

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

Mestrado em Engenharia Mecânica

Ricardo Mendonça Lopes

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



25 de Outubro de 2014

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

Candidato: Ricardo Mendonça Lopes, 1070613@isep.ipp.pt

Orientação Científica:

Professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

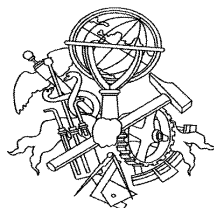
Co-orientação Científica:

Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, fgs@isep.ipp.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



25 de Outubro de 2015

Aos meus pais, irmão e amigos.

Agradecimentos

Ao professor Doutor Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, pela sua grande ajuda, incentivo e disponibilidade no decorrer de todo este trabalho.

Ao professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, pela sua orientação e conselhos dados durante este trabalho.

Ao professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto pelo apoio na realização da parte experimental.

Às Oficinas Mecânicas, em particular ao Engenheiro Vítor Moreira pelo apoio prestado na maquinação dos substratos TDCB.

Por fim, agradeço ao meu amigo, Engenheiro Tiago Faneco, pela ajuda e incentivo demonstrado durante a realização deste trabalho.

Resumo

O constante desenvolvimento observado nas ligações adesivas, em conjunto com as melhorias verificadas nas características dos adesivos, estão a ser traduzidos, de uma certa forma, num aumento das aplicações das ligações adesivas, assim como na variedade de aplicações.

No âmbito da previsão de resistência de juntas adesivas, dois métodos de grande relevância são a Mecânica da Fratura e os Modelos de Dano Coesivo. Os Modelos de Dano Coesivo permitem a simulação da iniciação e propagação do dano, recorrendo ao Método Dos Elementos Finitos. No que concerne à Mecânica da Fratura, a previsão de resistência é geralmente feita através de uma análise energética. Independentemente da forma como é obtida, a taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{Ic}) dos adesivos é um dos parâmetros mais importantes para a previsão da resistência das juntas. Dois dos ensaios mais utilizados são o *Double Cantilever Beam* (DCB) e o *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB).

Este trabalho pretende determinar e comparar o valor de G_{Ic} em juntas adesivas pelos ensaios DCB e TDCB. São utilizados três tipos de adesivos com diferentes graus de ductilidade. No ensaio DCB os métodos utilizados para a determinação de G_{Ic} são: *Compliance-Based Beam Method* (CBBM), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance Calibration Method* (CCM). Os métodos utilizados no ensaio TDCB são: *Simple Beam Theory* (SBT), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance Calibration Method* (CCM). Os resultados obtidos apresentam concordância entre os vários métodos de cada ensaio. A discrepância de resultados é superior quando comparados os dois tipos de ensaios.

Palavras-Chave

Double Cantilever Beam; Tapered Double Cantilever Beam; Adesivo estrutural; Tenacidade

Abstract

The continuous development observed in bonded joints, along with the improvements of the adhesives' properties, are resulting on an increase of the bonded joint applications, as well as the variety of applications.

Regarding the strength prediction of adhesive joints, two highly relevant methods are Fracture Mechanics and Cohesive Zone Models. Cohesive Zone Models, supported by the Finite Element Method, enable the simulation of damage initiation and propagation. By Fracture Mechanics, the strength prediction is usually carried out by an energetic analysis. Regardless of how it is obtained, the critical tensile strain energy release rate of adhesives (G_{Ic}) is one of the most important parameters for predicting the joint strength. Two of the most commonly used tests are the Double Cantilever Beam (DCB) and the Tapered Double Cantilever Beam (TDCB).

This work aims to determine and compare the value of G_{Ic} of adhesive joints by the DCB and TDCB tests. Three types of adhesives with different levels of ductility are used. In DCB test, the methods used to determine G_{Ic} are: Compliance-Based Beam Method (CBBM), Corrected Beam Theory (CBT) and Compliance Calibration Method (CCM). The methods used in the TDCB test are: Simple Beam Theory (SBT), Corrected Beam Theory (CBT) and Compliance Calibration Method (CCM). The results obtained agree well between the different methods considered for each test. The discrepancy of results is higher when comparing the two types of tests.

Keywords

Double Cantilever Beam; Tapered Double Cantilever Beam; Structural adhesive; Fracture toughness

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXI
NOMENCLATURA	XXIII
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	3
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS	5
2.1.1 <i>Esforços e tipos de rotura em juntas adesivas</i>	7
2.1.2 <i>Tipos de ligações adesivas</i>	12
2.2 ADESIVOS ESTRUTURAIS	14
2.2.1 <i>Caracterização dos adesivos estruturais</i>	15
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	17
2.2.2.1 Epóxidos	17
2.2.2.2 Fenólicos	18
2.2.2.3 Acrílicos	19
2.2.2.4 Poliuretanos	20
2.2.2.5 Poliimidas	20
2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ADESIVOS	21
2.3.1 <i>Ensaio de adesivo em bruto</i>	22
2.3.1.1 Ensaio de tração de provetes maciços	22
2.3.1.2 Ensaio Iosipescu ou <i>V-Notched beam shear method</i>	24
2.3.1.3 Ensaio de borboleta ou <i>Notched plate shear method (Arcan)</i>	25
2.3.2 <i>Ensaio de adesivo em junta adesiva</i>	26
2.3.2.1 Junta de sobreposição simples	26
2.3.2.2 Junta topo a topo em torção ou <i>Napkin-ring test</i>	27
2.3.2.3 <i>Thick Adherend Shear Test (TAST)</i>	27
2.3.2.4 Ensaio de arrancamento em junta tipo T	29
2.3.2.5 Ensaio de tração em juntas topo a topo	29

