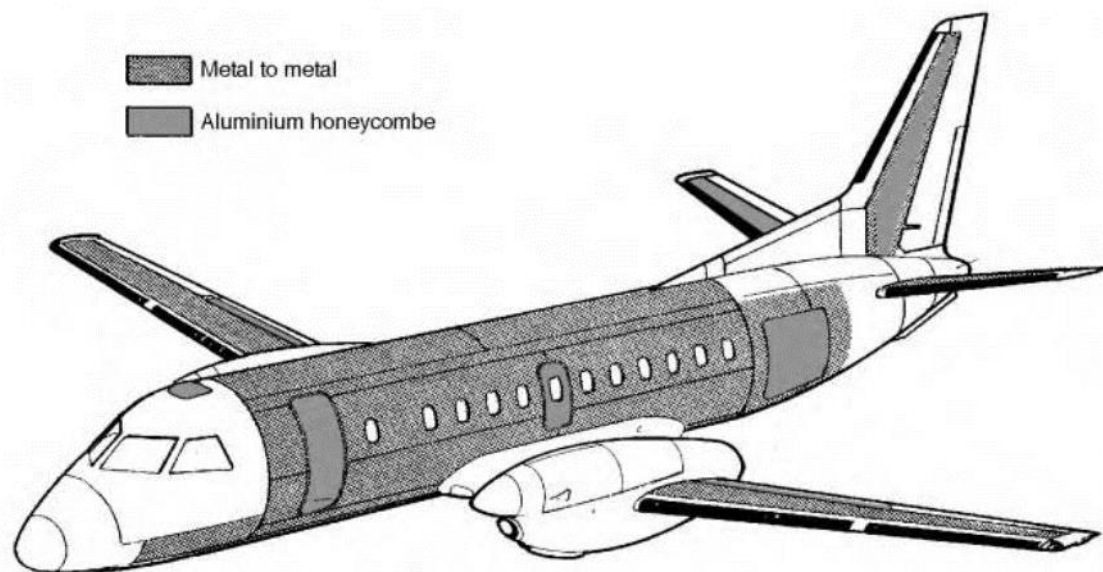


Figura 3 - Aplicação de adesivos na indústria aeroespacial [9]

Com o desenvolvimento de novos adesivos com maior resistência e com maior taxa de absorção de energia em caso de colisão, começou-se a utilizar adesivos como um elemento estrutural na estrutura do carro [9]. Com a aplicação dos adesivos diretamente nos veículos e como componentes estruturais do veículo é possível obter veículos com uma relação peso/resistência maior, entre outras vantagens [9].



Figura 4 - Aplicação de adesivos na indústria automóvel [9]

Indústria naval

As ligações adesivas estão a começar a ganhar também alguma popularidade na indústria naval. A sua principal aplicação é nas juntas estruturais de grandes partes, tais como casco e o convés, anteparas, etc [9]. Na Figura 5 é apresentado um exemplo da aplicação de adesivos na indústria naval, sendo neste caso a aplicação de adesivos no casco de uma embarcação.

Na indústria naval os adesivos precisam de possuir resistência à humidade, calor e raios ultravioleta [9].



Figura 5 - Adesivos na indústria naval [9]

Indústria do calçado

Os adesivos têm sido utilizados como alternativa à costura, pregos, tachas ou agrafos na ligação da parte superior do calçado à sola [9].

A aplicação de adesivos na indústria do calçado traz várias vantagens, tais como ligações mais flexíveis e homogéneas, distribuição mais uniforme das tensões aplicadas no conjunto, produto esteticamente melhores e torna-se possível a utilização de produção automática [9]. Apesar das vantagens referidas, a aplicação de adesivos na indústria do calçado, possuiu também algumas limitações, tais como, ser necessário um grande controlo em todas as fases de produção [9].

2.1.3 Esforços e modos de rotura em juntas adesivas

Os principais esforços a que as juntas adesivas podem estar sujeitas, são a tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento.

Tração – este tipo de carregamento consiste essencialmente em forças de tração aplicadas perpendicularmente ao plano da junta, produzindo uma distribuição tensões normais ao longo da totalidade da junta [5, 10, 11] (Figura 6).

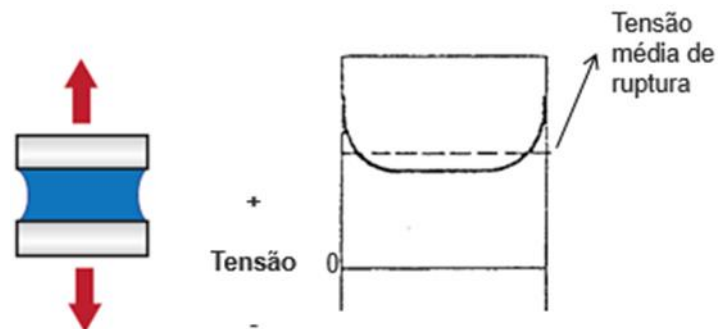


Figura 6 - Esforço de tração e respetiva distribuição da tensão [11]

Compressão – tipo de carregamento em que as forças são aplicadas de forma a comprimir um aderente contra o outro provocando tensões constantes ao longo do adesivo [5, 10, 11] (Figura 7).

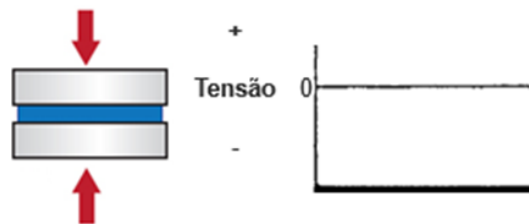


Figura 7 - Esforço de compressão e respetiva distribuição de tensão [11]

Corte – para este tipo de carregamento, a aplicação de forças no plano do adesivo provoca o escorregamento entre os dois aderentes. A extremidade da junta fica sujeita à maior parte da tensão, enquanto a região central da junta pouco contribui para a sustentação da carga [5, 10, 11] (Figura 8).

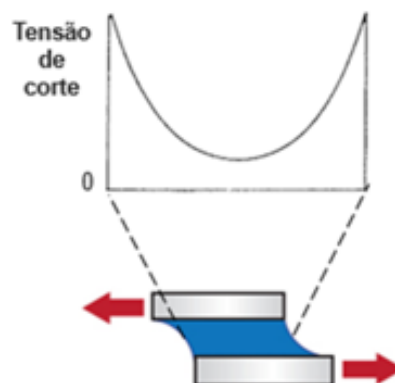


Figura 8 - Esforço de corte e respetiva distribuição de tensão [11]

Clivagem – neste tipo de carregamento, a aplicação de forças na extremidade de uma junta rígida tende a separar os substratos [5, 10, 11] (Figura 9).

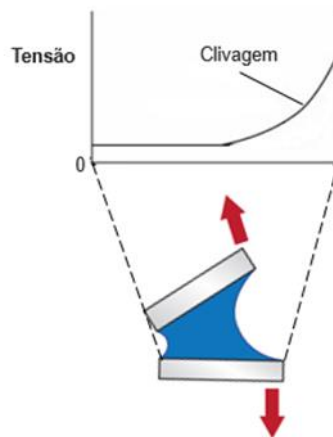


Figura 9 - Esforço de clivagem e respetiva distribuição de tensão [11]

Arrancamento – consiste em forças aplicadas na extremidade de uma junta onde pelo menos um dos aderentes é flexível e pode deformar plasticamente por ação das forças aplicadas [5, 10, 11] (Figura 10).



Figura 10 - Esforço de arrancamento e respetiva distribuição de tensão [11]

Nas juntas adesivas, os adesivos flexíveis e dúcteis em geral apresentam um melhor desempenho em relação aos rígidos e frágeis. A flexibilidade reduz os gradientes de tensões ao longo da camada de adesivo, enquanto a ductilidade permite a redistribuição de tensões nas regiões de concentração de tensões, ao invés de provocar rotura catastrófica (como ocorreria na presença de um adesivo frágil) [12].

As juntas adesivas, ao estarem sujeitas aos diferentes tipos de carregamento anteriormente mencionados, podem sofrer rotura sob diversas formas: rotura coesiva, rotura adesiva, rotura mista e rotura do substrato.

Rotura Coesiva- Acontece quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do adesivo. Após rotura verifica-se que ambas as superfícies estão cobertas por adesivo [2] (Figura 11). Este tipo de rotura ocorre quando, quer os substratos quer a ligação entre o adesivo e o substrato são mais fortes do que a resistência interna do próprio adesivo [5].

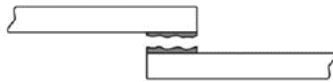


Figura 11 - Rotura Coesiva [11]

Rotura Adesiva – Acontece na interface de um dos substratos. Após rotura verifica-se que uma das superfícies está completamente coberta de adesivo enquanto a outra apenas contém vestígios deste [2] (Figura 12). Uma rotura deste tipo normalmente ocorre devido a uma má preparação da superfície [5].

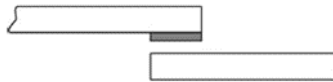


Figura 12 - Rotura Adesiva [11]

Rotura Mista – Caracteriza-se como sendo uma mistura do que acontece na rotura adesiva com a rotura coesiva [3] (Figura 13).

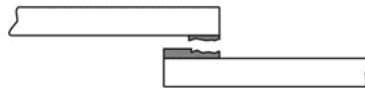


Figura 13 - Rotura Mista [11]

Rotura do substrato – Este tipo de rotura acontece quando a rotura se dá no substrato [3] (Figura 14).



Figura 14 - Rotura do Substrato [11]

O modo preferencial de rotura é a rotura coesiva no adesivo ou no aderente. A rotura de um dos aderentes demonstra que a junta foi bem concedida, desde que a carga de rotura corresponda à resistência nominal do substrato [3].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

Existem diferentes tipos de juntas adesivas. De seguida são representados e descritos alguns exemplos.

➤ Juntas topo a topo

São as juntas mais simples de conceber. Apesar disso, apresentam uma eficácia muito baixa, devido às acentuadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação. Este tipo de juntas adesivas não suporta esforços de flexão pois estes induzem clivagem ao adesivo. De forma a reduzir o efeito da clivagem podem ser realizadas modificações às juntas como mostrado na Figura 15 [3, 5, 10].

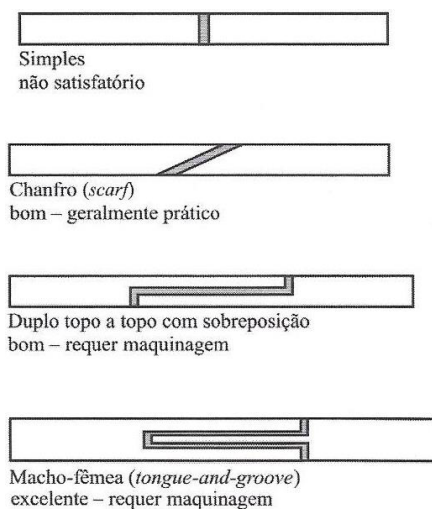


Figura 15 - Juntas topo a topo com modificações típicas [5]

➤ Juntas de sobreposição

São as mais comuns devido à facilidade de execução e devido ao adesivo ser solicitado maioritariamente ao corte. No entanto as forças não são colineares e isso introduz tensões de arrancamento nas extremidades da sobreposição. Para diminuir este efeito pode-se fazer algumas modificações às juntas como mostrado na Figura 16 [3, 5, 10].

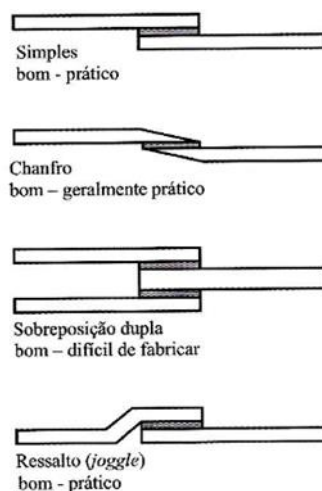


Figura 16 - Juntas de sobreposição com modificações típicas [5]

➤ Juntas de tira (*strap joints*)

São usadas para manter cargas alinhadas e são normalmente usadas quando as juntas de sobreposição não podem ser usadas devido à espessura do aderente. Na Figura 17 são apresentadas as melhores combinações para este tipo de junta. Este tipo de junta adesiva com apenas uma tira é sujeita a esforços de arrancamento [3, 5, 10]. Em caso de existirem forças de flexão é desejável a utilização da junta de tira dupla [3, 5, 10]. A tira dupla com chanfro e tira dupla macho-fêmea são as melhores combinações para resistir à flexão, porém ambos necessitam de maquinagem cara [3, 5, 10].

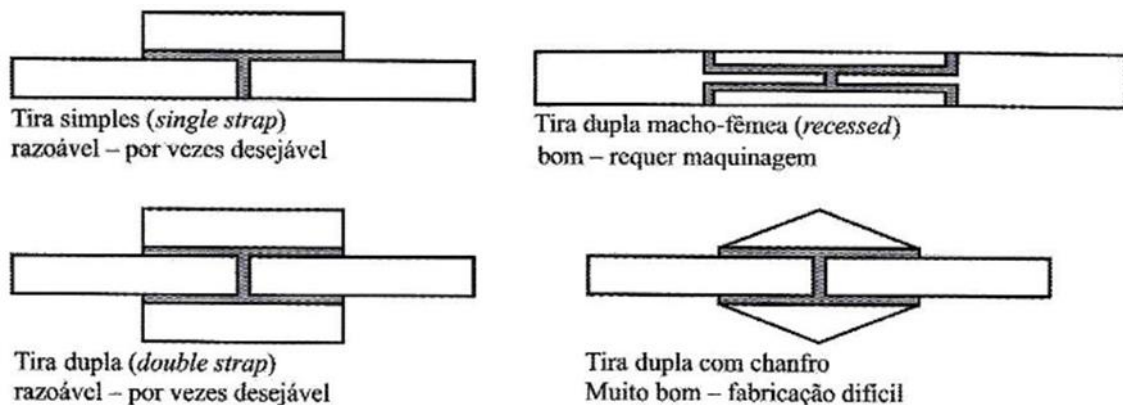


Figura 17 - Juntas de tira (*strap joints*) [5]

➤ Juntas cilíndricas

São habitualmente utilizadas na colagem de varões e tubos. São mais vantajosas relativamente às topo-a-topo, pois além de diminuir o efeito de arrancamento também se consegue uma área resistente maior. Alguns exemplos deste tipo de junta estão representados na Figura 18 [3, 5, 10].

➤ Juntas de “reforços”

Na colagem de substratos finos a componentes espessos são geralmente introduzidas forças de arrancamento. Estas forças de arrancamento podem ser minimizadas através de diversos métodos de construção, como mostrado na Figura 19a. Quando se pretende minimizar a clivagem em determinadas estruturas recorre-se a vários métodos, como os representados na Figura 19b [3, 5, 10].

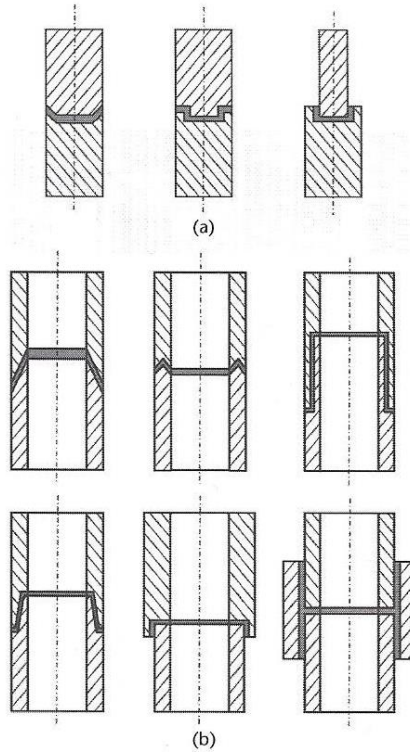


Figura 18 - Juntas cilíndricas: (a) para varões; (b) para tubos [5]

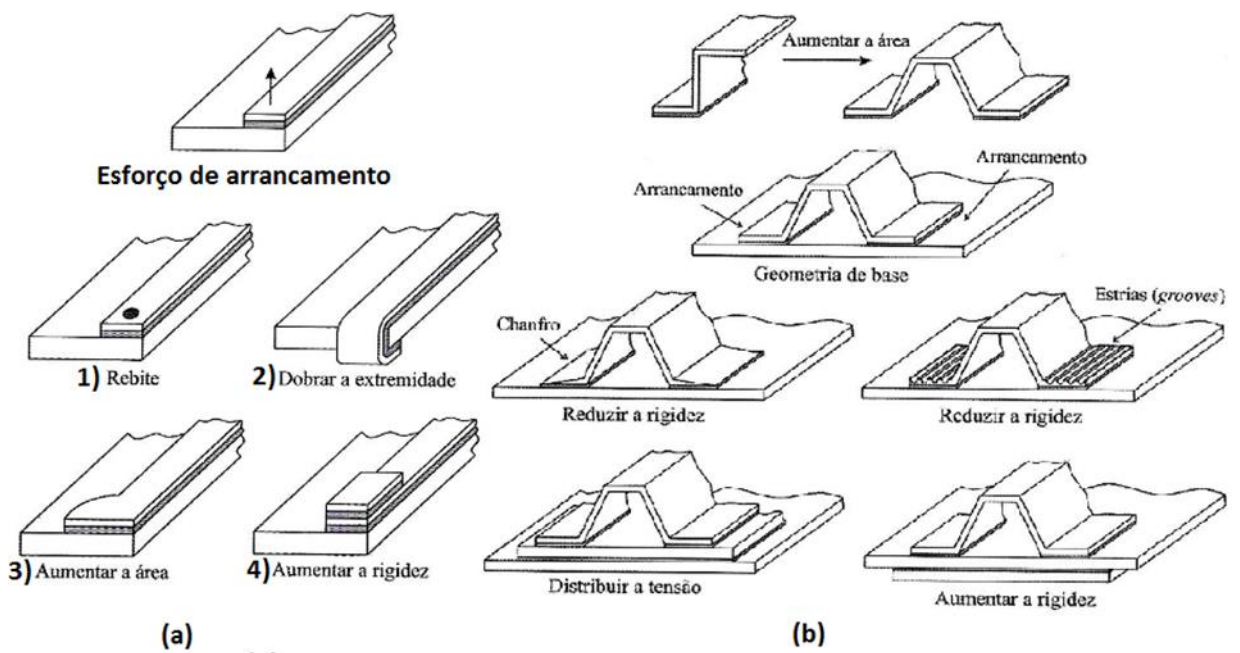


Figura 19 - Juntas de reforço – a) Diminuir esforços de arrancamento b) Diminuir esforços de clivagem [5]

➤ **Juntas em T**

Este tipo de juntas é caracterizado por uma orientação tipicamente perpendicular dos dois componentes (ângulo de 90°). O carregamento pode ser transversal (T) ou normal

(N). O objetivo principal é a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo. Na Figura 20, estão representadas algumas das juntas deste tipo [3, 5, 10].

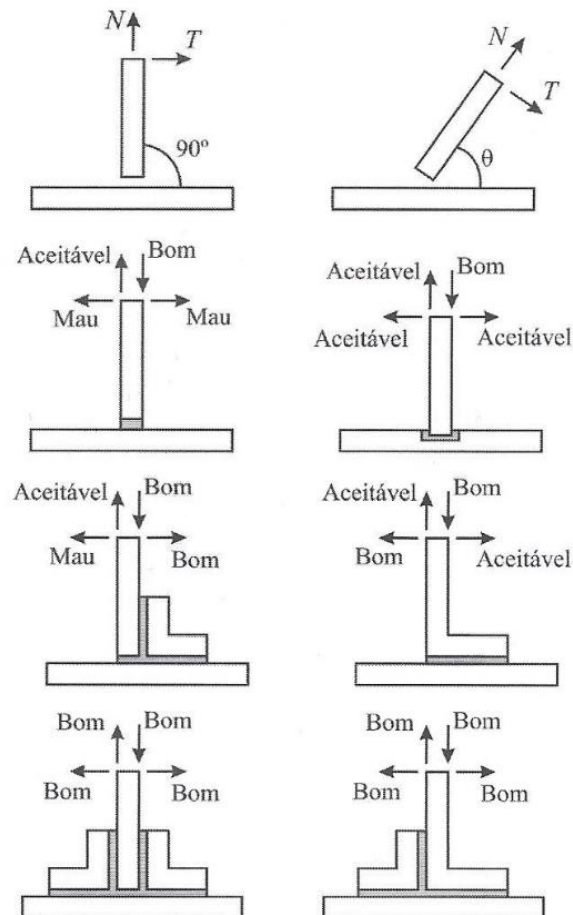


Figura 20 - Juntas em T [5]

➤ Juntas de canto

Estes tipos de juntas são semelhantes às juntas T, diferem apenas na geometria. As juntas de canto fazem ligação nas extremidades dos substratos formando uma junta com o formato de L. Na Figura 21, apresentam-se as soluções mais comuns para a diminuição de arrancamento do adesivo [3, 5, 10].

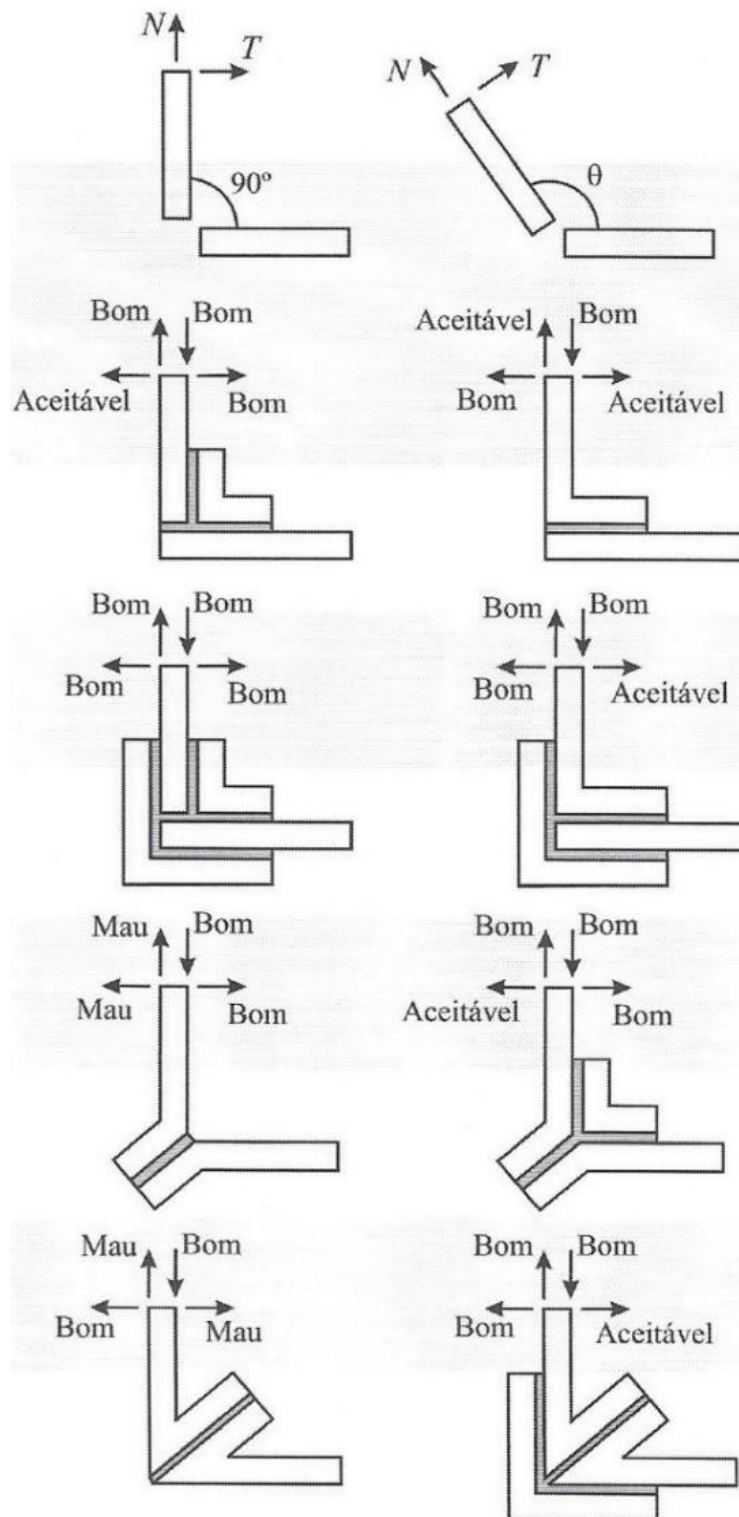


Figura 21 - Juntas de canto [5]

2.1.5 Adesivos estruturais

Os adesivos utilizados em aplicações permanentes em que é necessário resistir a cargas semelhantes às cargas aplicadas em ligações soldadas, aparafusadas e rebitadas, são denominados de adesivos estruturais [3, 5, 6, 10]. Esta definição de adesivos estruturais surgiu na indústria da construção mecânica quando se começaram a utilizar ligações adesivas de forma a garantirem cargas consideráveis [3, 5, 6, 10]. Neste tipo de ligações o adesivo pode apresentar resistência equivalente à dos componentes a serem ligados, ficando assim como parte integrante da estrutura [3, 5, 6, 10]. Sendo o adesivo parte integrante da estrutura, em que muitas vezes constitui o principal meio de ligação, deve garantir a resistência da estrutura a ser ligada [3, 5, 6, 10].

Os adesivos estruturais utilizados hoje em dia são geralmente polímeros termoendurecíveis [3, 5, 6, 10]. A classificação dos adesivos pode ser efetuada segundo vários critérios, tais como: rigidez, temperatura de cura, resistência à humidade, composição química, custo, desempenho, entre outras características [3, 5, 6, 10]. Na Figura 22 apresentam-se as principais famílias de adesivos, os adesivos estão divididos em adesivos estruturais ou não estruturais.

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

Figura 22 - Famílias de adesivos [3]

As principais famílias de adesivos estruturais a ter em consideração são [3, 5, 6, 10]:

- Adesivos Fenólicos;
- Adesivos Acrílicos;
- Adesivos de Poliuretano;
- Adesivos de Poliamida;

➤ Adesivos Epóxicos.

Adesivos Fenólicos

Resultam da condensação de fenol e formaldeído e começaram por ser usados principalmente para fazer ligações entre madeira. Posteriormente passaram a ser utilizados em ligações entre metais sendo obtida uma resistência satisfatória.

Possuem boa resistência à temperatura, boa estabilidade dimensional, boa resistência a fungos e são relativamente baratos. Porém possuem aspetos menos positivos tais como, baixa resistência ao impacto e vibrações, formando assim uma junta frágil. Na Tabela 1 apresentam-se as principais propriedades dos adesivos fenólicos.

De forma a melhorar as suas características os adesivos fenólicos são muitas vezes modificados com a adição de elastómeros de forma a melhorar a sua tenacidade e resistência ao arrancamento [3, 5, 6, 10].

Tabela 1 - Propriedades dos adesivos fenólicos [5]

Forma	Soluções, pós, filmes	
Método de aplicação	Manual, pincel, filme	
Cura	Temperatura e pressão	
Temperatura de Serviço	-40 a 180°C	
Vantagens	Boa resistência em ambientes adversos (fogo), baratos	
Desvantagens	Frágil, elevadas pressões de cura	
Resistência ao meio ambiente	Água	Excelente
	Solvente	Boa
	Óleo	Boa
Saúde e Segurança	Pouco fumo e baixo nível de toxicidade	
Aplicações	Madeira, vidro/metal (casquilhos de lâmpadas)	

Adesivos fenólicos-vinílicos

São baseados numa combinação de resina fenólica com formal de polivinilo ou resinas butiral de polivinilo. O processo de cura é obtido rapidamente a altas temperaturas e sob pressão. São utilizados para colar metais, borrachas e plásticos. Apresentam boa resistência ao impacto, boa resistência a agentes químicos, excelente resistência ao corte e arrancamento [3, 5, 6, 10].

Adesivos fenólicos-nitrilo

São obtidos através da mistura de fenólicos com borrachas de nitrilo. Possuem boa resistência ao corte (máximo 35 MPa), excelentes propriedades de arrancamento e fadiga, boa resistência ao impacto e à temperatura.

São utilizados para colar calços de travões (indústria automóvel), colar folhas de alumínio à estrutura de *honeycomb* (indústria aeronáutica), entre outras indústrias, tais como eletrónica, sapataria e mobiliário [3, 5, 6, 10].

Adesivos fenólicos-policloropreno

Relativamente aos dois últimos adesivos, estes possuem uma resistência a vibrações e baixas temperaturas ligeiramente superiores podendo mesmo ser utilizados até -55°C, porém são muito mais sensíveis a agentes químicos [3, 5, 6, 10].

Adesivos Acrílicos

Os adesivos acrílicos podem ser divididos em três principais adesivos, os anaeróbicos, os cianoacrilicos e os acrílicos modificados [3, 5, 6, 10].

Adesivos Anaeróbicos

São chamados de anaeróbicos porque curam quando o ar é excluído da resina. São essencialmente líquidos finos monoméricos que polimerizam para formar uma ligação plástica resistente quando confinados entre as juntas metálicas. Na Tabela 2 encontram-se as principais propriedades dos adesivos anaeróbicos.

Ligam todos os metais comuns, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis. São fáceis de usar, possuem uma cura rápida, custo reduzido, resistência bastante variável (podendo chegar a valores próximos dos epóxidos) e possuem baixa resistência a agentes químicos [3, 5, 6, 10].

Tabela 2 - Propriedades dos adesivos anaeróbicos [5]

Forma	Uma parte líquida ou pasta	
Método de aplicação	Pequeno contentor ou aplicação automática	
Cura	Por exclusão de ar. Cura em minutos ou horas a 25°C, ou em 10 min a 120°C	
Temperatura de Serviço	-55 a 150°C	
Vantagens	Preparação da superfície não precisa de ser muito cuidada	
Desvantagens	Espessuras finas	
Resistência ao meio ambiente	Água	Boa
	Solvente	Depende da formulação
	Óleo	Boa
Saúde e Segurança	Não causam grandes problemas à saúde	
Aplicações	Pequenos trabalhos de montagem. Ligação de árvores. Vedação (<i>liquid lock washer</i>)	

Adesivos Cianoacrilatos

São geralmente à base de cianoacrilato de metilo ou etilo e tornaram-se muito conhecidos pela sua capacidade de colar tudo em poucos segundos sendo a colagem efetuada quase instantaneamente, são usados normalmente em borrachas ou superfícies plásticas. Na Tabela 3 são apresentadas as principais propriedades dos adesivos cianoacrilatos.

Possuem uma cura rápida à temperatura ambiente, embora esta seja influenciada pela humidade do meio ambiente.

Têm uma boa resistência ao corte, são mais rígidos em relação aos anaeróbicos, baixa resistência ao calor e à humidade, baixa resistência ao impacto e ao arrancamento e são ainda relativamente caros [3, 5, 6, 10].

Tabela 3 - Propriedades dos adesivos cianoacrilatos [5]

Forma	Uma parte líquida	
Método de aplicação	Pequeno contentor ou aplicação automática	
Cura	Em presença de humidade no substrato. Cura em segundos ou minutos a 20°C	
Temperatura de Serviço	-30 a 80°C	
Vantagens	Cura rápida	
Desvantagens	A cura rápida impede de ligar grandes áreas. Frágil. Baixa capacidade de preencher espaços.	
Resistência ao meio ambiente	Água	Fraca
	Solvente	Razoável / Boa
	Óleo	Boa
Saúde e Segurança	A cura rápida apresenta dificuldades como o facto de poder colar à pele.	
Aplicações	Montagem rápida de estruturas leves compostas de pequenos componentes. Indústria ótica e eletrónica.	

Acrílicos Modificados

São sistemas termoendurecíveis, sendo que a sua modificação é efetuada com a adição de metacrilato de polimetilo reticulado enxertado em borracha de nitrilo com extremidades de vinilo. São também designados por acrílicos reativos e as suas principais propriedades encontram-se na Tabela 4.

Possuem boa resistência ao corte, ao arrancamento, ao impacto e ao corte e têm boa resistência à humidade [3, 5, 6, 10].

Tabela 4 - Propriedades dos adesivos acrílicos modificados [5]

Forma	Duas partes	
Método de aplicação	Contentor, misturador, sistemas completamente automatizados	
Cura	Catalisados por um iniciador que permite uma cura rápida	
Temperatura de Serviço	-40 a 120°C	
Vantagens	Pode curar rapidamente. Habilidade em ligar superfícies mal preparadas. Boa resistência ao meio ambiente.	
Desvantagens	A resistência e o módulo são mais baixos do que para os epóxidos.	
Resistência ao meio ambiente	Água	Boa
	Solvente	Boa
	Óleo	Boa
Saúde e Segurança	Não causam grandes problemas à saúde.	
Aplicações	Montagem rápida de pequenos e grandes componentes.	

Poliuretanos

Resultam da reação de um polioli (ou poliéter-polioli) com um isocianato. A sua cura pode-se efetuar à temperatura ambiente ou a altas temperaturas. As suas principais propriedades são apresentadas na Tabela 5.

Possuem uma resistência relativamente alta ao corte e ao arrancamento, são flexíveis, apresentam ligações com boa tenacidade, excelente comportamento a baixas temperaturas e uma boa resistência química [3, 5, 6, 10].

Tabela 5 - Propriedades dos adesivos poliuretanos [5]

Forma	Soluções, pastas	
Método de aplicação	Cartuchos	
Cura	Temperatura ambiente	
Temperatura de Serviço	-200 a 80°C	
Vantagens	Bom desempenho a baixa temperatura. Boa tenacidade, molhabilidade. Habilidade de formar uma espuma (os de 2 partes)	
Desvantagens	Curam com humidade, baixa resistência à temperatura	
Resistência ao meio ambiente	Água	Razoável
	Solvente	Razoável / Boa
	Óleo	Razoável / Boa
Saúde e Segurança	Evitar riscos fisiológicos	
Aplicações	Cargas baixas. Aplicações criogénicas. Indústria automóvel e do calçado	

Poliimidas

Foram desenvolvidas pela NASA para a indústria aeroespacial. Possuem uma temperatura de transição vítrea pelo menos 100°C acima da dos epóxidos podendo por isso ser utilizadas a temperaturas mais altas. Existem dois tipos de poliimidas utilizadas, distinguidas pela forma como se realiza a cura, sendo umas as que curam por reação de condensação e as outras as que curam por uma reação de adição. Possuem grande

dureza, baixa resistência ao impacto e vibrações e boa resistência a temperaturas altas [3, 5, 6, 10].

Epóxidos

São os adesivos mais versáteis pois aderem bem à maioria dos substratos, exceto a polímeros e a elastómeros. Têm uma vasta aplicação nas indústrias aeronáutica e automóvel. Os epóxidos comerciais são constituídos por uma resina epóxida e por um endurecedor. O endurecedor pode vir já incorporado na resina ou ser fornecido à parte para ser mais tarde misturado com a resina. Possuem excelente resistência à tração e ao corte, fraca resistência ao arrancamento, excelente resistência a óleos, humidade e muitos solventes, baixa contração de cura e elevada resistência à fluência [3, 5, 6, 10].

Na Tabela 6 e Tabela 7, são apresentadas as principais propriedades dos adesivos epóxidos de uma e duas partes respetivamente.

Tabela 6 - Propriedades dos adesivos epóxidos de uma parte [5]

Forma	Filme, pastas	
Método de aplicação	Manual	
Cura	Temperatura ($\approx 150^{\circ}\text{C}$)	
Temperatura de Serviço	-40 a 180°C	
Vantagens	Resistência e durabilidade	
Desvantagens	Armazenamento. Cura a alta temperatura	
Resistência ao meio ambiente	Água	Excelente
	Solvente	Excelente
	Óleo	Excelente
Saúde e Segurança	Dermatose, problemas respiratórios	
Aplicações	Aviões, helicópteros, carros, comboios, artigos desportivos	

Tabela 7 - Propriedades dos adesivos epóxicos de duas partes [5]

Forma	2 Partes em pasta	
Método de aplicação	Mistura manual, mistura e aplicação automática	
Cura	Temperatura ambiente (pode ser acelerada com a temperatura)	
Temperatura de Serviço	-40 a 100°C	
Vantagens	Resistência e durabilidade	
Desvantagens	Cura lenta. Mistura (bolhas)	
Resistência ao meio ambiente	Água	Boa
	Solvente	Boa
	Óleo	Boa
Saúde e Segurança	Dermatose, problemas respiratórios	
Aplicações	Aviões, helicópteros, carros, comboios, artigos desportivos	

Podem ser facilmente modificados para que determinada propriedade seja atingida. As combinações entre adesivos epóxicos com outros adesivos mais comuns são [3, 5, 6, 10]:

- Epóxico-poliamida

Neste tipo de adesivo a poliamida fica com a função de endurecedor e torna o adesivo mais flexível. A cura é processada lentamente à temperatura ambiente (12 a 16 horas).

- Epóxico-polisulfito

Esta combinação torna o adesivo mais flexível e com melhor resistência química. São caracterizados pela sua ótima resistência a baixas temperaturas assim como a sua resistência a forças de arrancamento.

- Epóxido-fenólicos

Com a adição de resinas fenólicas é garantida uma melhora na resistência a altas temperaturas. Como características possuem uma muito boa resistência ao meio ambiente, óleo, solventes e humidade, porém possuem baixa resistência ao impacto e a forças de arrancamento, e ainda uma limitada resistência a choques térmicos.

- Epóxido-vinilos

Esta mistura ajuda a melhorar a resistência ao impacto e ao arrancamento, porém faz com que a sua resistência a alta temperatura diminua.

- Epóxido-poliuretano

Esta mistura tem como objetivo melhorar a resistência ao arrancamento, a choques, a vibrações e à fadiga.

- Epóxido-nitrilo

Este tipo de adesivo é constituído com uma combinação de uma resina epóxida modificada com um polímero de nitrilo. Possui boa resistência ao arrancamento, sendo principalmente utilizado na construção e manutenção de aviões comerciais a jato.

2.2 Avaliação das propriedades de adesivos

O conhecimento das propriedades dos adesivos, isto é, propriedades mecânicas, propriedades térmicas e propriedades de fratura, é fundamental para a determinação das tensões na junta e para a previsão da sua resistência e tempo de vida útil.

Propriedades Térmicas

Temperatura de transição vítrea (T_g)

Pode ser definida como sendo a temperatura abaixo da qual um polímero se torna duro e frágil (estado vítreo), e acima da qual o mesmo polímero se torna num líquido viscoso. É por isso uma propriedade fundamental para a seleção de um determinado polímero para uma determinada aplicação. A Tabela 8 apresenta valores de T_g típicos [5].

Tabela 8 - Temperatura de transição vítrea de vários adesivos

Adesivo	Tg (°C)
Epóxidos	
Epóxido Modificado	50-150
Epóxido-fenólico	200
Epóxido-nylon	50
Epóxido-polisulfito	50
Epóxido-vinilo	50
Fenólicos	
Nitrilo-fenólico	120
Vinilo- fenólico	70
Neopreno- fenólico	70
Adesivos de Alta temperatura	
Bismaleimida	210-280
Poliimida	340-430
Poliuretanos	20-50
Anaeróbicos	120
Cianoacrilatos	80
Acrylicos Modificados	60-120

Temperatura de Fusão (Tf)

Temperatura na qual o polímero passa ao estado líquido/pastoso. No caso de adesivos estruturais como os epóxicos, os fenólicos e os acrílicos esta propriedade não tem grande importância, pois estes não são cristalinos (amorfos) [5].

Temperatura de Decomposição

Se a temperatura for suficientemente alta os polímeros começam a degradar-se quimicamente, produzindo produtos de degradação tais como voláteis e resíduos carbonados [5].

Coefficiente de Expansão Térmica

Na Tabela 9 encontram-se valores de expansão térmica de diversos materiais. Como se pode ver, os adesivos possuem valores superiores aos dos substratos em que são aplicados. Esta diferença provoca tensões residuais de origem térmica. De forma a diminuir a expansão térmica é adicionada uma carga de sílica ou alumina [5].

No fim da cura os adesivos devem possuir valores de expansão térmica próxima dos valores dos substratos ou então possuir tenacidade suficiente para suportar as tensões de origem térmica [5]. As tensões de origem térmica podem antecipar a rotura da junta, por isso devem ser utilizados adesivos mais rígidos para ligar metais e adesivos mais flexíveis para ligar polímeros [5].

Máxima temperatura de serviço

Entende-se como a temperatura máxima que o adesivo aguenta sem começar a plastificar, encontra-se diretamente relacionada com a Tg [5].

Se os adesivos estruturais são capazes de aguentar uma força substancial, não faz qualquer sentido usá-los a temperaturas em que o seu comportamento é semelhante ao da borracha [5].

Propriedades Mecânicas

Viscoelasticidade

Capacidade de o material sofrer deformação a uma temperatura abaixo da temperatura de transição vítrea e voltar ao seu estado normal [5].

Módulo de elasticidade

O módulo de elasticidade proporciona o valor de rigidez do adesivo. Os adesivos dúcteis e tenazes aguentam grandes deformações antes de romperem e, por isso, a relação entre a tensão e a deformação é não linear [5].

Tabela 9 - Coeficientes de expansão térmica para diversos materiais

Material	α ($\times 10^{-6}$ °C)	
Alumínio	24	
Aço	12	
Titânio	9	
Fibra de vidro	6	
Fibra de carbono (axial)	-0.5	
Fibra de carbono (radial)	10	
Compósito unidirecional epóxico / carbono (ao longo das fibras)	-0.1	
Compósito unidirecional epóxico / carbono (através das fibras)	30	
	Abaixo de Tg	Acima de Tg
Epóxico DGEBA (<i>Diglycidyl Ether of Bisphenol A</i>) / dietileno tetramina	60	180
Epóxico DGEBA (<i>Diglycidyl Ether of Bisphenol A</i>) / 1,2-diaminobenzeno	57	210
Bismaleimida	35	114
Metacrilato de polimetilo	26	53
Cianocrilato	80	
Anaeróbico	85	235

Coeficiente de Poisson

Mede a deformação transversal, em relação à direção longitudinal de aplicação da carga, de um material isotrópico. O coeficiente de Poisson de um adesivo varia entre 0,3 e 0,5 [5].

Tensão de cedência

Tensão máxima que o material suporta em regime elástico de deformação. Os critérios tradicionais de medição da tensão de cedência não são aplicados nos adesivos. Os metais possuem uma tensão de cedência semelhante à tração e à compressão, enquanto os adesivos possuem uma resistência à compressão superior à tração.

Ductilidade

Nos adesivos é muito difícil medir esta propriedade, pois esta medição depende muito do tipo de ensaio usado assim como quantidade de defeitos existentes (poros, microfendas, etc.) [5].

Fratura Frágil

A teoria da fratura frágil envolve a formação e propagação de fendas e é aplicada a polímeros e metais. A energia necessária para que a fenda se propague formando duas unidades de nova superfície é denominada como taxa crítica de libertação de energia, G_c , que por sua vez é uma característica do material [5].

Existem vários ensaios para determinação de propriedades dos adesivos. Estes podem ser basicamente divididos em duas categorias: ensaios em provetes de adesivo maciço ou ensaios em juntas adesivas [13].

É sabido que as propriedades dos adesivos diferem entre adesivo maciço e adesivo em camada fina entre dois aderentes devido ao facto, nesta última situação, as deformações do adesivo estarem restringidas entre dois corpos de rigidez superior, o que por sua vez altera a forma e dimensão da zona de processo de fratura (ZPF) [14]. Existe ainda quem defenda que as propriedades obtidas através de ensaios em provetes de adesivo bruto não as mesmas obtidas em ensaios de juntas adesivas, pois a cura difere de um método para o outro [13].

2.2.1 Ensaios de adesivo maciço

Ensaio de tração em provetes maciços

Os provetes maciços são normalmente produzidos por injeção do adesivo para um molde com a forma final ou por pressão entre placas. O primeiro método é o mais adequado a adesivos de um só componente, que são relativamente líquidos. O segundo

método é mais adequado a adesivos mais viscosos, adesivos em forma de filme ou de dois componentes [13].

A norma francesa NF T 76-142 descreve uma técnica para o segundo método, que funciona muito bem na obtenção de provetes maciços sem poros. Esta consiste em colocar o adesivo no centro do molde e depois efetuar pressão (2 MPa ou 20 atm).

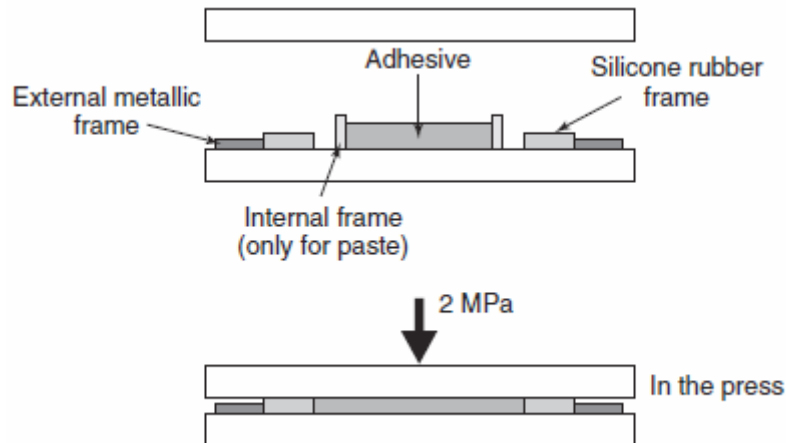


Figura 23 - Obtenção de provetes maciços (NF T 76-142) [13]

No início da cura existe um vazio entre o adesivo e a placa de silicone, que permite que, no momento de aplicação de pressão o adesivo se espalhe por todo o molde evitando assim entrada de ar (não havendo formação de bolhas de ar). O suporte metálico garante o posicionamento da placa de silicone [13].

As placas de adesivo obtidas são depois maquinadas de forma a obterem a geometria adequada de acordo com normas de ensaio. Após a maquinagem, os provetes ficam em forma de osso de cão, como demonstrado na Figura 24 [13].

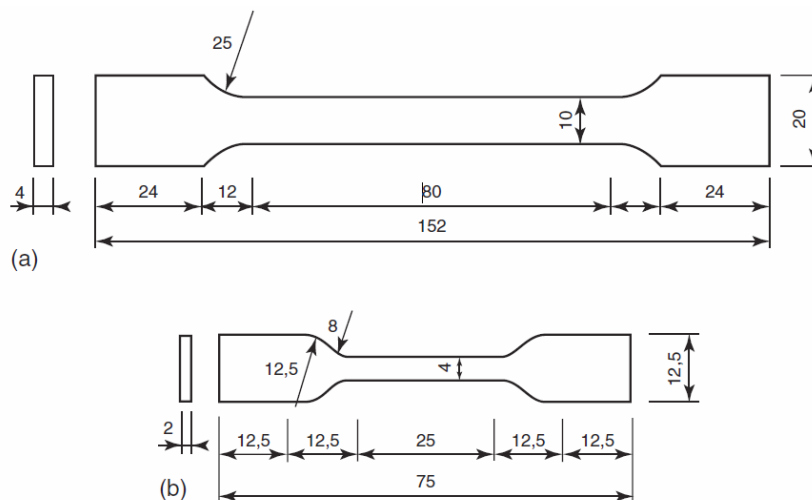


Figura 24 - Geometria dos provetes maciços (norma EN ISO 527-2) [15]

No que diz respeito ao ensaio destes provetes, para a maior parte dos adesivos podem ser utilizadas pinças convencionais, mas no caso de adesivos de alta resistência é necessário utilizar pinças de alta pressão para a fixação dos provetes [15].

Efetua-se a medição da carga e deslocamento para se determinar a curva tensão-deformação. Normalmente é usada uma velocidade de ensaio igual a 1 mm/min para se obter o módulo de Young, em caso de utilização de velocidades de ensaio mais elevadas pode ocorrer falha do ensaio [15].

Com a obtenção da curva tensão-deformação (Figura 25), é possível obter os valores do módulo de Young, resistência à tração e tensão de cedência.

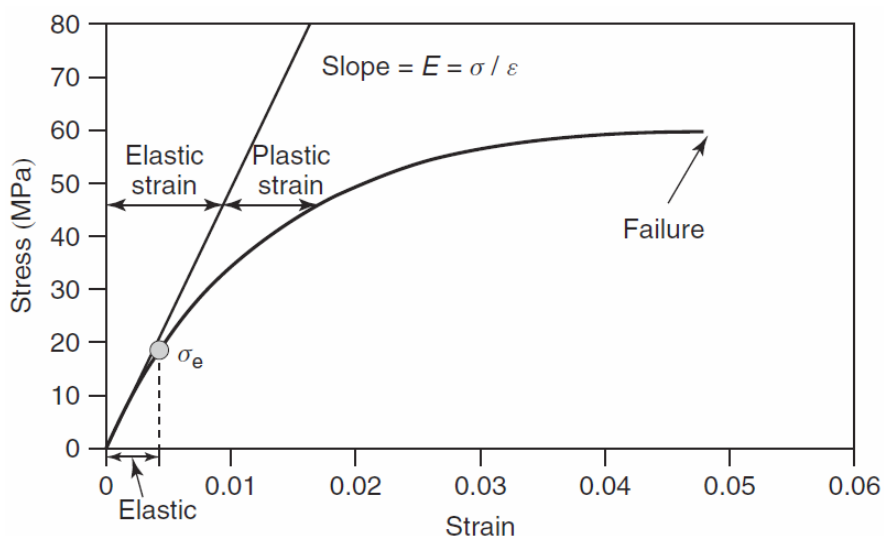


Figura 25 - Típico gráfico tensão-deformação [15]

Ensaio Iosipescu ou V-Notched beam shear method

Este método foi proposto por Iosipescu para testar metais e soldaduras em condições de corte puro, mas desde então tem sido usado para testar compósitos e foi padronizado como norma ASTM D5379. Este método pode ser aplicado também a adesivos, tanto em juntas adesivas como em provetes maciços [16].

Os provetes possuem entalhes angulares inclinados a $\pm 45^\circ$ dos eixos, a fim de garantir uma região de corte uniforme para que a falha ocorra na secção central (Figura 26) [16].

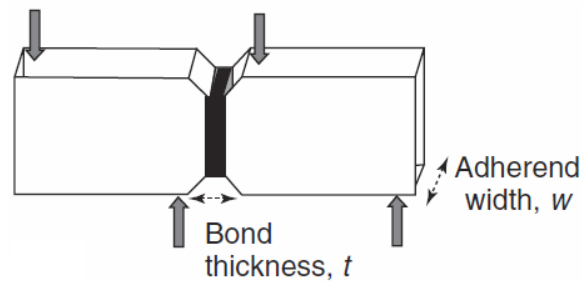


Figura 26 – Provete para ensaio Iosipescu [16]

Para um provete com espessura w e com uma carga aplicada de P , a tensão de corte, τ , é dada pela equação:

$$\tau = \frac{P}{wb}, \quad (1)$$

onde b é a distância entre entalhes.

Segundo a norma ASTM D5379, a carga deve ser efetuada como exemplificado na Figura 27. O ensaio consiste num grampo fixo ligado à máquina de ensaio e um móvel ligado que vai efetuar a carga no provete até à rotura deste [16].

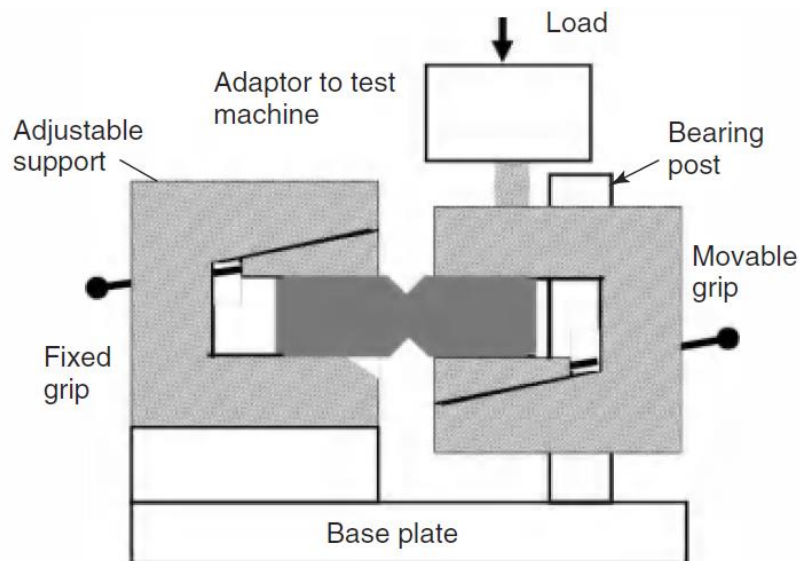


Figura 27 - Ensaio Iosipescu [16]

É recomendado pela norma ASTM D5379 que a tensão de corte seja obtida através do uso de extensómetros, posicionados a 45° do eixo do provete. De forma a diminuir erros de leitura é aconselhado o uso de extensómetros biaxiais com sensores orientados ortogonalmente. O valor de tensão é obtido pela soma dos valores medidos nos sensores [16].

Ensaio de borboleta ou *Notched plate shear method* (Arcan)

O ensaio de borboleta (Arcan) foi desenvolvido a partir de provetes em forma de “S” que possuíam entalhes em V, com a intenção de medir a resistência ao corte de plásticos. Este ensaio é conhecido como ensaio de borboleta devido à geometria dos seus provetes (Figura 28) [17].

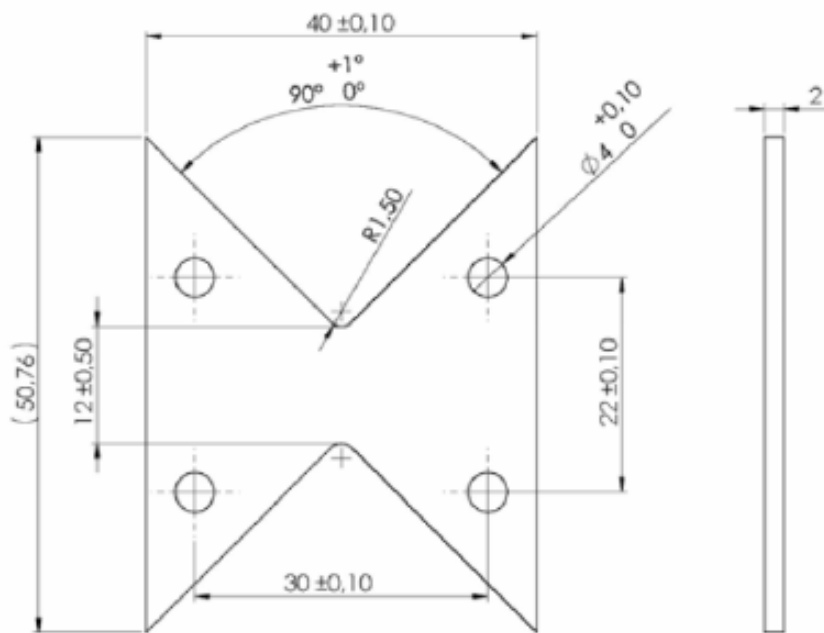


Figura 28 - Provette Arcan [1]

Este ensaio é muito versátil e tem sido usado para a obtenção de propriedades de plásticos, compósitos e adesivos [17].

Na Figura 29 está representado o esquema do ensaio Arcan. Os pratos metálicos possuem furos de forma a fixar o provete a testar e possuem furos para ligar estes à máquina de ensaio. A carga P , ao ser aplicada, vai gerar uma tensão de corte na região central do provete [17].

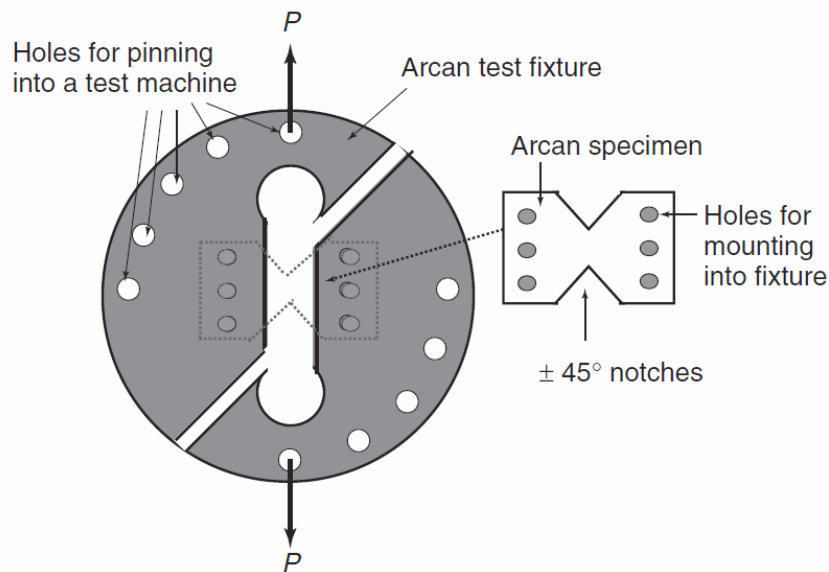


Figura 29 - Esquema do ensaio Arcan [17]

A tensão de corte, τ , é dada pela seguinte equação:

$$\tau = \frac{P}{wb}, \quad (2)$$

em que w é a largura do provete, P é a carga aplicada e b é a distância entre entalhes.

A deformação de corte, γ , é dada pela seguinte equação:

$$\gamma = \frac{(\delta_1 - \delta_2)}{t}, \quad (3)$$

em que δ_1 e δ_2 são os deslocamentos verticais obtidos através de uma roseta a 45° e t é a distância entre os dois deslocamentos [17].

2.2.2 Ensaios de adesivo em junta adesiva

Junta de sobreposição simples

O ensaio neste tipo de juntas é muito comum. Além de estas juntas serem bastante fáceis de produzir, são também muito usadas na indústria. É amplamente usado para medir a resistência ao corte do adesivo [18].

A geometria de uma junta de sobreposição simples está representada na Figura 30, e as dimensões apresentadas estão de acordo com a norma ASTM D 1002 [18].

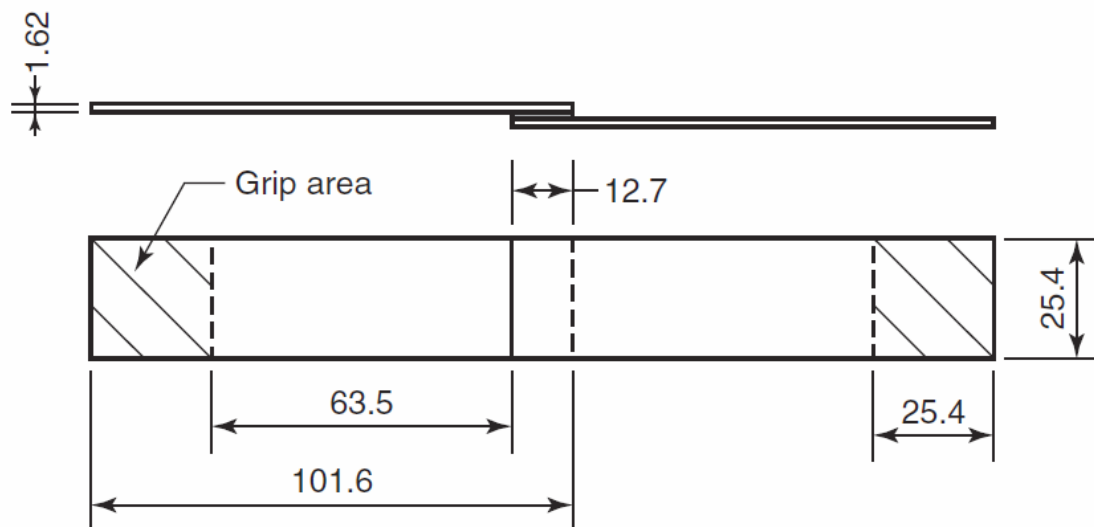


Figura 30 - Geometria de uma junta de sobreposição simples [18]

Junta topo a topo ou *Napkin-ring test*

Este ensaio é usado para determinar a tensão de corte de adesivos estruturais. Na Figura 31 encontra-se representado a geometrias usadas neste ensaio [19].

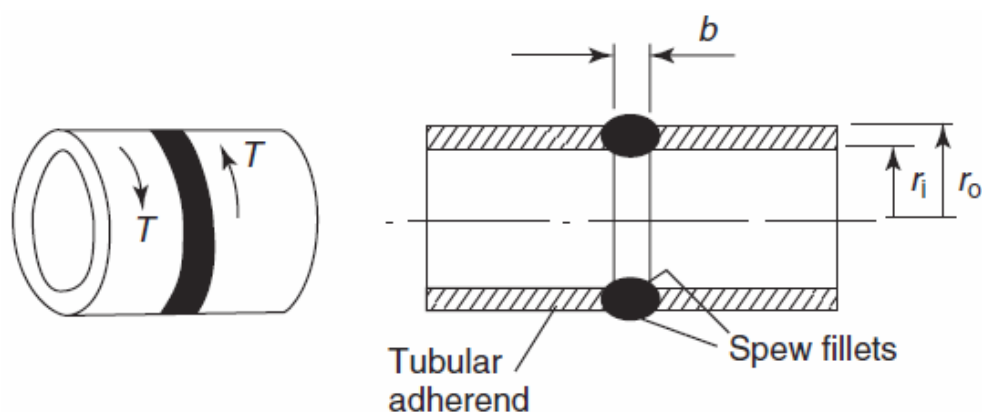


Figura 31 - Geometria topo a topo [19]

É aplicada torção, T , igual mas de sentido oposto em cada um dos substratos, que faz com que o adesivo fique aproximadamente sujeito a corte puro.

A tensão máxima de corte é dada pela equação:

$$\tau = \frac{Tr_0}{J}, \quad (4)$$

onde,

$$J = \frac{\pi}{2} (r_0^4 - r_i^4), \quad (5)$$

e o módulo de corte, G , é dado por:

$$G = \frac{b}{J} \left(\frac{T}{\theta} \right). \quad (6)$$

Thick Adherend Shear Test (TAST)

O ensaio TAST é um dos mais populares ensaios de resistência devido à facilidade de produzir e ensaiar os provetes. Tem como finalidade determinar a resistência ao corte dos adesivos. A geometria dos provetes utilizados neste tipo de ensaio encontra-se na Figura 32 [20].

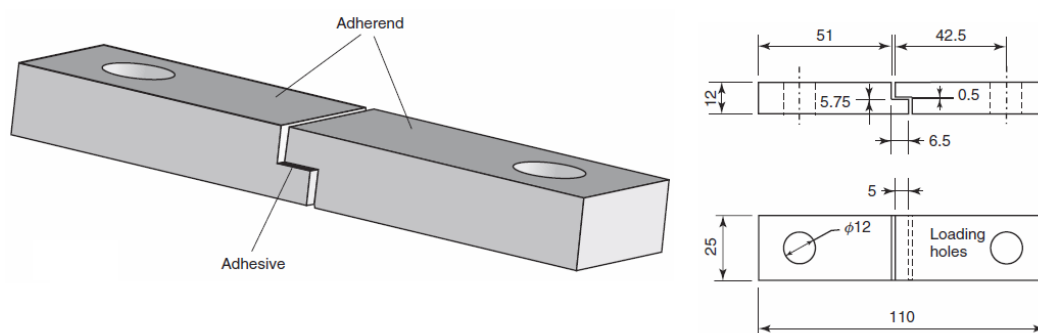


Figura 32 - Provede TAST [21]

De forma a garantir que a carga está perfeitamente alinhada e que não existe flexão, durante o ensaio destes provetes são aplicadas umas placas com pinos de forma a garantir o posicionamento correto (Figura 33) [20].

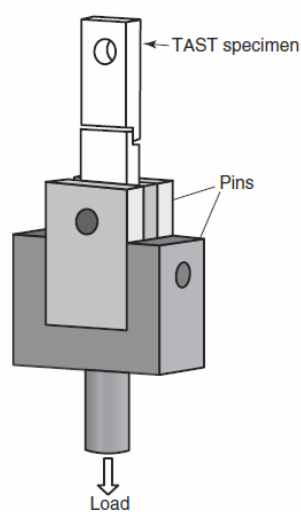


Figura 33 - Posicionamento provede ensaio TAST [20]

O ensaio é realizado com o auxílio de uma máquina de tração (Figura 34) e são utilizados extensómetros para medir as deformações.

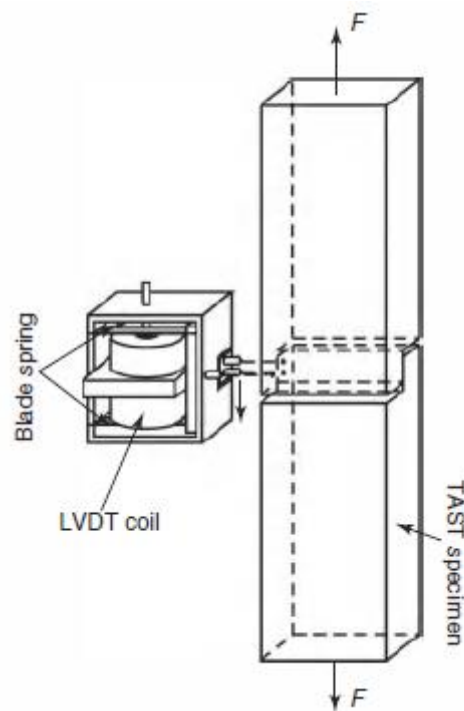


Figura 34 - Ensaio TAST [20]

Ensaio de arrancamento em junta do tipo T

Este tipo de ensaio está normalizado pela norma ASTM D1876 e tem como finalidade a determinação da resistência ao arrancamento [6].

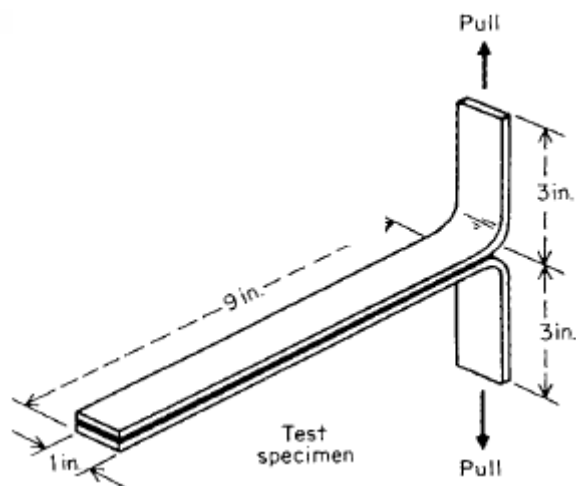


Figura 35 - Ensaio de arrancamento em junta do tipo T [6]

O ensaio é realizado conforme se demonstra na Figura 35, em que um dos substratos é fixo a uma base mais rígida e o outro substrato é arrancado pela máquina de ensaio [1]. Normalmente este tipo de ensaio é usado quando ambos os aderentes são flexíveis. O ângulo e a força de arrancamento dependem da espessura do suporte [6].

Ensaio de tração em juntas topo a topo

Este tipo de ensaio é bastante comum e está normalizado pela norma ASTM D 897. É usado para determinar as propriedades à tração dos adesivos [22]. Existem três requerimentos obrigatórios para se conseguirem bons resultados, são eles os seguintes [22]:

- A camada de adesivo não pode conter bolhas de ar;
- A carga tem de ser aplicada aximetricamente e perpendicularmente à linha de ligação;
- Deve ser evitada a falha na linha de adesão secundária (em provetes que a apresentem).

Os provetes utilizados neste tipo de ensaio consistem em dois aderentes metálicos cilíndricos unidos com ou sem um espaçador, tal como se demonstra na Figura 36 [22].

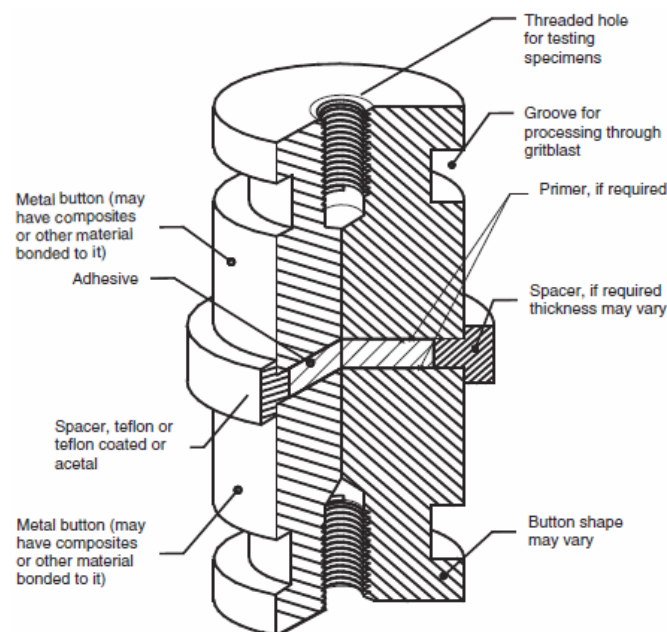


Figura 36 - Provette para ensaio de tração em junta topo a topo (com espaçador) [22]

Os provetes são normalmente fixados com recurso a pinças em U, sendo depois testados numa máquina de tração (Figura 37) [22].

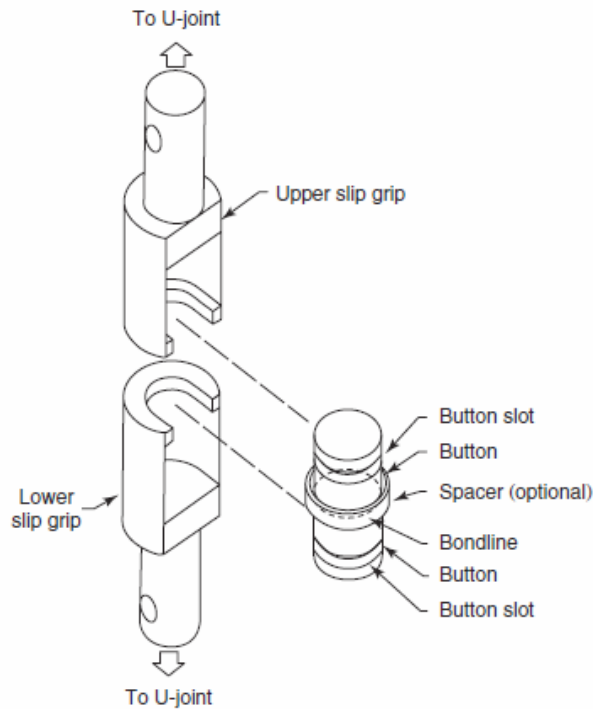


Figura 37 - Esquema de ensaio de tração de juntas topo a topo [22]

2.3 Ensaios de caracterização à fratura

A mecânica da fratura e os modelos de dano coesivo têm demonstrado grandes potencialidades na avaliação da resistência mecânica em juntas adesivas, sendo por isso cada vez mais objeto de estudo de vários investigadores [5]. A caracterização à fratura de adesivos fornece propriedades que ajudam a prever a resistência das ligações adesivas [23]. O parâmetro mais utilizado para prever a propagação da fratura é a taxa de libertação de energia, G_C . A utilização deste parâmetro pressupõe a existência de uma pré-fenda ou defeito na zona de colagem [5, 23]. Existem três modos de carregamento fundamentais: modo I, modo II e modo III, sendo que os mais estudados são o modo I e II [5].

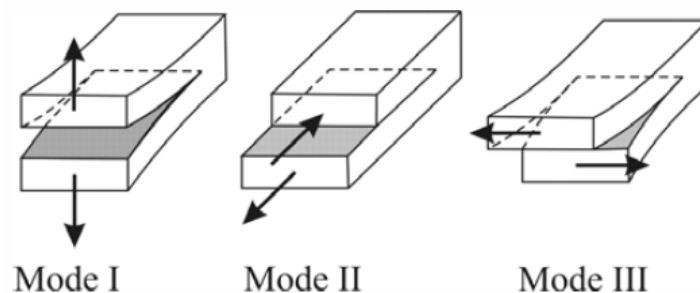


Figura 38 - Modos de carregamento [23]

Na maior parte das estruturas verifica-se uma combinação dos modos I e II, sendo esta definida como modo misto I+II [23].

Em modo I, os principais ensaios são o *Compact Tension* (CT), *Single Edge Notched Bend* (SENB), *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB). Em modo, II os principais ensaios são o *End-Notched Flexure* (ENF), *End-Loaded Split* (ELS), *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF). Em modo, misto I+II os ensaios mais relevantes são o *Asymmetric Double-Cantilever Beam* (ADCB), *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB), *Mixed-Mode Bending* (MMB), *Mixed-Mode Flexure* (MMF) e *Cracked Lap Shear* (CLS).

2.3.1 Modo I

Ensaio Compact Tension (CT) e Ensaio Single Edge Notched Bend (SENB)

Os ensaios CT e SENB podem ser realizados de acordo com as normas ASTM D5045-99 e ISO 13586. Estas normas especificam as características que os provetes de ensaio devem possuir (Figura 39). Estes ensaios foram concebidos para caracterizar a tenacidade de materiais poliméricos (tais como adesivos), em termos de um fator crítico de tensão, K_{IC} , ou de uma taxa de libertação de energia, G_{IC} , no momento inicial de fratura [24].

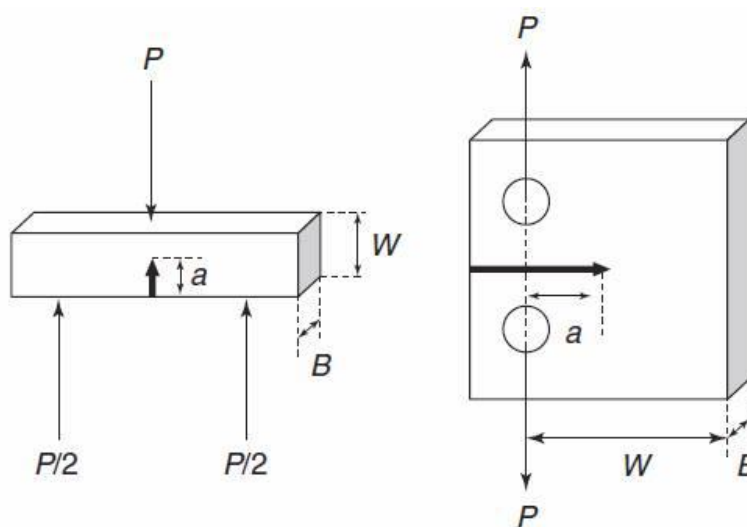


Figura 39 - Provetes para ensaio SENB (esquerda) e CT (direita) [24]

Deve ser realizada uma fenda nos provetes antes do início do ensaio. Uma forma de realizar esta fenda é tocar com o provete numa lâmina afiada, que tenha sido emersa em azoto líquido. Assim que ocorra a fratura o provete deve ser colocado na máquina de teste (máquina de flexão de três pontos). A velocidade de ensaio deve ser constante e de valor igual a 10 mm/min. Deve-se também guardar os valores de carga e deslocamento em função do tempo [24].

Ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB)

O ensaio DCB é utilizado para determinar a resistência à fratura em juntas adesivas submetidas ao modo I (tração). Este ensaio calcula o valor de G_{IC} utilizando ensaios de início e paragem sucessivos da fenda, como especificado pela norma ASTM D3433, ou ensaios com propagação estável de fenda, utilizando a norma ISO 25217 [25].

Os provetes utilizados neste ensaio são retangulares e ligados ao longo do seu comprimento por adesivo, sendo provocada uma fenda numa das extremidades durante o fabrico do provete [25].

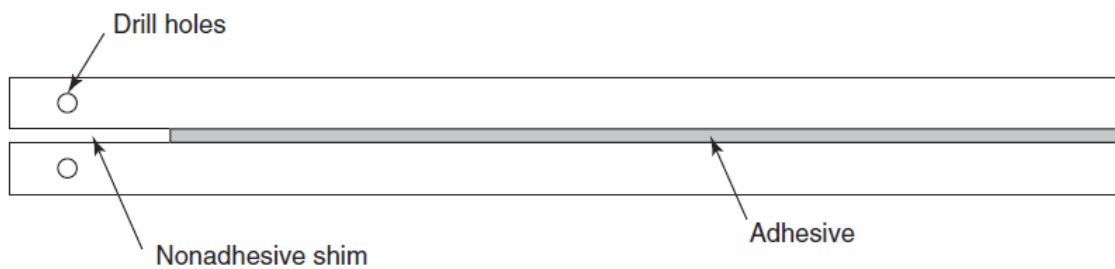


Figura 40 - Provette DCB [25]

Na Figura 40 está representado um típico provete DCB. Segundo a norma ASTM D3433 os aderentes a utilizar neste ensaio devem possuir as seguintes dimensões: 356 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e 12,7 mm de altura. Na mesma norma é indicada a altura mínima do substrato, de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio. A altura mínima do substrato é dada pela seguinte equação [26]:

$$h_{\min} = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (7)$$

em que h representa a espessura mínima, T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda, B corresponde à largura do substrato e σ_y representa a tensão de cedência do material do substrato [26].

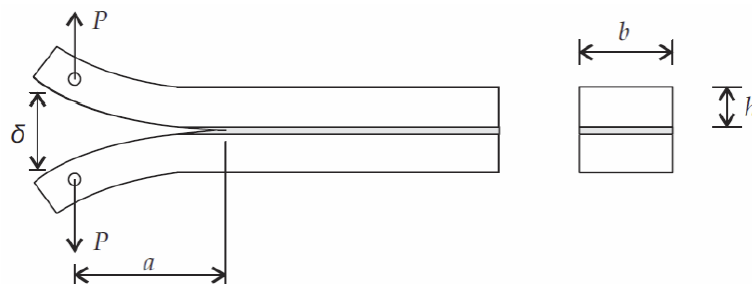


Figura 41 - Esquema de ensaio DCB [5]

A solicitação que é realizada ao provete durante o ensaio está representada na Figura 41. O ensaio é realizado a uma velocidade compreendida entre 0,5 e 3 mm/min. Ao

longo do ensaio são registados os valores de P (carga aplicada) e δ (deslocamento) em função do comprimento de fenda (a) [5].

Ensaio *Tapered-Double Cantilever Beam*

O ensaio TDCB é utilizado para determinar a resistência à fratura em juntas adesivas submetidas ao modo I (tração). Foi inicialmente desenvolvido para estudar o crescimento de fenda sem necessidade de medição da mesma [25]. Na Figura 42 é apresentado um provete típico do ensaio TDCB.

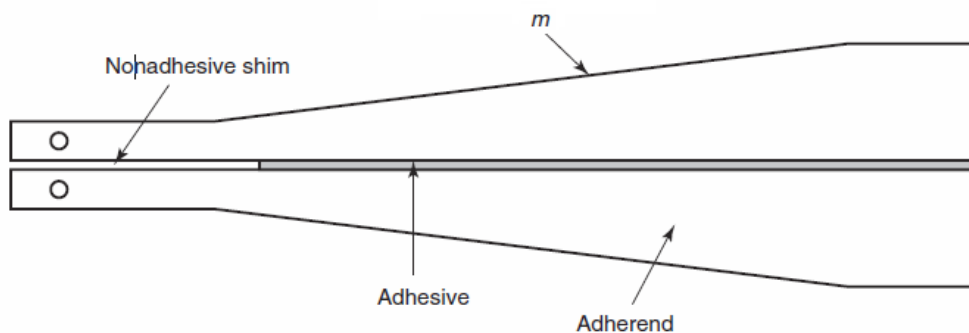


Figura 42 - Provete TDCB [25]

A norma ASTM D3433 recomenda a que os substratos possuam 241,3 mm de comprimento e largura de 25,4 mm. A altura do provete é a necessária para que a taxa de variação da flexibilidade, C , com o comprimento de fenda, isto é, que dC/da , seja constante ao longo da propagação da fenda. A altura do substrato, h , varia de acordo com a seguinte equação [26]:

$$m = \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h}, \quad (8)$$

em que m é o declive, a corresponde ao comprimento de fenda e h corresponde à altura do substrato.

A maior desvantagem deste ensaio em relação ao ensaio DCB é o facto de os provetes utilizados neste serem muito mais difíceis de produzir [5].

2.3.2 Modo II

Ensaio *End-Notched Flexure* (ENF)

Para este tipo de ensaio apenas estão disponíveis a norma japonesa JIS 7086 e a norma europeia AECMA prEN6036, que são para ensaios em compósitos. Apesar disto estas normas têm sido adaptadas a juntas adesivas com algum sucesso [27].

O ensaio ENF consiste basicamente numa viga apoiada, carregada ao meio do seu comprimento. Este é o ensaio mais generalizado para a obtenção de G_{IIC} . No entanto, a propagação da fenda neste tipo de ensaio pode ser instável. Com a aplicação da carga a fenda tende a fechar, o que dificulta a visualização da mesma [27].

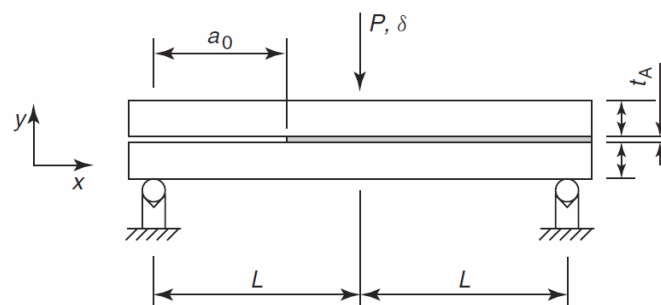


Figura 43 - Esquema de ensaio ENF [27]

Ensaio *End-Loaded Split* (ELS)

O ensaio ELS aparece como sendo uma valiosa opção para caracterizar o comportamento à fratura de juntas adesivas quando estas se encontram sob uma carga de modo II [28].

Este ensaio consiste em dois substratos ligados entre si ao longo de todo o seu comprimento exceto numa das extremidades, onde é realizada uma pré-fenda. A extremidade oposta é encastrada e a junta é carregada verticalmente, como é demonstrado na Figura 44 [28].

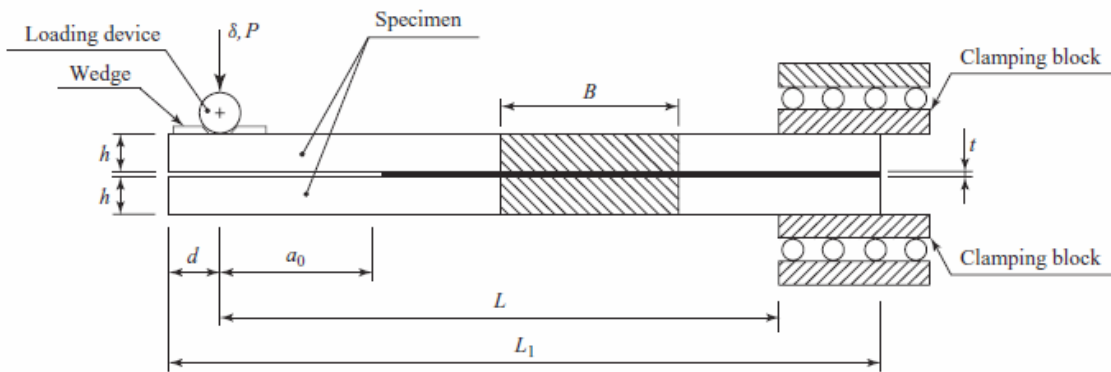


Figura 44 - Esquema de ensaio ELS [28]

As dimensões dos substratos dependem das características dos próprios substratos e do adesivo utilizado [28].

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

O ensaio 4ENF é muito semelhante ao ensaio ENF, apenas se diferencia no número de pontos de carregamento (Figura 45). No ensaio ENF é aplicada uma força a meio da junta, enquanto no ensaio 4ENF é aplicada uma força por intermédio de dois cilindros, provocando um deslocamento constante da linha de carga. Assim, a propagação da fenda é estável [27].

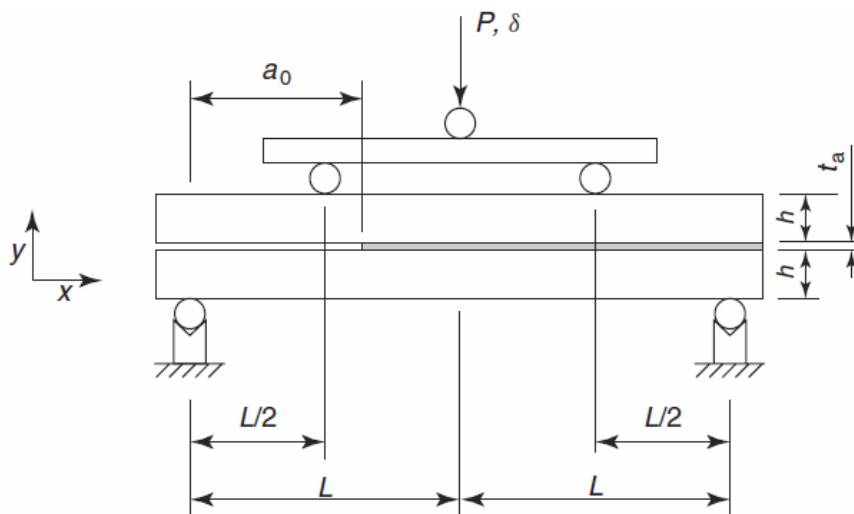


Figura 45 - Esquema de ensaio 4ENF [27]

2.3.3 Modo misto I+II

Ensaio Asymmetric Double-Cantilever Beam (ADCB)

O ensaio ADCB é muito semelhante ao ensaio DCB, sendo que estes apenas se diferem na espessura dos substratos (espessura esta que pode variar entre os substratos) e no

material dos substratos que também pode ser diferente. O ensaio é realizado da mesma maneira que o ensaio DCB, tal como é demonstrado na Figura 46 [29].

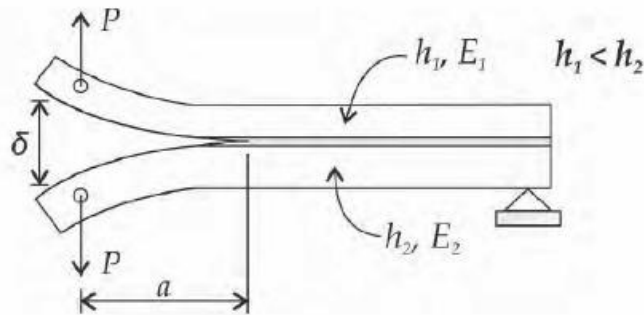


Figura 46 - Esquema de ensaio ADCB [29]

A assimetria dos substratos assegura que ocorra fratura do tipo misto. Este ensaio apresenta como principal desvantagem a utilização de substratos com diferentes espessuras ou rigidez [29].

Ensaio *Asymmetric Tapered Double-Cantilever Beam* (ATDCB)

Os provetes utilizados neste ensaio são similares aos provetes utilizados nos ensaios DCB e TDCB, isto é, neste ensaio é usada uma configuração mista em que um dos substratos possui secção constante e o outro possui a configuração típica de um substrato TDCB (Figura 47) [29].

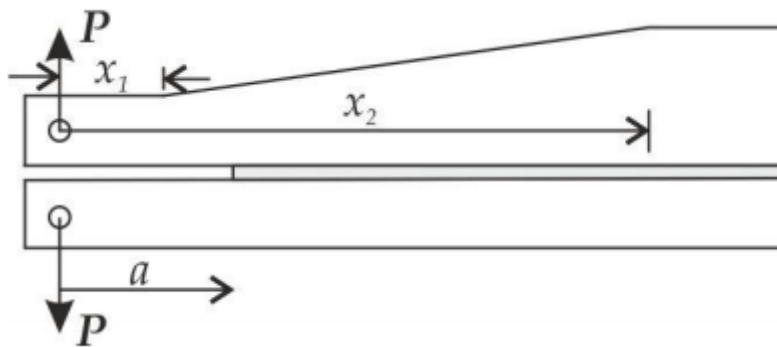


Figura 47 - Esquema de ensaio ATDCB [29]

O valor de m para o substrato com a configuração TDCB é calculado da mesma forma do que para o ensaio TDCB, ou seja, usa-se a equação (8).

Ensaio *Mixed-Mode Bending* (MMB)

Este ensaio foi aplicado pela primeira vez em 1988 e já se encontra normalizado pela norma ASTM 6671. Este ensaio consiste na combinação do ensaio DCB (modo I) com o ensaio ENF (modo II). Basicamente é um ensaio ENF em que se adiciona uma sollicitação em modo de abertura da fenda [30].

O rácio do modo misto aplicado na extremidade da fenda é determinado pelo valor relativo das duas solicitações aplicadas ao provete. As solicitações podem ser aplicadas com o uso de um braço submetido a uma única força, tal como é demonstrado na Figura 48 [5].

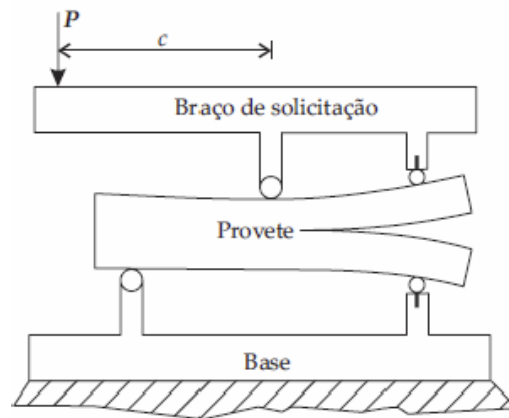


Figura 48 - Esquema do ensaio MMB [5]

A distância c define o valor relativo das duas solicitações no provete e determina o rácio do modo misto existente. Este ensaio tem como vantagem a possibilidade de se poder testar diferentes rácios de modo misto sem necessidade de alteração dos substratos [5]

Ensaio *Mixed-Mode Flexure (MMF)* ou *Single-Leg Bending (SLB)*

Este ensaio tem por base o ensaio ENF, com a alteração de um dos substratos. Neste ensaio apenas um dos substratos é que vai apoiar nos cilindros de suporte, pois um dos substratos é mais curto na extremidade mais próxima da pré-fenda (Figura 49). Esta diferença vai provocar modo de abertura (modo I) e um modo de corte (modo II). Este ensaio é realizado com um dispositivo de flexão em três pontos, com a carga a ser aplicada a meio [31].

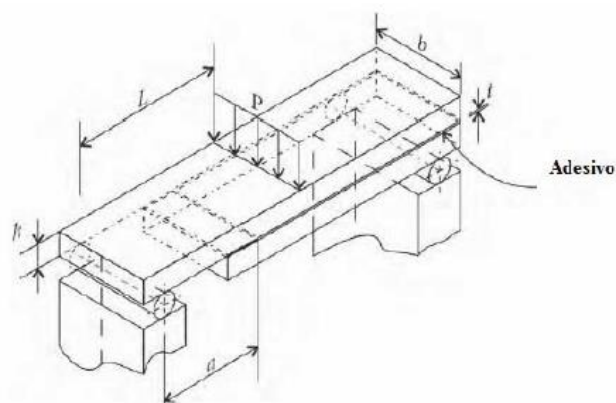


Figura 49 - Esquema de ensaio MMF [1]

Ensaio Cracked Lap Shear (CLS)

O ensaio CLS efetua a caracterização do adesivo à fratura em modo misto [31]. Pode também ser usado para simular a delaminação de um compósito. Os provetes utilizados no ensaio CSL devem possuir largura de 25 mm e um comprimento que varia de acordo com a [32].

O esquema de ensaio CLS, assim como as dimensões a utilizar neste ensaio, estão representados na Figura 49.

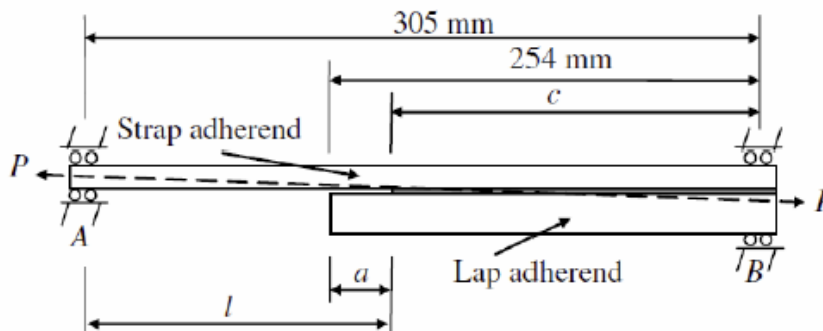


Figura 50 - Esquema de ensaio CLS [1]

2.4 Métodos para determinação de G_{IC}

A mecânica da fratura tornou-se uma ferramenta popular no que à caracterização de juntas adesivas diz respeito [33]. Com ferramentas de previsão precisas é possível reduzir custos, diminuir tempos de fabrico e melhorar o desempenho das juntas adesivas. Neste âmbito duas técnicas mais relevantes na previsão da resistência são a Mecânica da Fratura e MDC [34]. A Mecânica da Fratura realiza a previsão através de uma análise energética. A previsão da MDC é realizada com recurso ao Método dos Elementos Finitos, o qual faz uma simulação de iniciação e propagação de dano. Para ambos os métodos, G_{IC} e G_{IIC} são os principais parâmetros de previsão [34]. Os dois ensaios mais utilizados para obtenção do valor de G_{IC} são o DCB e TDCB [34].

2.4.1 Ensaio Double-Cantilever Beam

Os principais métodos para obtenção do valor de G_{IC} , pelo ensaio DCB, são: CBBM, CBT, CCM, DBT e Integral J . Sendo que os métodos CBBM e CBT são os que apresentam resultados mais precisos, o método DBT é o que apresenta resultados com mais discrepâncias [23].

2.4.1.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Os métodos que necessitam da medição do comprimento de fenda são os métodos CCM, CBT e DBT. O método CCM é baseado na equação de Irwin-Kies [35]:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}, \quad (9)$$

onde P representa a força aplicada, B a largura do substrato, $C = \delta/P$ é a flexibilidade do substrato e a é o comprimento de fenda. A flexibilidade, C , é uma função polinomial de grau três e é obtida através da seguinte equação:

$$C = C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0. \quad (10)$$

A teoria de vigas também pode ser usada para medir o valor de G_{IC} . O método DBT, baseado na teoria de vigas, diz que:

$$G_{IC} = \frac{12a^2 P^2}{B^2 h^3 E_1}, \quad (11)$$

em que h representa a espessura do substrato, E_1 representa o módulo de Young e a representa o comprimento de fenda. Pelo método CBT o valor de G_{IC} é dado por:

$$G_{IC} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}, \quad (12)$$

onde Δ é o fator de correção do comprimento de fenda devido à deflexão e rotação dos substratos.

2.4.1.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

Os métodos CCM, DBT e CBT dependem da precisão das medições de a durante a propagação da fenda, o que não é fácil de se realizar. Na realidade, na ponta da fenda é desenvolvida uma ZPF (zona de processo de fratura), devido às múltiplas microfissuras. Este fenómeno faz com que seja difícil identificar a localização da ponta da fenda. Por outro lado, quando é usado um adesivo dúctil a energia dissipada na ZPF deve ser considerada e seguindo estes métodos esta energia não é contabilizada levando a valores G_{IC} com desvios [35].

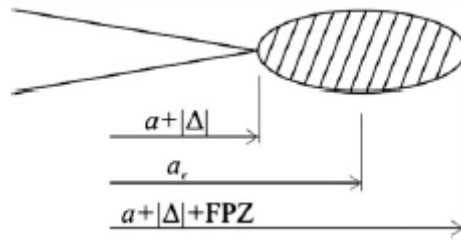


Figura 51 - Representação da ZPF [35]

O método que aqui vai ser descrito toma em consideração os valores de energia dissipada na ZPF e é denominado por CBBM. O CBBM é baseado no conceito de fenda equivalente, não necessitando da medição de a durante a propagação da fenda. A energia de deformação dos substratos devido à flexão e ao corte é dada por [35]:

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1 I} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dz dx \right], \quad (13)$$

em que M_f representa o momento fletor, I o momento de inercia da secção do substrato, E_1 e G_{13} representam as propriedades elásticas do material. A tensão de corte, τ , é dada pela seguinte equação [35]:

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{Bh} \left(1 - \frac{z^2}{c^2}\right), \quad (14)$$

em que c e V são, respetivamente, metade da espessura e esforço transverso em cada braço do provete ($0 \leq x \leq a$). Através do teorema de Castigliano, o deslocamento (δ) pode ser escrito da seguinte forma:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{E_1 Bh^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{13}}. \quad (15)$$

Esta equação tem por base a teoria de vigas e permite definir a flexibilidade, $C = \delta/P$, dos substratos. No entanto esta teoria não tem em conta todos os fatores que influenciam a curva P - δ . Para incluir esses fatores, é utilizado um módulo flexão equivalente (E_f) em vez de E_1 . O módulo de flexão equivalente é dado pela equação [35]:

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5BhG_{13}} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)^3}{Bh^3}, \quad (16)$$

em que a_e corresponde ao comprimento de fenda equivalente (Figura 51). O valor de G_{13} é obtido pela seguinte equação:

$$G_{IC} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_e^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right) \quad (17)$$

2.4.1.3 Métodos baseados no integral-J

Quando existe plastificação considerável, os métodos baseados na Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) são imprecisos, então o método do integral-J (Figura 52) passa a ser uma opção viável para determinar G_{IC} . Baseada na fundamental expressão para J definida por Rice, é possível derivar uma expressão para se obter o valor de G_{IC} . Assim sendo o valor de G_{IC} é dado pela seguinte expressão [36]:

$$G_{IC} = 12 \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + P_u \theta_0 \quad \text{ou} \quad G_{IC} = P_u \theta_p, \quad (18)$$

em que P_u corresponde à carga aplicada por unidade de largura dos substratos, θ_0 corresponde à rotação dos substratos na ponta da fenda e θ_p representa a rotação relativa dos substratos na linha de ação da carga P [36].

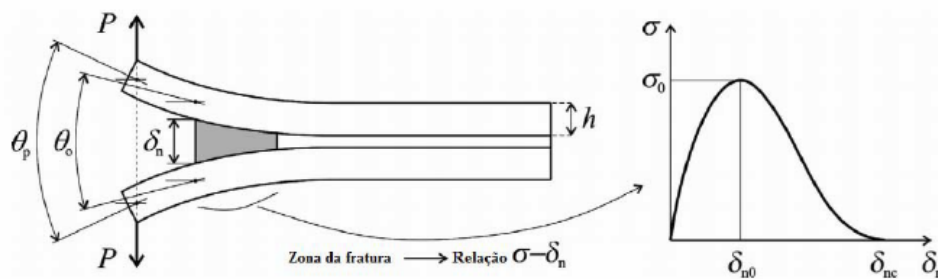


Figura 52 - Ensaio DCB em carregamento com variáveis do método Integral J [36]

O integral-J pode ser calculado pela seguinte equação [36]:

$$G_n = \int_0^{\delta_{nc}} t_n(\delta_n) d\delta_n, \quad (19)$$

onde δ_{nc} representa o deslocamento dos substratos e t_n é a tração atual. O valor de G_{IC} é dado pelo valor da taxa de libertação energia em modo I (G_I) no início da propagação da fenda. A curva $t_n(\delta_n)$ ou lei coesiva à tração pode ser obtida pela seguinte expressão [36]:

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_n}{\partial \delta_n} \quad (20)$$

Conclui-se assim que para o cálculo de G_{IC} pelo integral-J devem ser registados os valores de P , a , δ_n e θ_0 ao longo do ensaio.

2.4.2 Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam

Os métodos para obtenção do valor de G_{IC} , pelo ensaio TDCB, são: SBT, CCM e CBT. Para este ensaio o método que melhores resultados apresenta é o SBT [37].

2.4.2.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

O valor de G_{IC} , através do método CCM, para o ensaio TDCB pode ser obtido pela seguinte equação [38]:

$$G_{IC} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}, \quad (21)$$

em que P é a carga aplicada, b é a largura do substrato, C é a flexibilidade dos substratos e a é o comprimento da fenda.

O método CBT tem em conta variáveis que não são tidas em conta no método SBT, tais como a rotação e deflexão dos substratos. A equação (8), que define o fator de geometria (m) do substrato TDCB, está dependente do termo $1/h$. De forma a simplificar, a equação que define o fator de geometria (m) para o método CBT foi simplificada para [38]:

$$m = \frac{3a^2}{h^3} \quad (22)$$

É efetuada uma correção no comprimento de fenda (a), para a corrigir a flexibilidade. Passando o valor de a a ser $a+\Delta$ em que [38]:

$$\Delta^4 = \frac{EBh^3}{3k}, \quad (23)$$

onde h e b são altura e largura, respetivamente, do substrato DCB. A rigidez k é deduzida tendo em conta o alongamento elástico, o que leva a [38]:

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{1/4} \rightarrow i.e. \rightarrow \Delta \approx 0.64h. \quad (24)$$

Numa análise realizada mais tarde, em que foi incluída a deformação de corte, Kanninen demonstrou que tanto os efeitos de deflexão como de rotação podiam ser modelados por $\Delta \approx 0.67h$. Tendo em consideração ambos, o valor de Δ pode ser definido por [38]:

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{1/4} \cdot \left(1 + \frac{h_a E}{2h E_a} \right)^{1/4}, \quad (25)$$

onde h e E são a altura e módulo de Young, respetivamente, dos substratos. E h_a e E_a são altura e módulo de Young, respetivamente, do adesivo usado. A expressão anterior pode ser simplificada da seguinte forma:

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{1/4} \left(1 + \frac{R}{\lambda} \right)^{1/4}, \quad (26)$$

em que $\lambda = 2h/h_a$ e $R = E/E_a$. Voltando a simplificar a equação obtém-se [38]:

$$\Delta = 0,64 \left(\frac{3}{m} \right)^{1/3} a^{2/3}. \quad (27)$$

Assim, a flexibilidade é dada pela seguinte equação [38]:

$$C = \frac{8m}{Eb} \left(a + 0,64 \left(\frac{3}{m} \right)^{1/3} a^{2/3} - \frac{2}{3} x_0 \right). \quad (28)$$

Por fim, fazendo substituição da equação (28) na equação (21) e simplificando obtém-se a equação que permite calcular o valor de G_{IC} pelo método CBT, sendo ela a seguinte:

$$G_{IC} = \frac{4P^2}{EB^2} m \left[1 + 0,43 \left(\frac{3}{ma} \right)^{1/3} \right]. \quad (29)$$

2.4.2.2 Método baseado na flexibilidade constante

O SBT é o método baseado na flexibilidade. Considerando o substrato DCB, a flexibilidade e as deformações ao corte e à flexão, obtém-se a seguinte equação [38]:

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{Eb} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right), \quad (30)$$

onde E e h são o módulo de Young e altura respetivamente. De forma a manter dC/da constante, o fator geométrico, m , é dado pela seguinte equação [38]:

$$m = \frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} = const.. \quad (31)$$

Com o fator geométrico (m) a seguir a equação anterior, o valor de dC/da também vai ser constante e, assim sendo, a flexibilidade vai variar linearmente com a propagação da fenda. Fazendo substituições nas equações (21) e (30), o valor de G_{IC} é obtido pela seguinte equação [38]:

$$G_{IC} = \frac{4P^2}{Eb^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) = \frac{4P^2}{Eb^2} m. \quad (32)$$

2.5 Modelos de dano coesivo

O conceito de MDC foi apresentado no final dos anos 50 e início dos anos 60, através dos estudos desenvolvidos por Barenblatt [39] e Dugdale [40]. Estes descreveram o dano na zona de processo da fratura na frente da fenda sob o efeito de cargas estáticas, dando assim início a métodos mais refinados para caracterizar o dano em estruturas. Os MDC foram refinados e testados para poderem simular e analisar o início e propagação da fenda no interior ou na interface de materiais, ou ainda em delaminação de compósitos. Os MDC podem ser implementados em elementos de mola ou, mais tipicamente, em elementos coesivos que fazem a conexão de sólidos 2D ou 3D à estrutura. Uma característica importante dos MDC é que estes podem ser incorporados facilmente em programas de MEF e assim modelar o comportamento à fratura de vários materiais, incluindo juntas adesivas [41].

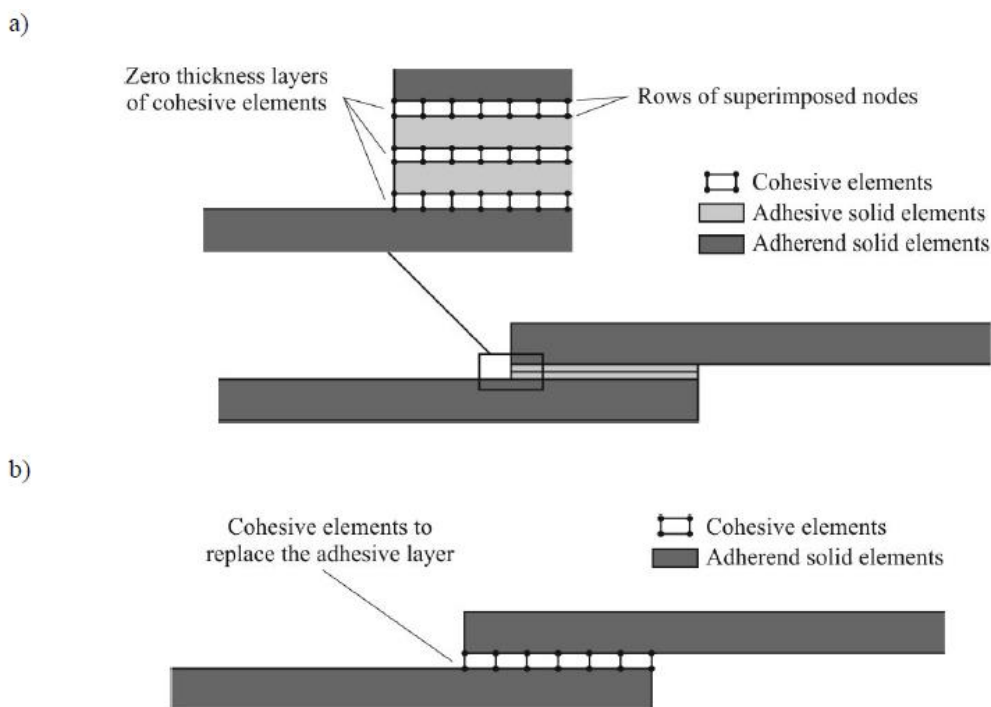


Figura 53 - Elementos coesivos para simular caminhos de rotura de espessura zero: aproximação local (a) e modificação de uma camada fina de adesivo: aproximação contínua (b) [41]

Os MDC têm por base a suposição que uma ou mais zonas de propagação de dano podem ser inseridas artificialmente nas estruturas, e assim avaliar o crescimento do dano pela introdução de uma descontinuidade no campo dos deslocamentos. A técnica consiste em estabelecer leis de tração-separação (leis coesivas) para modelar interfaces ou regiões finitas. As leis coesivas são estabelecidas entre pares de nós de elementos coesivos (Figura 53). Podem também ligar nós sobrepostos de elementos que representam diferentes materiais ou diferentes camadas em compósitos, para simular uma interface de espessura zero (aproximação local Figura 53a) ou então ser

diretamente aplicados entre dois materiais (que não estão em contacto) para simular uma camada de material fina entre eles para, por exemplo, simular uma ligação adesiva (aproximação contínua Figura 53b) [41].

Apesar da grande eficiência computacional associada à modelação MDC contínua em juntas coladas, existem algumas limitações:

- O significado físico da fratura é perdido pois as separações coesivas reais são normalmente acompanhadas de comportamentos plásticos em toda a camada intermédia do adesivo, representados por este método por propriedades equivalentes;
- Os MDC passam a ser dependentes da geometria das estruturas, mais especificamente da espessura do aderente (t_p) e da espessura do adesivo (t_A), porque estas afetam a dimensão da ZPF e a plasticidade da ponta da fenda [41].

2.5.1 Leis de dano coesivo

Ao longo dos anos foram vários os MDC estudados, tais como o modelo triangular, trapezoidal, exponencial, polinomial e linear parabólico. Com base na natureza do material ou da interface em simulação, podem ser utilizadas diferentes formas de leis coesivas para que os resultados obtidos sejam o mais precisos possíveis. As mais usadas são o triangular, o trapezoidal e o exponencial [41].

Modelo de dano triangular

A lei triangular é a mais usada devido à sua simplicidade, reduzido número de parâmetros a determinar, e apresenta resultados globalmente aceitáveis para a maioria das condições reais [41]. Os MDC simulam a evolução da força e subsequente amolecimento até à falha, para dar conta da degradação gradual das propriedades dos materiais [42]. As leis de tração separação são normalmente representadas por relações lineares em cada uma das fases de carga, embora possam ser definidas mais que uma fase para uma melhor representação do comportamento dos materiais [41]. O MDC triangular é implementado num elemento coesivo de seis nós e espessura nula, compatível com os elementos sólidos bidimensionais de oito nós do ABAQUS®. Neste tipo de modelo existem duas versões diferentes (Figura 54): modo puro e modo misto [3].

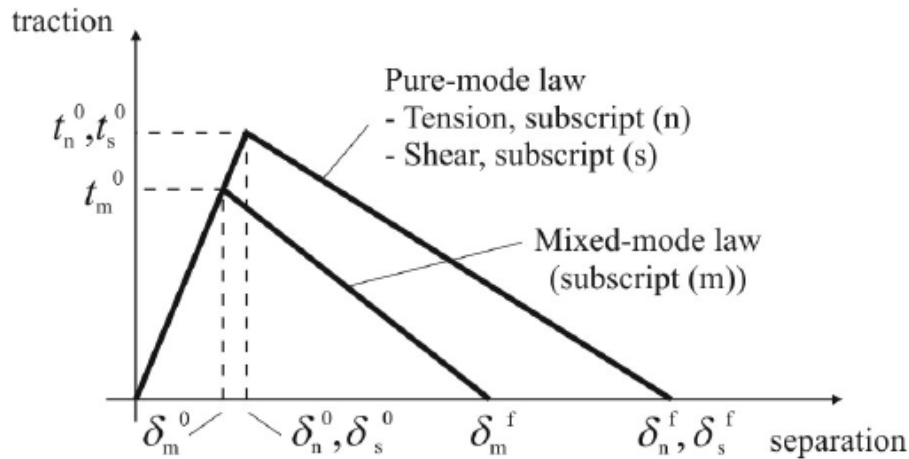


Figura 54 - Modelo coesivo triangular [41]

No modo puro, a propagação de dano ocorre num conjunto de pares de nós quando os valores das tensões no respetivo modo são anulados na lei coesiva correspondente [41].

No modo misto, são utilizados critérios energéticos e de tensões para combinar os modos puros de tração e corte [41].

Modelo de dano trapezoidal

Este modelo é particularmente vantajoso para simular o comportamento mecânico de camadas finas de adesivos dúcteis em modo I e modo II (Figura 55). Este modelo pode ser utilizado para substituir os tradicionais elementos sólidos utilizados para modelar a camada fina de adesivo [3]. De facto, este modelo ao invés do modelo triangular, apresenta um patamar a tensão constante após o final da zona elástica para simular a ductilidade dos materiais [43].

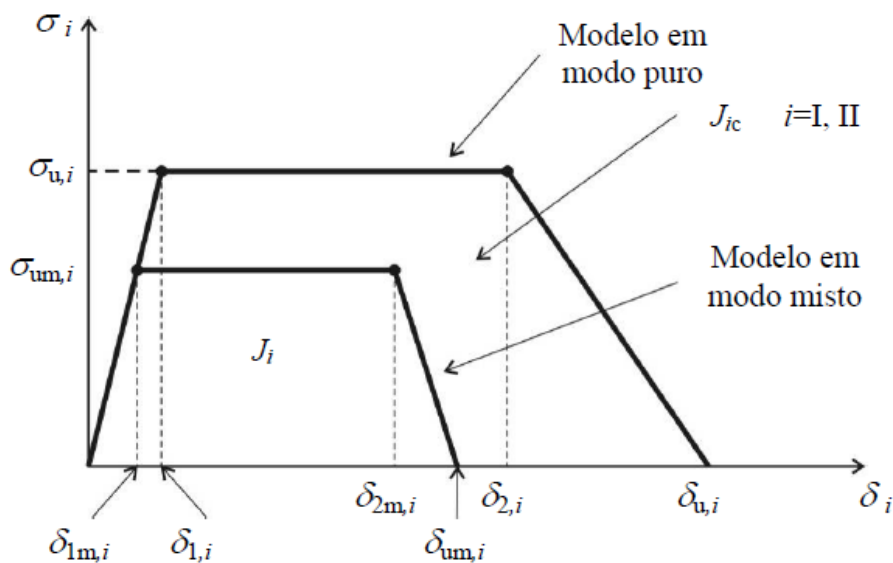


Figura 55 - Modelo coesivo trapezoidal [3]

2.5.2 Métodos de determinação dos parâmetros coesivos

As análises por MDC oferecem um meio poderoso para explicar o comportamento à fratura de juntas adesivas, mas os seus parâmetros exigem calibrações cuidadosas por dados experimentais e respetiva validação, a fim de simular com precisão o processo de rotura [41].

Nos últimos anos foram publicados bastantes trabalhos sobre a definição dos parâmetros dos MDC (t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} , G_{IIC}), e existem atualmente algumas técnicas de redução de dados para obter estes parâmetros [41]. Existem várias técnicas de identificação dos parâmetros, tais como técnica da identificação das propriedades, método direto e método inverso. Estes métodos normalmente baseiam-se em resultados obtidos em ensaios DCB, ENF e juntas de sobreposição simples, apresentando bons resultados [41].

Técnica da identificação das propriedades

A técnica de identificação das propriedades consiste no cálculo separado de cada um dos parâmetros das leis coesivas através de ensaios adequados. Neste método pelo menos um dos parâmetros é obtido pela análise das propriedades em provetes de adesivo maciço. Campilho et al. [43] realizaram um trabalho em que avaliaram a resistência à tração de uma reparação em material compósito numa reparação de sobreposição simples, em função do comprimento de sobreposição e de t_p . Foi realizada uma análise pelo MEF com um modelo de dano trapezoidal para simular camada fina de adesivo Araldite® 420 (Hunstman), pela aproximação contínua [41]. Neste trabalho t_n^0 e δ_n^s foram obtidos a partir da curva σ - ϵ (tensão-deformação) do adesivo, suportados por evidências prévias de Anderson e Stigh [44] de que t_n^0 é da mesma ordem de grandeza da resistência à tração medida em ensaios de adesivo maciço, e de que δ_n^s e δ_s^s não têm influência significativa nos resultados numéricos. Por outro lado, t_s^0 foi obtido por derivação de t_n^0 através do critério de Von Mises para materiais isotrópicos maciços. Devido à sua menor influência nos resultados, δ_s^s foi definido considerando uma inclinação similar à da curva da lei coesiva à tração. Os valores de G_{IC} e G_{IIC} foram estimados a partir dos ensaios DCB e ENF, respetivamente. As propriedades interlaminares, intralaminares e da fibra do compósito foram obtidas através de trabalho anteriores, considerando leis coesivas triangulares. Foram equacionados diferentes caminhos de fratura (Figura 56), de forma a todos os modos de rotura serem contabilizados. Neste trabalho chegou-se a um resultado razoável para a rigidez e para a carga/deslocamento de rotura, apesar das aproximações realizadas aos parâmetros dos MDC [41].

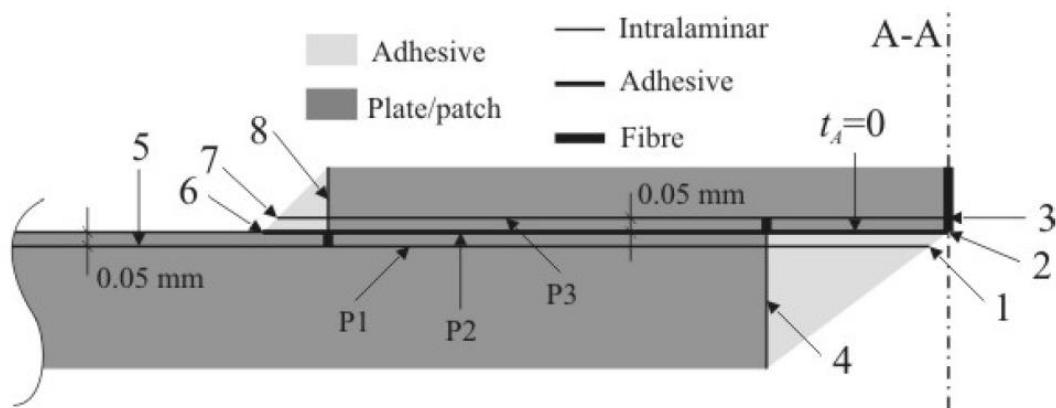


Figura 56 - Localização de elementos coesivos [41]

Método Inverso

No método inverso os parâmetros são estimados de forma iterativa com dados obtidos experimentalmente (normalmente através da curva $P-\delta$), sendo a previsão feita por MEF, considerando uma descrição precisa da geometria experimental e leis coesivas aproximadas, definidas pelo comportamento típico do material a simular. A caracterização inversa de ligações adesivas deve ser aplicada individualmente a cada provete testado, de forma a ter em conta todas as variações geométricas entre provetes [45]. Com esta técnica, os valores de G_{IC} e G_{IIC} , que correspondem aos valores estacionários de G_I e G_{II} durante a propagação da fenda nas respetivas curvas-R, são introduzidos no modelo de MEF. Para definir completamente uma lei dos MDC, podem ser usados valores aproximados para t_n^0 e t_s^0 para o início do processo iterativo de ajuste. Os parâmetros finais são obtidos através de uma série de iterações numéricas até que seja obtida uma solução próxima dos valores obtidos experimentalmente [41]

Método direto

O método direto permite obter a forma precisa das leis de MDC para cada material ou interface, a partir de dados experimentais de ensaios de fratura como por exemplo DCB ou ENF. Por este método é possível estimar a lei coesiva para cada material ou interface através da diferenciação da curva $G_I-\delta_n$ ou $G_{II}-\delta_s$. De tal modo, é feita a distinção entre a estimação da lei coesiva de tração (ensaio DCB) ou corte (ensaio ENF) [41]. Para cada um dos ensaios o método direto consiste na aplicação do integral- J , já mencionado em capítulos anteriores. Para o ensaio DCB o integral- J pode ser usado para se obter relações entre carregamento e leis coesivas do caminho da fenda [46]. Tendo por base as expressões fundamentais para J definidas por Rice [47], é possível derivar uma expressão para o valor de G_I aplicado ao ensaio DCB. Para o ensaio ENF o método direto baseia-se na medição simultânea do integral- J e de δ_s .

2.5.3 Modelação numérica de juntas adesivas por modelos de dano coesivo

Um dos modelos de previsão mais simples é baseado no estado limite de tensão, isto é, baseado numa abordagem mecânica contínua. O princípio da mecânica da fratura pode também ser utilizado na análise do MEF. Isto pode basear-se tanto no fator de intensidade de tensão como em abordagens de energia. Uma extensão à abordagem anteriormente referida, é a modelação de dano com elementos coesivos (método de MDC). Esta técnica permite também realizar a simulação do dano do material à frente da fenda. A vantagem mais importante do MDC está relacionada com a sua capacidade de simular o aparecimento e crescimento do dano.

Os MDC são baseados numa relação entre tensões e deslocamentos relativos entre faces de fenda, simulando assim a degradação das propriedades do material. A forma das leis de amaciamento pode ser ajustada de acordo com o comportamento do material ou a interface a ser simulada. As áreas sob as leis de tração-separação em cada modo são equiparadas ao respetivo valor da taxa de libertação de energia crítica ou resistência à fratura da camada de adesivo ou da interface. Com esta metodologia podem ser obtidas as curvas $P-\delta$ e o respetivo modo de rotura [41].

2.5.3.1 Ensaios de fratura em modo puro

Vários autores abordam a determinação da energia crítica de fratura em juntas coladas em modo puro I. Recentemente os MDC têm sido usados para simular dano e propagação do mesmo, para uma melhor previsão o comportamento de juntas adesivas à fratura. Blackman et al. [48] usaram os MDC num ensaio TDCB e num ensaio de arrancamento sob o modo I, com dois parâmetros, G_c e σ_{max} , para estudar a fratura em juntas adesivas. Foi utilizada uma lei de tração-separação polinomial e foi dada especial atenção ao significado físico de σ_{max} . Foi concluído que a conformidade e o valor de G_c do provete dependem do valor de σ_{max} até este atingir um valor relativamente elevado, altura a partir da qual a dependência diminui significativamente [49].

Anderson e Stigh [44] usaram um método inverso para determinar os parâmetros coesivos de uma camada de adesivo usada num provete DCB. Verificou-se que a relação tensão-deformação pode ser dividida em três partes. Inicialmente, a tensão aumenta proporcionalmente com o alongamento até ser atingida a tensão limite (comportamento linear elástico da camada de adesivo). Depois é observada uma zona em patamar que corresponde ao comportamento plástico do adesivo. A curva termina com uma parabólica de amolecimento [49]. A maior parte das caracterizações de juntas à fratura é realizada através de ensaios DCB [44, 50-52]. O uso deste método tem como principais vantagens a sua simplicidade e a possibilidade de obter a resistência à fratura matematicamente, utilizando a teoria de vigas. No entanto é necessário ter em conta algumas questões para que a medição da energia crítica de fratura, seja correta. Na

realidade, Bader [50] e Ducept [51] verificaram a ocorrência de propagação instável, o que dificulta o acompanhamento do comprimento de fenda durante o ensaio [49].

No trabalho de Campilho et al. [53] foi usada uma metodologia inversa para definir uma lei de corte do MDC para um ensaio ENF (abordagem contínua), para uma ligação adesiva (Araldite® 2015) com $t_A=0,2$ mm. Não obstante as dificuldades de medição da fenda devido à sua propagação sem abertura, foi usado um fluido corretor para melhor estimar o valor do comprimento de fenda (a) por um processo de imagens, que consistiu na gravação de imagens ao longo do ensaio com intervalos de 5 s usando uma câmara digital de 10 MPixel. A estimação de G_{IIC} foi possível pela correlação de $P-\delta-a$ pelo tempo de ensaio decorrido desde o início do mesmo. O tempo de ensaio de cada ponto de dados $P-\delta$ foi calculado a partir do valor atual de δ e da taxa de carregamento. A correspondência dos valores de a foi realizada sabendo o tempo de ensaio de cada imagem. O valor de G_{IIC} foi estimado por três métodos: CCM, CBT e CBBM [41].

A análise de MEF representou fielmente a geometria e medição do valor de a_0 de cada provete. Foi tida em conta uma formulação trapezoidal dos MDC definida pelo utilizador [43] com formulação contínua, acoplada no Abaqus®, para ter em conta a ductilidade do adesivo (Figura 57) [41].

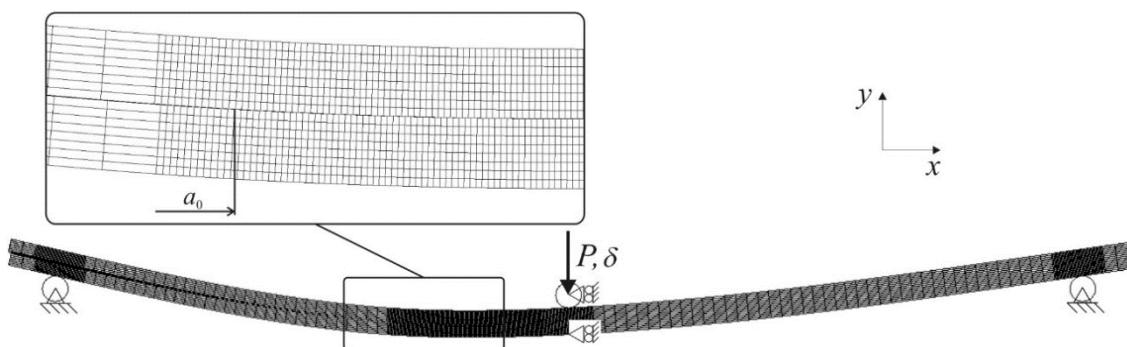


Figura 57 - Provete ENF deformado durante propagação, com limites e condições de carga [41]

Os valores de G_{IIC} obtidos pelo método CBBM foram usados como “input” no modelo de MEF. Os restantes parâmetros coesivos foram estimados pela sobreposição das curvas $P-\delta$ obtidas experimentalmente e numericamente (Figura 58) [41].

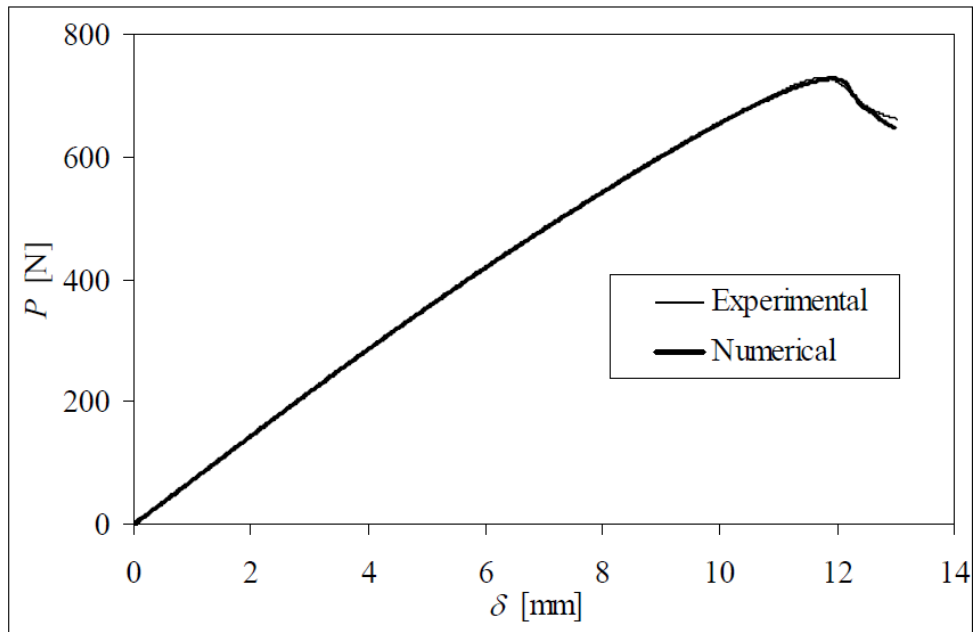


Figura 58 - Curvas P - δ e numérica sobrepostas de um provete ensaiado [41]

Na Figura 59 é apresentada a média da lei de corte do MDC e respetivos valores de G_{IIc} (J_{IIc}), t_s^0 ($\sigma_{u,II}$), δ_s^s ($\delta_{2,II}$) e δ_s^f ($\delta_{u,II}$), e também as leis do MDC após aplicação do princípio de modelação inversa a cinco curvas P - δ experimentais.

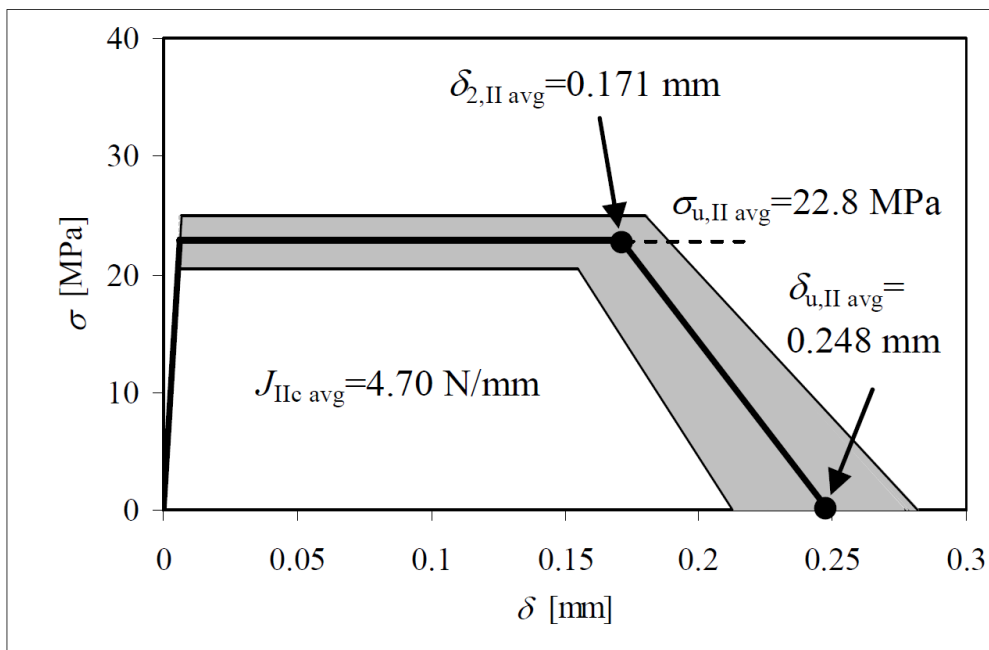


Figura 59 - Média da lei de corte do MDC e desvio após aplicação dos princípios de modelação inversa a cinco provetes [41]

O ajuste manual permitiu verificar o efeito dos parâmetros do MDC na forma das curvas P - δ . G_{IIc} , que é o valor de entrada nas simulações, influencia principalmente a carga de

pico. Quanto maiores os valores de t_s^0 maior será a carga de pico e a resistência do provete. O valor de δ_s^s tem um papel mais importante no arredondamento da curva $P-\delta$ perto do valor de pico. Estes resultados indicam que o método inverso permite obter uma solução única para a lei de corte do MDC poderia ser garantida pela técnica inversa [41].

2.5.3.2 Ensaios de fratura em modo misto

Lee [54] propôs um procedimento sistemático para estimar os parâmetros do MDC de uma ligação adesiva, utilizando o ensaio SLB em modo misto, com tração e corte como principais modos. Foram testados provetes SLB com aderentes curados em simultâneo (aderente superior em compósito reforçado com fibras de carbono e aderente inferior em aço) com diferentes rácios de modo misto, uma vez que este rácio pode ser alterado pela forma geométrica dos provetes para a validação dos dados em condições de tensão e corte puros. A medição de G_{IC} realizada a partir dos dados obtidos no ensaio e o rácio de modo misto foram definidos recorrendo à teoria de vigas. A extrapolação dos dados medidos para os modos de tração e corte puros permitiu a definição de G_{IC} e G_{IIC} , como demonstrado na Figura 60 [41].

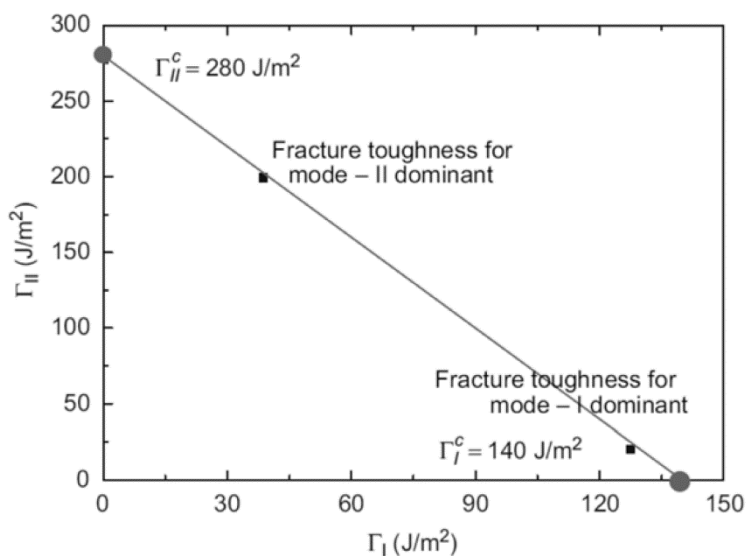


Figura 60 - Extrapolação linear de G_{IC} e G_{IIC} de ensaio em modo misto [41]

2.5.3.3 Juntas usadas em aplicações reais de modo misto

Neste subcapítulo serão apresentados alguns trabalhos sobre ensaios em juntas. No trabalho de Rudawska [55] são testadas juntas de sobreposição simples híbridas. Os materiais utilizados foram os seguintes:

- Titânio CP1 com espessura de 0,4 mm;

- Alumínio 2024PLT0 com espessura de 0,64 mm;
- Compósito aramida epóxida com 0,6 mm;
- Loctite 3430 (adesivo epóxido).

A geometria da junta é apresentada na Figura 61, sendo que a as espessuras das juntas foram variando de acordo com o seu tipo. Os vários tipos de juntas testadas foram os seguintes:

Tipo 1: Titânio – Titânio;

Tipo 2: Compósito aramida epóxida – Compósito aramida epóxida;

Tipo 3: Titânio – Compósito aramida epóxida;

Tipo 4: Alumínio – Alumínio;

Tipo 5: Alumínio – Compósito aramida epóxida.

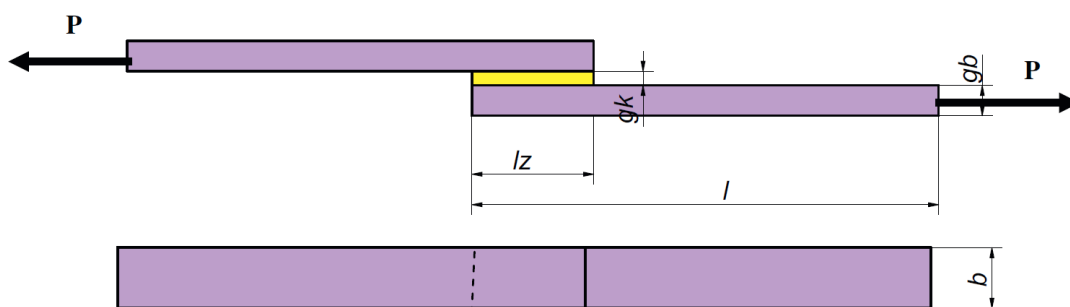


Figura 61 - Geometria das juntas de sobreposição testadas [55]

Os provetes possuíam as seguintes dimensões: $l=100$ mm, $g_k=0,1$ mm, $b=20$ mm, $g_b=0,4$ mm (para titânio), $g_b=0,64$ mm (para alumínio), $g_b=0,6$ mm (para compósito), $l_z=8$ mm (para juntas do tipo 1-3), $l_z=24$ mm (para juntas do tipo 4) e $l_z=16$ mm (para juntas do tipo 5). Os ensaios experimentais foram realizados na maquina de ensaios universal Zwick 2100.

O modelo numérico para modelação por MDC é o apresentado na Figura 62, onde são também mostradas as restrições impostas ao provete.

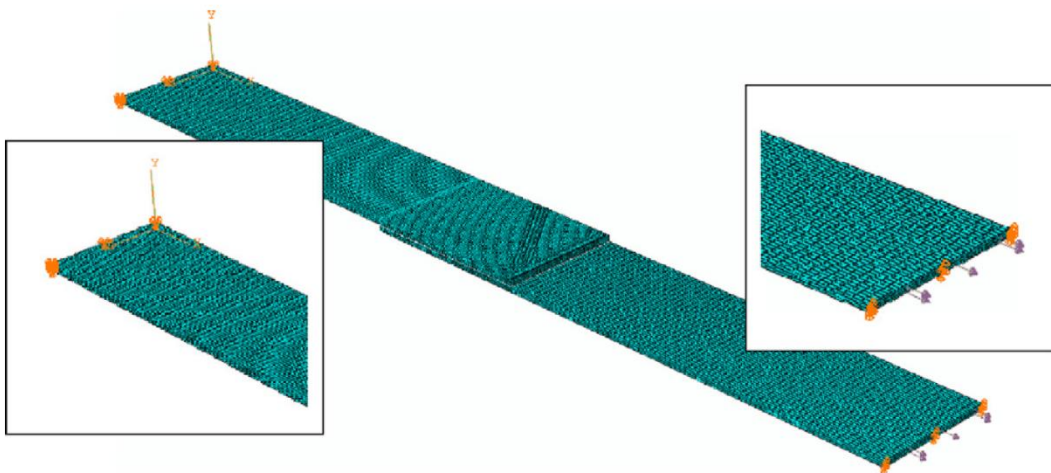


Figura 62 - Modelo numérico da junta de sobreposição simples [55]

A junta adesiva foi modelada com elementos coesivos do tipo COH3D8. Estes elementos são apenas alguns exemplos dos que são usados no Abaqus® e em análises a três dimensões. A modelação da junta colada com elementos coesivos requer a definição de um material cuja descrição contém o mecanismo de rotura. Os cálculos foram realizados utilizando um modelo que continha a descrição da início do dano e da evolução do mesmo até à perda total de rigidez no elemento (Figura 63) [55].

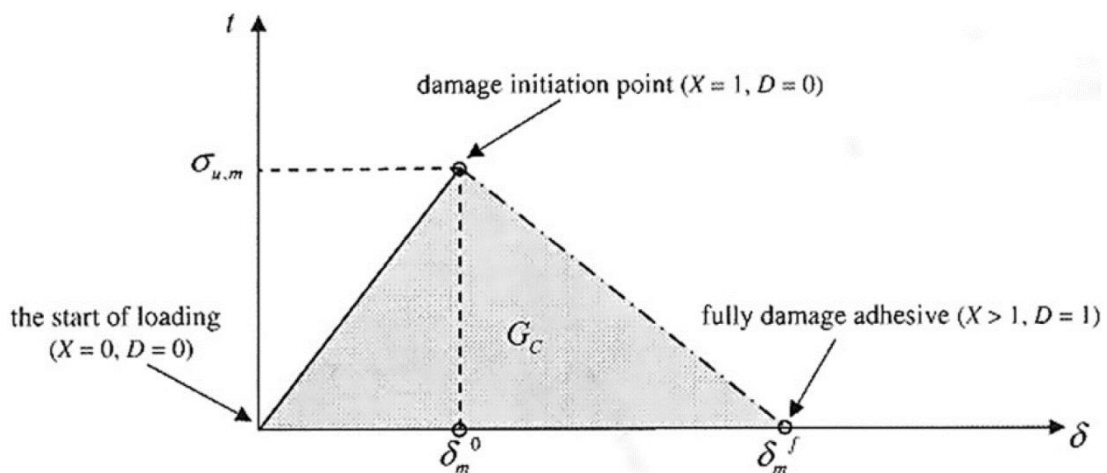


Figura 63 - Representação esquemática do comportamento constitutivo, início de dano e a evolução do adesivo [55]

Na Figura 64 e Figura 65 são apresentados os valores obtidos para as diversas combinações de aderentes/adesivos para os ensaios experimentais. Pelas figuras, pode-se dizer que as juntas adesivas que possuíam aderentes em titânio obtiveram a maior resistência e as que usavam material compósito obtiveram a menor resistência.

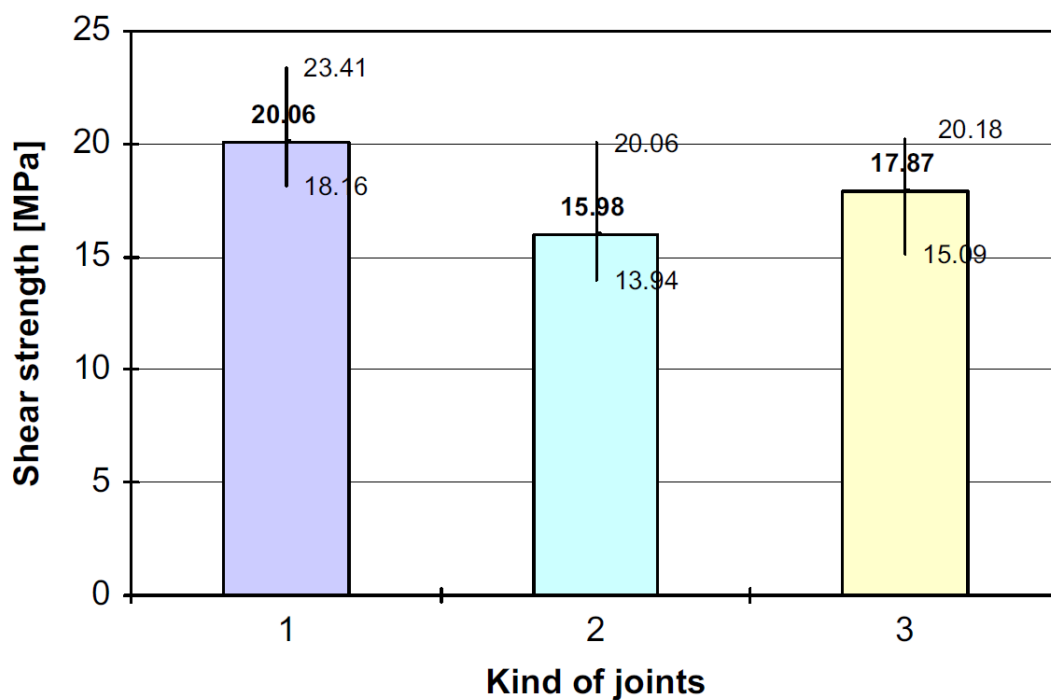


Figura 64 – Resistência da junta adesiva em corte: (1) titânio - titânio, (2) compósito - compósito, (3) titânio – compósito [55]

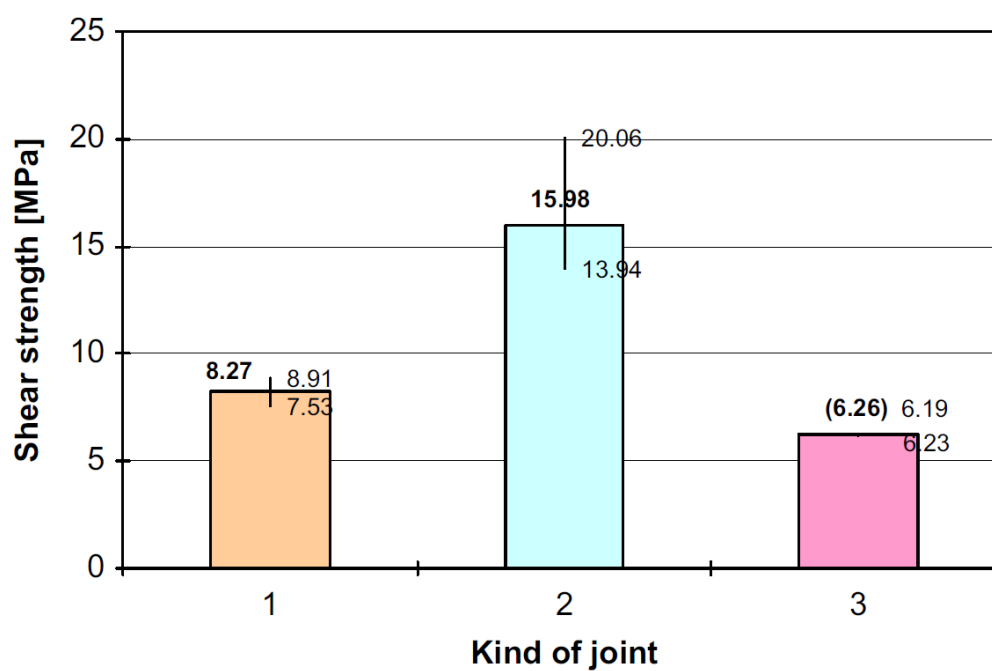


Figura 65 - Resistência da junta adesiva em corte: (1) Alumínio - Alumínio, (2) Compósito - Compósito, (3) Alumínio – Compósito [55]

Graças à utilização de elementos coesivos para a modelação da junta adesiva foi possível visualizar o processo de rotura da junta adesiva e obter o valor da força a que a rotura da junta começa [55].

Na Tabela 10 são apresentados os resultados obtidos para a análise experimental e para a análise numérica.

Tabela 10 - Resultados experimentais e numéricos [55]

Tipo de junta	Resistência ao corte, R_t [MPa]	Força de falha [N]	
		Ensaio Experimental	Ensaio Numérico
1	20,06	3210	2673
2	15,98	2557	2440
3	17,87	2860	2673
4	8,27	3971	3955
5	6,26	2004 (força de falha típica de provetes de alumínio)	≈2000

O trabalho de Campilho et al. [56] teve como objetivo realizar uma comparação e avaliação dos MDC e Método de Elementos Finitos Extendido (MEFX), atualmente implementados no Abaqus®, para simular o comportamento de juntas adesivas de sobreposição simples e dupla com aderentes em alumínio e ligados pelo adesivo Araldite AV138. Este estudo compreende uma variedade de comprimentos de sobreposição, entre 5 e 20 mm, de forma a testar soluções de modelação em condições diferentes. Irá também permitir a discussão das potencialidades e limitações desses dois métodos para modelar estruturas coladas, por comparações diretas com dados experimentais [56]. As curvas tensão-deformação dos aderentes em alumínio foram obtidas de acordo com a norma ASTM-E8M-04. A Figura 66 apresenta estas curvas para os três provetes ensaiados, bem como a aproximação realizada nas simulações.

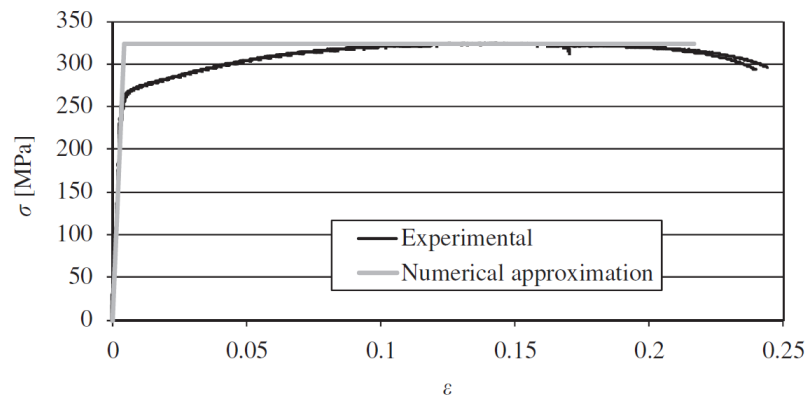


Figura 66 - Curvas σ - ϵ experimentais do alumínio e aproximação para a análise de MEF [56]

A aproximação bilinear da Figura 66 foi usada como *input* nas simulações. O adesivo Araldite AV 138 foi também caracterizado (Figura 67) para ser utilizado como *input* na análise de MEF.

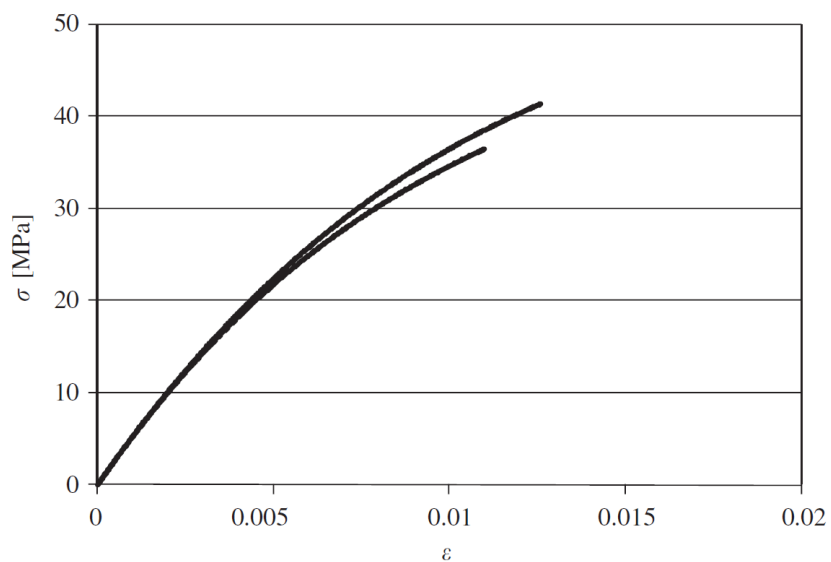


Figura 67 - Curvas σ - ϵ experimentais para o Araldite® AV138 [56]

Para a análise numérica foram usadas não linearidades geométricas com as propriedades do material e leis elástico-plásticas simplificadas. As malhas foram construídas sem condições de simetria para as juntas de sobreposição simples (Figura 68a) e com simetria horizontal para as juntas de sobreposição dupla (Figura 68b), de forma a reduzir o número de elementos dos modelos.

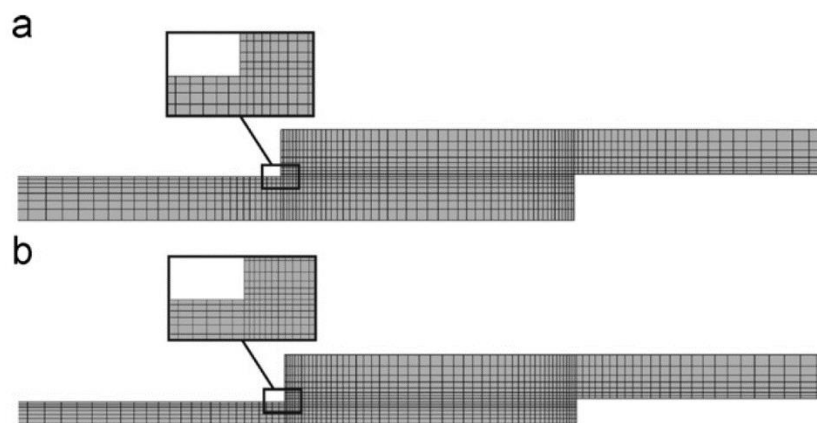


Figura 68 - Malha utilizada para: juntas de sobreposição simples (a) e juntas de sobreposição dupla (b)

Daqui se retira que o MEFX é atualmente utilizado apenas para identificar a localização do início do dano em ligações adesivas, comparando a tensão principal máxima/deformação em cada material para o respetivo valor máximo. Na Figura 69 são apresentados os valores máximos de P_m em função de L_0 para o ensaio experimental e numérico.

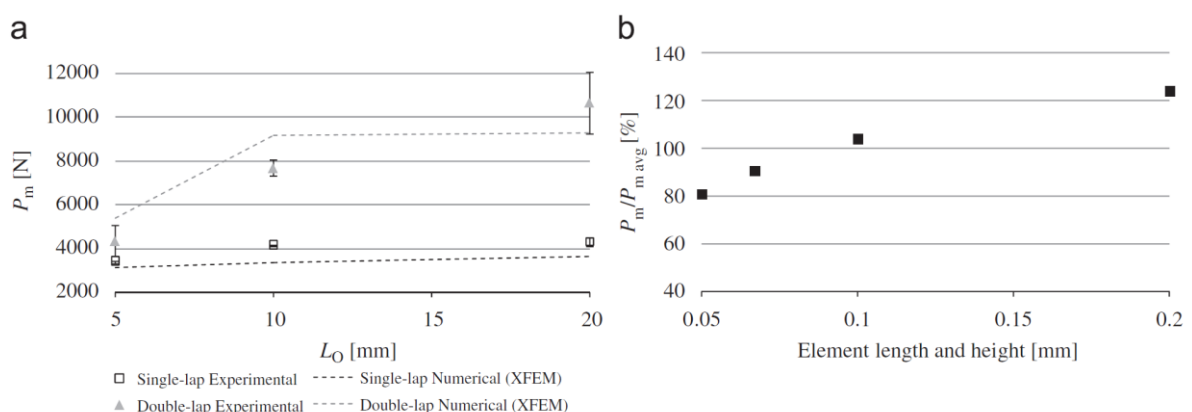


Figura 69 - Valores de P_m em função de L_0 (a) e estudo de dependência de malha (b) [56]

No trabalho de Fernandes et al. [57] foram testados três adesivos (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7888) em juntas de sobreposição simples, variando o comprimento de sobreposição (L_0). O trabalho experimental foi acompanhado de um estudo numérico pelo MEF, baseado em MDC e MEFX.

Os aderentes foram realizados em alumínio (AA6082 T651). Este material foi caracterizado em trabalhos anteriores, onde foram obtidas as suas propriedades mecânicas. As curvas experimentais e aproximação numérica encontram-se na Figura 70. As propriedades mecânicas dos adesivos utilizados foram obtidas em trabalhos anteriores. O ensaio DCB foi o selecionado para obtenção de G_{IC} e o ensaio ENF foi o escolhido para obtenção de G_{IIC} [57].

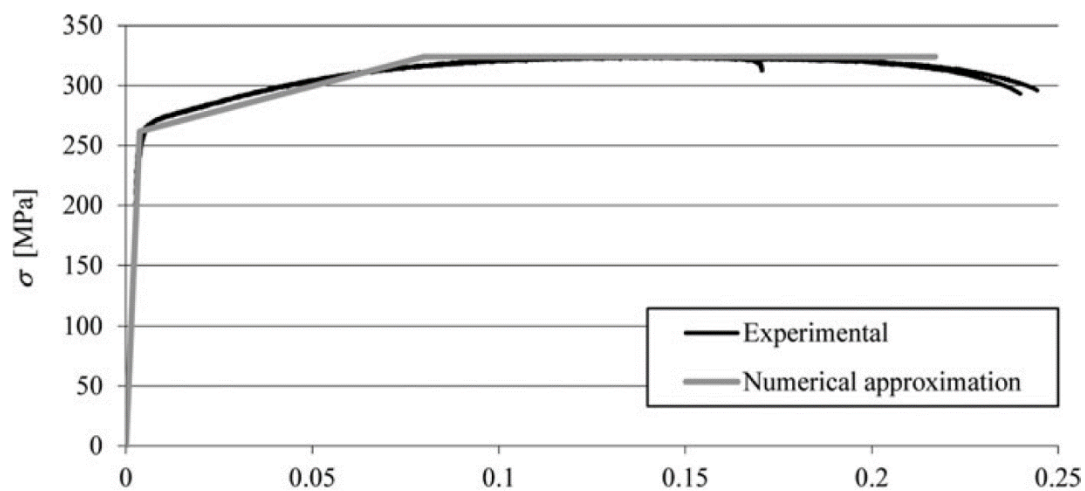


Figura 70 - Curva σ - ϵ experimental e numérica para o alumínio [57]

Na Figura 71 é descrita a geometria dos provetes utilizados neste estudo. As dimensões da junta são: $t_p=0,2$ mm; $L_0=12,5$; 25; 37,5 e 50 mm e $L_T=180$ mm.

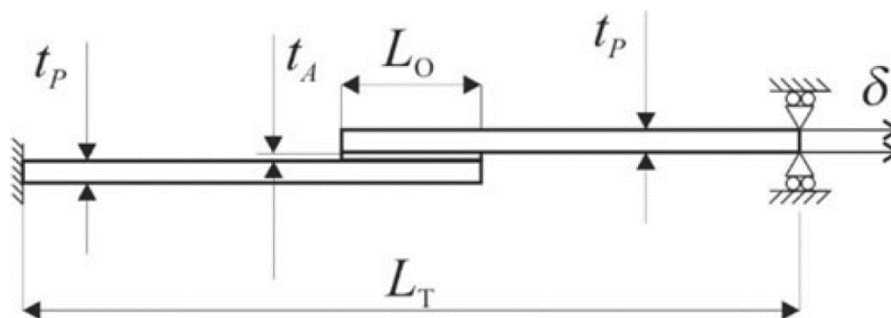


Figura 71 - Geometria das juntas de sobreposição testadas [57]

Para a realização do estudo numérico foi selecionado o *software* Abaqus®, que contém os módulos MDC e MEFX, para prever o comportamento das juntas em questão. Os aderentes foram modelados como sólidos elásto-plástico e os adesivos foram modelados com elementos do MDC, ou com elementos sólidos com formulação enriquecida para o MEFX. Apresenta-se na Figura 72 o refinamento de malha utilizado na análise numérica realizada neste estudo.

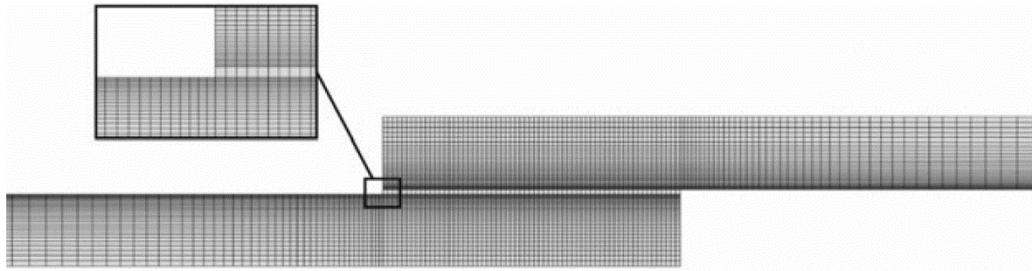


Figura 72 - Refinamento de malha para a análise de rotura pelo MDC e MEFX [57]

Após se terem realizado todos os ensaios, verificou-se que todas as roturas foram coesivas na camada de adesivo. Todas as curvas P - δ foram predominantemente lineares até à falha, com a exceção das juntas com $L_0=50$ mm e ligadas com o adesivo SikaForce® 7888. Este comportamento foi consistente com os resultados numéricos. Na Figura 73 é apresentado um exemplo de correlação das curvas P - δ experimentais e numéricas por MDC [57].

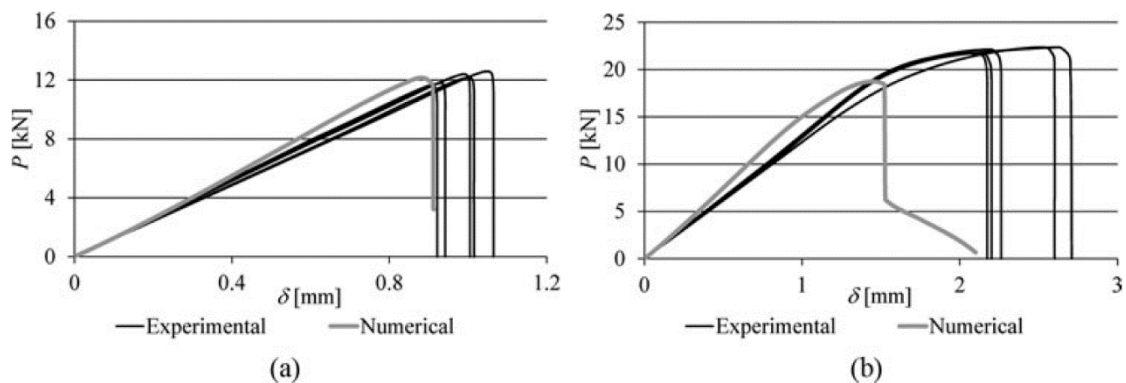


Figura 73 - Curvas P - δ experimentais e numéricas por MDC para: (a) Araldite® 2015 com $L_0=37,5$ mm, (b) SikaForce® 7888 com $L_0=50$ mm [57]

A modelação dos MDC com lei de dano triangular revelou ser bastante precisa para adesivos frágeis e moderadamente dúcteis. A análise de MEFX revelou que não é possível modelar a propagação de dano devido ao facto do modo de rotura real ocorrer ao longo da camada de adesivo predominantemente em corte [57].

DESENVOLVIMENTO

3 DESENVOLVIMENTO

3.1 Trabalho experimental

Na presente dissertação/tese é proposto um estudo numérico, pelo Método de Elementos Finitos, de comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinação de G_{IC} . Sendo este estudo apenas focado na análise numérica e recorrendo a dados experimentais já existentes para comparação de resultados, a fase experimental aqui descrita é referente a um trabalho realizado anteriormente [1]. No entanto, todo o tratamento dos dados experimentais e respetiva análise foram realizados no âmbito da presente tese.

Aqui serão apresentados todos os dados registados em toda a fase experimental, bem como os materiais utilizados, fabrico dos provetes DCB e TDCB e o ensaio desses mesmos provetes. Este trabalho experimental teve como objetivo a determinação do valor de G_{IC} . Após a obtenção dos vários resultados de G_{IC} , é feita uma comparação entre ensaios, assim como entre os adesivos utilizados [1].

3.1.1 Materiais utilizados

3.1.1.1 Substratos

Os substratos DCB e TDCB foram produzidos em aço C45E, que é um aço de baixa liga e que tem como características principais as apresentadas na Tabela 11.

Tabela 11 - Propriedades do aço C45E [1]

Propriedades	C45E
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	375
Módulo de Young, E [GPa]	210
Módulo de corte, G [GPa]	80
Densidade [kg/m ³]	7850
Dureza [HB]	163
Código [DIN]	1654

3.1.1.2 Adesivos

Os adesivos utilizados para a determinação da tenacidade em tração foram: Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752. O Araldite® AV138 é um adesivo epóxico e apresenta o comportamento mais frágil, o Araldite® 2015 é também um adesivo epóxico e tem um comportamento dúctil, já o SikaForce® 7752 é um adesivo poliuretano e o seu comportamento é bastante dúctil [1].

3.1.1.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo com excelente resistência química e mecânica após a cura. É produzido pela empresa Huntsman, e é fornecido em conjunto com o endurecedor (HV 998). Deve ser misturado à razão de 100/40, isto é, a cada 100g de resina devem ser adicionadas 40g de endurecedor [1, 58, 59].

Este adesivo resiste a uma temperatura máxima de 120°C e a sua cura pode ser realizada a partir de 5°C [58].



Figura 74 - Resina Araldite® AV 138 e endurecedor HV 998 [60]

As principais propriedades do adesivo foram obtidas com recurso a dados relativos a outros trabalhos experimentais [61], e encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 - Propriedades do adesivo Araldite® AV 138 [1]

Propriedade	Araldite® AV 138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coeficiente de Poisson, ν^*	0,35
Tensão de Cedencia, σ_Y [MPa]	36,49±2,47
Tensão de Rotura, σ_f [MPa]	39,45±3,18
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	1,21±0,10
Módulo de corte, G [GPa]	1,56±0,01
Tensão de cedência de corte, τ_Y [MPa]	25,1±0,33
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	30,2±0,30
Deformação de rotura de corte, γ_f [%]	7,8±0,7
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	0,249±0,033
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	0,636±0,105

*Propriedades fornecidas pelo fabricante

O adesivo deve ser aplicado manualmente nas superfícies a colar, por intermédio de uma espátula. Após a mistura dos componentes (resina e endurecedor), o tempo de manuseamento do adesivo é de aproximadamente 35 minutos [58].

Este adesivo pode ser usado para ligar vários materiais, tais como metais, borrachas, vidro, plásticos e outros materiais. Devido à sua baixa emissão de gases é adequado para aplicações no ramo da eletrónica, telecomunicações e aeroespacial [58].

3.1.1.2.2 Araldite® 2015

O adesivo Araldite® 2015 é produzido pela empresa Huntsman e é fornecido em dois componentes (resina e endurecedor). Possui um comportamento dúctil e de alta resistência e apresenta uma boa resistência à clivagem. É bastante utilizado na ligação de substratos metálicos e compósitos [62].



Figura 75 - Adesivo Araldite® 2015 [63]

Tabela 13 - Propriedades do adesivo Araldite® 2015 [1]

Propriedade	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	1,85±0,21
Coeficiente de Poisson, ν^*	0,33
Tensão de Cedência, σ_Y [MPa]	12,63±0,61
Tensão de Rotura, σ_f [MPa]	21,63±1,61
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	4,77±0,15
Módulo de corte, G [GPa]	0,56±0,21
Tensão de cedência de corte, τ_Y [MPa]	14,6±1,3
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	17,9±1,8
Deformação de rotura de 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]	4,7±0,34
*Propriedades fornecidas pelo fabricante	

A aplicação do adesivo é efetuada manualmente através da bisnaga de disposição que faz com que os componentes sejam misturados nas mesmas quantidades através do bico. Após a mistura dá-se início ao processo de cura [62]. Após a mistura dos componentes (resina e endurecedor), o tempo de manuseamento do adesivo é entre 30 a 40 minutos [62]. As principais propriedades do adesivo foram obtidas com recurso a dados relativos a outros trabalhos experimentais [61], e encontram-se na Tabela 13. A cura pode ser efetuada à temperatura ambiente (aproximadamente 23°C) o que demora 6 horas e permite obter uma resistência ao corte de 10 MPa, ou então 35 minutos a 60°C para a obtenção do mesmo resultado [62].

3.1.1.2.3 Sikaforce® 7752

O adesivo SikaForce® 7752 é um adesivo fornecido pela empresa SIKA, é composto por dois componentes (resina e endurecedor) e deve ser misturado à razão mássica de 5/1, respetivamente.



Figura 76 - Adesivo SikaForce® 7752 [64]

Este adesivo é resistente a temperatura até 120°C de forma permanente. A cura deste adesivo pode ser realizada à temperatura ambiente, funciona como retardador de chama, é resistente ao envelhecimento e ao impacto, e apresenta excelente flexibilidade a baixas temperaturas [1, 65]. As principais propriedades do adesivo foram obtidas com recurso a dados relativos a outros trabalhos experimentais [61], e encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 - Propriedades do adesivo SikaForce® 7752 [1]

Propriedade	SikaForce® 7752
Módulo de Young, E [GPa]	493,81±89,60
Coeficiente de Poisson, ν^*	0,32
Tensão de Cedência, σ_Y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de Rotura, σ_f [MPa]	11,49±0,25
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	13,92±9,14
Módulo de corte, G [GPa]	187,75±16,35
Tensão de cedência de corte, τ_Y [MPa]	5,16±1,14
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	10,17±0,64
Deformação de rotura de corte, γ_f [%]	54,82±6,39
Tenacidade à tração, G_{IC} [N/mm]	2,36±0,17
Tenacidade ao corte, G_{IIC} [N/mm]	5,41±0,47

*Propriedades fornecidas pelo fabricante

Este adesivo é aplicado manualmente com recurso a uma espátula, colocando o adesivo nas superfícies a colar. Após misturar os componentes inicia-se o processo da cura. Após a cura, o tempo de manuseamento do adesivo é de 60 minutos [1, 65].

3.1.2 Fabrico dos provetes DCB e TDCB

A geometria dos provetes a utilizar nos ensaios DCB e TDCB foi definida de acordo com a norma ASTM D3433-99. No caso dos substratos a serem usados para o ensaio DCB não foi preciso proceder à sua realização, pois já existiam substratos em aço C45E no laboratório de ensaios mecânicos do ISEP. Para o ensaio TDCB foi necessário proceder ao fabrico dos substratos, que foram também produzidos em aço C45E e com recurso à norma ASTM D3433-99. Os substratos TDCB (Figura 77) apresentam uma espessura crescente desde o local da aplicação da carga até à extremidade oposta, garantindo assim uma taxa constante de flexibilidade ao longo do ensaio. O valor do declive utilizado foi de $1,968386 \text{ mm}^{-1}$, que é o valor especificado na norma ASTM D 3433-99.

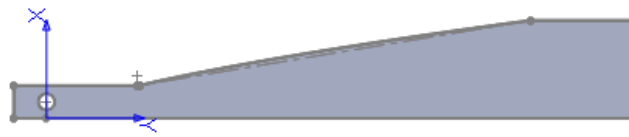


Figura 77 - Geometria dos provetes TDCB [1]

A partir da equação da qual se obtém o declive, obtém-se também a função polinomial que relaciona a coordenada y em função de x , que torna possível a construção geométrica da Figura 77.

Foi considerado $12,70 \text{ mm} \leq x \leq 38 \text{ mm}$ e um $y \geq 35,92 \text{ mm}$. Após estas considerações foi realizado um desenho 2D (Figura 78) do substrato TDCB, com recurso ao Solidworks, com as medidas em detalhe e foi enviado para as oficinas mecânicas para o fabrico dos mesmos.

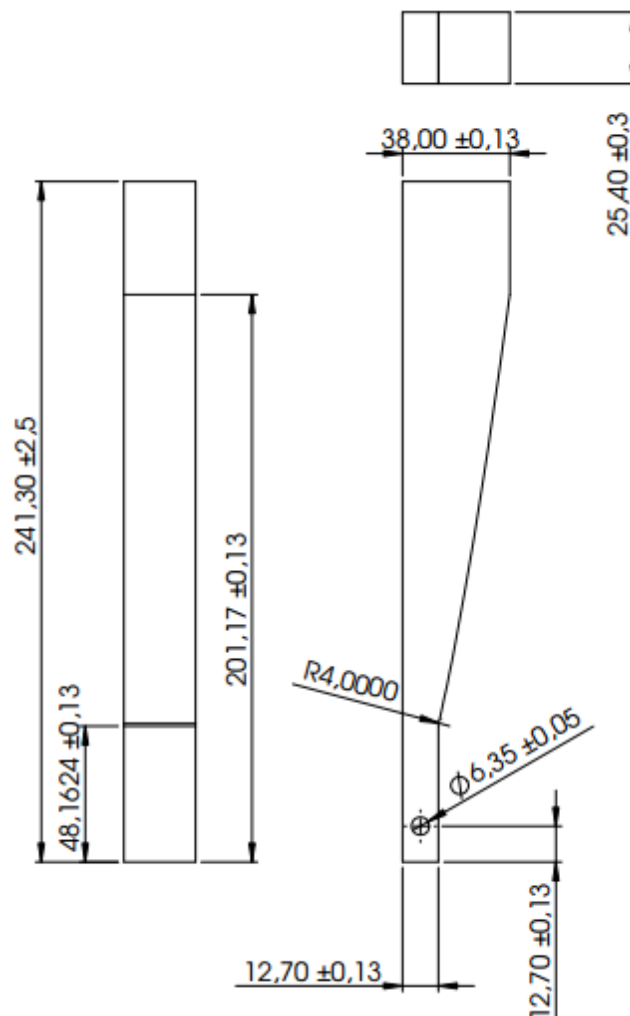


Figura 78 - Provete TDCB segundo a norma ASTM D 3433-99 [1]

Os provetes foram fabricados com recurso a um centro de maquinagem HAAS VF2 (Figura 79), nas oficinas de mecânica do ISEP.



Figura 79 - Centro de maquinagem HAAS VF2 [1]

Foram utilizados 14 blocos em esquadria com as dimensões de $244 \times 40 \times 31 \text{ mm}^3$, para construir os 14 substratos. Para a execução dos provetes foram necessários dois apertos e foram utilizadas as ferramentas disponíveis nas oficinas.

Na Tabela 15 e na Tabela 16 encontram-se a sequência de operações efetuadas em cada aperto.

Tabela 15 - Sequência de operações para o primeiro aperto [1]

Operação	1º Aperto
1	Com a ferramenta SANDVIK Face Mill R245 de Ø80 mm com 4 navalhas para facejar a superfície do bloco.
2	Com a ferramenta de pontear Dormer A200 de Ø2,5 mm, marcou-se o centro do furo de Ø6,35 mm com uma penetração de 2 mm no material.
3	Com a broca Dormer R120 de aço rápido de Ø6 mm, furou-se com ciclo de furação pica-pau com um incremento no eixo Z de 6 mm, até à profundidade de 28 mm.
4	Com a fresa de topo cilíndrica Dormer C135 de Ø6 mm com 2 navalha, terminou-se o furo para o diâmetro final de 6,35 mm.
5	Com a fresa de topo cilíndrica Dormer C353 de Ø20 mm com 3 navalhas para desbastar a lateral da superfície inclinada e acabamento.
6	Com a fresa de topo cilíndrica Dormer C135 de Ø6 mm com 2 navalha, realizou-se a operação de acabamento do raio de 4 mm.

Tabela 16 - Sequência de operações para o segundo aperto [1]

Operação	2º Aperto
1	Com a SANDVIK Face Mill R245 de Ø80 mm com 4 navalhas, facejou-se a superfície do bloco. Facejamento do lado oposto para a cota final de 25,40 mm.

A velocidade de avanço da mesa, V_f (m/min), é dada pela expressão

$$V_f = n \cdot f_z \cdot z, \quad (33)$$

onde n representa a rotação da fresa (rpm), f_z o avanço de cada dente da fresa (mm/dente) e z o número de dentes da fresa.

A velocidade de corte V_c (m/min) é dada pela seguinte expressão

$$V_c = \frac{\pi \times DC_{ap} \times n}{1000}, \quad (34)$$

onde DC_{ap} representa o diâmetro de corte (mm) na profundidade de corte AP.

Na Tabela 17 encontram-se os parâmetros utilizados durante a maquinagem.

Para a realização dos provetes a ensaiar foram preparados 5 provetes para cada adesivo utilizado. Para o ensaio DCB os substratos possuíam 356 mm de comprimento, 25,4 mm de largura e espessura de 12,7 mm. A preparação dos provetes TDCB é similar à dos DCB, isto é, o número de provetes utilizados por adesivo foi o mesmo e foram preparados nas mesmas instalações.

Para garantir uma boa colagem e prevenir rotura na interface é necessário realizar uma boa preparação da superfície de colagem, e para isso foram utilizados processos passivos mecânicos e químicos na preparação destes provetes. Inicialmente os provetes foram todos limpos e desengordados através da aplicação de acetona. De seguida estes foram granalhados na granalhadora CIDBLAST RT 6S (Figura 80), tendo óxido de alumínio como abrasivo.

Tabela 17 - Parâmetros utilizados na maquinagem [1]

Posição	Designação	\varnothing [mm]	Operação	V_c [m/min]	n [rpm]	V_f [mm/min]	A_p máx [mm]
T24	SANDVIK Face Mill R245	80	Facejar (Desbaste)	186	740	744	1,0
T24	SANDVIK Face Mill R245	80	Facejar (acabamento)	200	795	795	0,1
T5	Dormer A200	6,3	Pontear	25	3183	401	2
T18	Broca Dormer R120 HSS	6	Furação	75	3979	915	-
T13	Dormer C135	6	Desbaste	35	1857	111	0,5
T13	Dormer C135	6	Acabamento	40	2122	127	0,1
T19	Dormer C135	20	Desbaste	100	1591	811	0,5
T19	Dormer C135	20	Acabamento	100	1751	892	0,1



Figura 80 - Granalhadora CIDBLAST RT 6S [1]

Após a granalhagem os provetes são secos através de jato de ar e de seguida são limpos de novo com acetona e posteriormente secos com papel. Na Figura 81 estão representados os provetes após a operação de granalhagem.



Figura 81 - Substratos DCB após a granalhagem [1]

A espessura de adesivo foi igual para todos os adesivos e com valor de 1 mm. De forma a garantir essa espessura recorreu-se a espaçadores calibrados de aço e uma lâmina para criar a pré-fenda inicial (Figura 82). Foi utilizado um calço de 1 mm constituído por uma lâmina de 0,1 mm de espessura com calços de 0,45 mm de ambos os lados, sendo este colocado na extremidade próxima do ponto de solicitação.

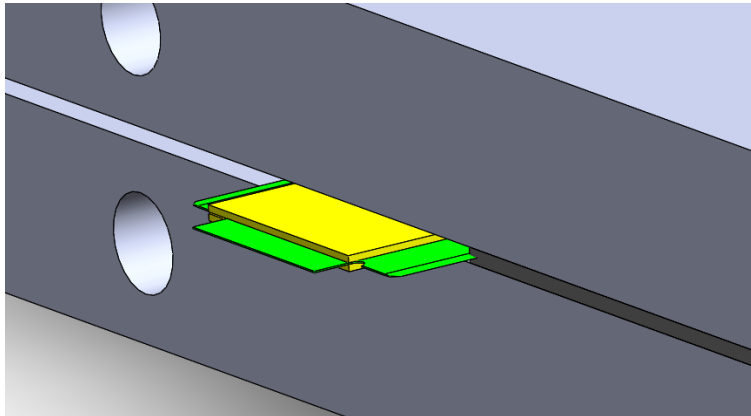


Figura 82 - Extremidade do provete DCB (local da criação da pré-fenda) [1]

Os espaçadores são colados à lâmina com uma cola LOCTITE Super Cola3, seguindo-se uma limpeza do conjunto com acetona. Após a limpeza o conjunto vai ao forno (Figura 83) a uma temperatura perto dos 60°C durante 15 minutos.



Figura 83 - Espaçadores no forno [1]

Para facilitar a remoção dos calços é aplicado o desmoldante Loctite 770-NC (Figura 84). O desmoldante é aplicado 3 vezes em cada uma das faces do conjunto.



Figura 84 - Aplicação de desmoldante nos espaçadores [1]

Os espaçadores com lâmina são posicionados a 50 mm do ponto de solicitação, para garantir o mesmo posicionamento em todos os substratos. Os espaçadores de 1 mm são colocados na outra extremidade. Os espaçadores são colocados com recurso à cola LOCTITE Super Cola3. Na Figura 85 é possível verificar o posicionamento dos calços nos substratos DCB.



Figura 85 - Posicionamento dos calços nos substratos DCB [1]

Depois de os espaçadores estarem todos colocados, inicia-se a preparação dos adesivos. Como referido anteriormente, o SikaForce® 7752 L60 possui dois componentes (adesivo e endurecedor) que vêm em embalagens diferentes, sendo necessário fazer a mistura destes. A mistura é feita na razão de massa de 5/1, respetivamente.

Efetuuou-se a pesagem de cada um dos componentes (adesivo e endurecedor) iniciou-se a mistura manual de ambos até se obter uma mistura homogénea do adesivo (Figura 86).

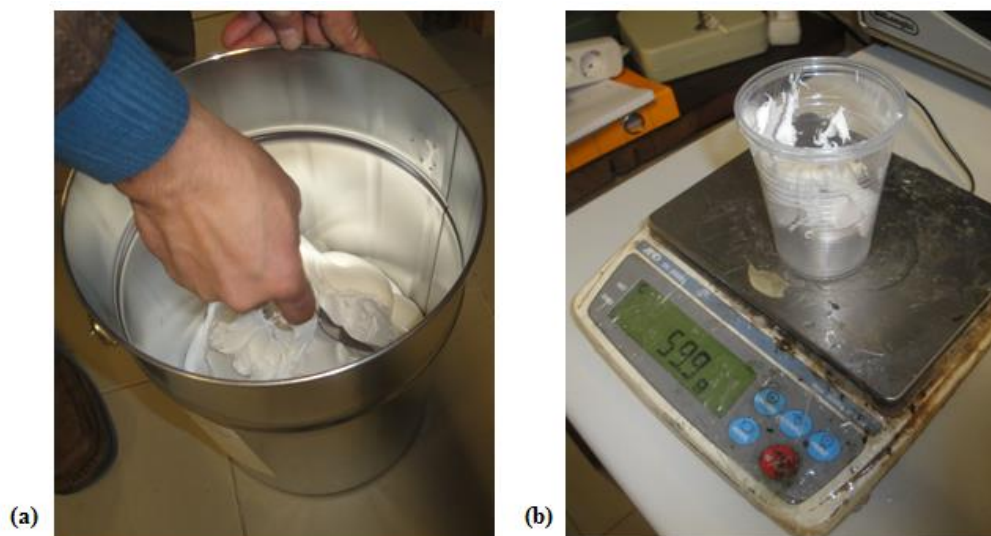


Figura 86 - Preparação do adesivo SikaForce® 7752 L60 (a) adesivo; (b) pesagem do adesivo numa balança digital [1]

A aplicação foi efetuada com uma espátula e foi adicionado adesivo em quantidade superior à necessária para fazer uma camada de 1 mm, isto para evitar preenchimento insuficiente e vazios. Após o adesivo ser espalho num dos substratos de cada provete, foi imediatamente colocado o substrato superior e pressionado para evitar o aparecimento de porosidades e vazios na camada de adesivo. A cura foi realizada durante 7 dias e à temperatura ambiente.

A preparação do adesivo Araldite® AV138 é muito parecida com a do adesivo SikaForce® 7752, apenas mudando a razão de mistura adesivo/endurecedor que neste caso é de 100/40, ou seja, 100 g de adesivo para 40 g de endurecedor. A cura foi realizada à temperatura ambiente durante uma semana.

No caso do Araldite® 2015 a preparação e aplicação são diferentes em relação aos adesivos anteriores. Como foi referenciado anteriormente, o adesivo Araldite® 2015 é fornecido em forma de bisnaga que possui o adesivo e o endurecedor, sendo a mistura realizada através do bico desta. A aplicação foi realizada através de uma pistola acionada manualmente e o adesivo foi aplicado no substrato em zigue-zague, como demonstrado na Figura 87.



Figura 87 - Aplicação do adesivo Araldite® 2015 [1]

Após a aplicação dos adesivos foram colocados os substratos superiores e pressionados em báscula, de forma a evitar formação de porosidades e vazios na camada de adesivo. A cura foi realizada à temperatura ambiente durante 7 dias. De referir que em todos os casos o tempo de cura foi superior ao especificado pelo fabricante.

Após a cura, com o auxílio de uma máquina de furar com uma mó (Figura 88), eliminou-se o excesso de adesivo.



Figura 88 - Mó utilizada para remoção de excesso de adesivo nas faces laterais dos provetes [1]

Após a remoção do adesivo em excesso procedeu-se à limpeza dos provetes com acetona e aplicou-se corretor numa das faces laterais, para ser possível realizar a medição do comprimento de fenda. Como demonstrado na Figura 89.



Figura 89 - Provete TDCB com corretor aplicado na face lateral [1]

Assim que o corretor secou aplicou-se uma escala impressa em papel autocolante a cerca de 1 mm do adesivo. O provete foi identificado com o seu número. Na Figura 90(a) é apresentado um provete pronto para o ensaio DCB e na Figura 90(b) é apresentado um provete pronto para o ensaio TDCB.



Figura 90 - Provetes preparados: DCB (a); TDCB (b) [1]

3.1.3 Ensaio das juntas

Os ensaios DCB e TDCB foram realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP, recorrendo à máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (Figura 91) que possui uma célula de carga de 100 kN.



Figura 91 - Máquina de ensaio Shimadzu AG-X 100 [1]

Foi necessário a utilização de amarras em U (Figura 92) para fixação dos provetes à máquina.



Figura 92 - Amarras em U [1]

De forma a nivelar os provetes nos dois tipos de ensaio, foi adicionado um fio ligado da extremidade livre do provete ao travessão da máquina de ensaios. Na Figura 93 é apresentada a preparação para cada um dos tipos de ensaio.

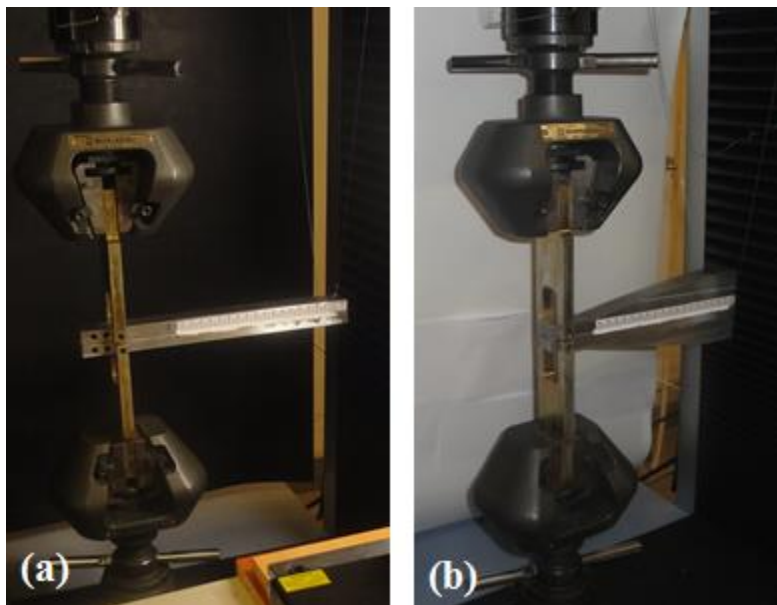


Figura 93 - Ensaio: (a) DCB; (b) TDCB [1]

A aquisição de valores correspondentes à força e deslocamento foi efetuada a uma taxa de 5 registos por segundo, enquanto o comprimento de fenda foi medido através de uma máquina fotográfica, sendo a zona do provete fotografada em intervalos de 5 segundos. A máquina fotográfica utilizada foi uma CANON modelo EOS 650D com uma resolução de 18MPixel (Figura 94).



Figura 94 - Máquina fotográfica utilizada para a medição do comprimento de fenda [1]

Para evitar a morosidade dos ensaios e respetivas consequências a nível de tratamento de dados, considerou-se a variação de velocidade de ensaio de forma a obter cerca de 100 imagens por ensaio.

Tabela 18 - Velocidades de ensaio [1]

Ensaio – Adesivo	Velocidade de ensaio [mm/min]
DCB – SikaForce® 7752	0,5
TDCB – SikaForce® 7752	0,25
DCB – Araldite® 2015	0,5
TDCB – Araldite® 2015	0,25
DCB – Araldite® AV138	0,15
TDCB – Araldite® AV138	0,07

Como os provetes TDCB possuem uma rigidez superior aos DCB foi utilizada uma velocidade de cerca de metade, como se pode verificar na Tabela 18. Os provetes colados com o adesivo Araldite® AV138 foram ensaiados com velocidades mais baixas, por este ser um adesivo frágil mas ao mesmo tempo o mais rígido, isto é, a propagação dá-se com deslocamentos inferiores. Os provetes colados com os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 foram ensaiados a velocidades iguais, pois são ambos adesivos dúcteis.

De forma a evitar uma propagação de fenda brusca pré-carregou-se os provetes DCB. Os valores obtidos da fenda inicial a_0 (mm), para $t=0$ segundos no ensaio DCB e TDCB encontram-se na Tabela 19 e Tabela 20, respetivamente.

Tabela 19 - Comprimento de fenda inicial para ensaio DCB [1]

Provete	a_0 [mm]		
	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	61,0	99,5	69,6
2	54,8	81,9	53,4
3	56,8	59,9	54,2
4	59,3	62,9	49,7
5	81,4	76,3	52,8

Tabela 20 - Comprimento de fenda inicial para ensaio TDCB [1]

Provete	a_0 [mm]		
	Araldite® AV138	Araldite® 2015	SikaForce® 7752
1	34,9	39,1	34,9
2	35,2	41,1	34,9
3	34,8	38,9	34,8
4	36,5	37,6	33,7
5	40,6	37,4	34,4

3.1.4 Resultados obtidos

Este capítulo será dividido em resultados dos ensaios DCB, resultados dos ensaios TDCB, análise aos resultados obtidos e comparação entre os dois métodos de ensaio (DCB e TDCB).

3.1.4.1 Ensaio Double-Cantilever Beam

Serão apresentadas as curvas $P-\delta$ para todos os provetes ensaiados de acordo com o adesivo. De seguida serão apresentadas as curvas- R , que relacionam a evolução de G_I com a e que servem de base para o cálculo de G_{IC} .

3.1.4.1.1 Curvas $P-\delta$

Adesivo Araldite® AV138

Na Figura 95 encontram-se representadas as curvas $P-\delta$ referentes ao ensaio dos provetes DCB com adesivo Araldite® AV138. Através da Figura 95 nota-se que o provete 3 foi o que se destacou apresentando uma rigidez inicial superior e valor de P também bastante mais elevado. Isto pode estar relacionado com o facto de o valor de a_0 ser um dos mais baixos (Tabela 19). Podem também ver-se várias propagações instáveis durante o ensaio de cada um dos provetes. De facto, sempre que há uma queda acentuada de P , isto traduz-se numa propagação abrupta da fenda.

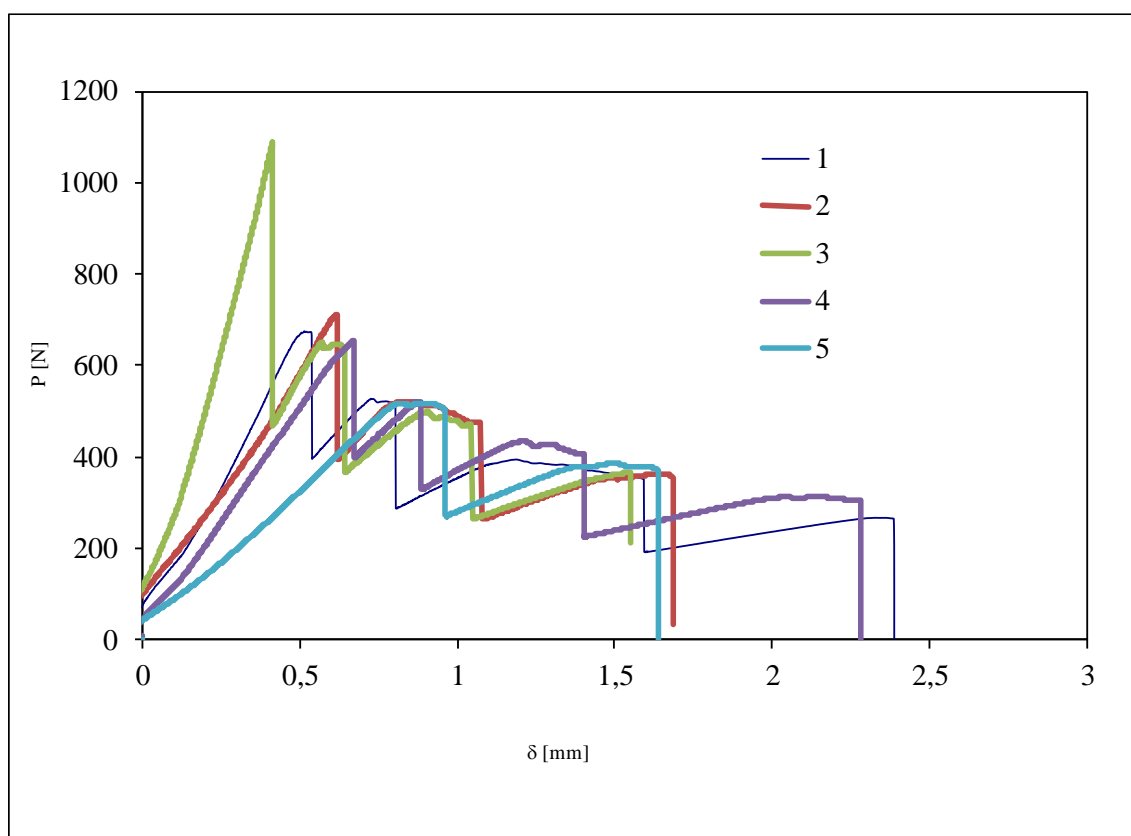


Figura 95 - Curva $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® AV 138

Verificou-se, em todos os provetes após rotura, a existência de zonas de propagação instável da fenda alternados com regiões de propagação estável (Figura 96). Apesar disto, foi possível obter o valor de G_{IC} a partir das zonas de propagação estável.

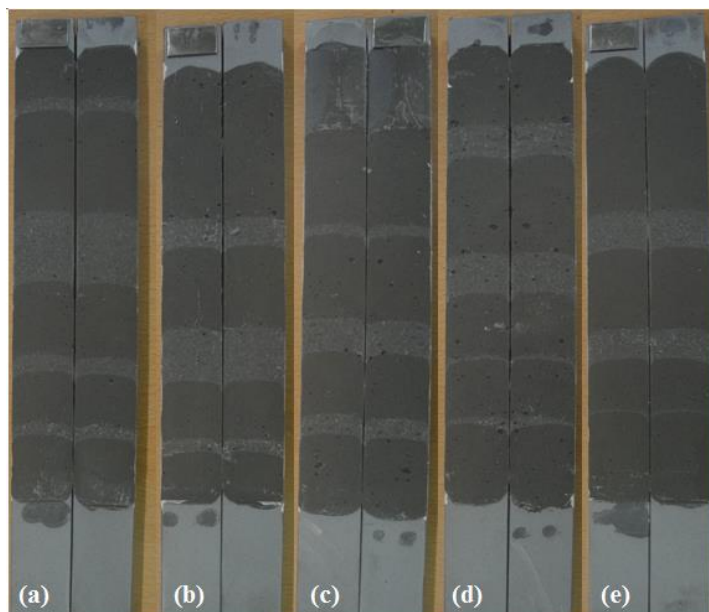


Figura 96 - Rotura do adesivo Araldite® AV 138 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5 [1]

Na Figura 96 pode-se verificar as zonas de propagação estável representadas pelas zonas de adesivo com a cor de cinzento-claro. As zonas com um cinzento-escuro representam as zonas de propagação instável. De referir que o tipo de rotura que ocorreu foi rotura coesiva, o que significa que a preparação superficial foi bem efetuada.

Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 97 encontram-se representadas as curvas $P-\delta$ referentes ao ensaio dos provetes DCB com adesivo Araldite® 2015. Pode-se verificar que o provete 1 possui uma rigidez inicial inferior aos restantes provetes, isto porque este provete possui um valor de a_0 superior a todos os outros (Tabela 19). O provete 2 apresenta uma queda acentuada de rigidez para um deslocamento aproximadamente de 2,10 mm, que representa uma propagação de fenda instável. Verifica-se também que foi obtida uma boa repetibilidade durante a propagação e no deslocamento final.

Todos os provetes apresentaram rotura coesiva (Figura 98), pelo que a preparação da superfície foi corretamente executada. Apesar de não ser evidente na imagem, em todos os substratos estava presente uma pequena quantidade de adesivo, afastando assim a hipótese de rotura mista ou adesiva em qualquer provete.

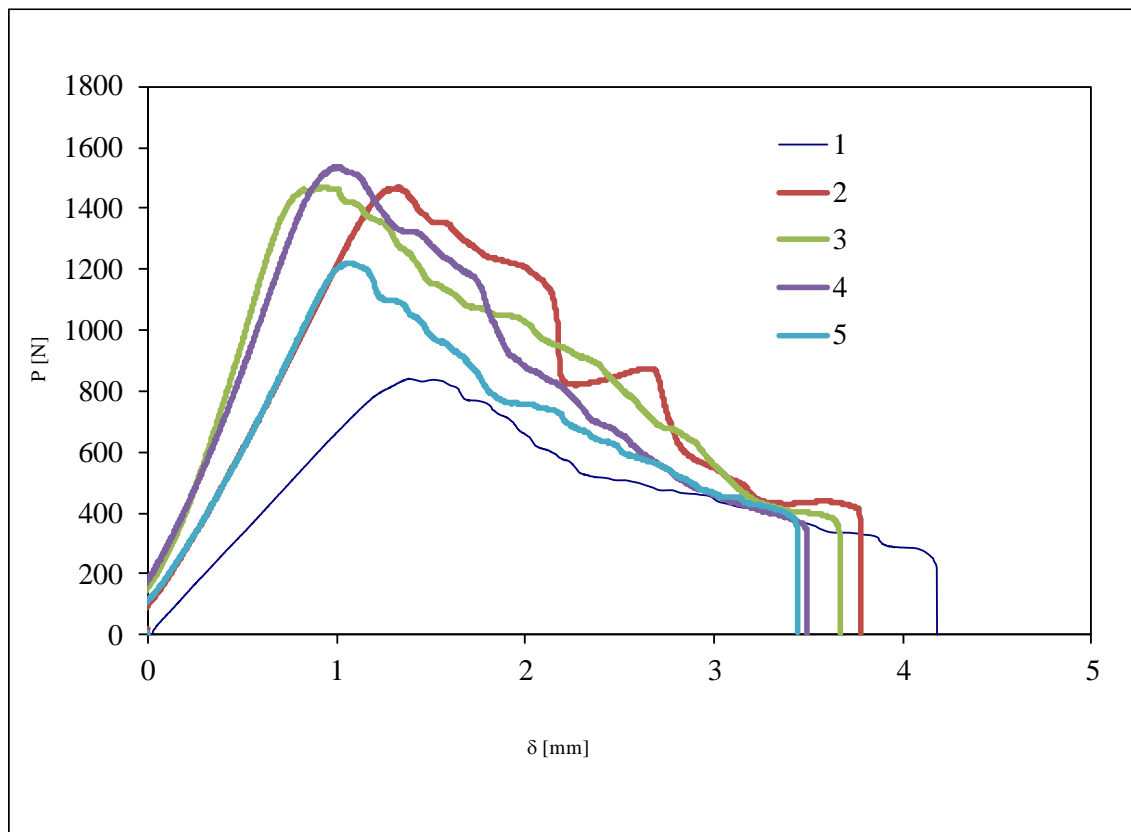
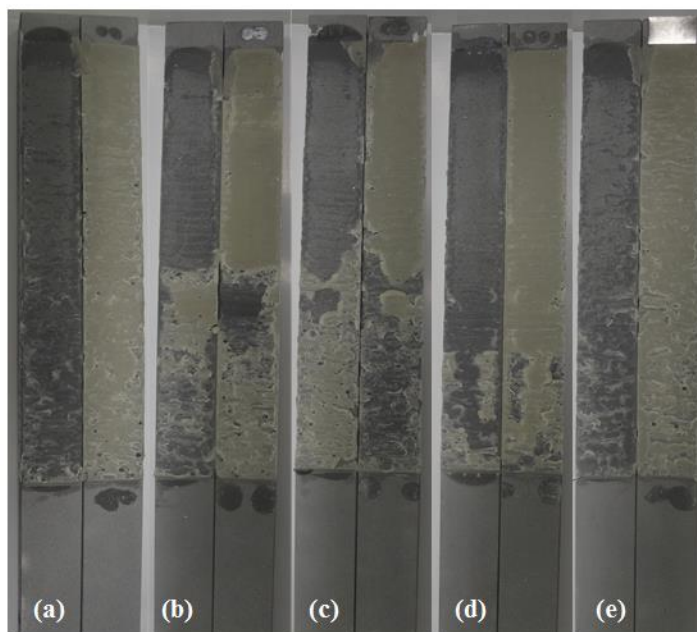
Figura 97 - Curvas P - δ relativas ao adesivo Araldite® 2015

Figura 98 - Rotura do adesivo Araldite® 2015 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5 [1]

Adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 99 encontram-se representadas as curvas $P-\delta$ referentes ao ensaio dos provetes DCB com adesivo SikaForce® 7752.

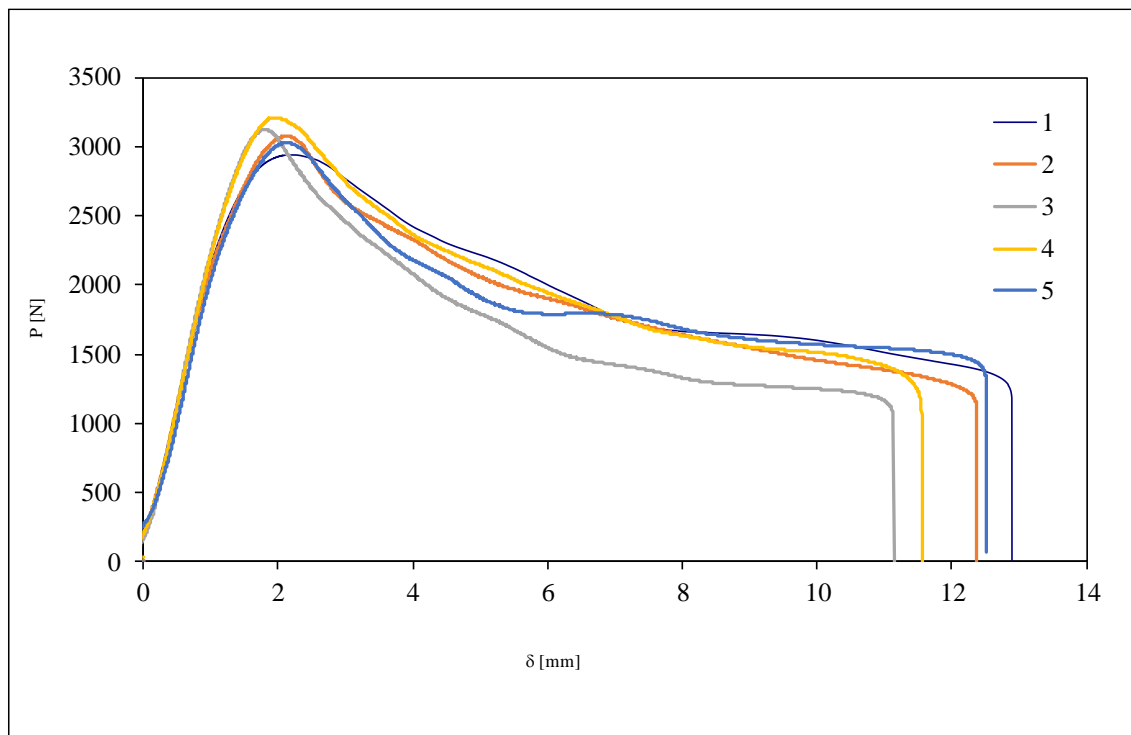


Figura 99 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo SikaForce® 7752

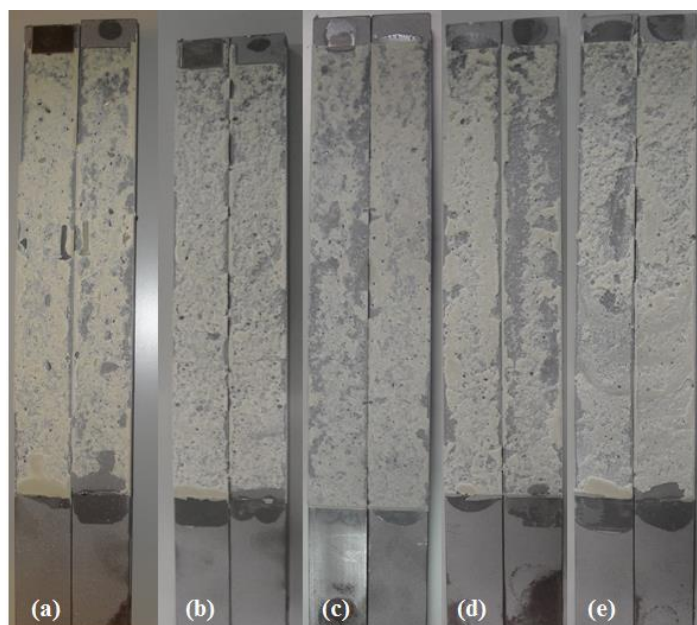


Figura 100 - Rotura do adesivo SikaForce® 7752 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5 [1]

É possível ver que existe uma boa repetibilidade na rigidez inicial, assim como durante todo o ensaio. Esta boa repetibilidade antevê resultados coerentes para o valor de G_{IC} para este adesivo. Após o ensaio dos provetes, estes apresentaram todos uma rotura coesiva. Como se pode verificar na Figura 100, a rotura ocorreu na zona intermédia do adesivo.

3.1.4.1.2 Determinação de G_{IC}

Para a determinação de G_{IC} foram utilizados os métodos CBBM, CBT e CCM. Os valores de G_{IC} foram comparados sempre em relação ao método CBBM, pois este método tem em conta a ZPF, em que o valor de a é obtido sem ser necessário medir o comprimento de fenda. Assim, este método não está sujeito a erros de medição. Devido às propagações instáveis da fenda foi feita a média do valor de G_{IC} nas zonas onde a propagação era estável.

Adesivo Araldite® AV 138

Na Figura 101 está representada a curva-R referente ao provete 1. Nesta imagem é perceptível a variação de G_{IC} durante a propagação da fenda para os três métodos utilizados (CBBM, CCM e CBT). Os dados apresentados na Figura 101 traduzem os resultados globais para este adesivo em termos de instabilidade na propagação da fenda.

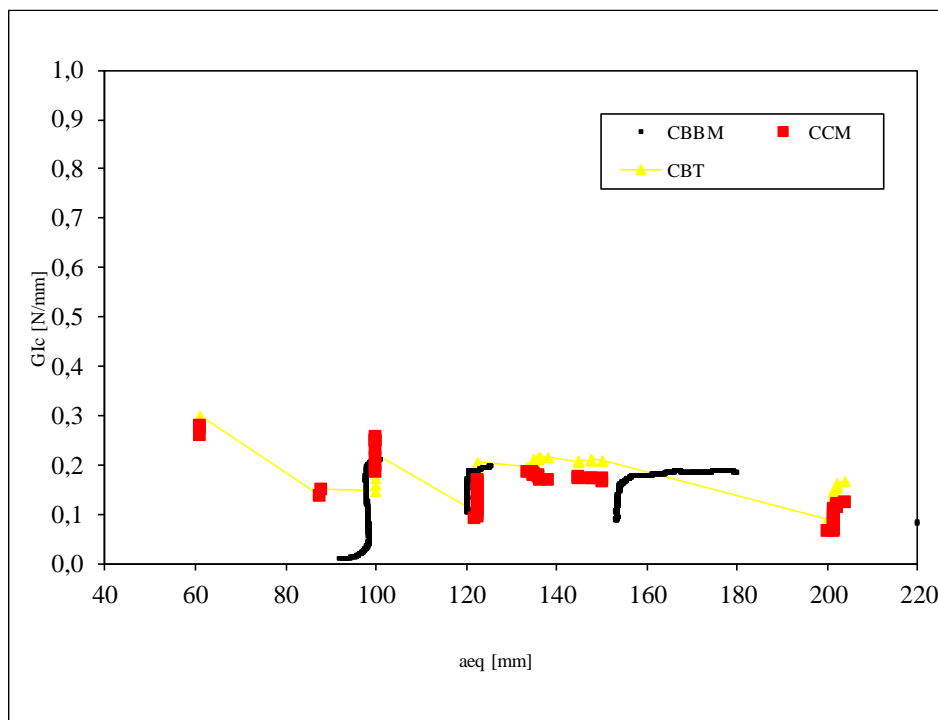


Figura 101 - Curva-R relativa ao provete 1

Na Tabela 21 estão representados os resultados obtidos do valor de G_{IC} para cada um dos provetes de acordo com cada método utilizado. No final da tabela é apresentada a média e desvio padrão para cada um dos métodos utilizados. O valor médio de G_{IC} obtido pelo método de CBBM é de 0,249 N/mm, com um desvio padrão de 0,045 N/mm. Fazendo a comparação entre os métodos CCM e CBT com o método CBBM, observa-se que os primeiros apresentam valores de G_{IC} inferiores, sendo o valor de CBT 3,21% mais baixo, enquanto o de CCM é inferior 26,51%.

Tabela 21 - Resultados de G_{IC} para o adesivo Araldite® AV138 (em N/mm)

Provete	CCM	CBT	CBBM
1	0,178	0,212	0,176
2	0,223	0,276	0,305
3	0,211	0,254	0,228
4	0,186	0,235	0,284
5	0,119	0,230	0,252
Média	0,183	0,241	0,249
Desvio Padrão	0,036	0,022	0,045

O método CCM apresenta um valor de G_{IC} inferior em relação aos restantes métodos, devido ao ajuste do polinómio $C = f(a)$, uma vez que este pequeno ajuste provoca uma grande alteração no resultado final.

Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 102 está representada a curva-R do ensaio DCB obtida através dos três métodos utilizados (CBBM, CCM e CBT) referente ao provete 2. Verifica-se que, para o método CBBM, a curva-R encontra-se um pouco desviada para a direita em relação aos restantes métodos. Isto deve-se ao facto de esta desta possuir um a_e maior que a devido à contabilização da ZPF. Como este adesivo é mais dúctil que o anterior, este possui uma ZPF superior. Desta forma espera-se que, quanto mais dúctil for o adesivo, maior será a ZPF e, conseqüentemente, maior será o desfasamento na medição do comprimento de fenda entre o método CBBM em relação aos outros métodos.

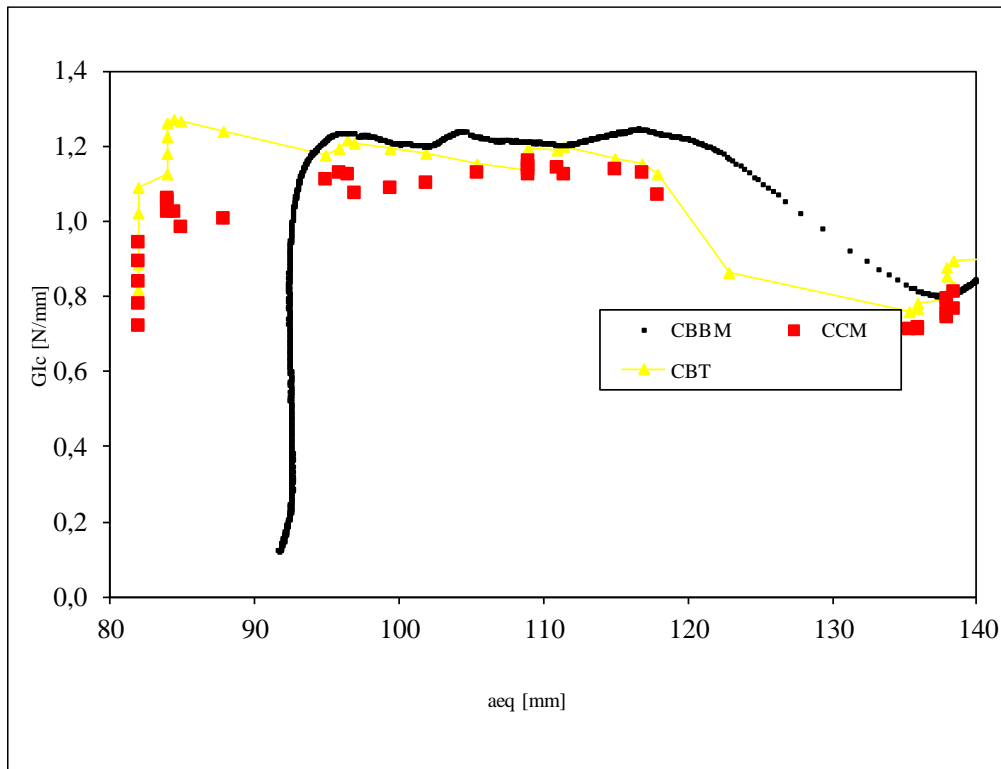


Figura 102 - Curva-R relativa ao provete 2

Na Tabela 22 estão representados os resultados obtidos do valor de G_{IC} para cada um dos métodos utilizados. No final da tabela, para cada um dos métodos utilizados, está apresentada a média e desvio padrão. O valor médio de G_{IC} obtido pelo método de CBBM é de 0,956 N/mm, com um desvio padrão de 0,209 N/mm. Fazendo a comparação dos métodos CBT e CCM com o método CBBM é perceptível que os valores obtidos são muito próximos, tendo o valor obtido pelo método CBT um desvio por defeito de 0,94% e o CCM um desvio por excesso de 0,52%, ambos relativamente ao método CBBM. Sendo o adesivo Araldite® 2015 um adesivo mais dúctil que o Araldite® AV138, apresenta um valor de G_{IC} também superior. Neste adesivo não existe uma disparidade tão grande como se verificou no adesivo Araldite® AV138, pois foi obtida uma maior uniformidade na curva $C = f(a)$, o que se refletiu no correto ajuste de dC/da necessário para o cálculo do método CCM.

Tabela 22 - Resultados de G_{IC} para o adesivo Araldite® 2015 (em N/mm)

Provete	CCM	CBT	CBBM
1	0,547	0,607	0,623
2	1,107	1,191	1,200
3	1,012	0,994	1,035
4	1,287	1,130	1,104
5	0,851	0,811	0,817
Média	0,961	0,947	0,956
Desvio Padrão	0,251	0,214	0,209

Adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 103 está representada a curva-R do ensaio DCB obtida através dos três métodos utilizados (CBBM, CCM e CBT) referente ao provete 2. Através da Figura 103 é possível verificar que o valor de G_{IC} foi constante ao longo da propagação da fenda.

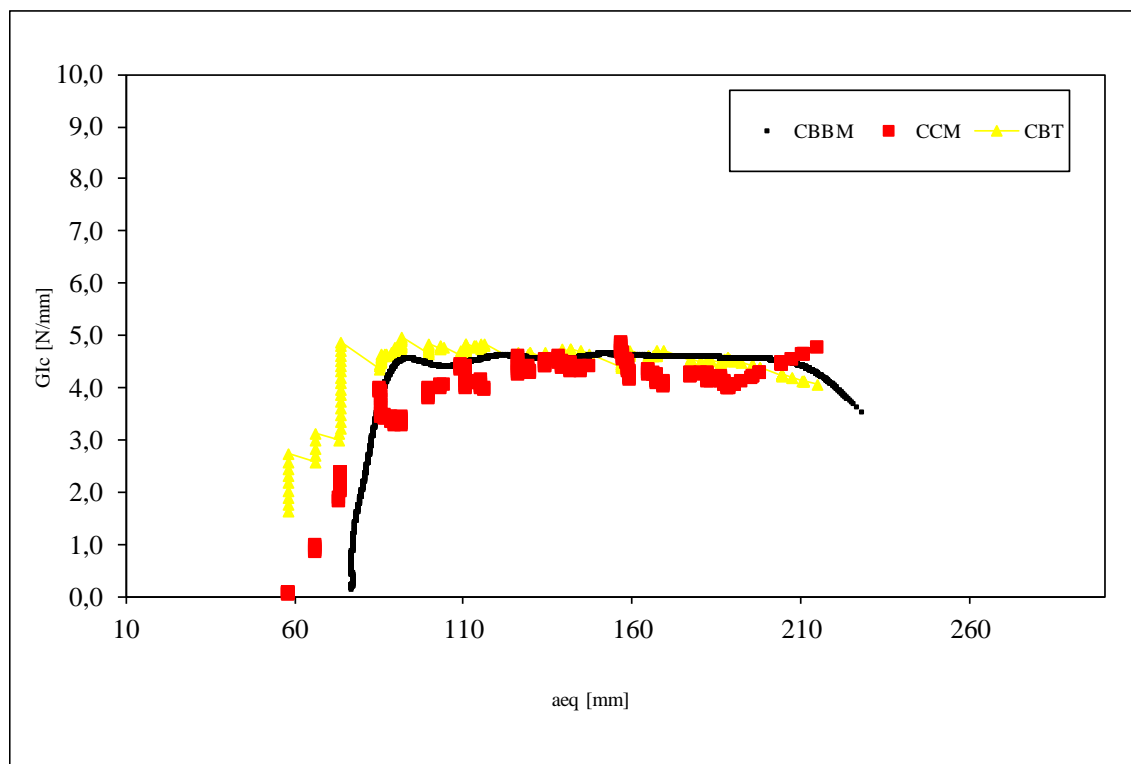


Figura 103 - Curva-R relativa ao provete 2

Na Tabela 23 estão representados os resultados obtidos do valor de G_{IC} para cada um dos métodos utilizados. No final da tabela, para cada um dos métodos utilizados, está apresentada a média e desvio padrão. Note-se que neste adesivo foi obtido o maior valor de G_{IC} , pois o adesivo SikaForce® 7752 é o mais dúctil dos três utilizados.

Tabela 23 - Resultados de G_{IC} para o adesivo SikaForce® 7752 (em N/mm)

Provete	CCM	CBT	CBBM
1	4,601	4,788	4,695
2	4,282	4,559	4,589
3	3,272	3,619	3,579
4	4,496	4,691	5,130
5	4,157	4,438	4,594
Média	4,162	4,419	4,518
Desvio Padrão	0,472	0,417	0,509

O valor médio de G_{IC} obtido pelo método de CBBM é de 4,518 N/mm, com um desvio padrão de 0,509 N/mm. Fazendo a comparação dos métodos CBT e CCM com o método CBBM é perceptível que os valores obtidos são próximos, mas mais baixos, tendo o valor obtido pelo método CBT um desvio de 2,19% e no CCM um desvio de 7,88%. Assim como nos adesivos anteriores, também neste se verifica que o CCM é o que apresenta menor valor de G_{IC} . Também como já referido anteriormente, este facto está diretamente relacionado com o ajusto do polinómio $C=f(a)$.

3.1.4.2 Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam

Neste subcapítulo são apresentadas as curvas $P-\delta$ para todos os provetes ensaiados com cada adesivo. De seguida serão apresentadas as curvas- R , que relacionam a evolução de G_I com a e que servem de base para o cálculo de G_{IC} . O comportamento esperado para as curva $P-\delta$ será o aumento linear da força aplicada até a fenda se começar a propagar. Após se iniciar a propagação da fenda a carga deve manter-se aproximadamente constante até à rotura do provete.

3.1.4.2.1 Curvas $P-\delta$

Adesivo Araldite® AV138

Na Figura 104 estão representadas as curvas $P-\delta$ relativas aos 5 provetes TDCB com o adesivo Araldite® AV138.

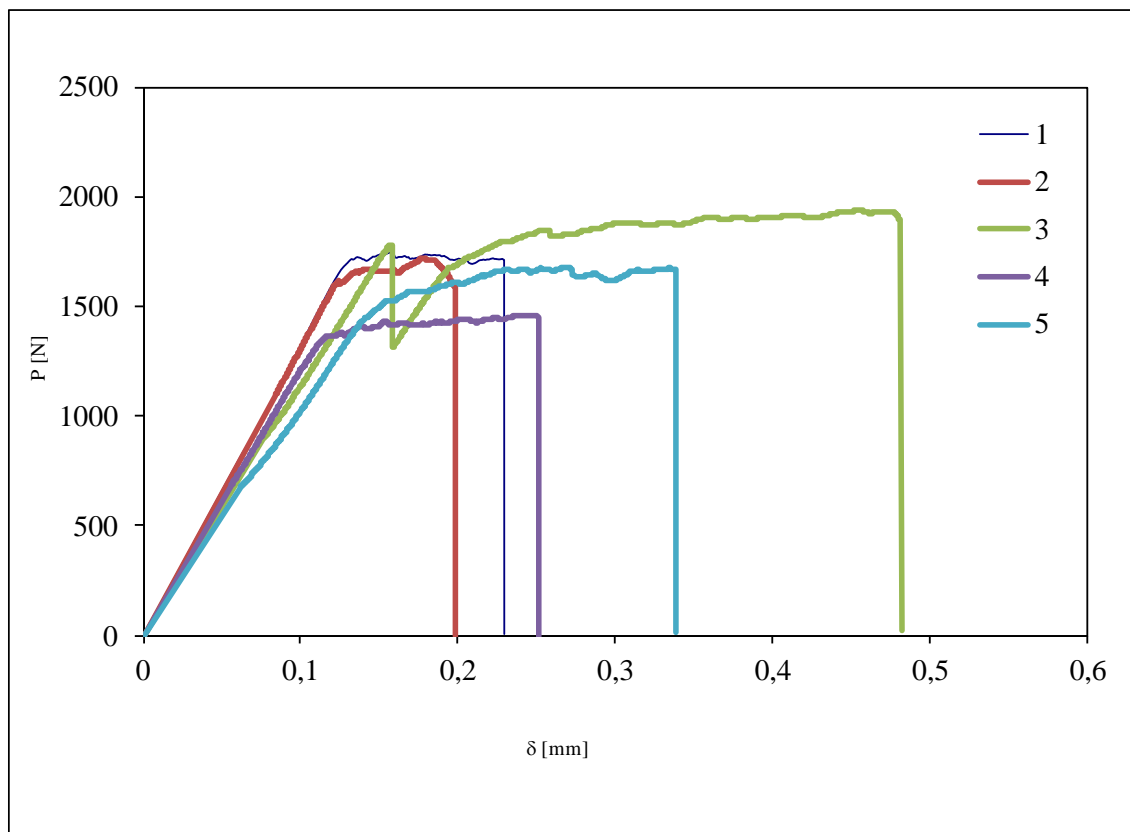


Figura 104 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® AV 138

Através da Figura 104 é possível verificar que as curvas apresentam uma boa repetibilidade na rigidez inicial, no comportamento durante a propagação da fenda e no deslocamento de rotura. Para um deslocamento de 0,18 mm, o provete 3 apresentou uma propagação de fenda instável. Todos os provetes apresentaram rotura coesiva e propagação instável, como se pode verificar na Figura 105.

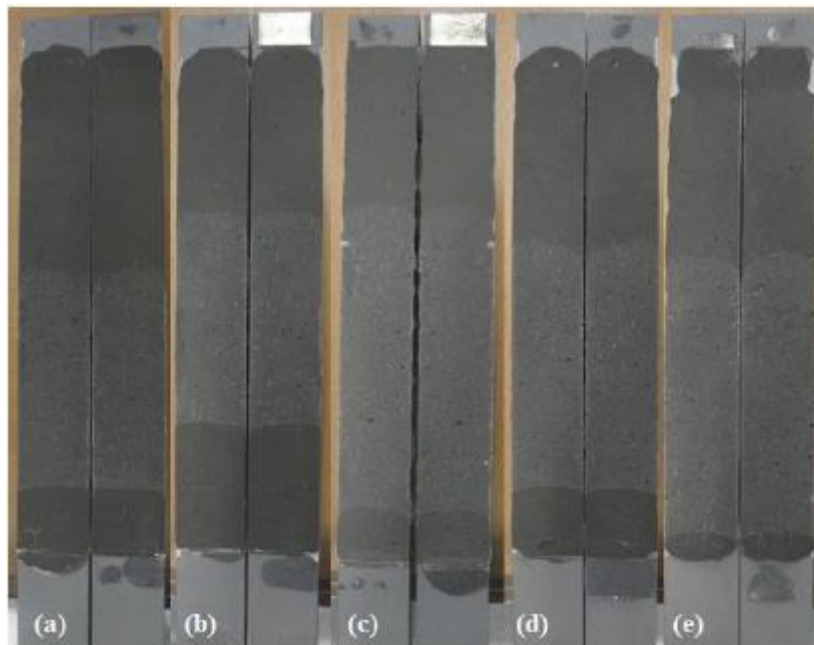


Figura 105 - Rotura do adesivo Araldite® AV138 no ensaio TDCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5 [1]

Podem-se também verificar as zonas de propagação estável representadas pelas zonas de adesivo com a cor de cinzento-claro. As zonas com um cinzento-escuro representam as zonas de propagação instável.

Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 106 estão representadas as curvas $P-\delta$ para os 5 provetes relativos ao ensaio TDCB com o adesivo Araldite® 2015. Como se verifica na Figura 106, foi conseguida uma boa repetibilidade na rigidez inicial assim como no comportamento durante a propagação da fenda.

Todos os provetes apresentaram rotura coesiva, como se pode verificar na Figura 107. Os provetes 1, 3 e 5 possuem zonas em que aparenta existir rotura adesiva, porém foi verificado visualmente que ficou com uma película de adesivo em cada substrato, significando assim que o tratamento superficial foi bem executado.

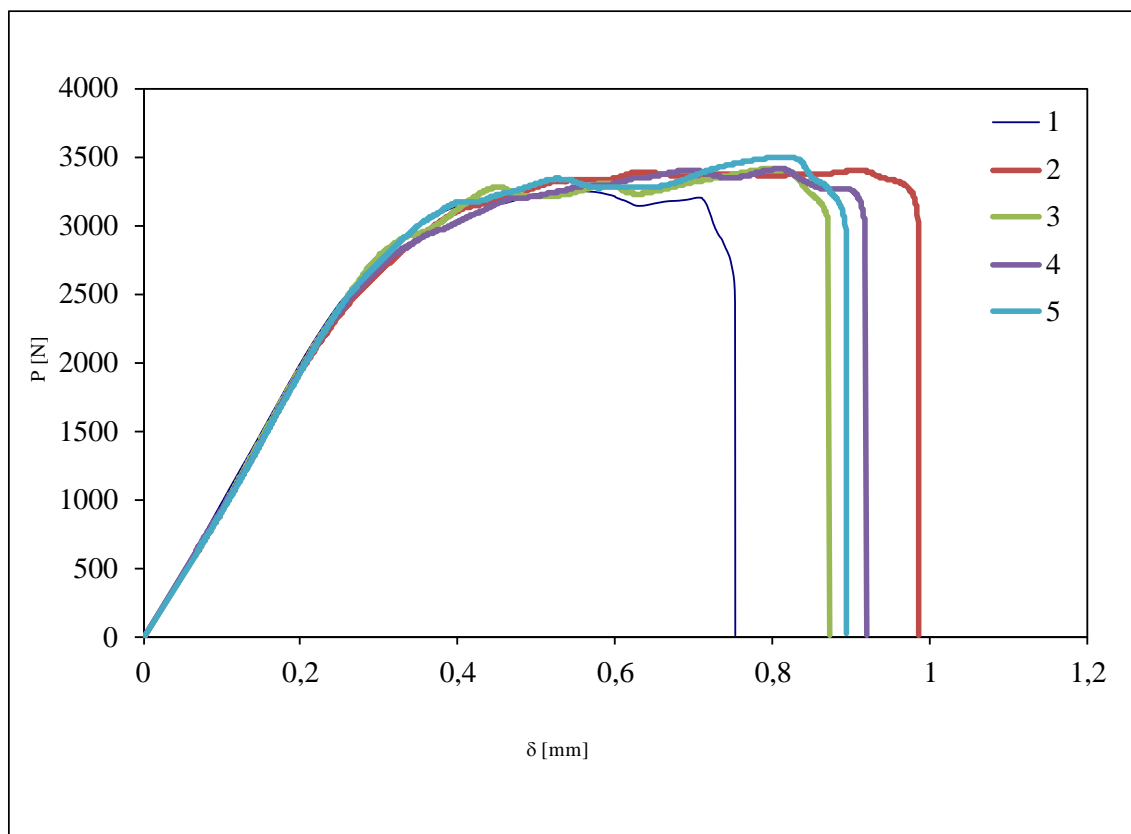
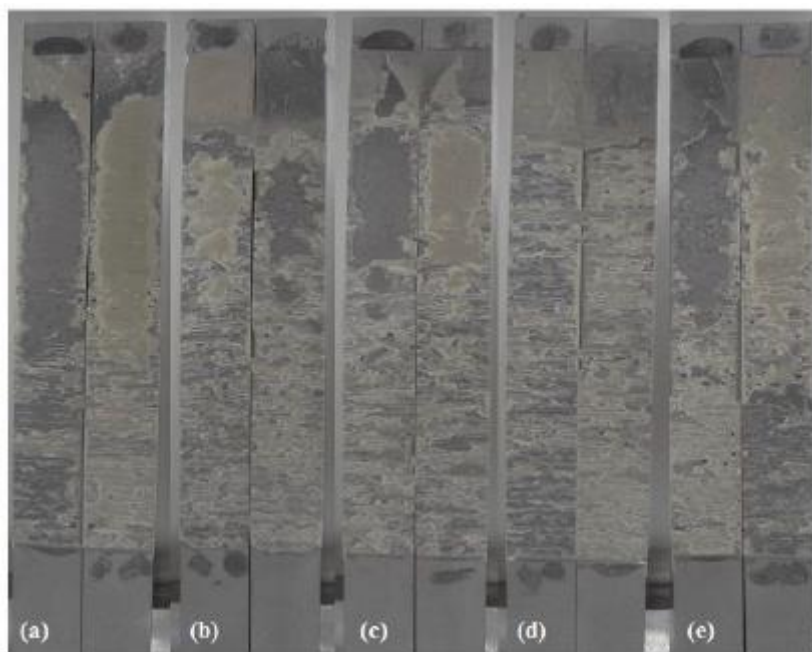
Figura 106 - Curvas P - δ relativas ao adesivo Araldite® 2015

Figura 107 - Rotura do adesivo Araldite® 2015 no ensaio TDCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5 [1]

Adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 108 estão representadas as curvas P - δ para os 5 provetes relativos ao ensaio TDCB com o adesivo SikaForce® 7752. Através da Figura 108 é possível verificar que as curvas apresentam uma boa repetibilidade na rigidez inicial, no comportamento durante a propagação da fenda e no deslocamento de rotura. Verifica-se também que a propagação de dano se deu a um valor de P aproximadamente constante.

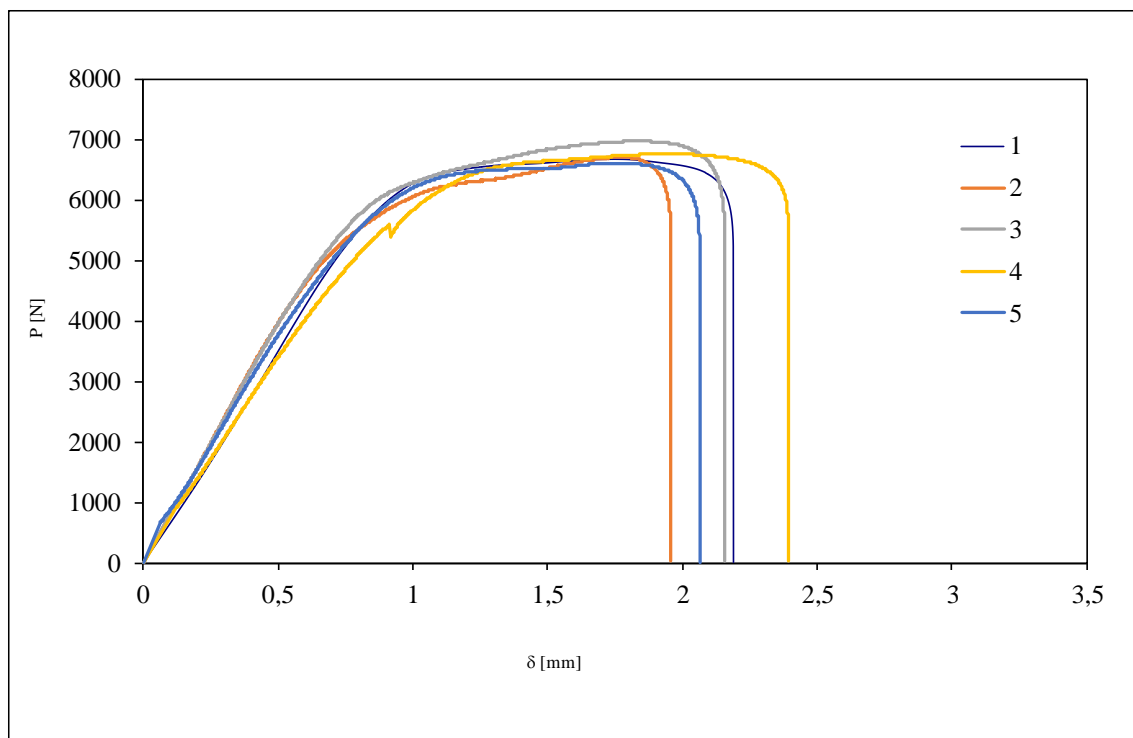


Figura 108 - Curvas P - δ relativas ao adesivo SikaForce® 7752

Todos os 5 provetes apresentaram rotura coesiva, como se pode verificar na Figura 109. Isto significa que o tratamento superficial efetuado foi bem executado, permitindo uma ótima ligação do adesivo com a superfície do substrato.

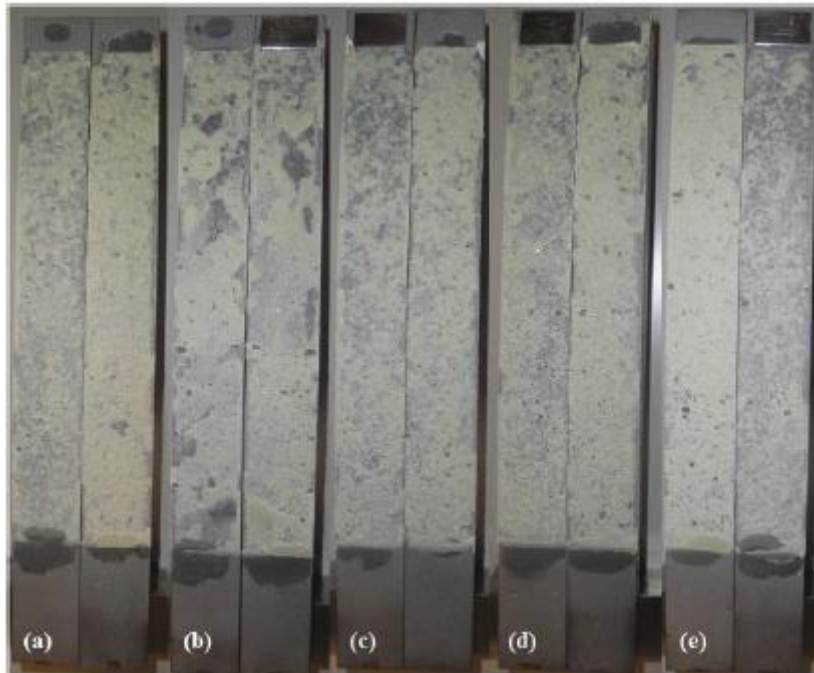


Figura 109 - Rotura do adesivo SikaForce® 7752 no ensaio TDCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5 [1]

3.1.4.2.2 Determinação de G_{IC}

Para a determinação de G_{IC} nos ensaios TDCB, os métodos utilizados foram o SBT, CBT e CCM. Os valores de G_{IC} foram comparados sempre em relação ao método SBT, pois este método é baseado na flexibilidade constante, isto é, este método não depende da medição do comprimento de fenda. Assim, este método não está sujeito a erros de medição.

Adesivo Araldite® AV138

Na Figura 110 está representada a curva-R do provete 2, em que se observa a variação de G_{IC} ao longo do comprimento de fenda. O comportamento deste provete é exemplo do comportamento dos restantes provetes.

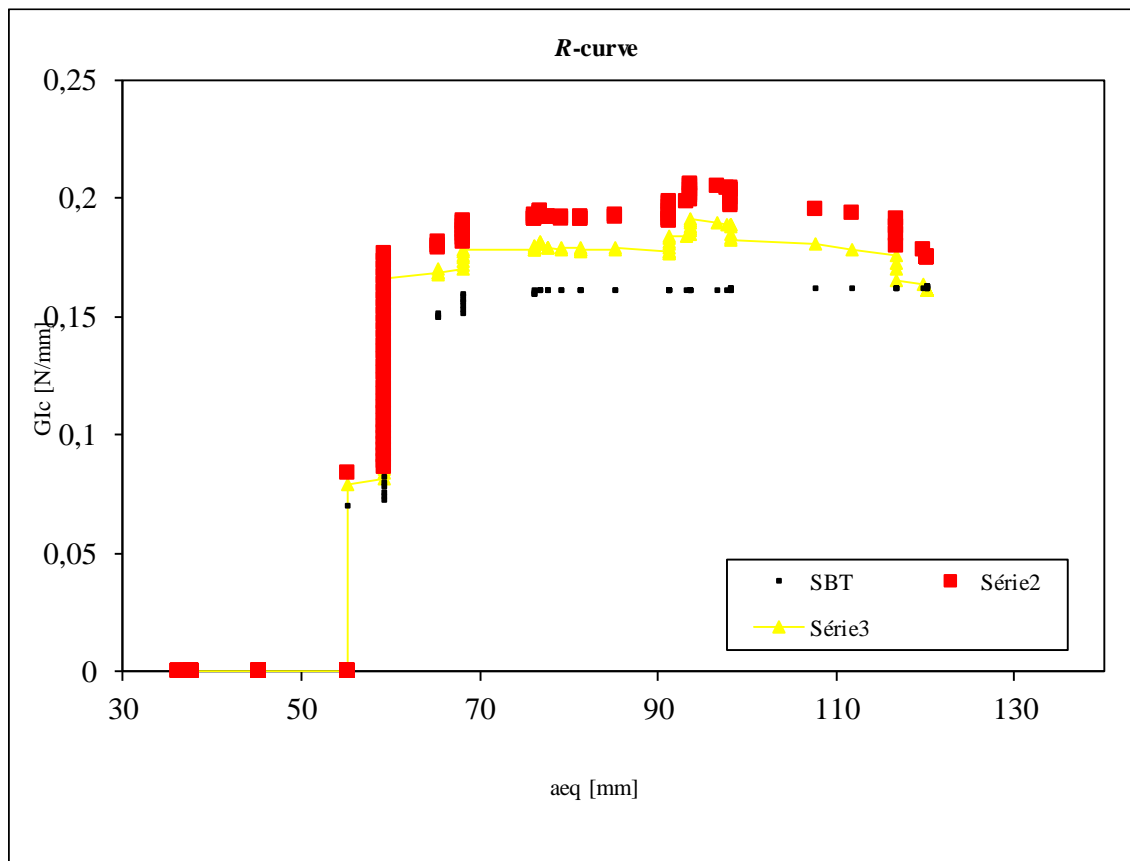


Figura 110 - Curva-R relativa ao provete 2

Na Tabela 24 são apresentados os valores de G_{Ic} obtidos para cada um dos métodos utilizados (SBT, CCM e CBT). No final da tabela encontram-se a média e desvio padrão dos mesmos. O valor médio de G_{Ic} obtido pelo método de SBT é de 0,161 N/mm, com um desvio padrão de 0,024 N/mm. Fazendo a comparação dos métodos CCM e CBT com o método SBT, nota-se que ambos possuem um desvio por excesso em relação ao SBT, sendo o desvio do CCM de 14,91% e o do CBT de 13,04%.

Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 111 está representada a curva-R do provete 2, em que se demonstra a variação de G_{Ic} ao longo do comprimento de fenda. O comportamento deste provete é representativo do comportamento dos restantes provetes. De notar que o valor de G_{Ic} se manteve constante ao longo da propagação da fenda.

Tabela 24 - Resultados de G_{IC} para o adesivo Araldite® AV138 (em N/mm)

Provete	SBT	CCM	CBT
1	0,173	0,183	0,193
2	0,162	0,172	0,177
3	0,194	0,228	0,228
4	0,119	0,148	0,133
5	0,159	0,192	0,178
Média	0,161	0,185	0,182
Desvio Padrão	0,024	0,026	0,030

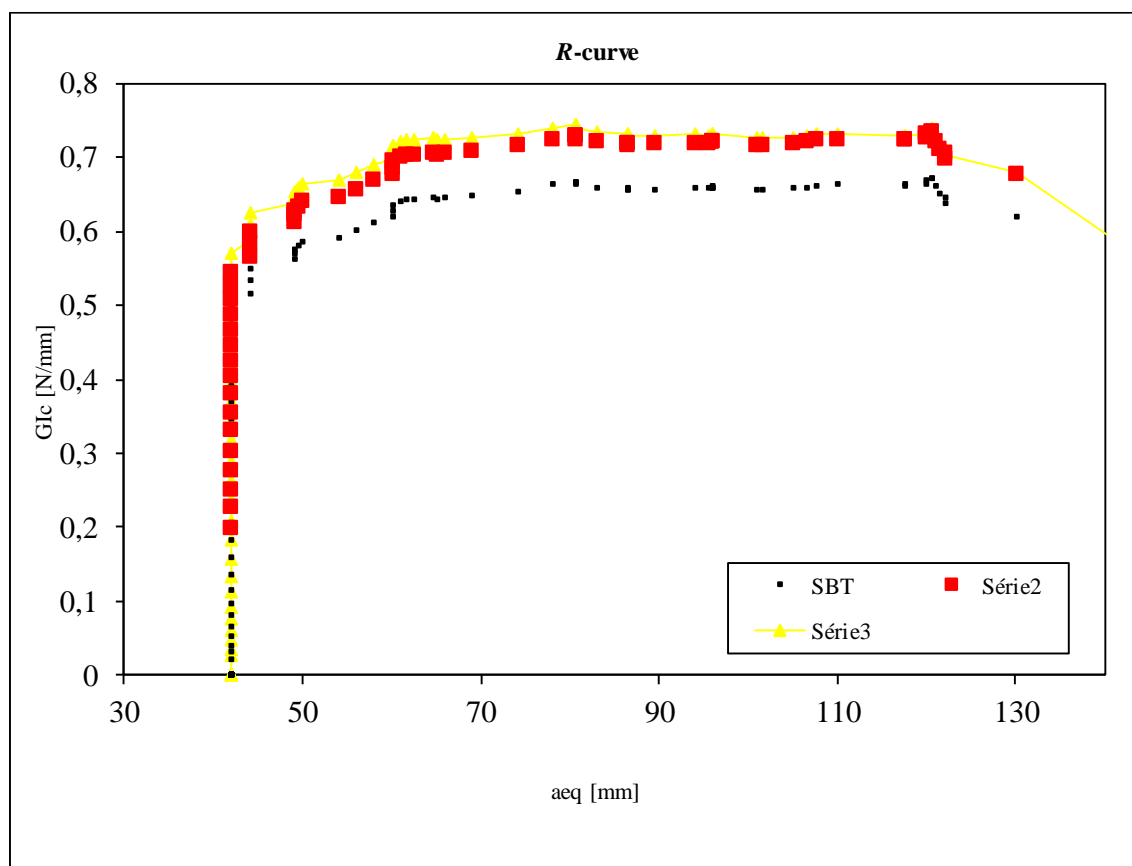


Figura 111 - Curva-R relativa ao provete 2

Na Tabela 25 são apresentados os valores de G_{IC} obtidos para cada um dos métodos utilizados (SBT, CCM e CBT). No final da tabela encontram-se a média e desvio padrão dos mesmos. O valor médio de G_{IC} obtido pelo método SBT é de 0,637 N/mm, com um desvio padrão de 0,024 N/mm. Comparando dos métodos CCM e CBT com o método SBT, nota-se que ambos possuem um desvio por excesso em relação ao SBT, sendo o desvio do CCM de 11,77 % e o do CBT de 11,15%.

Tabela 25 - Resultados de G_{IC} para o adesivo Araldite® 2015 (em N/mm)

Provete	SBT	CCM	CBT
1	0,592	0,689	0,663
2	0,658	0,719	0,731
3	0,631	0,704	0,703
4	0,646	0,721	0,716
5	0,656	0,727	0,729
Média	0,637	0,712	0,708
Desvio Padrão	0,024	0,014	0,025

Ao comparar os valores de G_{IC} obtidos para o adesivo Araldite® AV138 e para o Araldite® 2015, verifica-se que o Araldite® AV138 possui valores mais baixos, pois o Araldite® 2015 é um adesivo mais dúctil. Nota-se também que o Araldite® 2015 possui um valor de G_I mais estável ao longo da propagação da fenda.

Adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 112 está representada a curva-R do provete 5, em que se demonstra a variação de G_{IC} ao longo do comprimento de fenda. O comportamento deste provete é o exemplo do comportamento dos restantes provetes. De notar que o valor de G_{IC} se manteve aproximadamente constante ao longo da propagação da fenda, o que se deve ao facto de o adesivo em questão possuir um comportamento dúctil.

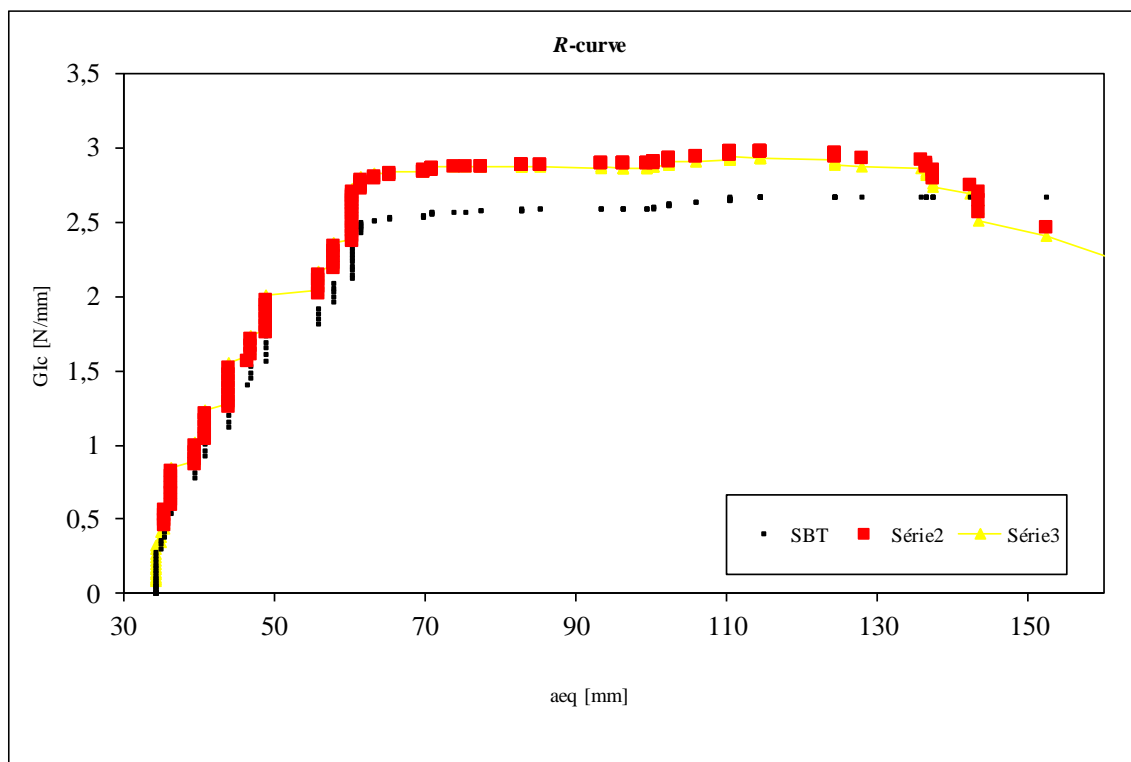


Figura 112 - Curva-R relativa ao provete 5

Na Tabela 26 são apresentados os valores de G_{IC} obtidos para cada um dos métodos utilizados (SBT, CCM e CBT). No final da tabela encontram-se a média e desvio padrão dos mesmos. O valor médio de G_{IC} obtido pelo método de SBT é de 2,603 N/mm, com um desvio padrão de 0,107 N/mm. Comparando dos métodos CCM e CBT com o método SBT, nota-se que ambos possuem um desvio por excesso em relação ao SBT. O desvio do CCM de 10,07 % e o do CBT de 10,99 %, ambos em relação ao SBT.

Tabela 26 - Resultados de G_{IC} para o adesivo SikaForce® 7752 (em N/mm)

Provete	SBT	CCM	CBT
1	2,623	2,886	2,887
2	2,455	2,810	2,716
3	2,782	3,012	3,036
4	2,601	2,777	2,983
5	2,552	2,842	2,825
Média	2,603	2,865	2,889
Desvio Padrão	0,107	0,082	0,114

3.1.4.3 Análise dos resultados obtidos

Através dos resultados obtidos nos ensaios DCB, foi possível constatar que o adesivo Araldite® AV138 é o mais frágil dos três adesivos utilizados. Devido à sua fragilidade, este adesivo apresentou uma propagação de fenda instável, havendo alternância entre zonas de propagação estável e instável. Utilizando as zonas de propagação estável, foi possível efetuar a medição do valor de G_{IC} pelos três métodos (CBBM, CBT e CCM). Para o método CBBM foi obtido um valor médio de G_{IC} de 0,249 N/mm. Os métodos CBT e CCM obtiveram valores de G_{IC} inferiores em 3,21% e 26,51%, respetivamente. A discrepância de valores dos métodos CCM e CBT em relação ao CBBM é devida à necessidade de medição do comprimento de fenda ao longo da propagação desta, o que pode originar erros de leitura. Ao método CCM acrescenta-se ainda o erro associado ao ajuste do polinómio $C=f(a)$, o que justifica o maior desvio em relação ao método CBBM [66].

O adesivo Araldite® 2015, nos ensaios DCB, apresentou valores de G_{IC} superiores aos apresentados pelo adesivo Araldite® AV138. Para o método CBBM obteve-se o valor médio de G_{IC} igual a 0,956 N/mm. Neste adesivo, para o método CCM obteve-se um valor superior em 0,52%, e para o método CBT obteve-se um valor inferior em 0,94%, ambos relativamente ao método CBBM. A justificação para esta variação é a mesma apresentada no adesivo anterior.

O adesivo SikaForce® 7752 foi o que, nos ensaios DCB, apresentou valores de G_{IC} mais elevados. Pelo método CBBM obteve-se um valor médio de G_{IC} igual a 4,518 N/mm. Esta diferença em relação aos restantes adesivos utilizados deve-se à superior ductilidade

apresentada por este adesivo. Fazendo a comparação com os restantes métodos, verifica-se ambos apresentam valores inferiores em relação ao CBBM. O método CBT apresenta um desvio de 2,19% e o método CCM apresenta um desvio 7,88%. Estas diferenças são justificadas pela mesma razão que nos adesivos anteriores.

Em função dos resultados obtidos nos três adesivos, verifica-se que o método mais fiável é o método CBBM, pois este considera a_{eq} (que contabiliza a ZPF). Os métodos CBT e CCM necessitam da medição do comprimento de fenda, que é realizada através de fotografias. O método CCM depende ainda do ajuste efetuado ao polinómio $C=f(a)$. Estes fatores podem levar a erros de leitura, justificando assim os desvios observados na obtenção do valor de G_{IC} .

Nos ensaios TDCB, com os valores de G_{IC} obtidos para cada um dos métodos, comprova-se o que tinha sido observado nos ensaios DCB, isto é, que o adesivo Araldite® AV138 é o mais frágil e que o adesivo SikaForce® 7752 é o mais dúctil. Verificou-se ainda que para este ensaio os métodos CCM e CBT obtiveram valores de G_{IC} superiores ao método SBT.

O adesivo Araldite® AV138, para método SBT apresentou um valor médio de G_{IC} igual a 0,161 N/mm. Quando comparado com os valores obtidos para os métodos CCM e CBT observa-se um desvio de 14,91% e 13,04%, respetivamente.

Para o adesivo Araldite® 2015, pelo método SBT obteve-se um valor médio de G_{IC} igual a 0,637 N/mm. Comparando o valor obtido pelo método SBT com os valores obtidos para os métodos CCM e CBT observa-se um desvio de 11,77% e 11,15%, respetivamente.

O adesivo SikaForce® 7752 como referido anteriormente, foi o adesivo que apresentou o valor de G_{IC} mais elevado. Para o método SBT obteve-se um valor médio de G_{IC} igual a 2,603 N/mm. Quando comparado com os valores obtidos para os métodos CCM e CBT observa-se um desvio de 10,07% e 10,99%, respetivamente.

No trabalho de Campilho et al. [12], obteve-se um valor de G_{IC} para o adesivo Araldite® AV138 de 0,2 N/mm. Comparando os valores de G_{IC} obtidos com os valores obtidos pelo autor da referência [12], observa-se que para o ensaio DCB existe uma variação de +19,68% (obtido pelo método CBBM), enquanto para o método TDCB existe uma variação de -24,22% (obtido pelo método SBT).

da Silva et al. [67] obtiveram um valor de G_{IC} para o adesivo Araldite® 2015 igual a 0,44 N/mm ($\pm 0,05$ N/mm). Este valor foi obtido através de um ensaio DCB e com o método CBBM. No ensaio realizado no trabalho exposto na referência [67], a espessura de adesivo usada foi de 0,2 mm e os substratos utilizados possuíam 290 mm de comprimento, 25 mm de largura e 12,7 mm de espessura. O valor de G_{IC} obtido na referência [67] é notoriamente inferior ao valor aqui obtido (0,956 N/mm). Esta diferença pode ser explicada pelo facto da diferença de espessura de adesivo utilizado, isto é, no presente trabalho foi utilizada uma espessura de 1 mm ao invés de 0,2 mm.

Esta diferença, num adesivo com alguma ductilidade, pode causar uma variação significativa do valor de G_{IC} [14].

No trabalho realizado por Faneco [68] é realizado um ensaio DCB de forma a obter o valor de G_{IC} para o adesivo SikaForce® 7752. Neste ensaio foram utilizados provetes de alumínio (6082-T651) com 140 mm de comprimento, 25 mm de largura e 3 mm de espessura e foi utilizada uma espessura de adesivo de 0,2 mm. Foi obtido um valor de G_{IC} igual a 2,29 N/mm. Em comparação com os valores obtidos no presente trabalho, verifica-se uma diferença de 49,31% (nos ensaios DCB) e de 12,03% (nos ensaios TDCB) sendo os valores obtidos neste trabalho superiores aos valores obtidos na referência [68].

3.1.4.4 Comparação de resultados pelos dois ensaios

De forma a obter os valores de G_{IC} , no ensaio DCB foram utilizados os métodos CBBM, CBT e CCM e no ensaio TDCB foram utilizados os métodos SBT, CBT e CCM. Os resultados obtidos para os ensaios DCB e TDCB são apresentados na Figura 113 e na Figura 114, respetivamente. As propriedades dos adesivos influenciam bastante a resistência de uma junta, mas a utilização de um adesivo mais rígido não significa um aumento da resistência da junta. Quando é utilizado um adesivo resistente, mas frágil, este atinge nas extremidades da junta uma tensão elevada, não permitindo uma boa distribuição dos esforços no interior dessa junta. Assim, a tensão de corte média de rotura irá ser muito baixa quando comparada com um adesivo dúctil e menos resistente.

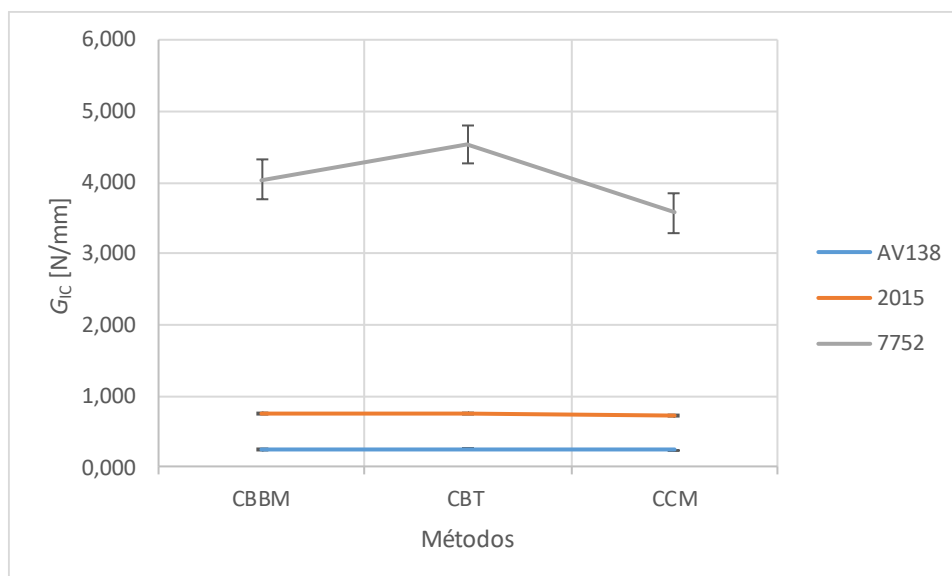


Figura 113 - Valores de G_{IC} obtidos pelo ensaio DCB

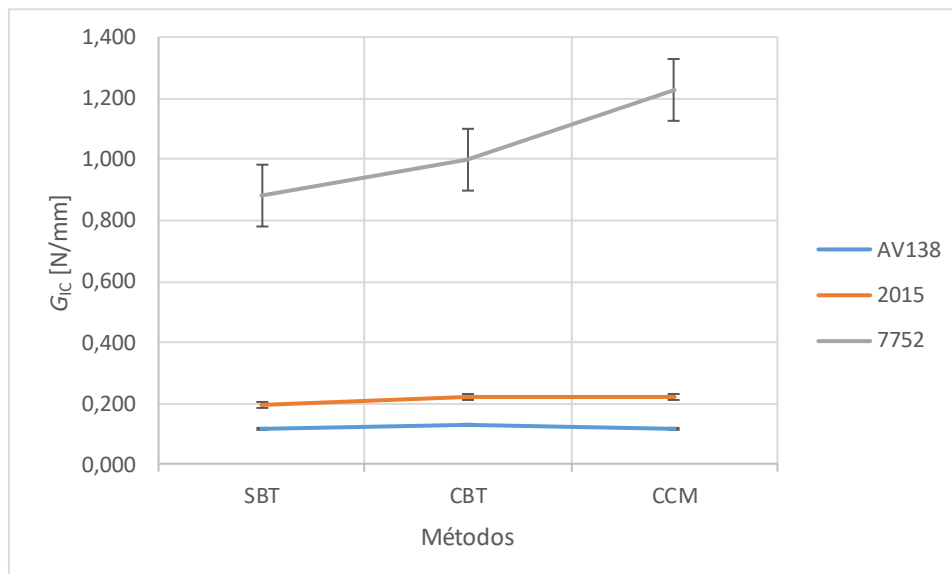


Figura 114 - Valores de G_{IC} obtidos pelo ensaio TDCB

Em ambos os tipos de ensaio foi usada a mesma espessura de adesivo com valor igual a 1 mm, e o valor de a_0 usado foi de 60 mm para o ensaio DCB e de 40 mm para o ensaio TDCB (sendo estes os valores típicos). A grande diferença foi a geometria dos provetes.

Analisando os resultados apresentados na Figura 113 e na Figura 114, pode-se concluir que o adesivo SikaForce® 7752 é o mais dúctil e que o adesivo Araldite® AV 138 é o mais frágil, enquanto o Araldite® 2015 apresenta um comportamento intermédio relativamente aos outros dois. Verifica-se que o valor de G_{IC} aumenta de acordo com a ductilidade do adesivo.

Realizando uma comparação direta entre os ensaios é possível verificar que o ensaio TDCB é o que produz resultados com menos variações. É possível constatar que para os mesmos adesivos, no ensaio DCB os valores obtidos para G_{IC} são superiores aos obtidos pelo ensaio TDCB. No ensaio TDCB nota-se que os métodos CBT e CCM apresentam valores próximos entre si, enquanto o método STB apresenta alguma discrepância. Esta discrepância pode ser justificada com possíveis questões relacionadas com a fabricação dos provetes e com o conservadorismo dos métodos de redução utilizados para o ensaio TDCB [38].

3.2 Trabalho numérico

Neste capítulo é abordada a análise numérica pelo MEF, recorrendo à ferramenta de simulação Abaqus®. Esta tem como principal objetivo a reprodução dos resultados obtidos experimentalmente. São inicialmente abordadas as condições de análise numérica, estimativa da lei coesiva em modo II, descritas as malhas e leis coesivas utilizadas. Será também apresentada uma análise de sensibilidade aos parâmetros

coesivos, no sentido de averiguar o efeito nas curvas $P-\delta$ dos parâmetros coesivos de cada um dos adesivos estudados.

3.2.1 Condições da análise numérica

A simulação foi realizada recorrendo ao *software* Abaqus®. Este *software* tem por base o MEF e possui um modulo integrado de MDC para prever o comportamento das juntas. A modelação das juntas foi feita a duas dimensões e em estado plano de deformação. Para a simulação, os aderentes de aço foram considerados como tendo um comportamento elástico do tipo isotrópico e foram utilizados elementos sólidos homogéneos. Para o adesivo foram utilizados elementos coesivos. Na camada do adesivo apenas foi considerado um elemento ao longo da espessura. Na análise numérica foram utilizadas malhas bastantes refinadas, tendo os elementos dos aderentes próximos da camada de adesivo dimensões de 0,5 mm por 0,5 mm. A malha dos provetes DCB (Figura 115) apresenta um maior refinamento na zona do adesivo e, nos aderentes, na proximidade da face interior, garantindo assim o maior refinamento nas zonas onde se esperam maiores gradientes de tensão.

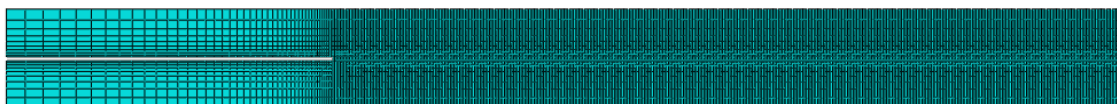


Figura 115 - Refinamento geral de malha do modelo utilizado nos provetes DCB

Na Figura 116 é mostrada em detalhe a malha na proximidade da pré-fenda, onde é possível verificar a variação no tamanho dos elementos referida anteriormente. A zona marcada a vermelho representa a camada de adesivo e possui elementos de 1 mm de altura por 0,5 mm de largura. Foi utilizado verticalmente um efeito de diminuição do tamanho dos elementos de malha (efeito *bias*), com a altura dos elementos a ser no máximo 3 mm e no mínimo 0,5 mm, e horizontalmente nos aderentes da esquerda para a direita com os elementos a possuírem no máximo de 5 mm e no mínimo de 0,5 mm.

As condições fronteira para os modelos DCB consistiram na fixação do nó da extremidade inferior do aderente inferior na extremidade esquerda do provete, enquanto no aderente superior se impôs uma restrição horizontal e deslocamento vertical no nó da extremidade superior.

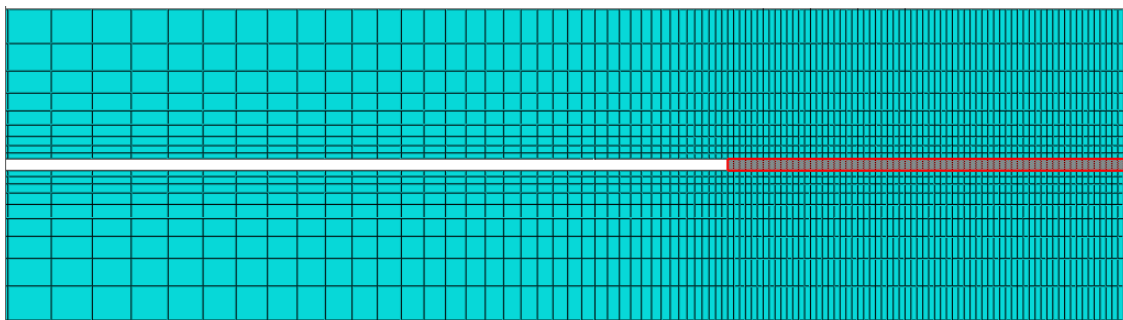


Figura 116 - Detalhe do refinamento de malha na proximidade da extremidade da fenda no provete DCB

A geometria do provete TDCB foi conseguida através da importação *sketch* que foi usado para o fabrico dos substratos no *software* Solidworks®. Na Figura 117 é apresentado o refinamento geral da malha utilizada nos provetes TDCB. Esta apresenta um maior refinamento na zona do adesivo e, nos aderentes, na proximidade da face interior.

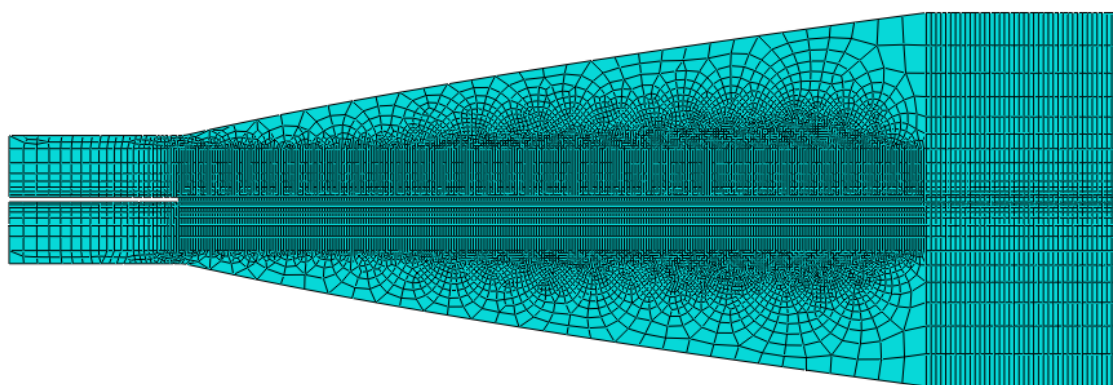


Figura 117 - Refinamento geral de malha do modelo utilizado nos provetes TDCB

Na Figura 118 é mostrado em detalhe a malha na proximidade da pré-fenda, onde é possível verificar a variação no tamanho dos elementos. É também mostrado em detalhe a malha da zona inclinada, que apresenta uma malha não estruturada devido ao declive característico destes provetes.

Foi utilizado verticalmente um efeito de diminuição do tamanho dos elementos de malha (efeito *bias*), nos aderentes na zona da pré-fenda, com os elementos a terem no máximo 3 mm e no mínimo 0,5 mm, e horizontalmente nos aderentes da esquerda para a direita com os elementos a possuírem no máximo de 3 mm e no mínimo de 0,5 mm de largura. Na zona triangular foram considerados elementos de tamanho aproximadamente 5 mm.

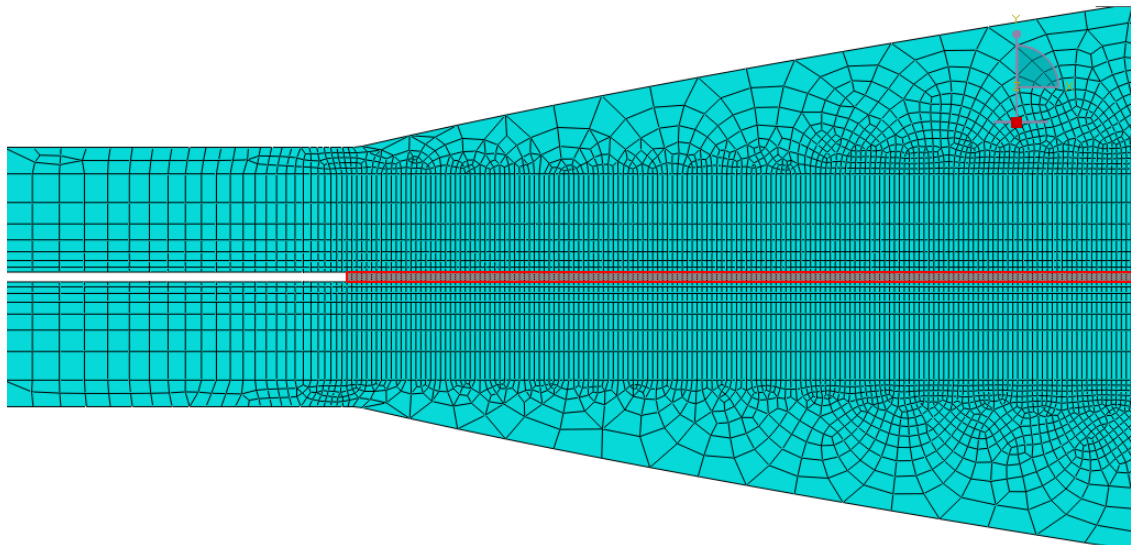


Figura 118 - Detalhe do refinamento de malha na proximidade da extremidade da fenda no provete DTCB

Na zona retangular (à direita na Figura 119) foi utilizado o efeito *bias* na direção vertical, com o tamanho dos elementos a variar entre um mínimo de 0,5 mm (próximo da camada de adesivo) e um máximo de 6 mm.

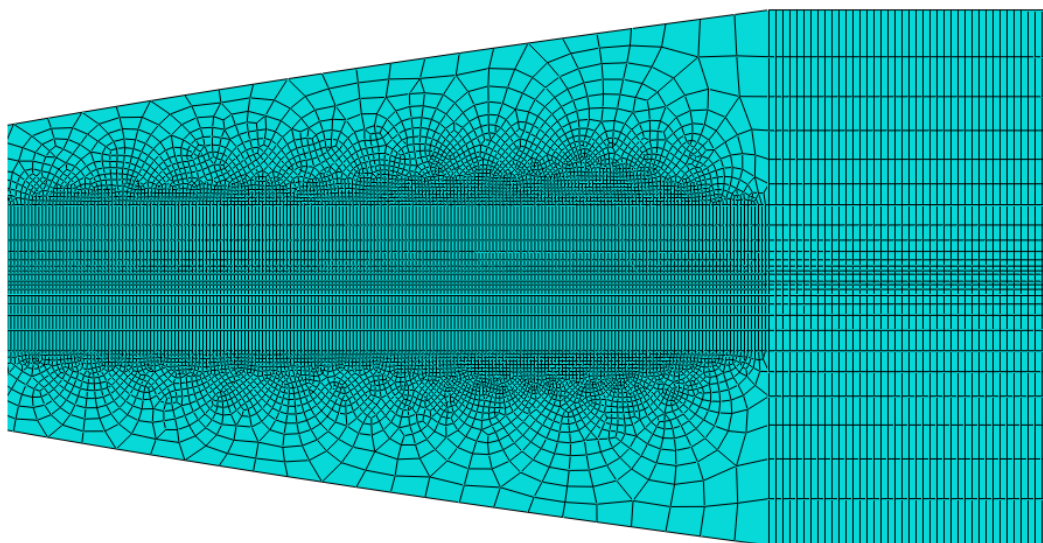


Figura 119 - Detalhe do refinamento de malha na zona de declive

As condições fronteira para os modelos TDCB foram idênticas às aplicadas nos modelos DCB, isto é, consistiram na fixação de um nó do aderente inferior na extremidade esquerda do provete e no aderente superior impôs-se restrição horizontal e deslocamento vertical do ponto da extremidade superior. A utilização de variações do número de elementos e do efeito *bias* na malha tem como objetivo diminuir o esforço do computador durante a simulação, permitindo assim a obtenção dos resultados em tempos inferiores.

3.2.2 Modelo de dano coesivo

3.2.2.1 Modelo de dano triangular

Em função do comportamento do tipo de material ou da interface em simulação, podem ser consideradas diferentes formas de leis coesivas de forma a obter resultados mais precisos [69]. Ao longo dos anos foram desenvolvidos diversos modelos, dos quais se destacam o triangular [70], linear parabólico [71], exponencial [72], polinomial [73] e trapezoidal [74]. Pela sua simplicidade, pelo reduzido número de parâmetros a serem determinados e ainda pelos resultados precisos para a maioria das condições reais, a lei triangular é a mais usada [75]. O modelo triangular 2D está representado na Figura 120, onde a lei de maiores dimensões representa as leis em modo puro, e a lei de menores dimensões representa a lei em modo misto.

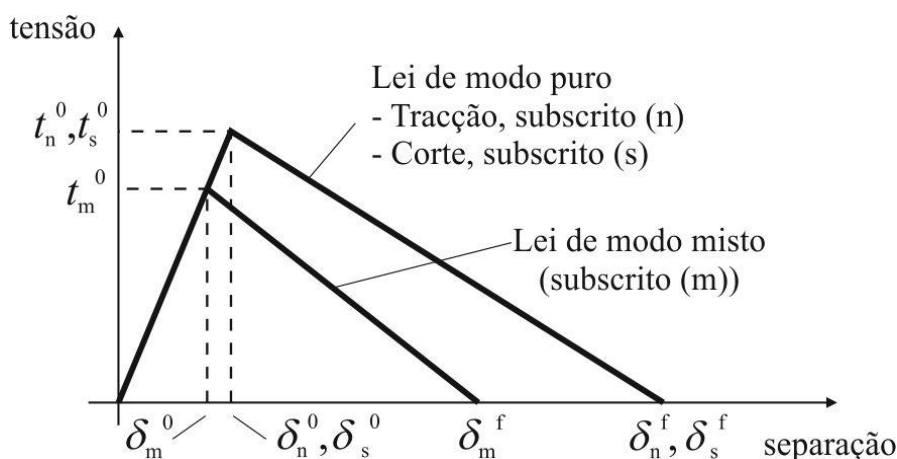


Figura 120 – Lei triangular do modelo de dano coesivo

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 tração e corte [43]. Os elementos coesivos estão sujeitos a uma componente normal de deformação e de uma deformação de corte que são determinadas recorrendo à cinemática do elemento. Em camadas finas, entre aderentes rígidos, as tensões de 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:

$$\mathbf{t} = \begin{Bmatrix} t_n \\ t_s \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} k_{nn} & k_{ns} \\ k_{ns} & k_{ss} \end{bmatrix} \cdot \begin{Bmatrix} \varepsilon_n \\ \varepsilon_s \end{Bmatrix} = \mathbf{K}_{\text{COH}} \boldsymbol{\varepsilon}. \quad (35)$$

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 [76]. Para uma formulação contínua de camadas finas, mais especificamente para ligações adesivas, adquire-se uma boa aproximação aos parâmetros de rigidez admitindo que:

$$K_{nn} = E, K_{ss} = G, K_{ns} = 0 \quad (36)$$

onde E corresponde ao módulo de elasticidade longitudinal e G ao módulo de elasticidade transversal. Considerando estes parâmetros, o modelo reproduz de forma fiel a deformação da camada de adesivo [43]. Em modo misto, a iniciação do dano pode ser definida por diferentes critérios, como o critério de tensão nominal quadrática, expresso pela seguinte expressão:

$$\left\{ \frac{\langle t_n \rangle}{t_n^0} \right\}^2 + \left\{ \frac{t_s}{t_s^0} \right\}^2 = 1 \quad (37)$$

$\langle \rangle$ são os parêntesis de Macaulay, que indicam que uma tensão normal de compressão não induz dano. O critério distingue-se pela sua precisão, já testada em trabalhos anteriores [77]. Quando t_m^0 é atingido (Figura 120), pela igualdade da equação (37), 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 120) é prevista por um critério linear energético, em função dos valores de G_{IC} e G_{IIC}

$$\frac{G_I}{G_{IC}} + \frac{G_{II}}{G_{IIC}} = 1. \quad (38)$$

3.2.2.2 Determinação das propriedades coesivas

De modo a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} . No passado foram publicados alguns estudos que por aproximação assumiam que estes parâmetros eram idênticos aos obtidos para ensaios de tração [78, 79]. No entanto, a restrição às deformações na camada do adesivo provocada pelos substratos neste tipo de geometrias e propagação de fenda tipicamente em modo misto levam a que haja uma diferença entre as propriedades do adesivo como material maciço e como camada fina [44, 80, 81]. Assim sendo, é recomendada a utilização de métodos de definição destes valores que traduzam o comportamento dos adesivos nas condições em que estes vão ser utilizados.

Nos subcapítulos que se seguem apresenta-se a definição dos parâmetros iniciais para cada um dos três adesivos, embora o valor de G_{IC} depois seja alterado em função do processo de ajuste levado a cabo para cada provete.

3.2.2.2.1 Araldite® AV138

Para a determinação das leis coesivas para o adesivo Araldite® AV138 foi utilizado um método inverso, descrito em detalhe no trabalho de Campilho et al. [82]. No entanto, devido à não existência de ensaios de caracterização à fratura, o procedimento seguido foi ligeiramente diferente ao mais indicado, e foi utilizado para o adesivo Araldite® 2015, conforme se exemplificará de seguida. Neste caso, foram utilizados os valores de resistência à tração e corte através de ensaios de tração e de corte (*Thick adherend shear test* (TAST)), respetivamente, para a definição de t_n^0 e t_s^0 . Estes valores foram utilizados para a construção de leis coesivas aproximadas, utilizando inicialmente valores típicos de G_{IC} e G_{IIC} para adesivos frágeis. As leis obtidas para tração e corte foram então utilizadas no modelo numérico para uma das geometrias testadas (a JSS com $L=20$ mm), e as leis do adesivo foram estimadas por ajuste das curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais, até obter valores de G_{IC} e G_{IIC} que conseguissem reproduzir os resultados experimentais. Os valores obtidos foram subsequentemente aplicados a todas as configurações testadas com resultados bastante satisfatórios. Os valores de E e G foram também determinados experimentalmente com ensaios de tração e ensaios de corte (TAST). No trabalho referido [56] conclui-se que os parâmetros obtidos reproduzem de forma fiel as propriedades do adesivo. A Tabela 27 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® AV138 numa lei coesiva em modo misto [56].

Tabela 27 – Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo Araldite® AV138 com t_A de 0,2 mm [56]

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
4890	1560	39,45	30,2	0,2	0,38

3.2.2.2.2 Araldite® 2015

Tal como no caso anterior, as leis coesivas da camada de adesivo do Araldite® 2015 foram determinadas num trabalho anterior [82] por um método inverso para a determinação de t_n^0 e t_s^0 . Num estudo anterior [83] é apresentada uma descrição mais detalhada desta metodologia, que basicamente consiste na determinação de G_{IC} e G_{IIC} através de ensaios DCB e ENF, respetivamente, usando um método ou teoria apropriados para a sua obtenção. O valor de G_{IC} ou G_{IIC} é então utilizado para construção de uma lei coesiva no modo puro correspondente, que inicialmente tem um valor aproximado de t_n^0 ou t_s^0 , estimado em função das características do adesivo. A lei coesiva obtida é utilizada no modelo numérico correspondente (DCB para tração ou ENF para corte), com as mesmas dimensões do modelo a ser simulado. O valor de t_n^0 ou t_s^0 é então definido utilizando um procedimento de ajuste entre as curvas $P-\delta$ numéricas e experimentais do teste respetivo de caracterização à fratura, para que a lei coesiva

estimada permita reproduzir fielmente o comportamento observado da camada de adesivo.

Tabela 28 – Parâmetros coesivos em tracção e corte para uma camada de adesivo Araldite® 2015 com t_A de 0,2 mm [83]

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
1850	650	21,63	17,9	0,43	4,7

A Tabela 28 apresenta os parâmetros utilizados para simular a camada de adesivo Araldite® 2015 numa lei coesiva em modo misto [83]. Os valores de E e G foram determinados experimentalmente com ensaios de adesivo maciço [84] e ensaios TAST, respetivamente [53].

3.2.2.2.3 Sikaforce® 7752

O processo de obtenção de propriedades coesivas para o adesivo Sikaforce® 7752 seguiu um processo algo idêntico ao utilizado para o Araldite® 2015. De facto, para a determinação da lei coesiva ao corte, foi seguido um método inverso idêntico, correspondente à determinação do valor de G_{IIC} por ensaio de fractura ENF, seguido de ajuste iterativo manual para a estimativa de t_s^0 [85]. Os valores utilizados neste trabalho são os valores médios de t_s^0 e G_{IIC} obtidos na referência [85], cujo desvio entre provetes foi bastante reduzido, traduzindo a repetibilidade dos ensaios efectuados. Por outro lado, para a lei coesiva em tracção, devido à inexistência, até à data, de procedimento inverso, foi seguido um processo distinto. O valor de G_{IC} foi obtido por ensaios de fractura DCB [86], nomeadamente o valor médio de uma série de ensaios. O valor de t_n^0 foi aproximado ao valor médio de resistência à tracção de provetes maciços ensaiados no mesmo trabalho [49]. Como foi definido em trabalhos anteriores que, no caso particular de solicitação à tracção, o valor de t_n^0 não tem influência digna de registo para variações de t_n^0 até 25% do valor obtido por método inverso (variação para os 2 sentidos) [49], não foi considerado relevante neste trabalho a realização do dito procedimento. Os valores de E e G foram obtidos experimentalmente com ensaios de adesivo maciço e ensaios de corte (TAST) [86]. A Tabela 29 mostra os valores utilizados nos modelos numéricos para simular a camada de adesivo Sikaforce® 7752 numa lei coesiva em modo misto.

Tabela 29 - Parâmetros coesivos em tração e corte para uma camada de adesivo SikaForce® 7752 com t_A de 0,2 mm

E [MPa]	G [MPa]	t_n^0 [MPa]	t_s^0 [MPa]	G_{IC} [N/mm]	G_{IIC} [N/mm]
493,81	37,49	12,25	10,50	2,36	5,56

3.2.3 Estimativa da lei coesiva em modo II

Com as condições anteriormente referidas, foram realizados os ensaios numéricos de forma a obter uma lei coesiva do comportamento à tração, dos três adesivos testados.

Os valores de G_{IC} obtidos experimentalmente pelo método CBBM e STB foram usados como *input* nos ensaios numéricos dos modelos DCB e TDCB, respetivamente, para posteriormente efetuar a comparação dos resultados experimentais e numéricos e assim obter a lei coesiva respetiva a cada ensaio.

3.2.3.1 Ensaio Double-Cantilever Beam

Neste subcapítulo vão ser apresentadas as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente e experimentalmente para o ensaio DCB. Para os modelos DCB foi considerada uma largura, w , de 24,8 mm e foram utilizados os valores de G_{IC} obtidos pelo método CBBM como input para a simulação. A validação das leis coesivas vai consistir na comparação das curvas $P-\delta$ numéricas com as experimentais.

3.2.3.1.1 Araldite® AV138

A Tabela 30 apresenta os valores de entrada em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 30 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com Araldite® AV138

Provete	E (GPa)	G_{IC} (N/mm)
1	210	0,176
2	210	0,305
3	210	0,228
4	210	0,284
5	210	0,252

A Figura 121 e a Figura 122 mostram as curvas $P-\delta$ numérica e experimental do provete 1 e provete 5, respetivamente.

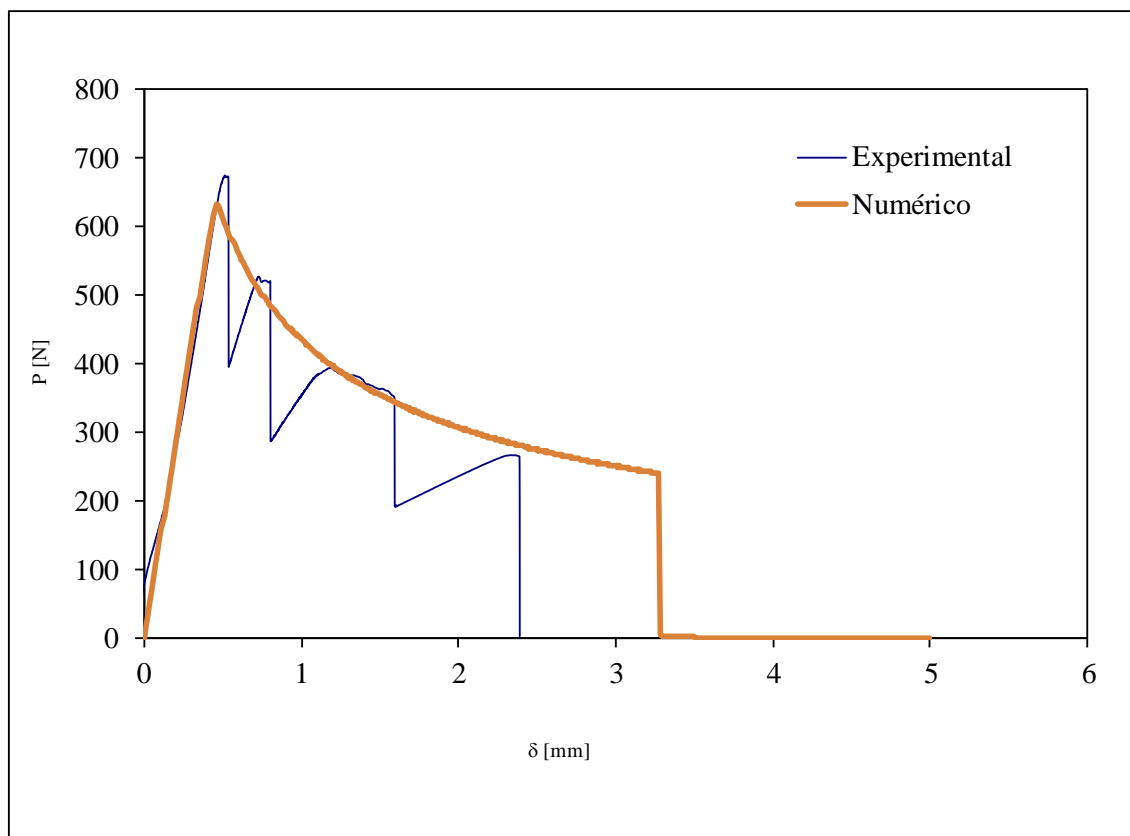


Figura 121 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio DCB para o provete 1 colado com o adesivo Araldite® AV138

Globalmente verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e experimentais. Verifica-se que as curvas P - δ obtidas numericamente reproduzem de forma bastante satisfatória as curvas experimentais de todos os provetes. Em função dos valores obtidos, considera-se que as leis coesivas obtidas representam de forma fiel o comportamento do adesivo Araldite® AV138. No entanto, numericamente o deslocamento de rotura é bastante superior ao experimental, o que se considera ocorrer pois experimentalmente ocorre rotura prematura devido a efeitos experimentais. Os gráficos apresentados representam a generalidade dos resultados obtidos.

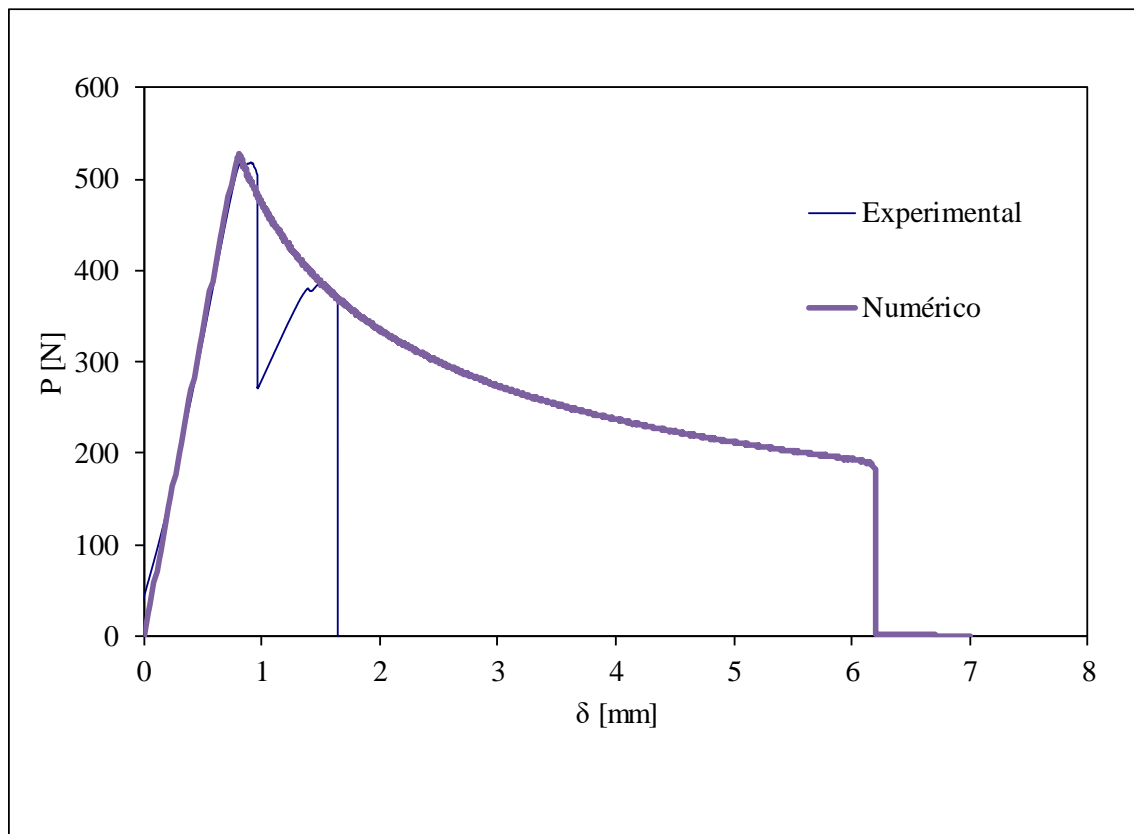


Figura 122 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio DCB para o provete 5 colado com o adesivo Araldite® AV138

3.2.3.1.2 Araldite® 2015

A Tabela 31 apresenta os valores de entrada em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 31 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com Araldite® 2015

Provete	E (GPa)	G_{IC} (N/mm)
1	210	0,623
2	210	1,200
3	210	1,035
4	210	1,104
5	210	0,817

A Figura 123 e a Figura 124 mostram as curvas P - δ numérica e experimental do provete 1 e provete 4, respetivamente.

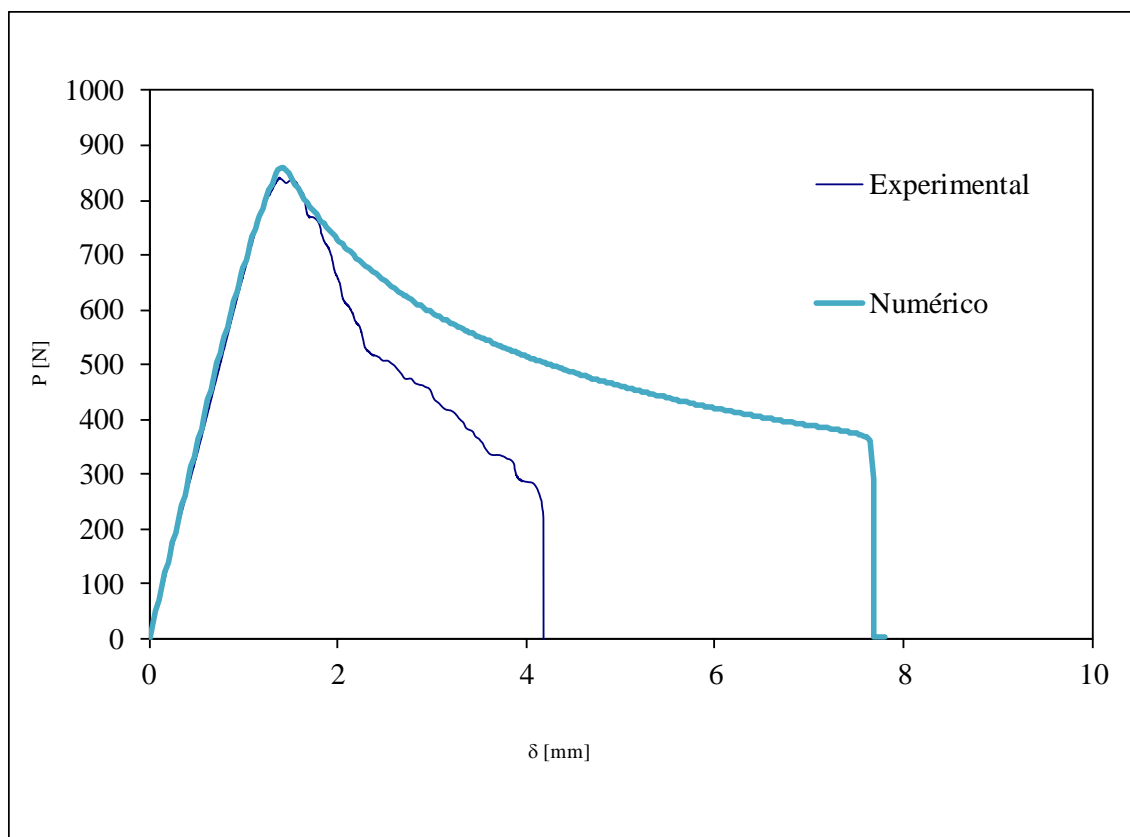


Figura 123 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio DCB para o provete 1 colado com o adesivo Araldite® 2015

Realizando a comparação entre as curvas P - δ experimentais e numéricas é possível verificar uma boa concordância no que à rigidez diz respeito. É possível verificar que nas curvas experimentais ocorre propagação instável de fenda a partir de um dado deslocamento, o que faz com que o deslocamento de rotura seja bastante inferior ao numérico. As curvas apresentadas representam a generalidade dos resultados obtidos para o adesivo Araldite® 2015.

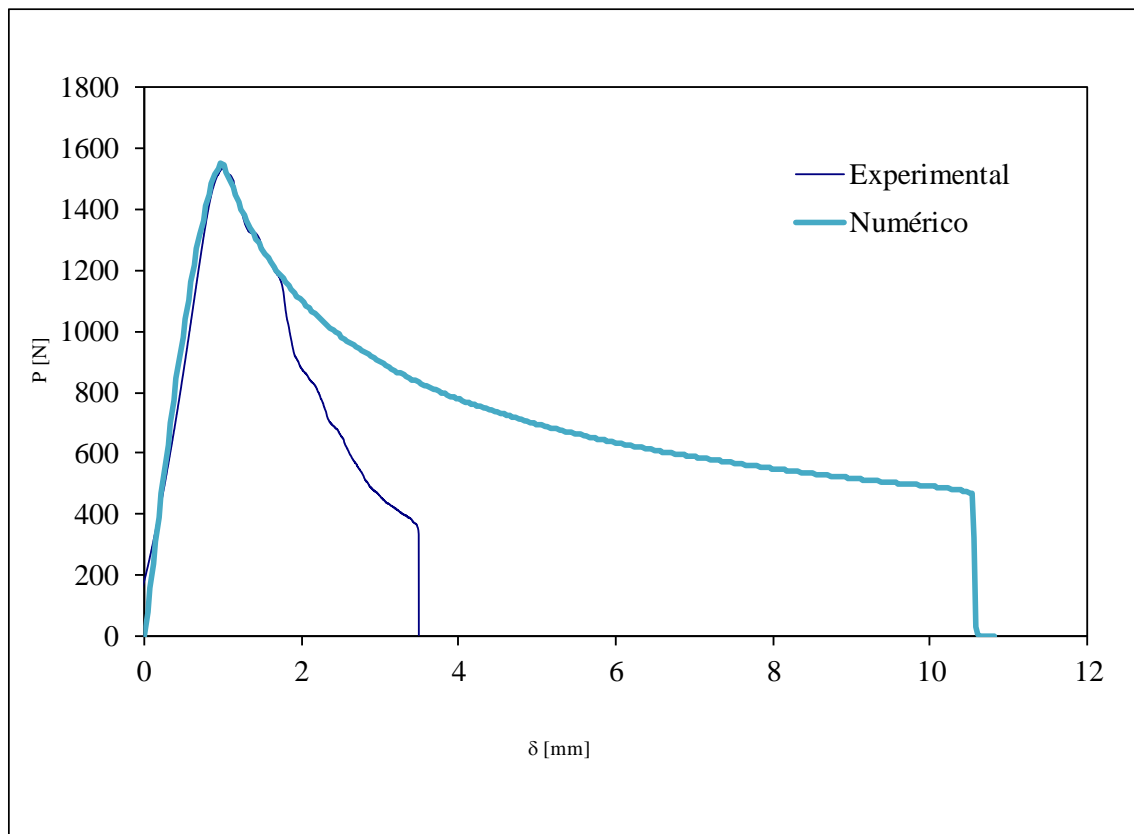


Figura 124 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio DCB para o provete 4 colado com o adesivo Araldite® 2015

3.2.3.1.3 Sikaforce® 7752

A Tabela 32 apresenta os valores de entrada em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo SikaForce® 7752.

Tabela 32 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com SikaForce® 7752

Provete	E (GPa)	G_{IC} (N/mm)
1	210	4,695
2	210	4,589
3	210	3,579
4	210	5,130
5	210	4,594

A Figura 125 e a Figura 126 mostram as curvas P - δ numérica e experimental do provete 4 e provete 5, respetivamente.

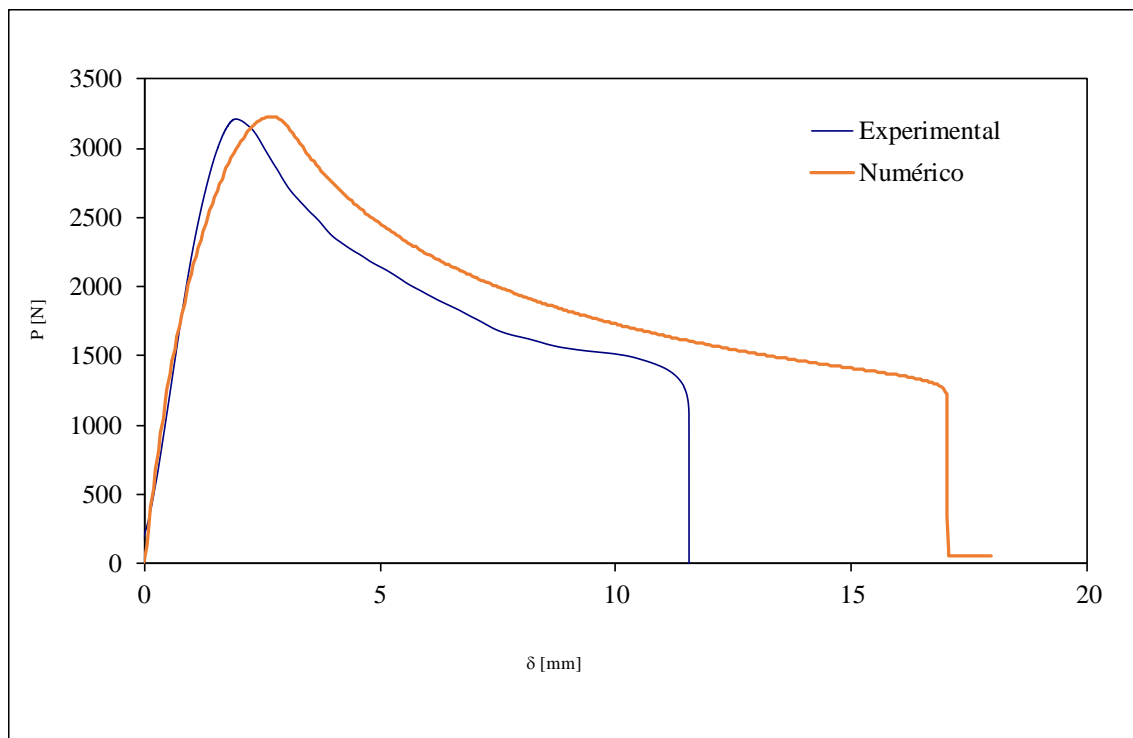


Figura 125 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio DCB para o provete 4 colado com o adesivo SikaForce® 7752

Globalmente verificou-se uma boa concordância, apesar das curvas referentes aos resultados numéricos apresentarem uma rigidez mais baixa. Esta diferença deve-se à utilização de uma lei coesiva triangular para modelar um adesivo marcadamente dúctil, o que se traduziu num amaciamento prematuro antes do início da propagação da fenda. As curvas apresentadas representam a generalidade dos resultados obtidos para o adesivo SikaForce® 7752.

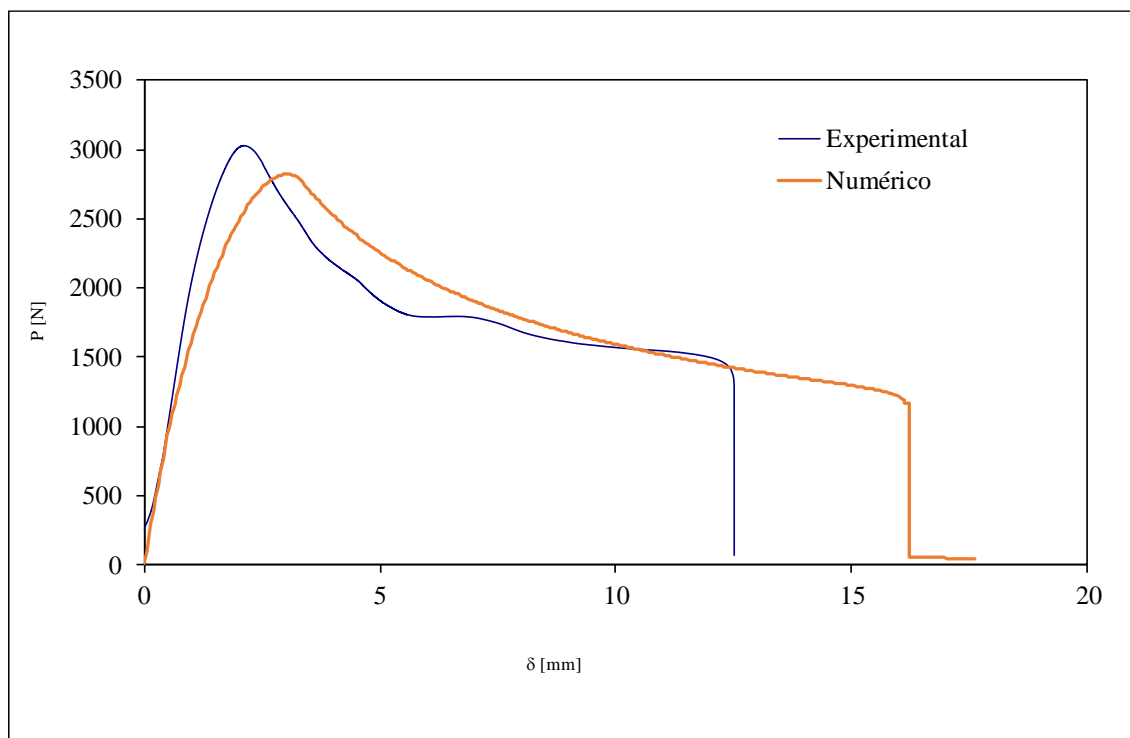


Figura 126 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio DCB para o provete 5 colado com o adesivo SikaForce® 7752

3.2.3.2 Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam

Neste subcapítulo vão ser apresentadas as curvas P - δ obtidas numericamente e experimentalmente para o ensaio TDCB. Para os modelos TDCB foi considerada uma largura, w , de 25,4 mm e foram utilizados os valores de G_{IC} obtidos pelo método CBT como input para a simulação. Foram utilizados os valores obtidos pelo método CBT em detrimento dos valores obtidos pelo método SBT, pois se concluiu que o método SBT é algo conservativo no que diz respeito à estimativa dos valores de G_{IC} [25]. A validação das leis coesivas vai consistir na comparação das curvas P - δ numéricas com as experimentais.

3.2.3.2.1 Araldite® AV138

A Tabela 33 apresenta os valores de entrada em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo Araldite® AV138.

Tabela 33 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com Araldite® AV138

Provete	E (GPa)	G_{IC} (N/mm)
1	210	0,193
2	210	0,177
3	210	0,228
4	210	0,133
5	210	0,178

A Figura 127 e a Figura 128 mostram as curvas P - δ numérica e experimental do provete 1 e provete 2, respetivamente.

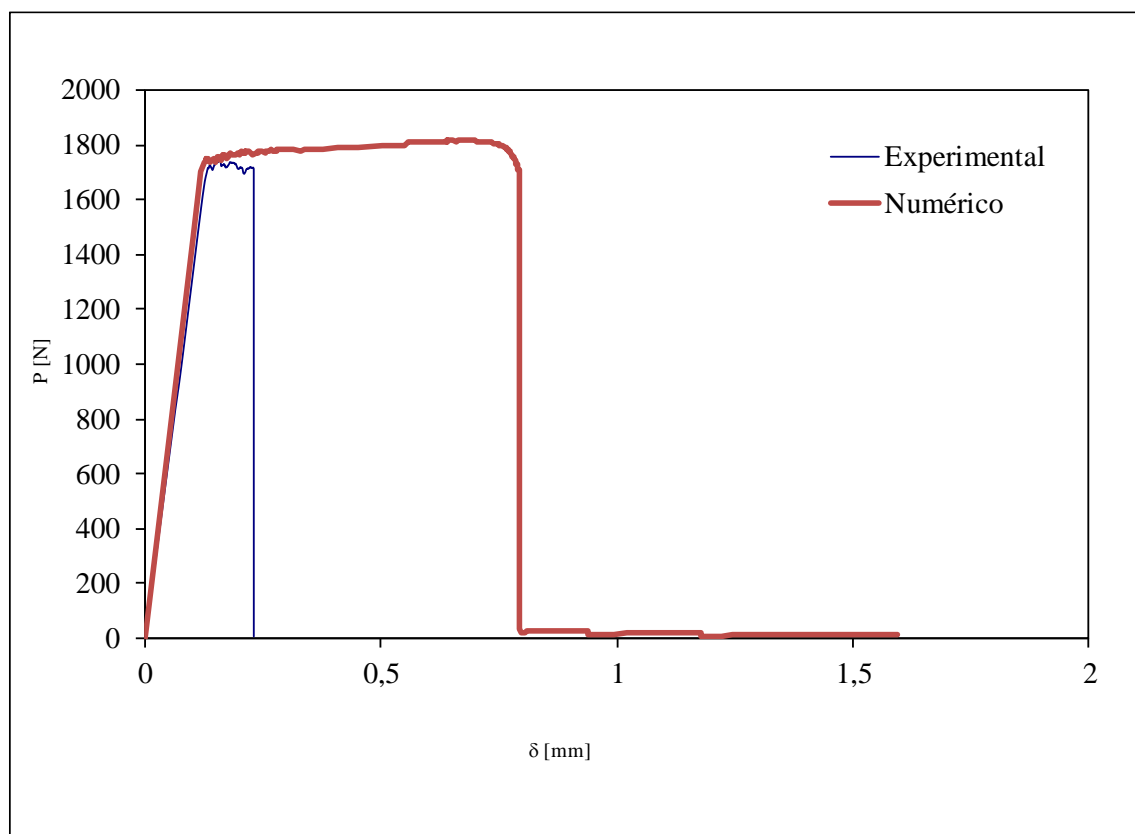


Figura 127 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio TDCB para o provete 1 colado com o adesivo Araldite® AV138

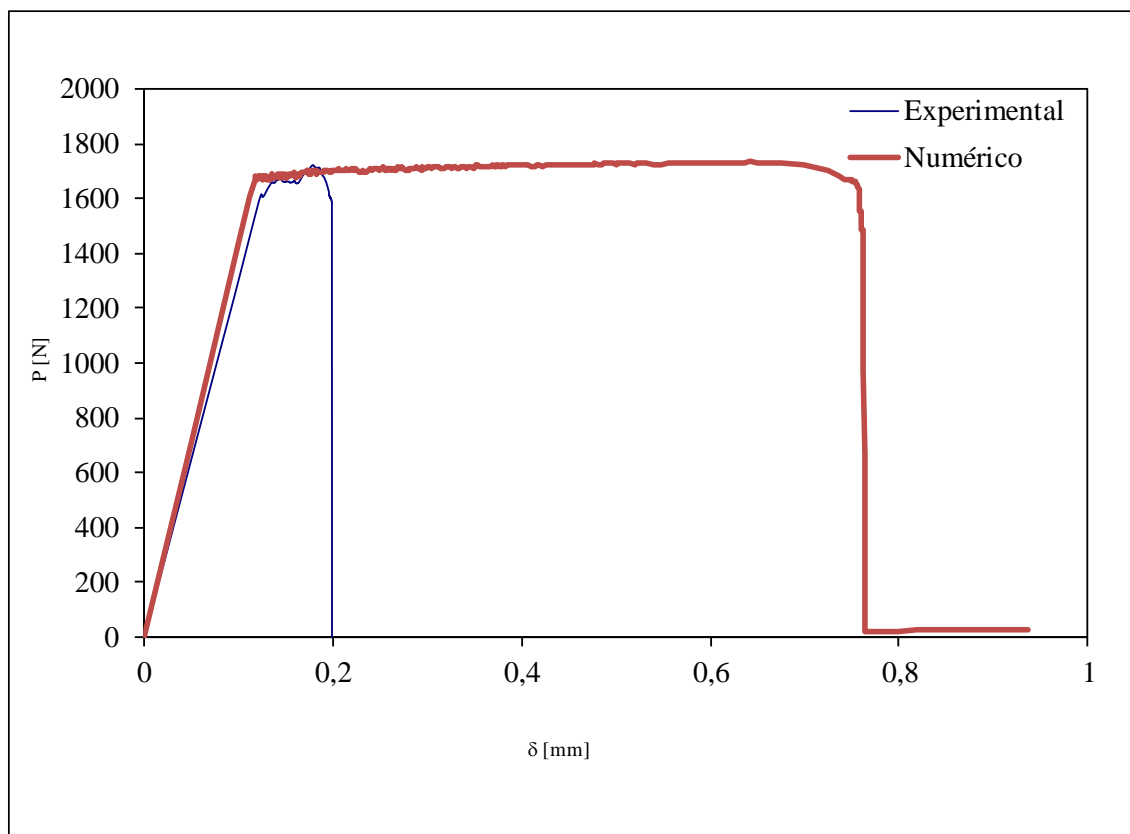


Figura 128 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio TDCB para o provete 2 colado com o adesivo Araldite® AV138

Globalmente verificou-se uma boa concordância na rigidez inicial entre os resultados numéricos e os experimentais. Evidencia-se que nas curvas P - δ experimentais ocorre ruptura prematura. Isto deve-se sobretudo a algum efeito experimental ocorrido durante o ensaio. As curvas apresentadas representam a generalidade dos resultados obtidos para o adesivo Araldite® AV138.

3.2.3.2.2 Araldite® 2015

A Tabela 34 apresenta os valores de entrada em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo Araldite® 2015.

Tabela 34 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com Araldite® 2015

Provete	E (GPa)	G_{IC} (N/mm)
1	210	0,663
2	210	0,731
3	210	0,703
4	210	0,716
5	210	0,729

A Figura 129 e a Figura 130 mostram as curvas P - δ numérica e experimental do provete 1 e provete 3, respetivamente.

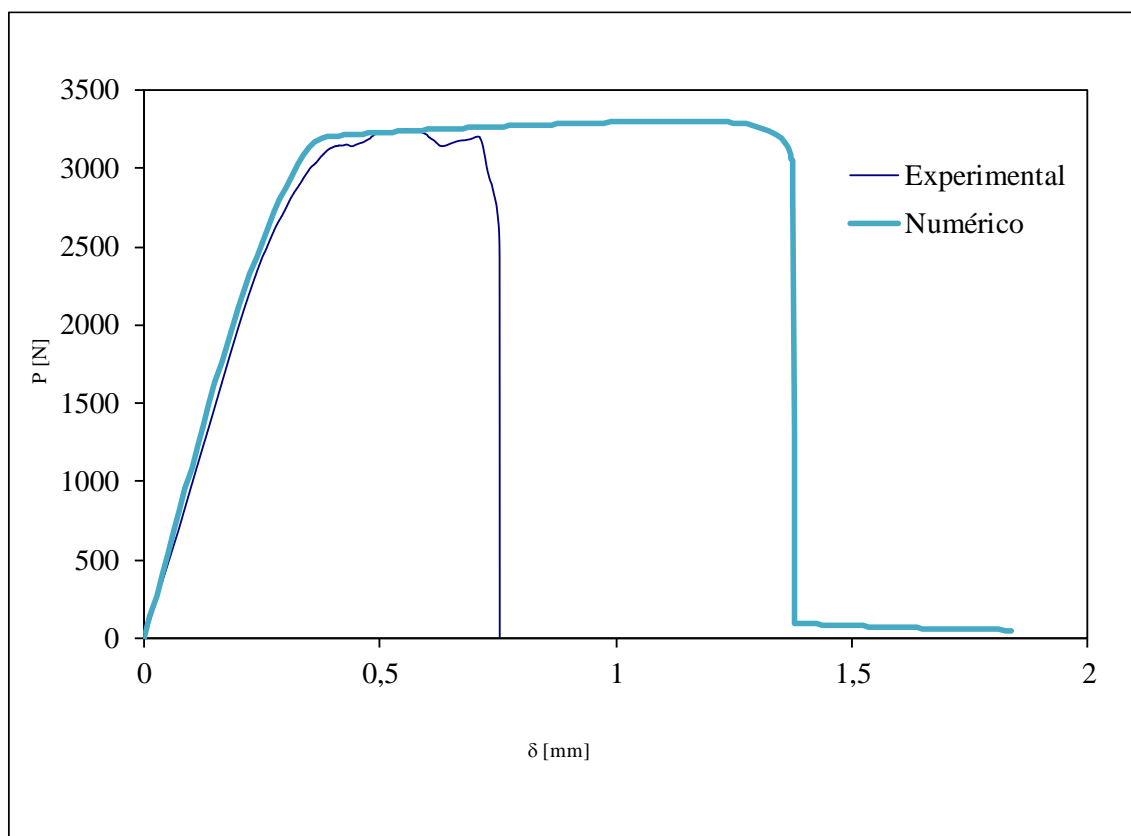


Figura 129 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio TDCB para o provete 1 colado com o adesivo Araldite® 2015

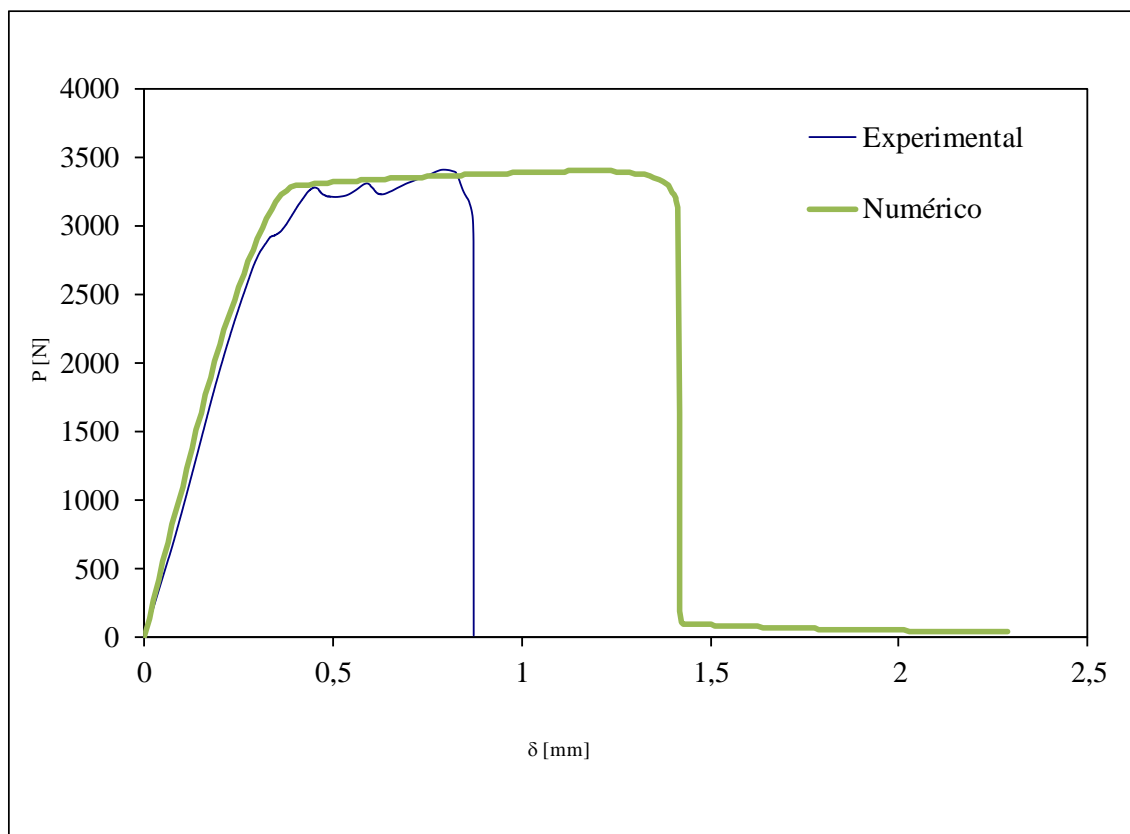


Figura 130 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio TDCB para o provete 4 colado com o adesivo Araldite® 2015

De forma geral observou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais, em termos de rigidez. Verifica-se uma progressão de fenda instável na curva P - δ experimental do provete 4. Para todos os provetes verificou-se a ocorrência de rotura prematura nos ensaios experimentais. Esta rotura prematura pode dever-se a algum efeito experimental corrido durante o ensaio. As curvas aqui apresentadas representam o comportamento dos restantes provetes.

3.2.3.2.3 Sikaforce® 7752

A Tabela 35 apresenta os valores de entrada em cada um dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com o adesivo SikaForce® 7752.

Tabela 35 - Valores de entrada dos modelos numéricos das juntas DCB coladas com SikaForce® 7752

Provete	E (GPa)	G_{IC} (N/mm)
1	210	2,887
2	210	2,716
3	210	3,036
4	210	2,983
5	210	2,825

A Figura 131 e a Figura 132 mostram as curvas P - δ numérica e experimental do provete 1 e provete 5, respetivamente.

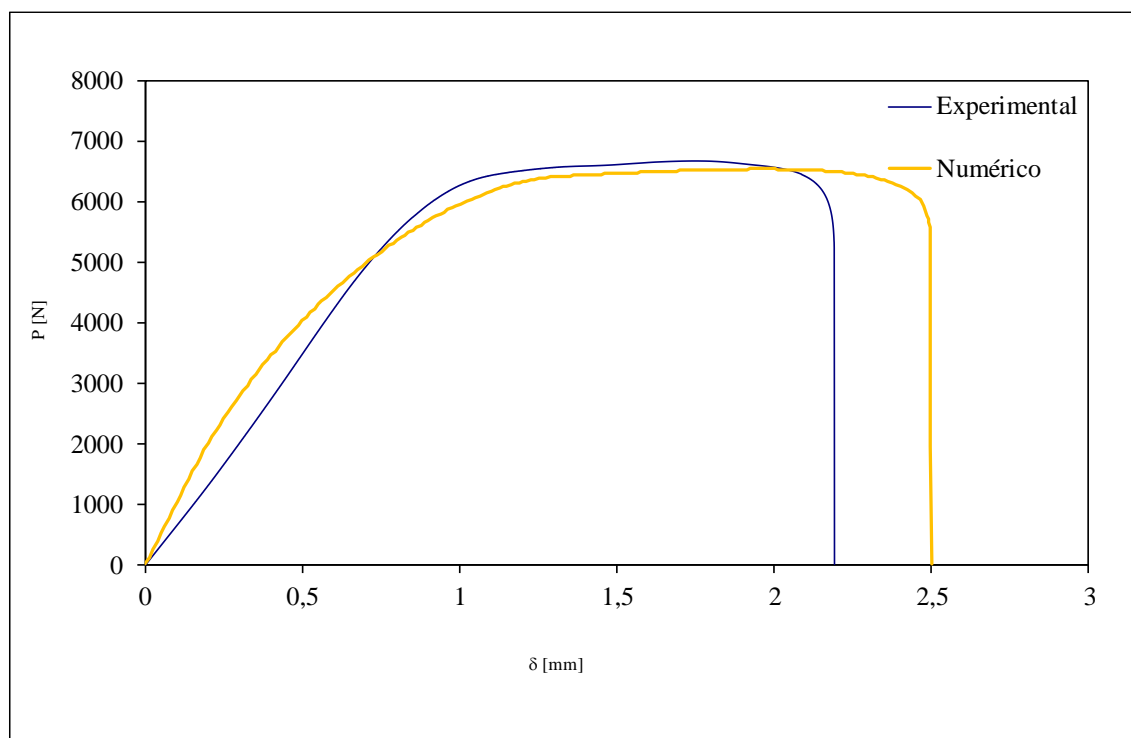


Figura 131 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio TDCB para o provete 1 colado com o adesivo SikaForce® 7752

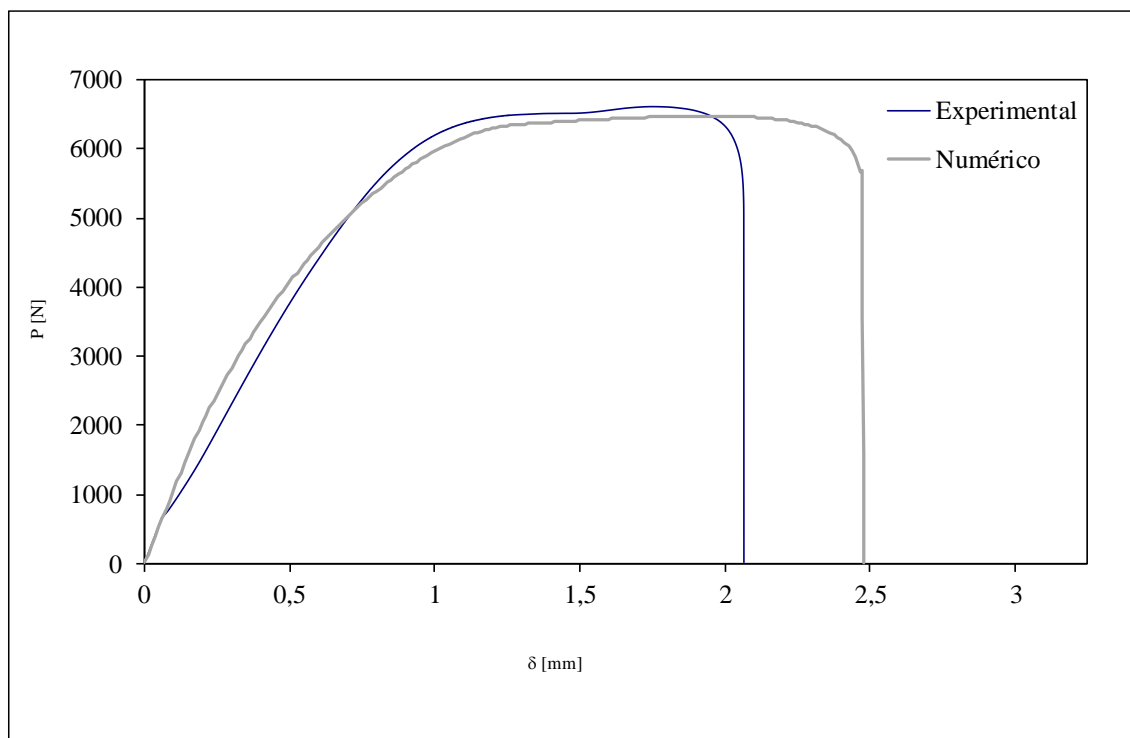


Figura 132 - Curva P - δ experimental e numérica do ensaio TDCB para o provete 5 colado com o adesivo SikaForce® 7752

De forma geral verificou-se uma boa concordância entre os resultados numéricos e os experimentais. Verifica-se que para as curvas P - δ experimentais a rotura ocorre primeiro, sendo a diferença é mínima. Observa-se também que as curvas P - δ numéricas apresentam uma rigidez inicial superior à das curvas experimentais. Esta diferença deve-se à utilização de uma lei coesiva triangular para modelar um adesivo marcadamente dúctil, o que se traduziu num amaciamento prematuro antes do início da propagação da fenda.

3.2.4 Análise da adequabilidade dos métodos de determinação de G_{IC}

Com a finalidade de analisar a adequabilidade dos métodos de determinação de G_{IC} realizou-se um estudo numérico, considerando os três adesivos estruturais utilizados. Os valores de a_0 e G_{IC} empregues nos modelos foram os valores típicos. Isto é, os valores tomados para a_0 para os modelos DCB e TDCB foram 60 e 40 mm, respetivamente. Os valores de G_{IC} utilizados neste estudo, para cada tipo de ensaio e provete, foram os valores médios obtidos anteriormente.

3.2.4.1 Ensaio Double-Cantilever Beam

Na Figura 133 encontram-se as curvas P - δ correspondentes ao modelo DCB, para os três adesivos estudados, com as propriedades anteriormente referidas.

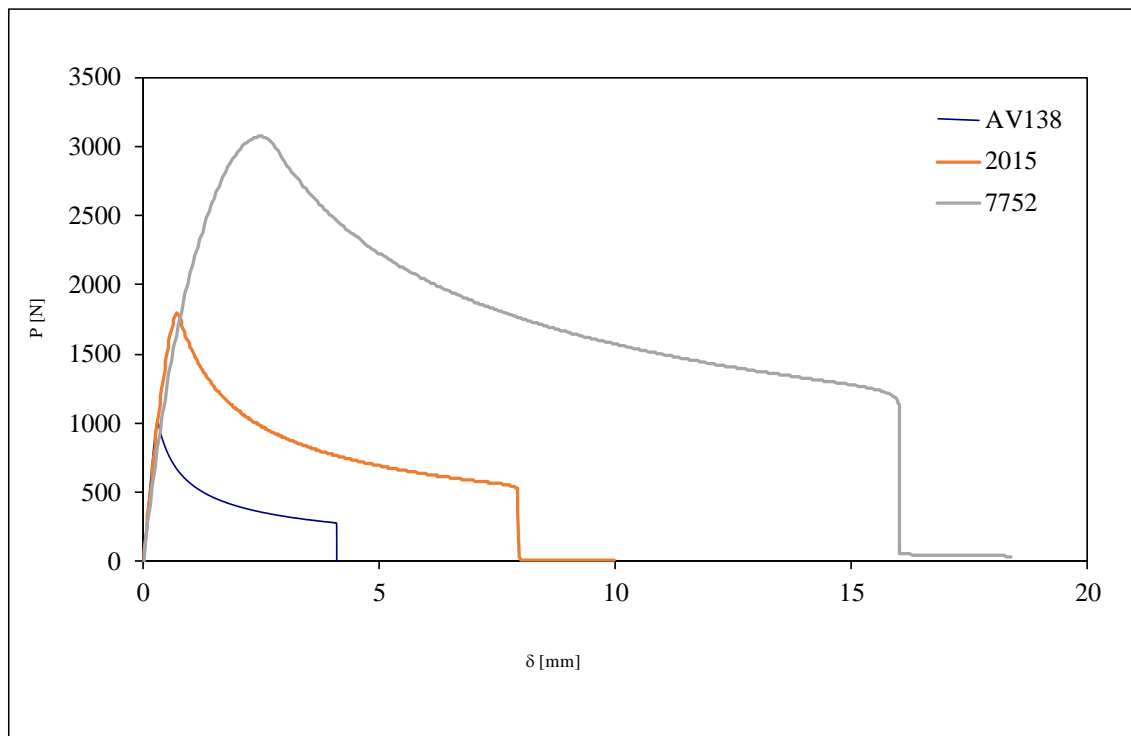


Figura 133 – Curvas P - δ para o ensaio DCB com as propriedades típicas dos três adesivos utilizados

Através da Figura 133 é possível verificar que para os três adesivos as curvas apresentam um forma idêntica, diferindo de acordo com a ductilidade de cada adesivo. Fazendo a comparação entre as curvas obtidas na Figura 133 com as obtidas para cada provete de acordo com o adesivo utilizado, é possível verificar que os valores da carga máxima ($P_{m\acute{a}x}$) aqui obtidos se aproximam dos valores obtidos no subcapítulo 3.2.3.1, à exceção do valor de $P_{m\acute{a}x}$ para o adesivo Araldite® AV138 que aqui apresenta um valor superior.

Na Figura 134, Figura 135 e Figura 136, estão representadas as curvas-R obtidas numericamente, para o ensaio DCB, com a utilização das propriedades típicas para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 7752 e SikaForce® 7752, respetivamente.

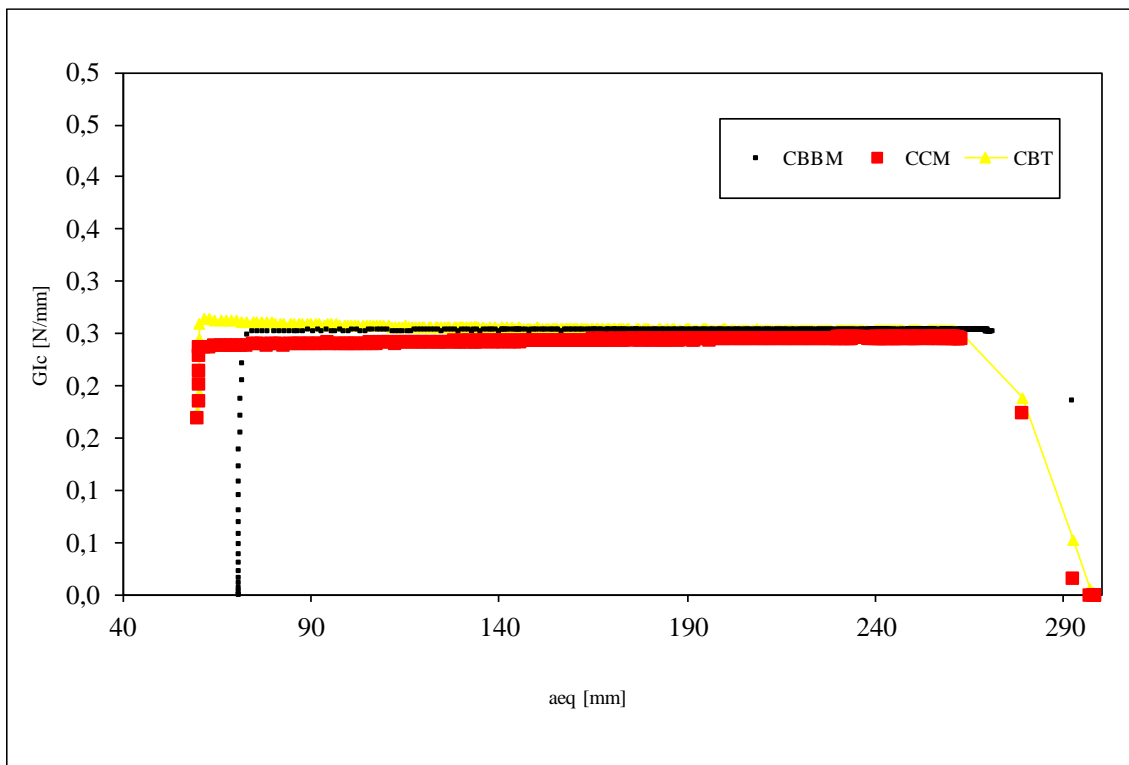


Figura 134 - Curva-R do ensaio DCB para o adesivo Araldite® AV138 com a utilização das propriedades típicas

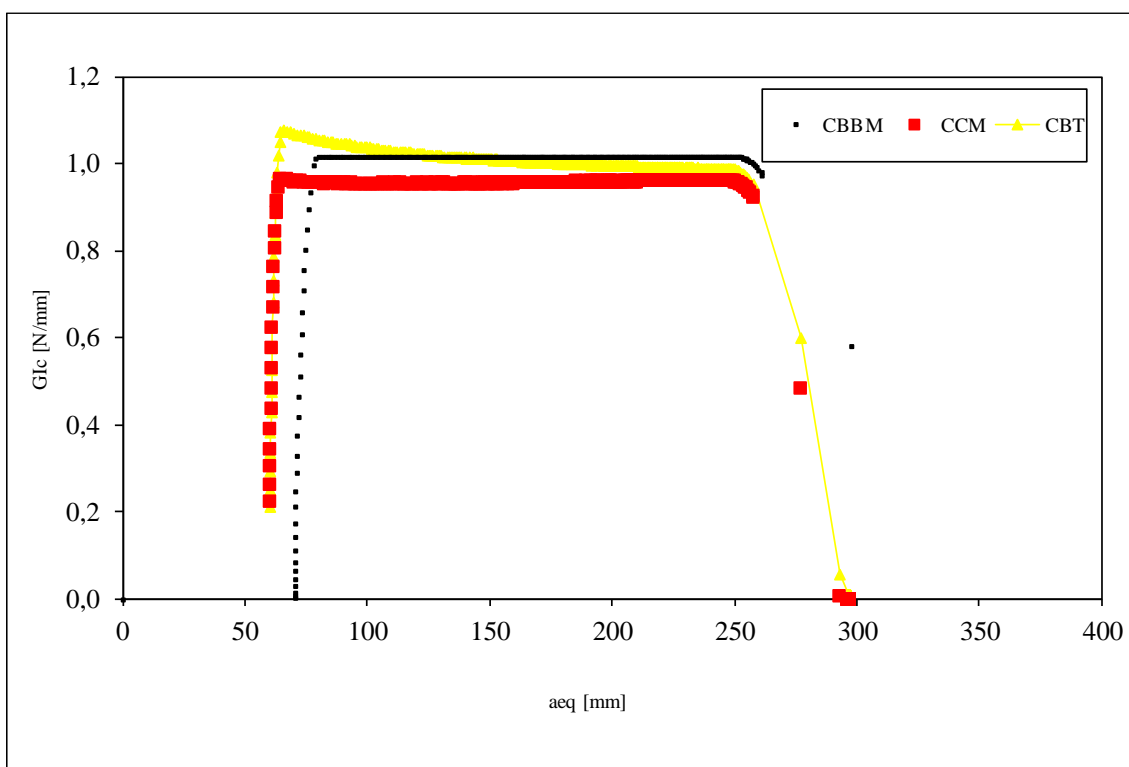


Figura 135 - Curva-R do ensaio DCB para o adesivo Araldite® 2015 com a utilização das propriedades típicas

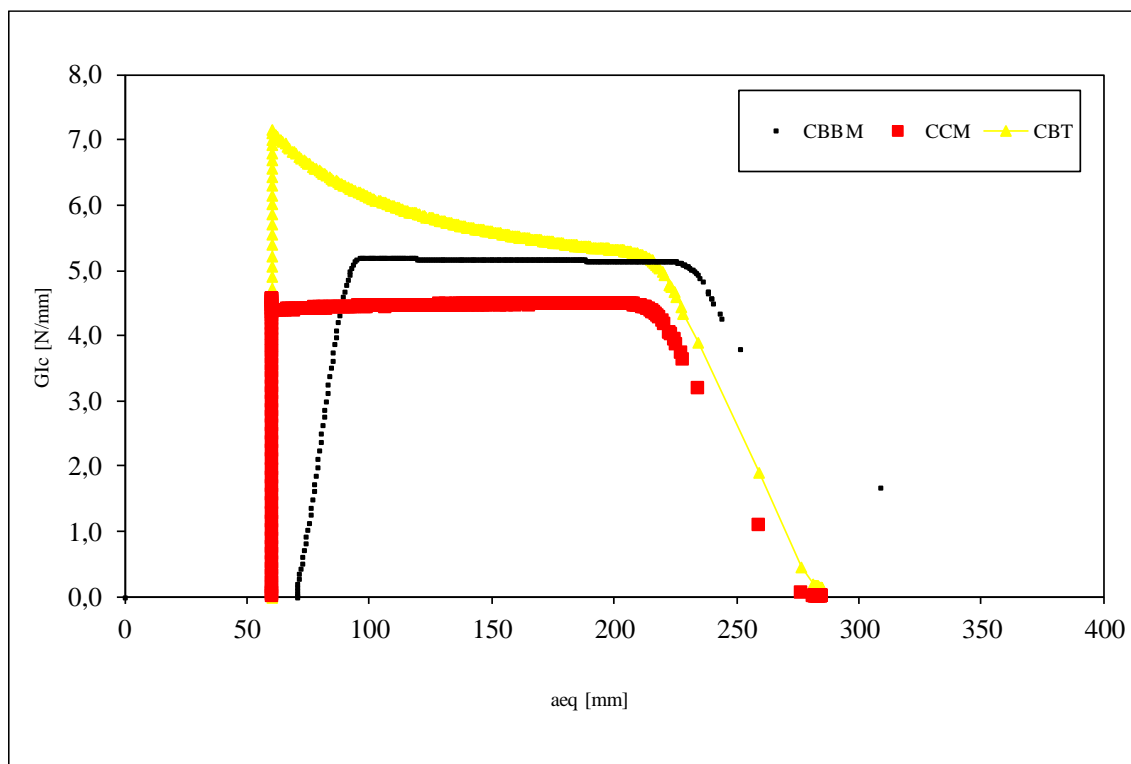


Figura 136 - Curva-R do ensaio DCB para o adesivo SikaForce® 7752 com a utilização das propriedades típicas

Ao analisar as curvas-R observa-se que para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015 a propagação da fenda ocorre a valores de G_I constantes e que os patamares se encontram em concordância para os três métodos utilizados (CBBM, CCM e CBT). Para o adesivo SikaForce® 7752 verifica-se que não existe concordância entre os patamares e que o método CBT é o que apresenta o valor de G_{Ic} mais alto.

3.2.4.2 Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam

As curvas $P-\delta$ correspondentes ao modelo TDCB, com as propriedades anteriormente referidas, encontram-se na Figura 137. Realizando a comparação entre as curvas da Figura 137 com as curvas obtidas anteriormente para cada um dos adesivos, é possível verificar que estas traduzem o comportamento geral para cada um dos adesivos. As curvas experimentais apresentaram rotura prematura. Em relação ao valor de $P_{máx}$ aqui obtido verifica-se que para os três adesivos os valores obtidos são de acordo com os valores obtidos no subcapítulo 3.2.3.2.

As curvas-R obtidas numericamente, para o ensaio TDCB, com a utilização das propriedades típicas para o adesivo Araldite® AV138, Araldite® 7752 e SikaForce® 7752, encontram-se na Figura 138, Figura 139 e na Figura 140, respetivamente.

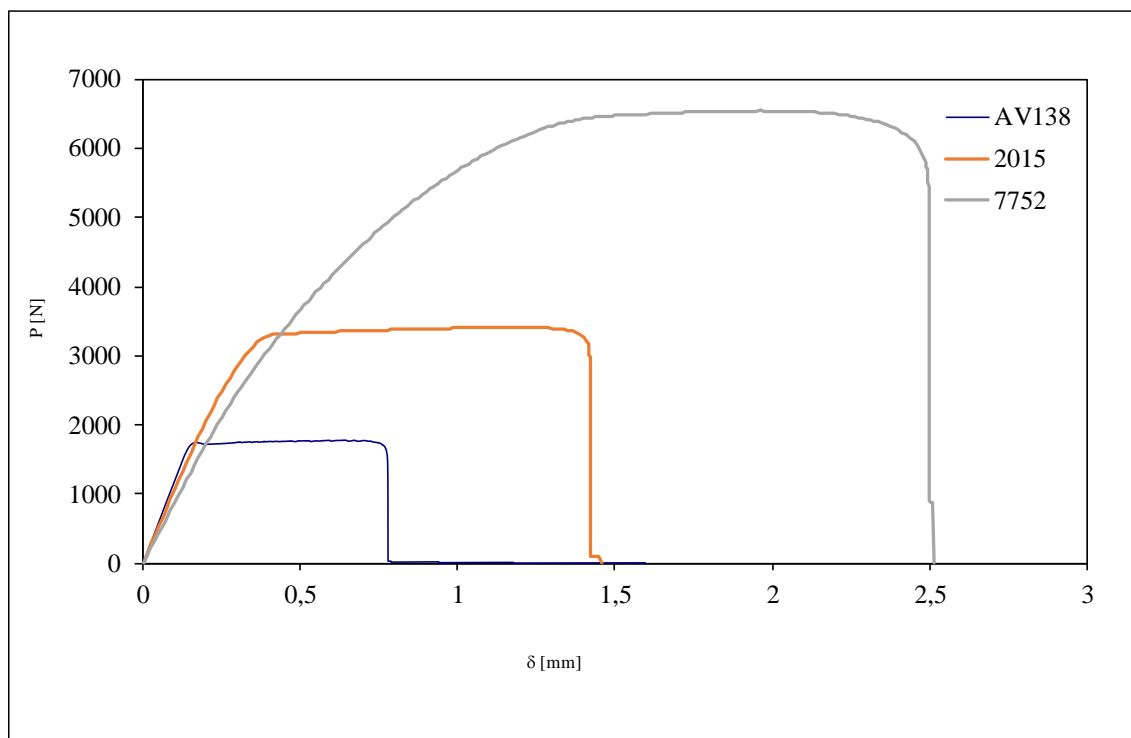
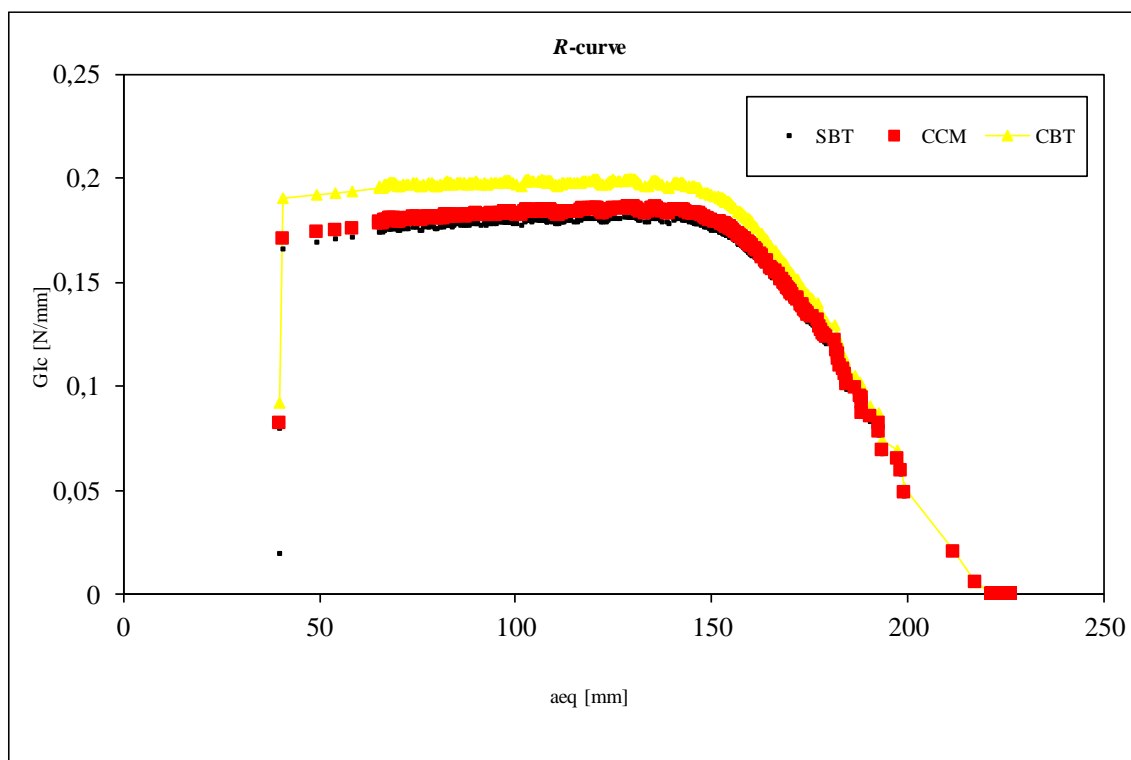
Figura 137 - Curvas P - δ para o ensaio TDCB com as propriedades gerais dos três adesivos utilizados

Figura 138 - Curva-R do ensaio TDCB para o adesivo Araldite® AV138 com a utilização das propriedades típicas

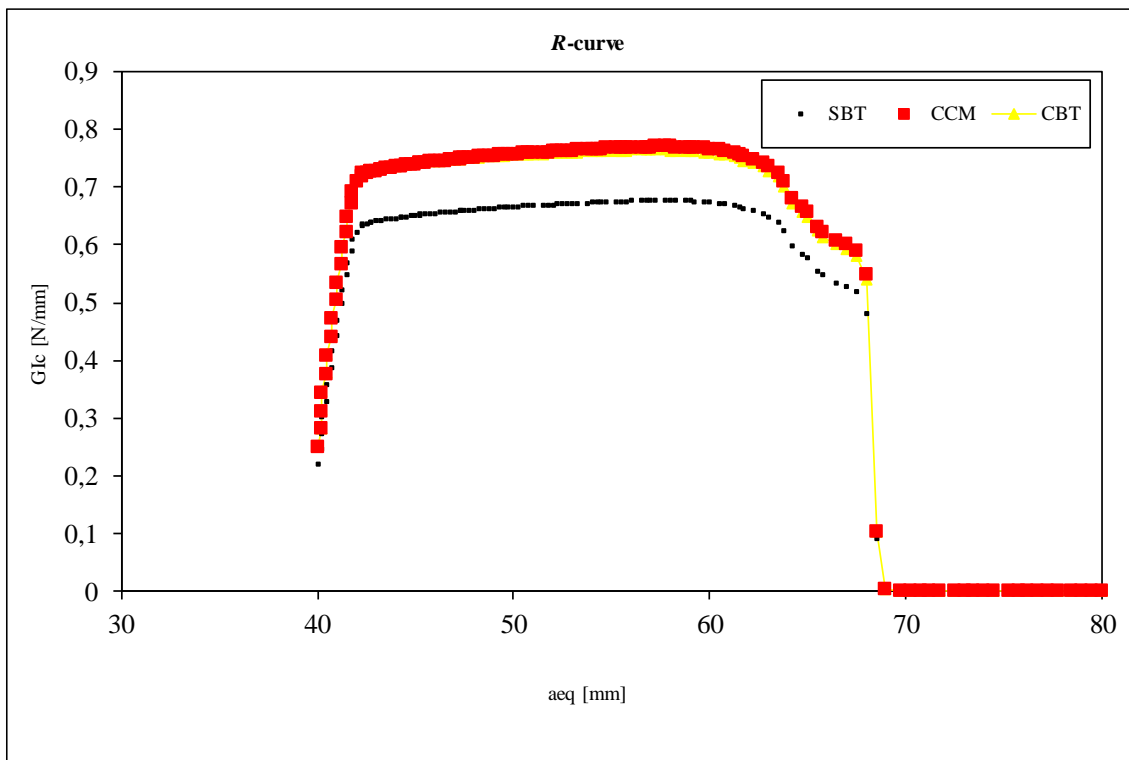


Figura 139 - Curva-R do ensaio TDCB para o adesivo Araldite® 2015 com a utilização das propriedades típicas

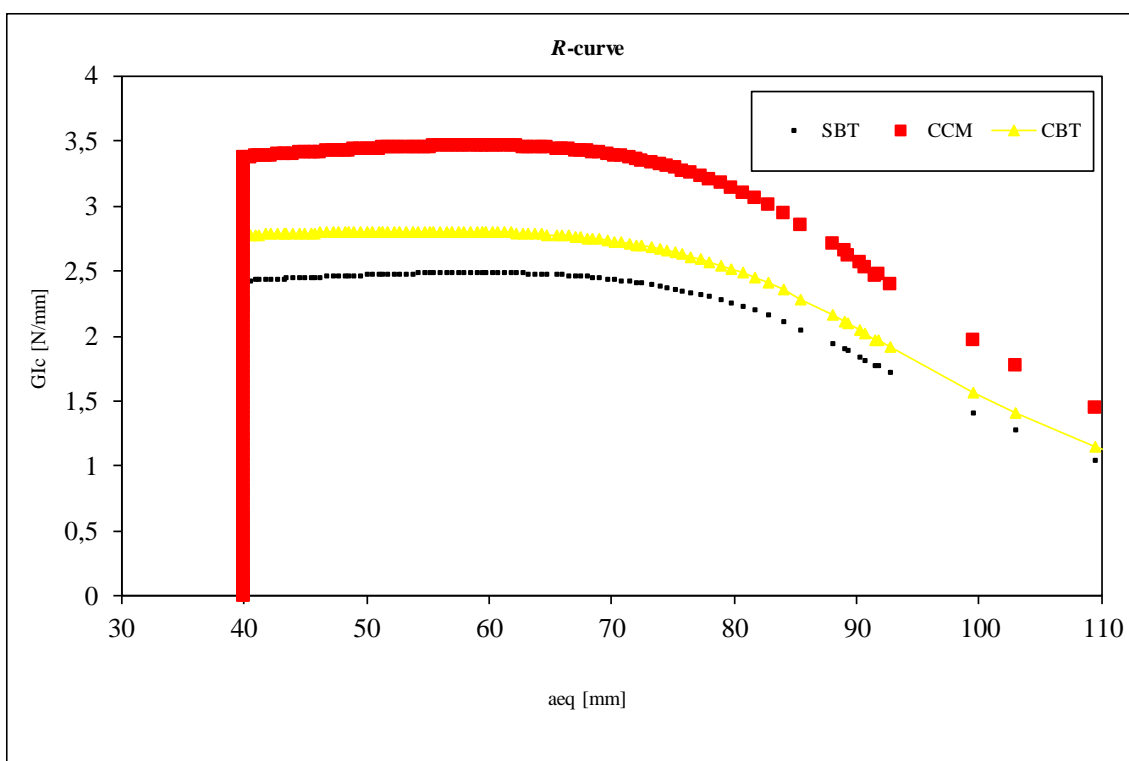


Figura 140 - Curva-R do ensaio TDCB para o adesivo SikaForce® 7752 com a utilização das propriedades típicas

Fazendo a comparação entre as curvas-R observa-se que a propagação da fenda ocorreu de forma estável para os três adesivos estudados. Para o adesivo Araldite® AV138 verifica-se uma boa concordância entre os três métodos, pois os patamares encontram-se muito próximos. Em relação ao adesivo Araldite® 2015, nota-se que existe uma boa concordância entre os métodos CBT e CCM, estando a curva do método SBT um pouco mais desfasada em relação aos outros dois. No adesivo SikaForce® 7752 é onde se verifica o maior desfasamento entre métodos.

3.2.5 Análise dos resultados obtidos

Após terem sido obtidas todas as curvas $P-\delta$ numéricas, procedeu-se à comparação destas com as obtidas experimentalmente.

Relativamente aos ensaios DCB, para o adesivo Araldite® AV138 verificou-se a existência de uma boa concordância entre as curvas experimentais e as curvas numéricas. Foi observado que, para as curvas numéricas, o deslocamento de rotura é bastante superior ao observado no trabalho experimental. Este desvio pode ser facilmente justificado com a ocorrência de efeitos experimentais. De resto pode-se dizer que as curvas $P-\delta$ numéricas reproduzem de forma satisfatória as curvas experimentais de todos os provetes testados. No caso do adesivo Araldite® 2015, observou-se a existência de uma boa concordância entre as curvas $P-\delta$ experimentais com as numéricas, fundamentalmente na rigidez. Verificou-se também a existência de propagação de fenda instável, a partir de um certo deslocamento, em algumas das curvas experimentais. Os ensaios apresentaram devido a este facto um deslocamento de rotura inferior ao apresentado nas curvas numéricas. Em relação ao adesivo SikaForce® 7752, foi observada globalmente uma boa concordância entre as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas. Verificou-se também que as curvas numéricas apresentaram rigidez mais baixa quando comparadas com as experimentais. Esta diferença de rigidez é explicada pela utilização de uma lei coesiva triangular para modelar um adesivo bastante dúctil, fazendo com que ocorresse um amaciamento prematuro antes do início da propagação da fenda. Pode-se dizer que, de uma forma global, as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente reproduzem de forma satisfatória as curvas experimentais.

Quanto aos ensaios TDCB, nas curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® AV138 observou-se uma boa concordância entre as curvas experimentais e as numéricas. Verificou-se que para todos os provetes a ocorrência de rotura prematura, nomeadamente nas curvas $P-\delta$ experimentais. Este acontecimento deve-se a algum efeito experimental que deverá ter ocorrido durante o ensaio. Para o adesivo Araldite® 2015, verificou-se a nível de rigidez inicial uma boa concordância entre os resultados experimentais e os numéricos. Foi também observado que em alguns provetes ocorreu uma propagação de fenda instável. De notar que também para este adesivo ocorreu rotura prematura nos resultados experimentais. O adesivo SikaForce® 7752 apresentou uma boa concordância

entre as curvas $P-\delta$ experimentais e numéricas. Apesar de a diferença ser mínima (aproximadamente 0,3 mm), observou-se que o deslocamento de rotura para as curvas $P-\delta$ experimentais foi menor do que o obtido nas curvas numéricas. Verificou-se ainda que as curvas $P-\delta$ numéricas apresentaram uma rigidez inicial superior. Esta diferença é explicada pela utilização de uma lei coesiva triangular para modelar este adesivo, que é bastante dúctil e faz com que ocorra um amaciamento prematuro antes do início da propagação da fenda.

Numa comparação direta entre os dois tipos de ensaio, DCB e TDCB, é possível verificar que os valores de $P_{\text{máx}}$ são bastante superiores para o ensaio TDCB. Por exemplo, se for realizada uma comparação entre os valores de $P_{\text{máx}}$ para o adesivo SikaForce® 7752, que é o mais dúctil dos três utilizados, verifica-se que para o ensaio DCB é obtido um valor de $P_{\text{máx}}$ aproximadamente igual a 3100 N, enquanto para o ensaio TDCB este valor é aproximadamente 6600 N. Esta diferença pode ser justificada pela maior resistência apresentada pelos provetes TDCB.

Na Figura 141 e na Figura 142 estão representadas as leis coesivas triangulares para cada um dos provetes colados com o adesivo Araldite® AV138, para o ensaio DCB e TDCB, respetivamente. É possível verificar que as leis, para o ensaio DCB, apresentam alguma disparidade entre si. Isto deve-se à variação dos valores de G_{IC} para cada um dos provetes. Para o ensaio TDCB verifica-se uma maior concordância entre as leis coesivas, à exceção das leis dos provetes 3 e 4. Esta concordância significa que os resultados obtidos apresentam uma boa robustez.

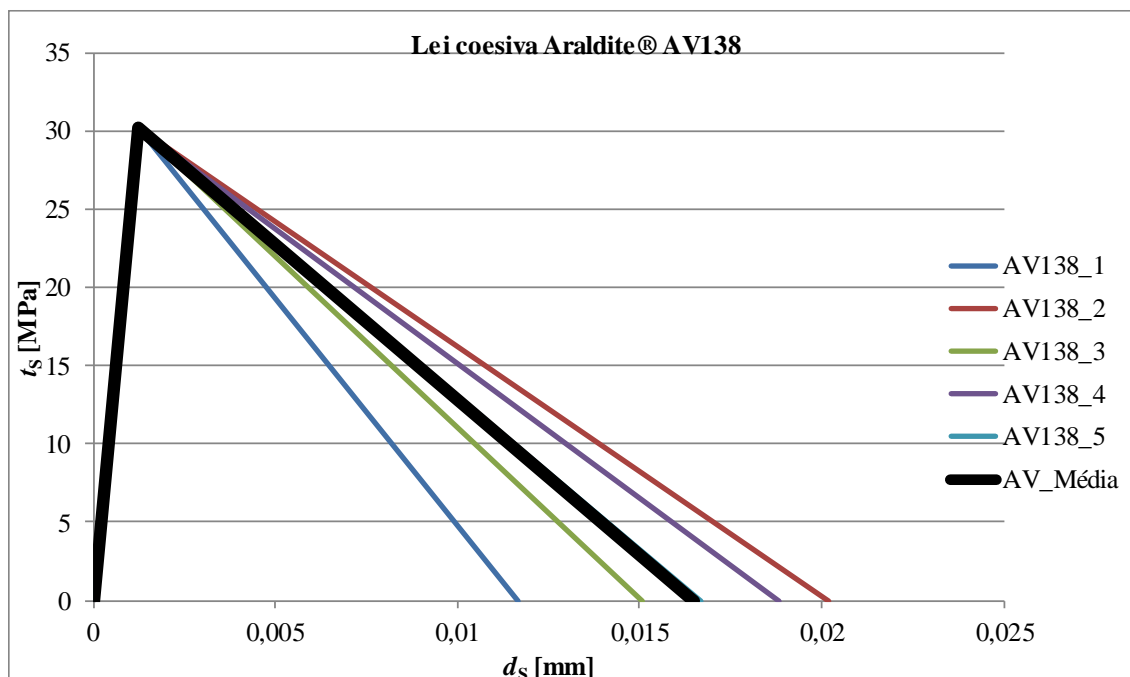


Figura 141 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo Araldite® AV138

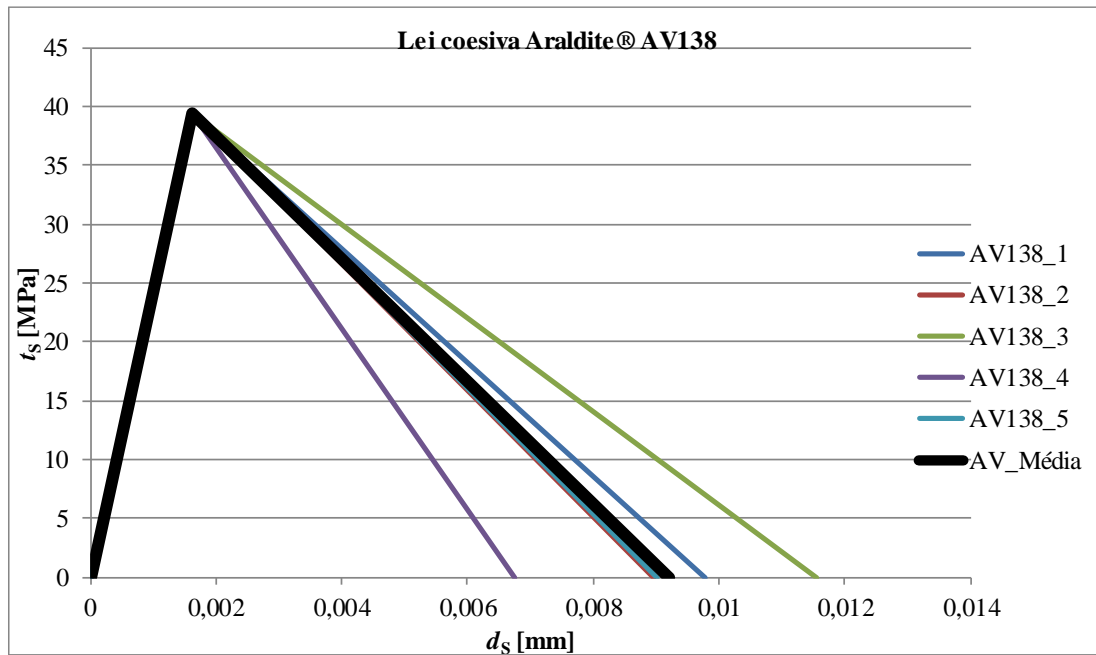


Figura 142 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes TDCB colados com o adesivo Araldite® AV138

As curvas das leis coesivas obtidas para o adesivo Araldite® 2015, para os ensaios DCB e TDCB, encontram-se representadas na Figura 143 e Figura 144, respetivamente. Devido à variação dos valores de G_{IC} utilizados para cada um dos provetes DCB, verifica-se uma maior divergência nas leis coesivas para este ensaio. Para o ensaio TDCB observa-se uma grande concordância entre as leis, o que representa que os resultados obtidos apresentam um elevado grau de rigor.

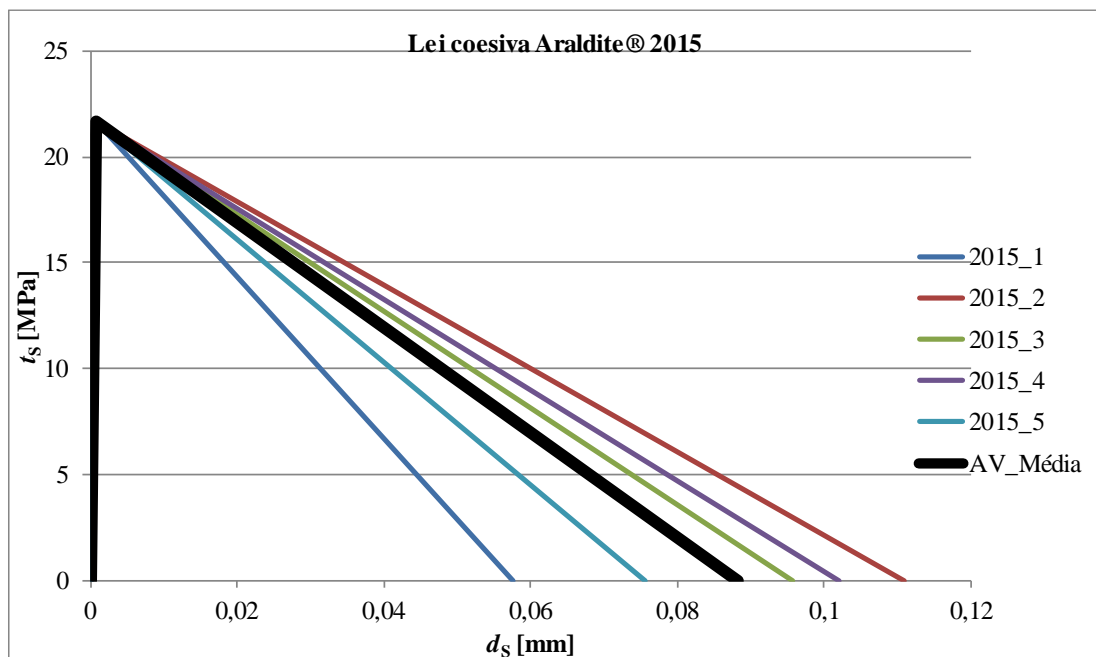


Figura 143 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo Araldite® 2015

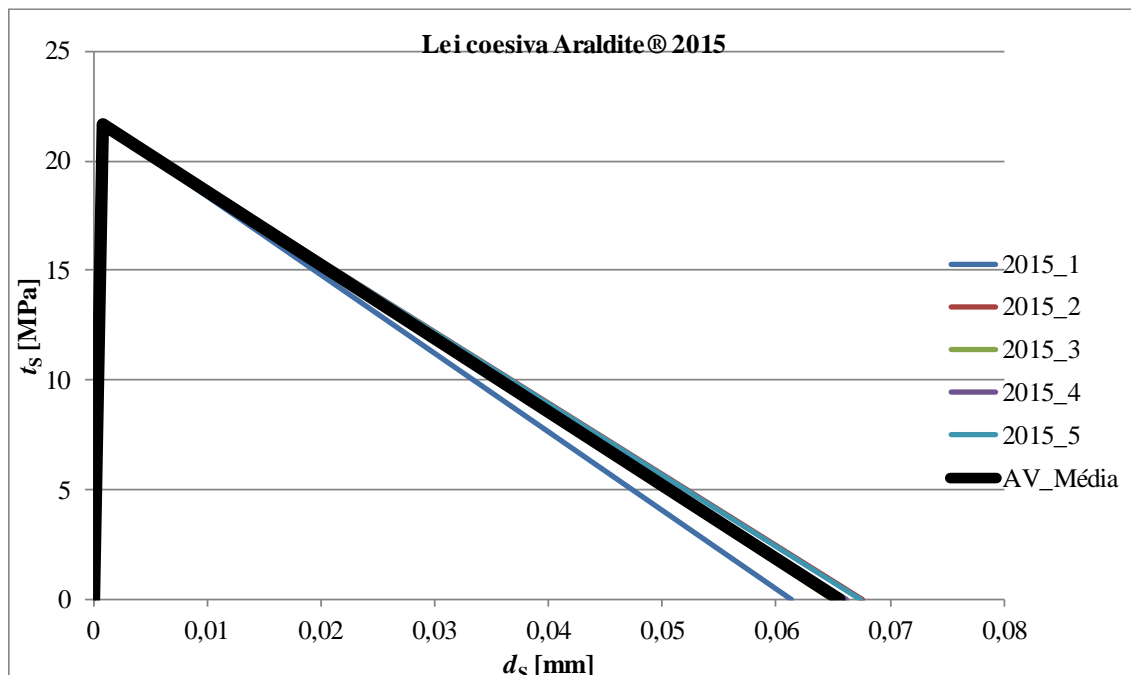


Figura 144 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes TDCB colados com o adesivo Araldite® 2015

Na Figura 145 e Figura 146 são apresentadas as leis coesivas para os ensaios DCB e TDCB, de cada provete colado com o adesivo SikaForce® 7752.

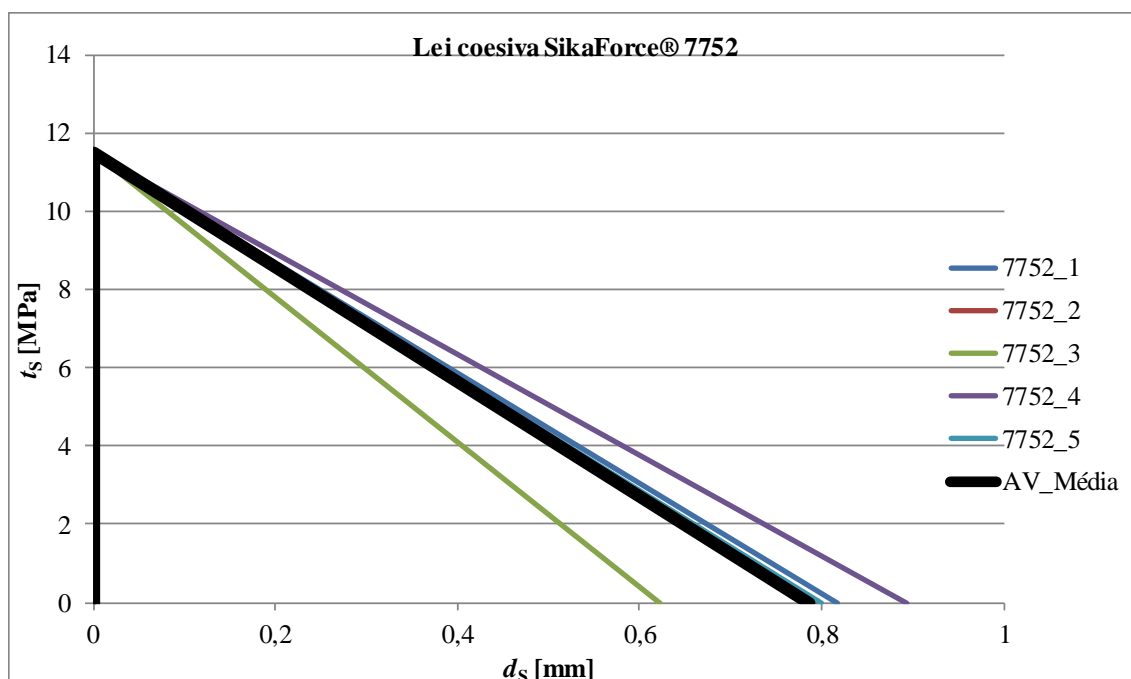


Figura 145 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes DCB colados com o adesivo SikaForce® 7752

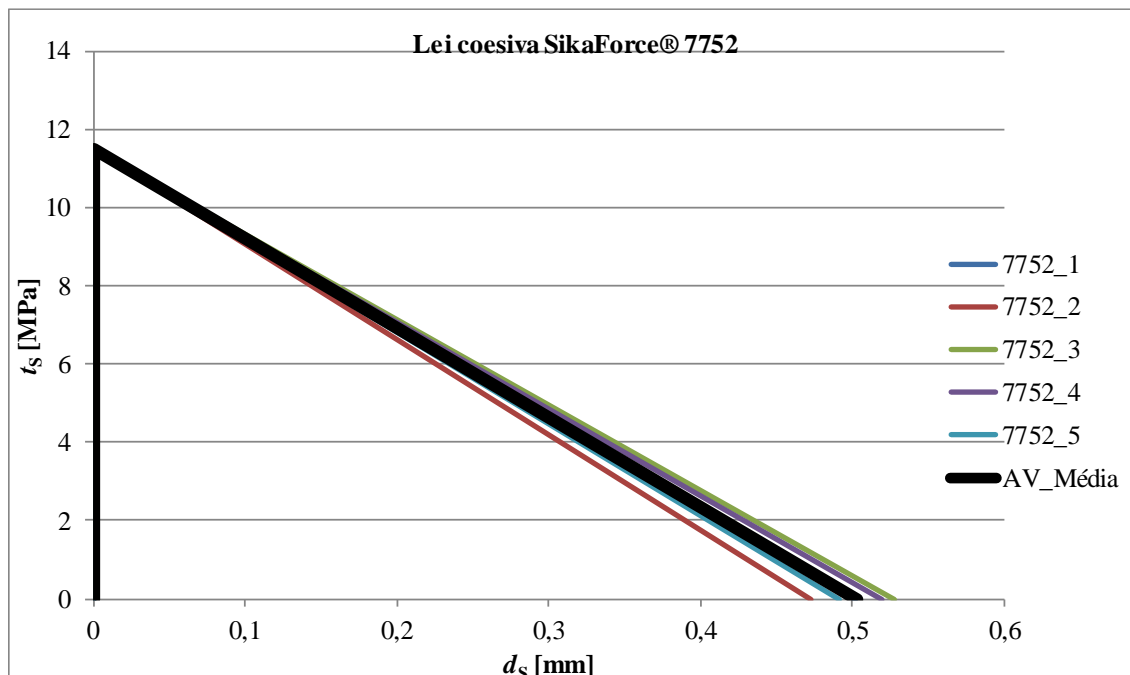


Figura 146 - Leis coesivas obtidas por ajuste numérico para os provetes TDCB colados com o adesivo SikaForce® 7752

Pela análise das leis coesivas obtidas para os ensaios DCB e TDCB, verifica-se que ambas apresentam uma boa concordância para todos os provetes. Esta elevada concordância representa que os resultados obtidos apresentam um excelente rigor e robustez.

3.2.6 Análise de Sensibilidade

Neste subcapítulo é realizado um estudo sobre a influência dos parâmetros coesivos na forma das curvas $P-\delta$ numéricas. Este estudo consiste na averiguação da influência dos parâmetros t_n^0 e G_{IC} no comportamento dos modelos numéricos dos ensaios DCB e TDCB. Pretende-se verificar com a variação destes parâmetros quais as diferenças apresentadas nas curvas $P-\delta$. Neste estudo fizeram-se variações de t_n^0 e G_{IC} entre +25%, +50%, -25% e -50% do valor utilizado nos ensaios numéricos para cada adesivo.

3.2.6.1 Ensaio DCB

3.2.6.1.1 Araldite® AV138

Na Figura 147 são apresentadas as curvas $P-\delta$ com a variação do parâmetro G_{IC} , para o adesivo Araldite® AV138.

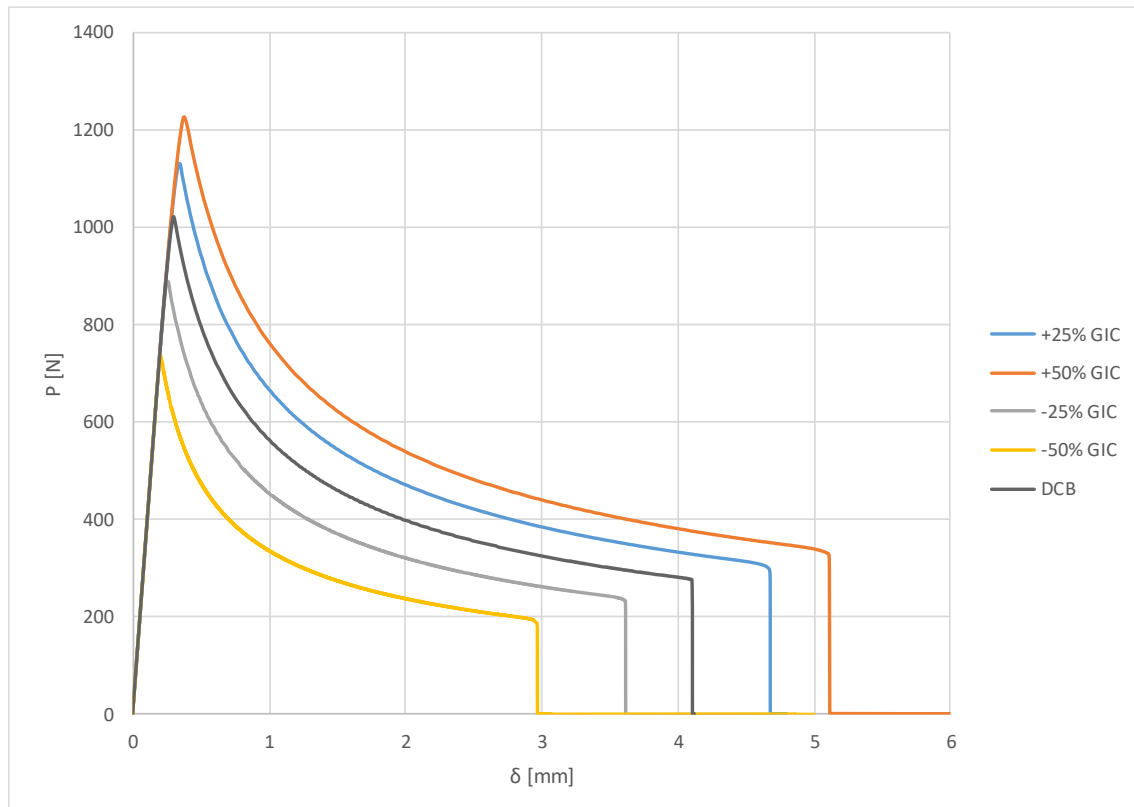


Figura 147 - Influência de G_{IC} nas curvas P - δ de provetes DCB colados com o adesivo Araldite® AV138

Observa-se que a variação de G_{IC} tem um efeito claro sobre o valor de $P_{máx}$, variando o valor deste de acordo com o aumento ou diminuição de G_{IC} , mas mantendo a rigidez do provete. Verifica-se também que o deslocamento de ruptura varia também de acordo com a variação de G_{IC} .

As curvas P - δ para o adesivo Araldite® AV138, obtidas com a variação de t_n^0 , encontram-se representadas na Figura 148.

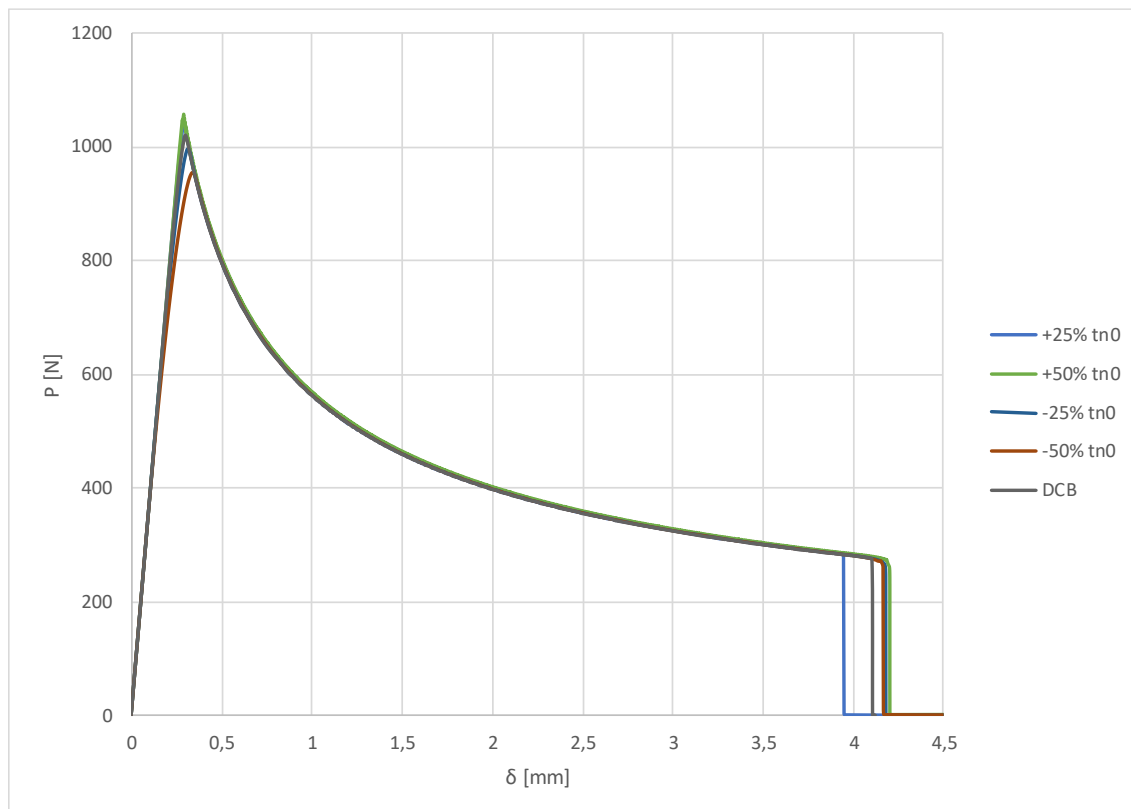


Figura 148 - Influência de t_n^0 nas curvas P - δ de provetes DCB colados com o adesivo Araldite® AV138

A variação do parâmetro t_n^0 , para o adesivo Araldite® AV138, não aparenta ter muita influência nas curvas P - δ . No entanto verifica-se uma pequena alteração do valor de rigidez antes de o pico ser alcançado.

3.2.6.1.2 Araldite® 2015

Na Figura 149 são apresentadas as curvas P - δ com a variação do parâmetro G_{IC} , para o adesivo Araldite® 2015.

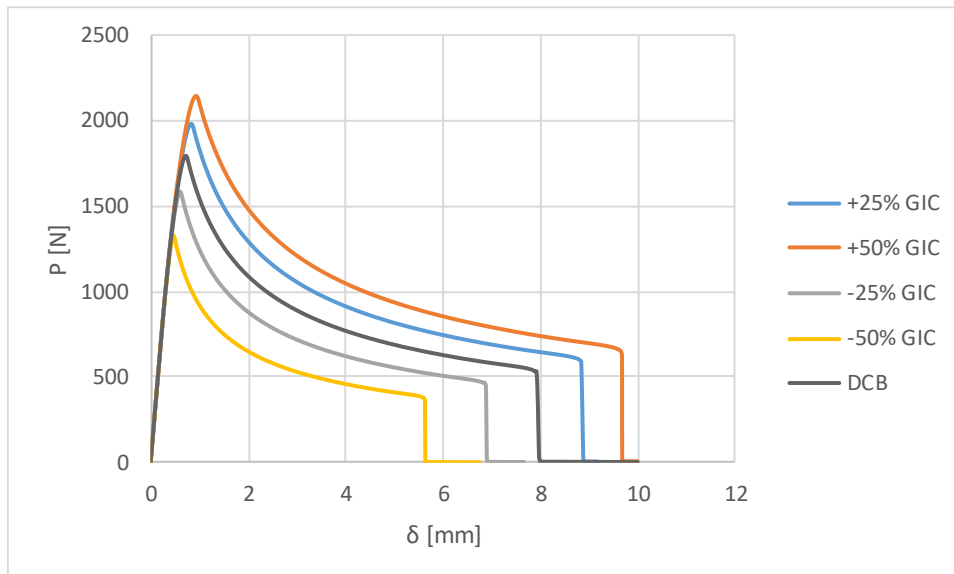


Figura 149 - Influência de G_{IC} nas curvas P - δ de provetes DCB colados com o adesivo Araldite® 2015

Verifica-se que o valor de G_{IC} influencia diretamente o valor de $P_{m\acute{a}x}$, tendo este uma variação de aumento ou diminuição de acordo com a variação de G_{IC} . De notar também que o deslocamento de rotura varia também de acordo com a variação de G_{IC} . Por outro lado, a rigidez inicial mantém-se constante.

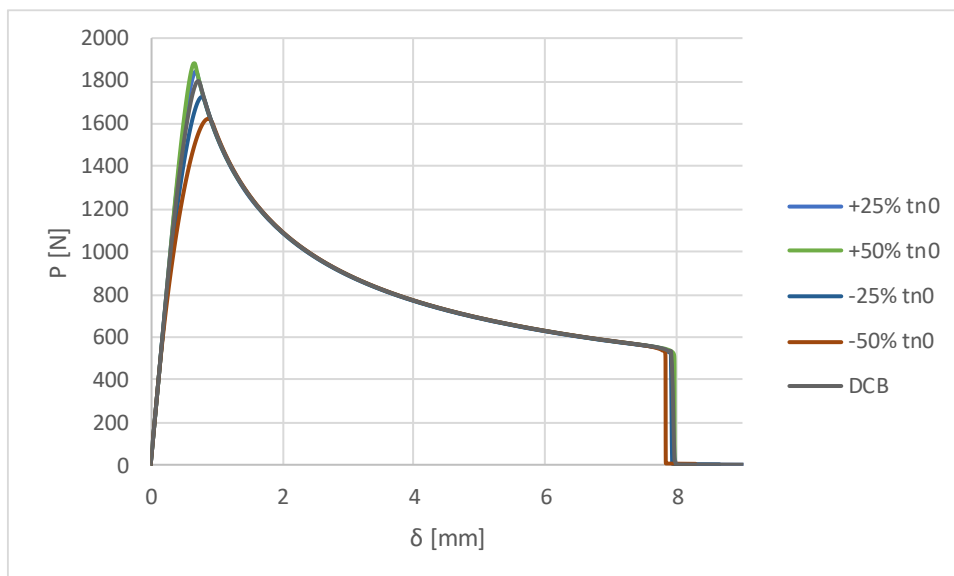


Figura 150 - Influência de t_n^0 nas curvas P - δ de provetes DCB colados com o adesivo Araldite® 2015

Com a variação do parâmetro t_n^0 (Figura 150) verifica-se que, para o adesivo Araldite® 2015, existe uma pequena variação do valor da rigidez pouco antes de ser atingido o pico. Para este adesivo não se verificou alteração do deslocamento de rotura, ao contrário do que se observou no adesivo anterior.

3.2.6.1.3 SikaForce® 7752

Na Figura 151 e na Figura 152 são apresentadas as curvas P - δ , para o adesivo Araldite® 2015 com a variação do parâmetro G_{IC} e do parâmetro t_n^0 , respetivamente.

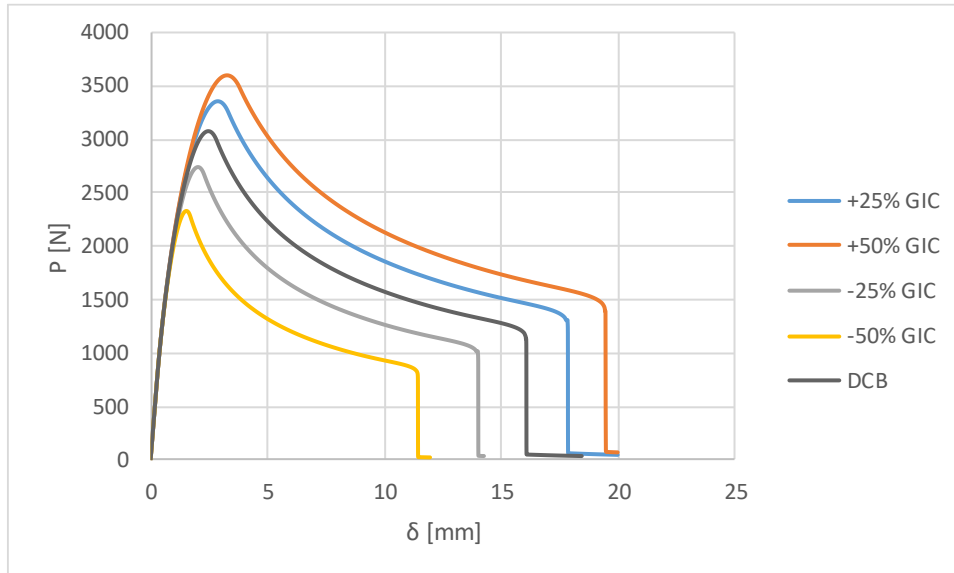


Figura 151 - Influência de G_{IC} nas curvas P - δ de provetes DCB colados com o adesivo SikaForce® 7752

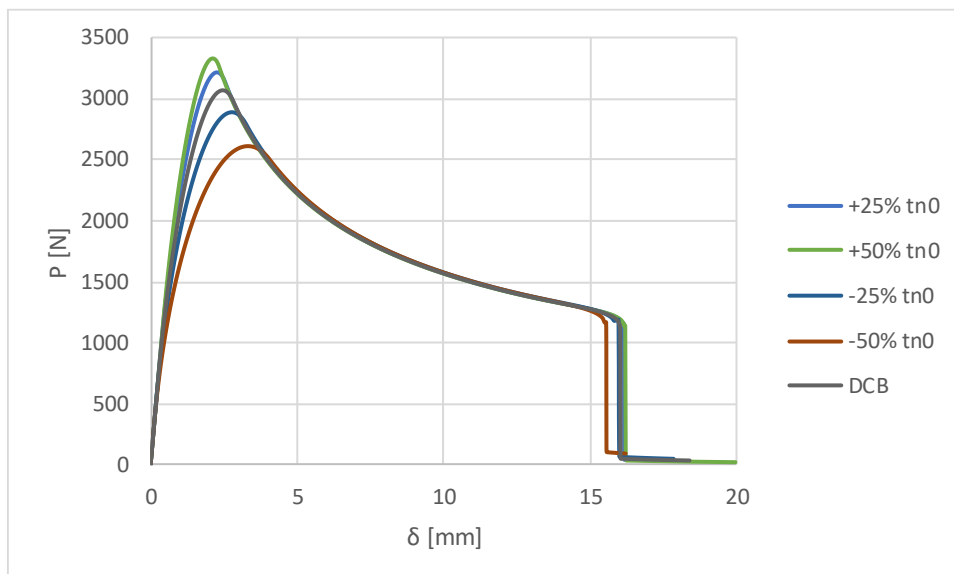


Figura 152 - Influência de t_n^0 nas curvas P - δ de provetes DCB colados com o adesivo SikaForce® 7752

Analisando os gráficos apresentados verifica-se que o parâmetro G_{IC} tem influência direta no valor de $P_{máx}$, fazendo este variar de acordo com a variação aplicada a G_{IC} . A variação de t_n^0 influencia o valor da rigidez antes do pico de acordo com a sua variação, sendo que para este adesivo foi onde se verificou a maior diferença. Esta diferença é mais visível neste adesivo, pois este é um adesivo bastante dúctil.

3.2.6.2 Ensaio TDCB

3.2.6.2.1 Araldite® AV138

Na Figura 153 e na Figura 154 são apresentadas as curvas $P-\delta$, relativas ao ensaio TDCB para o adesivo Araldite® AV138, com a variação do parâmetro G_{IC} e do parâmetro t_n^0 , respetivamente.

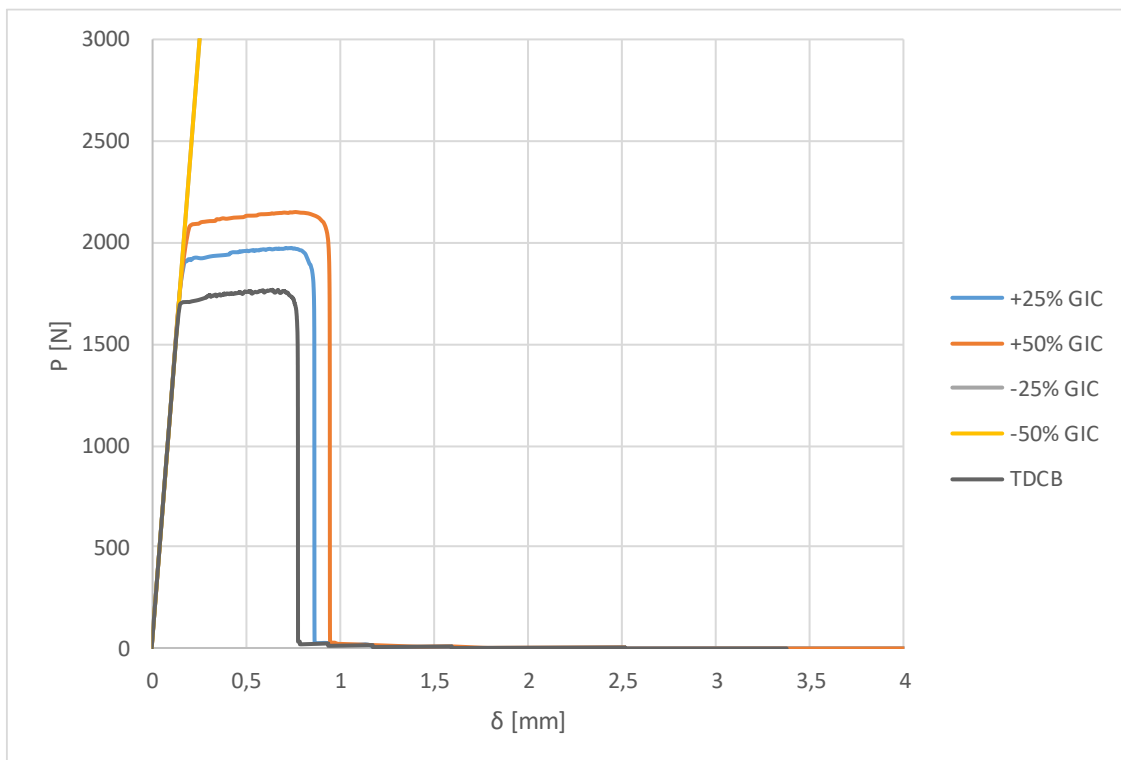


Figura 153 - Influência de G_{IC} nas curvas $P-\delta$ de provetes TDCB colados com o adesivo Araldite® AV138

Neste ensaio é possível verificar que, com o aumento do valor de G_{IC} , ocorre também um aumento de $P_{máx}$. No entanto esta análise não é muito precisa, pois não foi possível obter as curvas $P-\delta$ para todas as variações aplicadas. Para a variação de t_n^0 não foi possível obter qualquer curva para as variações testadas. Os resultados esperados eram que, para a variação de G_{IC} e t_n^0 , ocorresse variação do valor de $P_{máx}$ e do valor da rigidez antes do pico, respetivamente.

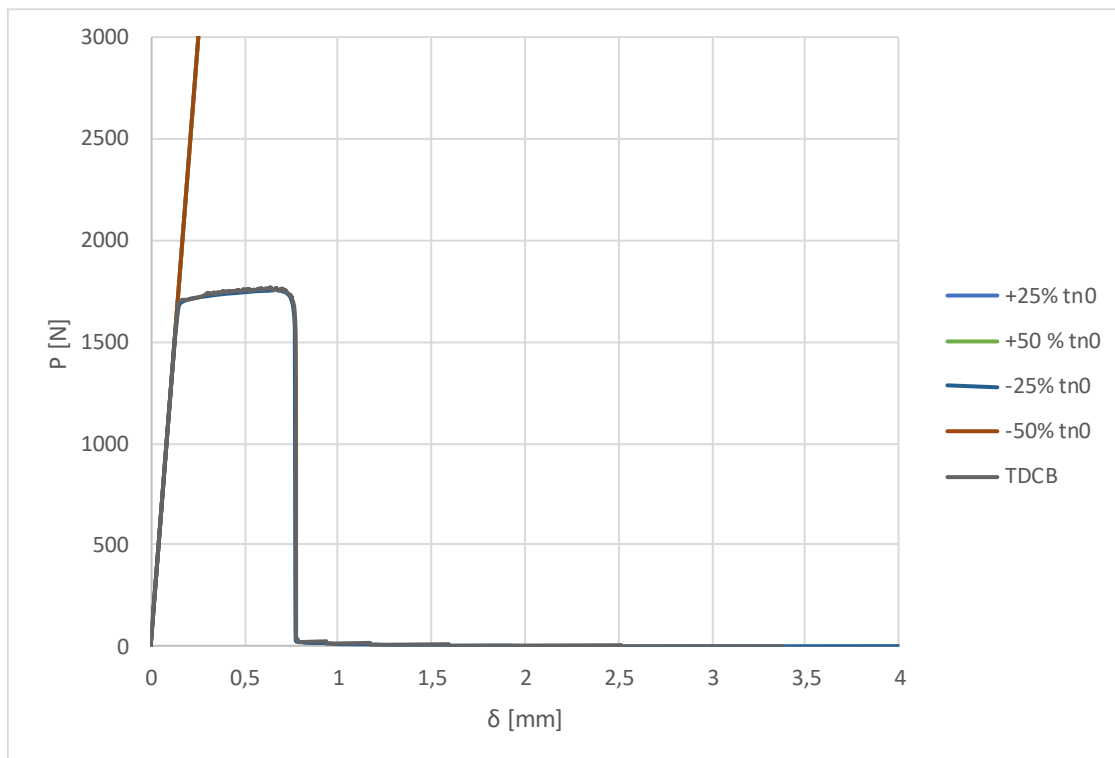


Figura 154 - Influência de t_n^0 nas curvas P - δ de provetes TDCB colados com o adesivo Araldite® AV138

3.2.6.2.2 Araldite® 2015

Na Figura 155 são apresentadas as curvas P - δ obtidas no ensaio TDCB para o adesivo Araldite® 2015, com a variação do parâmetro G_{IC} .

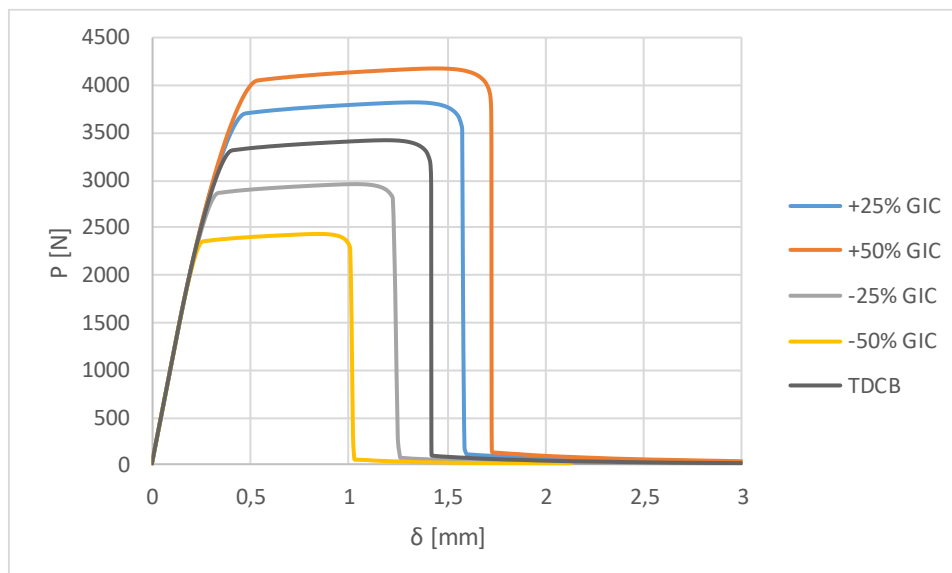


Figura 155 - Influência de G_{IC} nas curvas P - δ de provetes TDCB colados com o adesivo Araldite® 2015

Verifica-se que, com a variação de G_{IC} , o valor de $P_{m\acute{a}x}$ também varia de acordo com a variação de G_{IC} . Observa-se ainda que a rigidez se mantém constante para todas as variações.

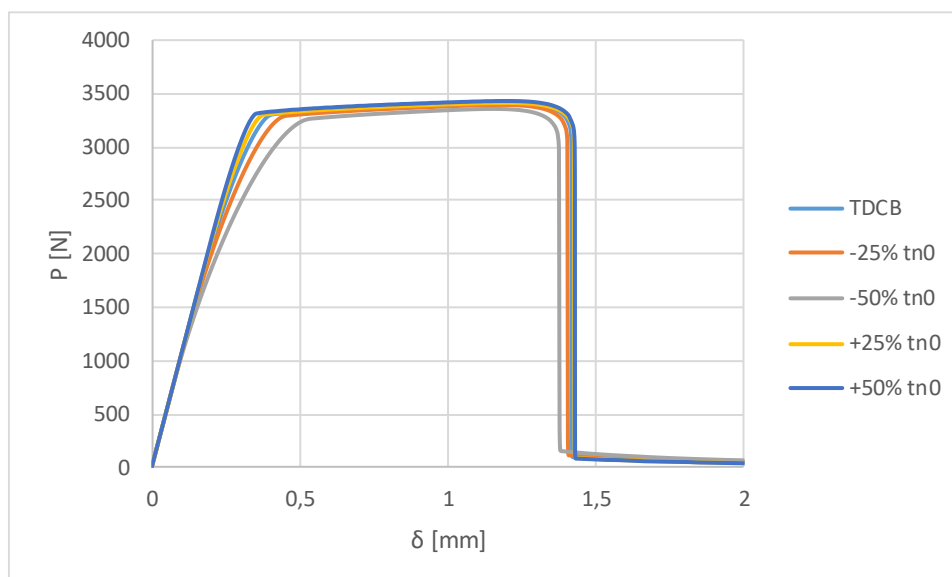


Figura 156 - Influência de t_n^0 nas curvas P - δ de provetes TDCB colados com o adesivo Araldite® 2015

Com a variação do parâmetro t_n^0 (Figura 156), observa-se uma variação de rigidez antes de ser atingido o patamar. Observa-se que a variação de t_n^0 não tem muita influência nas curvas P - δ , a não ser no valor de rigidez antes do pico e uma ligeira variação no valor de patamar. Estas variações ocorrem de acordo com a alteração aplicada a t_n^0 .

3.2.6.2.3 SikaForce® 7752

Na Figura 157 encontram-se representadas as curvas P - δ obtidas no ensaio TDCB para o adesivo SikaForce® 7752, com a variação do parâmetro G_{IC} . A variação do parâmetro G_{IC} provoca uma variação do valor de $P_{m\acute{a}x}$, sendo esta variação de acordo com a variação de G_{IC} (se G_{IC} aumentar, $P_{m\acute{a}x}$ também aumenta). É também observado que a rigidez se mantém constante para todas as variações, até ser alcançado o patamar.

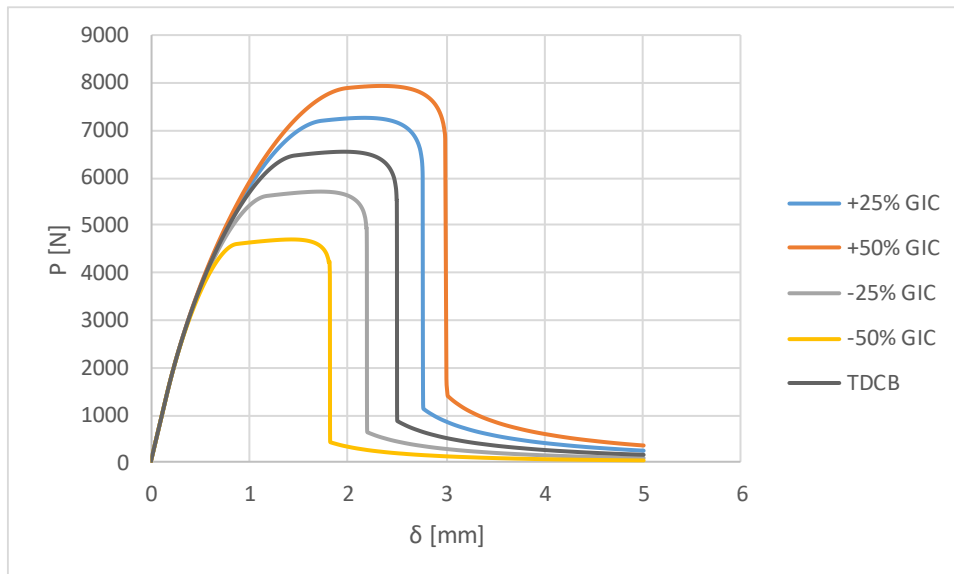


Figura 157 - Influência de G_{IC} nas curvas $P-\delta$ de provetes TDCB colados com o adesivo SikaForce® 7752

Na Figura 158 são apresentadas as curvas $P-\delta$ para o adesivo SikaForce® 7752 obtidas pelo ensaio TDCB com a variação do parâmetro t_n^0 .

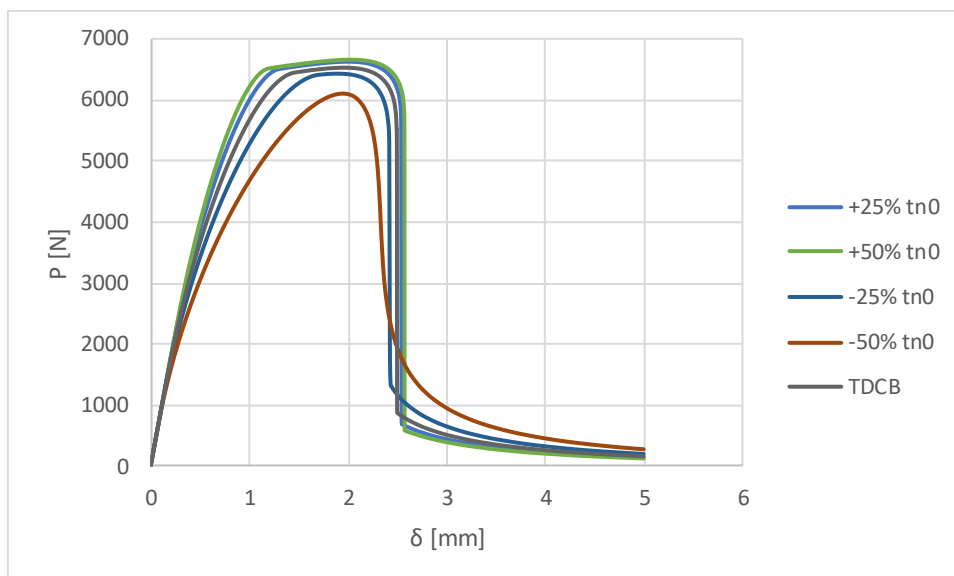


Figura 158 - Influência de t_n^0 nas curvas $P-\delta$ de provetes TDCB colados com o adesivo SikaForce® 7752

Com a variação do parâmetro t_n^0 , verifica-se que o valor de $P_{m\acute{a}x}$ também varia, embora esta variação não seja tão notória como nos restantes adesivos. Observa-se também uma variação da rigidez de acordo com a variação de t_n^0 , isto é, observa-se que quando se aumenta o t_n^0 a rigidez também aumenta.

CONCLUSÕES

4 CONCLUSÕES

O presente trabalho teve como objetivo principal realizar um estudo numérico, pelo MEF, de comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinar o valor de G_{IC} . Inicialmente efetuou-se o tratamento de dados experimentais obtidos num trabalho anterior [1] e posteriormente obteve-se o valor de G_{IC} para os três adesivos estudados (Araldite® AV138, Araldite® 2015 e SikaForce® 7752). Após se obter o valor de G_{IC} , utilizando os diversos métodos (métodos tradicionais que requerem medição do comprimento de fenda e métodos baseados no comprimento de fenda equivalente), procedeu-se para a modelação numérica com o objetivo de reproduzir os resultados experimentais obtidos e avaliar a sua adequabilidade.

Experimentalmente, todos os ensaios efetuados possuíam espessura de adesivo igual a 1 mm. A rotura verificada em todos os provetes foi a rotura coesiva. Para o ensaio DCB o adesivo Araldite® AV138, devido à sua fragilidade, apresentou uma propagação de fenda instável, enquanto os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 apresentaram uma propagação de fenda estável. Para o ensaio TDCB, todos os adesivos apresentaram uma propagação de fenda estável à exceção do provete 3 do adesivo Araldite® AV138, no qual se observou uma propagação de fenda instável a partir de um determinado deslocamento.

Para o cálculo do valor de G_{IC} , para o ensaio DCB foram utilizados os métodos CBBM, CBT e CCM, e para o ensaio TDCB foram utilizados os métodos CBT, CCM e SBT. Para o adesivo Araldite® AV138 foram obtidos os valores médios de G_{IC} iguais a 0,249 N/mm e 0,161 N/mm para os ensaios DCB e TDCB, respetivamente. Para o adesivo Araldite® 2015 os valores médios de G_{IC} obtidos foram 0,956 N/mm e 0,637 N/mm para os ensaios DCB e TDCB, respetivamente. Para o adesivo SikaForce® 7752 foram obtidos valores de G_{IC} iguais a 4,518 N/mm e 2,603 N/mm para os ensaios DCB e TDCB, respetivamente. Os valores de G_{IC} referidos foram obtidos pelos métodos CBBM e SBT para os ensaios DCB e TDCB, respetivamente. Pelos resultados obtidos nos ensaios DCB e TDCB, comprova-se que o adesivo Araldite® AV138 é o mais frágil e que o adesivo SikaForce® 7752 é o mais dúctil, enquanto o adesivo Araldite® 2015 apresenta um comportamento intermédio.

Dos métodos utilizados nos ensaios DCB, o método CBBM é o mais preciso pois este não necessita da medição do comprimento de fenda e tem em conta os efeitos da ZPF. Os métodos CCM e CBT necessitam da medição do comprimento da fenda ao longo do ensaio, o que pode originar desvios devido a erros de leitura. Ao método CCM ainda se acrescenta o erro associado ao ajusto do polinómio $C=f(a)$.

Dos métodos utilizados nos ensaios TDCB, o método SBT é o método que não necessita de medição do comprimento de fenda durante o ensaio. Os métodos CCM e CBT

necessitam dessa medição ao longo do ensaio. O método CCM tem de ter em conta ainda o ajuste efetuado ao polinómio $C=f(a)$.

No trabalho de Campilho et al. [12] foi obtido um valor de G_{IC} para o adesivo Araldite® AV138 de 0,2 N/mm. Comparando o valor obtido por este autor com o obtido na presente dissertação, verifica-se que os resultados obtidos são bastante homogéneos. No trabalho de da Silva et al. [67] foi obtido um valor de G_{IC} para o adesivo Araldite® 2015 de 0,44 N/mm ($\pm 0,05$ N/mm). O valor obtido no presente trabalho é bastante superior (0,956 N/mm) ao obtido por da Silva [67]. Esta diferença pode ser explicada pela diferença de espessura utilizada nos ensaios, já que no trabalho de da Silva foi utilizada uma espessura de adesivo igual a 0,2 mm, enquanto no presente trabalho foi utilizado 1 mm. Esta diferença, num adesivo com alguma ductilidade, pode causar uma variação significativa do valor de G_{IC} [14]. No trabalho de Faneco [68] foi obtido um valor de G_{IC} para o adesivo SikaForce® 7752 de 2,29 N/mm. Em comparação com os resultados obtidos na presente dissertação, pode-se concluir que os valores obtidos são superiores. Esta diferença pode ser explicada pela diferença de espessura da camada de adesivo.

A parte numérica deste trabalho tinha como principal objetivo reproduzir os resultados obtidos experimentalmente. De forma a caracterizar as leis coesivas em tração e corte é necessário conhecer t_n^0 , t_s^0 , G_{IC} e G_{IIC} , para isso foi utilizado um método inverso. Para o adesivo Araldite® AV138 obtiveram-se $t_n^0=39,45$ MPa, $t_s^0=30,2$ MPa, $G_{IC}=0,2$ N/mm e $G_{IIC}=0,38$ N/mm. Para o adesivo Araldite® 2015 obtiveram-se $t_n^0=21,63$ MPa, $t_s^0=17,9$ MPa, $G_{IC}=0,43$ N/mm e $G_{IIC}=4,7$ N/mm. Para o adesivo SikaForce® 7752 obtiveram-se $t_n^0=12,25$ MPa, $t_s^0=10,50$ MPa, $G_{IC}=2,36$ N/mm e $G_{IIC}=5,56$ N/mm. Com os parâmetros referidos anteriormente, realizaram-se os ensaios numéricos de forma a obter a lei coesiva do comportamento à tração dos três adesivos utilizados. Os ensaios numéricos foram realizados tendo como valores de G_{IC} os valores obtidos experimentalmente pelos métodos CBBM e CBT para os ensaios DCB e TDCB, respetivamente. Inicialmente eram para ter sido os valores obtidos pelo método SBT a serem usados, mas concluiu-se que o método SBT é algo conservativo no que diz respeito à estimativa dos valores de G_{IC} [25] e optou-se pelo método CBT.

De uma forma geral, as curvas $P-\delta$ obtidas numericamente traduzem de forma satisfatória as curvas $P-\delta$ experimentais. No entanto, verificou-se em muitos dos provetes, principalmente para os adesivos Araldite® AV138 e Araldite® 2015, a ocorrência de rotura prematura nas curvas $P-\delta$ experimentais. Este acontecimento deve-se a algum efeito de ensaio. Verificou-se ainda que nos ensaios TDCB, para o adesivo SikaForce® 7752, o ensaio numérico possuía uma rigidez superior ao experimental. Isto deve-se ao facto de à utilização de uma lei coesiva triangular para modelar um adesivo marcadamente dúctil, o que se traduziu num amaciamento prematuro antes do início da propagação da fenda.

Foi realizado um estudo de sensibilidade para verificar a influência dos parâmetros G_{IC} e t_n^0 nas curvas $P-\delta$ dos ensaios DCB e TDCB. Foram feitas variações de t_n^0 e G_{IC} entre +25%, +50%, -25% e -50% do valor médio utilizado nos ensaios numéricos para cada adesivo. Este estudo permitiu concluir que o parâmetro G_{IC} é o que mais influencia a curva $P-\delta$ em termos de carga de pico, mantendo a rigidez inicial. O valor de t_n^0 tem mais influência na rigidez antes do pico de carga ser atingido. Com este estudo conclui-se que, com o método inverso, é possível chegar a uma lei coesiva para um determinado ensaio.

Com a realização da presente dissertação, conclui-se que os MDC são um método adequado, confiável e preciso para a previsão da resistência de juntas adesivas.

Como propostas para futuros trabalhos, sugerem-se as seguintes:

- Utilização de diferentes espessuras de adesivo, para estudar a influência desta nas leis coesivas;
- Comparação dos resultados com uma lei coesiva triangular com uma coesiva trapezoidal (para os dois adesivos mais dúcteis);
- Comparação dos ensaios para medição de G_{IC} com o ensaio CT;
- Averiguação experimental do efeito da variação de parâmetros geométricos como o comprimento e largura dos provetes.

**BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES
DE INFORMAÇÃO**

5 BIBLIOGRAFIA E OUTRAS FONTES DE INFORMAÇÃO

1. Lopes, R.M., *Comparação dos ensaios DCB e TDCB para determinação da tenacidade em tração de adesivos estruturais*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
2. Pocius, D.A.D.a.A.V., *The Mechanics of Adhesion*. 2002: Elsevier Science B.V.
3. 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, FACULDADE DE ENGENHARIA DA UNIVERSIDADE DO PORTO.
4. Kinloch, A.J., *Adhesion and Adhesives: Science and Technology*. 1987, London: Chapman & Hall.
5. Lucas F.M. da Silva, A.G.d.M., Marcelo F. S. F. de Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007: Publindústria.
6. Petrie, E.M., *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000, USA: McGraw-Hill.
7. Chaves, F., *Ligação Adesiva - Técnicas avançadas nos processos de ligação e consolidação*. FEUP.
8. Pocius, M.C.a.A.V., *SURFACES, CHEMISTRY AND APPLICATIONS*. 2002: Elsevier Science B.V.
9. Adams, R.D., *Adhesive bonding. Science, technology and applications*. 2005, USA: CRC Press LLC.
10. Esteves, J., *Estudo do Comportamento de Adesivos Estruturais*, in *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*. 1990.
11. Andrade, B.C.P., *Modos de Carregamento. Modos de Rotura. Tipos de Junta*. 2012: ISEP
12. Campilho, R.D.S.G., et al., *Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2011. **31**(5): p. 363-372.
13. da Silva, L.F.M., *Preparing Bulk Specimens by Hydrostatic Pressure*, in *Testing Adhesive Joints - Best Practices*, D.A.D. Lucas F.M. da Silva, Bamber Blackman, and Robert D. Adams, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
14. Campilho, R.D.S.G., et al., *Adhesive thickness effects of a ductile adhesive by optical measurement techniques*. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2015. **57**: p. 125-132.
15. da Silva, L.F.M., *Quasi-Static Testing of Bulk Tensile Specimens*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices* D.A.D. Lucas F.M. da Silva, Bamber Blackman, and Robert D. Adams, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim Germany.
16. Duncan, B., *Iosipescu (V-Notched Beam) Test*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
17. Duncan, B., *Arcan (V-Notched Plate) Test*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.

18. da Silva, L.F.M., *Quasi-Static Testing of Lap Joints*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
19. Adams, R.D., *Shear Properties of Adhesives Measured by Napkin Rings and Solid Butt Joints in Torsion*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
20. da Silva, L.F.M., *Quasi-Static Testing of Thick Adherend Shear Test Specimens*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
21. Silva, L.F.M.d., *Preparing Thick Adherend Shear Test Specimens*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, D.A.D. Lucas F.M. da Silva, Bamber Blackman, and Robert D. Adams, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
22. Anderson, G.L., *Quasi-Static Testing of Butt Joints in Tension*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
23. Campilho, R.D.S.G., *REPAIR OF COMPOSITE AND WOOD STRUCTURES*, in *DEPARTMENT OF MECHANICAL ENGINEERING AND INDUSTRIAL MANAGEMENT*. 2009, FACULTY OF ENGINEERING OF PORTO UNIVERSITY.
24. Pearson, R.A., *Measuring Bulk Fracture Toughness*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, D.A.D. Lucas F.M. da Silva, Bamber Blackman, and Robert D. Adams, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
25. Blackman, B.R.K., *Quasi-Static Fracture Tests: Double Cantilever Beam and Tapered Double Cantilever Beam Testing*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
26. Blackman, B.R.K., *Preparing Specimens for Fracture Properties: Double Cantilever Beam and Tapered Double Cantilever Beam*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
27. Campilho, R.D.S.G., *End-Notched Flexure*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
28. Dourado, M.F.S.F.d.M.a.N.M.M., *Mode II Fracture Characterization of Bonded Joints Using ELS Test*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
29. Chaves, F.J.P., *Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints*. 2013, FEUP: Porto.
30. Davies, P., *Mixed Mode Bending (MMB) with a Reeder and Crews Fixture*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
31. Dillard, D.A., *Other Mixed Mode Adhesive Fracture Test Specimens*, in *Testing Adhesive Joints Best Practices*, A.G.d.M. Lucas F.M. da Silva, Marcelo F. S. F. de Moura, Editor. 2012, Wiley-VCH Verlag & Co: Weinheim, Germany.
32. Luo, L.T.a.Q., *Analysis of Cracked Lap Shear (CLS) Joints*, in *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, L.F.M. da Silva, A. Ochsner, Editor. 2008, Springer-Verlag: Berlin

33. Blackman, B.R.K., et al., *Measuring the mode I adhesive fracture energy, GIC, of structural adhesive joints: the results of an international round-robin*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2003. **23**(4): p. 293-305.
34. Lopes, R.M., et al., *Comparative evaluation of the Double-Cantilever Beam and Tapered Double-Cantilever Beam tests for estimation of the tensile fracture toughness of adhesive joints*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2016. **67**: p. 103-111.
35. M.F.S.F. de Moura, R.D.S.G.C.a.J.P.M.G., *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading*. Elsevier Ltd, 2008.
36. R.D.S.G. Campilho, D.C.M., D.J.S. Gonçalves, J.F.M.G. da Silva, M.D. Banea and L.F.M. da Silva, *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites*. Elsevier Ltd, 2013.
37. Wang, W.-Z., C.-J. Li, and F.-X. Ye, *Effect of specimen geometry on fracture toughness measurement of plasma-sprayed ceramic coatings by the tapered double cantilever beam approach*. Vacuum, 2004. **73**(3-4): p. 649-654.
38. B.R.K. Blackman, H.H., A.J. Kinloch, M. Paraschi, J.G. Williams, *The calculation of adhesive fracture energies in mode I: revisiting the tapered double cantilever beam (TDCB) test*. Elsevier Ltd, 2002.
39. I., B.G., *The formation of equilibrium cracks during brittle fracture. General ideas and hypothesis. Axisymmetrical cracks*. Journal of Applied Mathematics and Mechanics 23, 1959: p. 622-636.
40. Dugdale, D.S., *Yielding of steel sheets containing slits*. Journal of the Mechanics and Physics of Solids 8, 1960: p. 100-104.
41. Raul D.S.G. Campilho, M.C., Guilherme Viana, Lucas F.M. da Silva, *Parameter identification in Cohesive Zone Modelling*.
42. Yang, Q.D.a.T., M. D., *Mixed-mode fracture analyses of plastically-deforming adhesive joints*. International Journal of Fracture 110, 2001: p. 175-187.
43. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS., *Using a cohesive damage model to predict the tensile behaviour of CFRP single-strap repairs*. Int. J. Solids Struct. 45, 2008: p. 1497-1512.
44. Anderson T, S.U., *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. Int. J. Solids Struct. 41, 2004: p. 413-434.
45. Campilho R.D.S.G., d.M., M.F.S.F., Pinto, A.M.G., Morais, J.J.L. and Domingues, J.J.M.S., *Modelling the tensile fracture behaviour of CFRP scarf repairs*. Composites Part B: Engineering 40, 2009a: p. 149-157.
46. Stigh, U., Alfredsson, K. S., Andersson, T., Biel, A., Carlberger, T. and Salomonsson, K., *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers*. International Journal of Fracture 165, 2010: p. 149-162.
47. Rice, J.R., *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks*. Journal of Applied Mechanics 35, 1968: p. 379-386.
48. Blackman BRK, H.H., Kinloch AJ, Williams JG., *The use of a cohesive zone model to study the fracture of fibre composites and adhesively-bonded joints*. Int. J. Fracture 119, 2003: p. 25-46.

49. de Moura MFSF, C.R., Gonçalves JPM., *Crack Equivalent Concept Applied to the Fracture Characterization of Bonded Joints under Pure Mode I Loading*. Composites Science and Technology, 2008: p. 2224-2230.
50. Bader MG, H.I., Hay JN, Kemp M, Winchester S., *Double cantilever beam testing of repaired carbon fibre composites*. Compos Part A, 2000: p. 31-603-8.
51. Ducept F, D.P., Gamby D., *Mixed mode failure criteria for a glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint*. Int J Adhes Adhes, 2000: p. 20:233-44.
52. JA., N., *Energy release rate analysis for adhesive and laminate double cantilever beam specimens emphasizing the effect of residual stresses*. Int J Adhes Adhes, 2000: p. 20:59-70.
53. Campilho RDSG, M.M., Ramantani DA, Morais JLL, Domingues JJMS., *Tensile behaviour of three-dimensional carbon-epoxy adhesively bonded single-and double-strap repairs*. Int. J. Adhes. Adhes. 29, 2009: p. 678-686.
54. Lee, M.J., Cho, T. M., Kim, W. S., Lee, B. C. and Lee, J. J., *Determination of cohesive parameters for a mixed-mode cohesive zone model*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010. **30**: p. 322-328.
55. Rudawska, A., *Adhesive joint strength of hybrid assemblies: Titanium sheet-composites and aluminium sheet-composites. Experimental and numerical verification*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2010: p. 574-582.
56. Campilho RDSG, B.M., Pinto AMG, da Silva LFM, de Jesus AMP., *Strength prediction of single-and double-lap joints by standard and extended finite element modelling*. Int. J. Adhes. Adhes. 31, 2011: p. 363-372.
57. T.A.B. Fernandes, R.D.S.G.C., M.D. Banea and L.F.M. da Silva, *Adhesive Selection for Single Lap Bonded Joints: Experimental and Advanced Techniques for Strength Prediction*. The Journal of Adhesion, 2015.
58. HUNTSMAN, *Araldite AV 138M with Hardener HV 998*. 2004.
59. João Teixeira, R.M., Rogério Faria, Joaquim Cunha, *Influência de defeitos introduzidos na zona de sobreposição na resistência de JSS com substratos de alumínio e um adesivo frágil*. 2015, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto, Portugal.
60. Pigmente, K. 19-09-2016]; Available from: <http://www.kremer-pigmente.com/de/mal---binde--und-klebmittel/klebstoffe/epoxide/araldit-av-138-m-1-hv-998-1-pack-97930.html>.
61. R. D. S. G. Campilho, A.M.G.P., M. D. Banea, R. F. Silva and L. F. M. da Silva, *Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2011.
62. HUNTSMAN, *Araldite 2015 Structural Adhesives*. 2007.
63. Ltd, A. 2014 19-09-2016]; Available from: <http://www.alscoltd.co.uk/product/araldite-2015-adhesive/>.
64. kampeerperfect.nl. 2016 19-09-2016]; Available from: <https://www.kampeerperfect.nl/technische-accessoires/onderhoud/lijmen-en-kitten/>.
65. SIKA, *SikaForce®-7752 FRW L60*. 2013.

66. Qiao, P., J. Wang, and J.F. Davalos, *Tapered beam on elastic foundation model for compliance rate change of TDCB specimen*. Engineering Fracture Mechanics, 2003. **70**(2): p. 339-353.
67. da Silva, L.F.M., V.H.C. Esteves, and F.J.P. Chaves, *Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings*. *Bruchzähigkeit eines Strukturklebstoffs bei Mixed-Mode Belastung*. Materialwissenschaft und Werkstofftechnik, 2011. **42**(5): p. 460-470.
68. Faneco, T.M.d.S., *Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*, in *Departamento de Engenharia Mecânica*. 2014, Instituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
69. Pinto AMG, M.A., Campilho RDSG, de Moura MFSF, Baptista APM, *Single lap joints of similar and dissimilar adherents bonded with an acrylic adhesive*. J. Adhes., 2009: p. 351-376.
70. Alfano G, C.M., *Finite element interface models for the delamination analysis of laminated composites: mechanical and computational issues*. Int. J. Numer. Methods Eng., 2001: p. 1701-1736.
71. Allix O, C.A., *Modeling and simulation of crack propagation in mixed-modes interlaminar fracture specimens*. Int. J. Fract. 77, 1996: p. 111-140.
72. Chandra N, L.H., Shet C, Ghonem H., *Some issues in the application of cohesive zone models for metal-ceramic interfaces*. Int. J. Solids Struct. 39, 2002: p. 2827-2855.
73. J., C., *Predicting progressive delamination of stiffened fibre-composite panel and by decohesion models*. J. Thermopl. Compos. Mater. 15, 2002: p. 429-441.
74. Kafkalidis MS, T.M., *The effects of geometry and material properties on the fracture of single lap-shear joints*. Int. J. Solids Struct. 39, 2002: p. 4367-4383.
75. Liljedahl CDM, C.A., Wahab MA, Ashcroft IA., *Damage modelling of adhesively bonded joints*. Int. J. Fract. 141, 2006: p. 147-161.
76. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS., *Modelling single and double-lap repairs on composite materials*. Comps. Sci. Technol. 65, 2005: p. 1948-1958.
77. Campilho RDSG, d.M.M., Domingues JJMS., *Numerical prediction on tensile residual strength of repaired CFRP under different geometric changes*. Int. J. Adhes. Adhes. 29, 2009: p. 195-205.
78. RDSG., C., *Modelação da execução de reparações em materiais compósitos*. . 2005, Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto: Porto.
79. AV., P., *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction, 2nd Edition*. 2002: 83, Hanser.
80. Leffler K, A.K., Stigh U., *Shear behaviour of adhesive layers*. Int. J. Solids Struct. 44, 2007: p. 530-545.
81. Hogberg JL, S.U., *Specimen proposals for mixed mode testing of adhesive layer*. Eng. Fract. Mech. 73, 2006: p. 2541-2556.
82. Campilho RDSG, P.A., Banea MD, Silva RF, da Silva LFM., *Strength improvement of adhesively-bonded joints using a reverse-bent geometry*. J. Adhes. Sci. Technol. 25, 2011: p. 2351-2368.
83. Moura MFSF, G.J., Chousal JAG, Campilho RDSG., *Cohesive and continuum mixed-mode damage models applied to the simulation of the mechanical behaviour of bonded joints*. Int. J. Adhes. Adhes. 28, 2008: p. 419-426.

84. Marques EAS, S.L., *Joint optimization of adhesively bonded patches*. Int. J. Adhes. Adhes. 84, 2008: p. 917-936.
85. J.C.S., A., *Determinação da tenacidade à fratura em tracção (GIIC) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, Insituto Superior de Engenharia do Porto: Porto.
86. Darwish SMH, G.A., *Critical assessment of weld-bonded technologies*. J. Mater Process Technol, 2000: p. 105:221-9.