ÍNDICE

2.4	ENSAIOS DE CARATERIZAÇÃO À FRATURA.....	30
2.4.1	<i>Modo I</i>	32
2.4.1.1	Ensaio <i>Compact Tension</i> (CT) e <i>Single Edge Notched Bend</i> (SENB).....	32
2.4.1.2	Ensaio <i>Double Cantilever Beam</i> (DCB).....	33
2.4.1.3	<i>Tapered Double Cantilever Beam</i> TDCB.....	34
2.4.2	<i>Modo II</i>	35
2.4.2.1	<i>End-Notched Flexure</i> (ENF).....	36
2.4.2.2	<i>End-Loaded Split</i> (ELS).....	36
2.4.2.3	<i>Four-Point End-Notched Flexure</i> (4ENF).....	37
2.4.3	<i>Modo misto I + II</i>	37
2.4.3.1	<i>Asymmetric Double Cantilever Beam</i> (ADCB).....	39
2.4.3.2	<i>Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam</i> (ATDCB).....	39
2.4.3.3	<i>Mixed-Mode Bending</i> (MMB).....	40
2.4.3.4	<i>Mixed-Mode Flexure</i> (MMF).....	41
2.4.3.5	<i>Cracked Lap Shear</i> (CLS).....	42
2.5	MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DO G_{IC}	42
2.5.1	<i>Ensaio Double-Cantilever Beam</i>	43
2.5.1.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda.....	43
2.5.1.2	Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente.....	44
2.5.1.3	Métodos baseados no Integral J.....	46
2.5.2	<i>Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam</i>	47
2.5.2.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda.....	47
2.5.2.2	Método baseado na flexibilidade constante.....	49
3	TRABALHO EXPERIMENTAL.....	51
3.1	SUBSTRATOS PARA OS PROVETES DCB E TDCB.....	51
3.2	ADESIVOS.....	52
3.2.1	<i>Araldite</i> [®] AV138.....	52
3.2.2	<i>Araldite</i> [®] 2015.....	54
3.2.3	<i>Sikaforce</i> [®] 7752.....	56
3.3	FABRICO DOS SUBSTRATOS TDCB.....	57
3.4	FABRICO DOS PROVETES DCB E TDCB.....	64
3.5	CONDIÇÕES DE ENSAIO.....	71
3.6	RESULTADOS.....	75
3.6.1	<i>Ensaio Double-Cantilever Beam</i>	75
3.6.1.1	Curvas $P-\delta$	75
3.6.1.2	Determinação do G_{IC}	80
3.6.1.2.1	Adesivo <i>Araldite</i> [®] AV138.....	80
3.6.1.2.2	Adesivo <i>Araldite</i> [®] 2015.....	82
3.6.1.2.3	Adesivo <i>Sikaforce</i> [®] 7752.....	83
3.6.2	<i>Ensaio Tapered Double-Cantilever Beam</i>	85
3.6.2.1	Curvas $P-\delta$	85

ÍNDICE

3.6.2.2	Determinação do G_{Ic}	89
3.6.2.2.1	Adesivo Araldite® AV138.....	90
3.6.2.2.2	Adesivo Araldite® 2015.....	91
3.6.2.2.3	Adesivo Sikaforce® 7752.....	92
3.6.3	<i>Análise dos resultados</i>	94
3.6.4	<i>Comparação dos resultados pelos dois tipos de ensaio</i>	98
4	CONCLUSÕES	101
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	105
	ANEXO A. DESMOLDANTE LOCTITE® FREKOTE 770-NC	111
	ANEXO B. ADESIVO ARALDITE® AV138	115
	ANEXO C. ADESIVO ARALDITE® 2015	121
	ANEXO D. ADESIVO SIKAFORCE® 7752	129

Índice de Figuras

Figura 1- Aplicação de adesivos na indústria aeronáutica [6].....	5
Figura 2 - Tensões numa junta adesiva (a) tração; (b) compressão; (c) corte; (d) clivagem e (e) arrancamento [10].....	7
Figura 3 - Distribuição de tensões numa junta topo a topo [4]	8
Figura 4 - Tensão de corte: (a)distribuição da tensão num adesivo frágil; (b) distribuição da tensão num adesivo dúctil (adaptado da referência [10]).....	9
Figura 5 - Distribuição de tensões numa ligação adesiva para esforços de (a) clivagem e (b) arrancamento (adaptado da referência [10]).....	10
Figura 6 - Rotura coesiva (a) no aderente e (b) no adesivo	11
Figura 7 - Rotura adesiva	12
Figura 8 - Rotura mista.....	12
Figura 9 - Tipos de juntas [12]	13
Figura 10 - Molde para produção de provetes em osso de cão [15].....	23
Figura 11 - Molde para produção de placas de adesivo [16].....	23
Figura 12 - Geometria dos provetes de <i>bulk</i> (dimensões em mm) [17]	24
Figura 13 - Geometria e carregamento do provete para o ensaio Iosipescu [2]	24
Figura 14 - Provette Arcan	25
Figura 15 - Fixação do provete com recurso a amarras para o ensaio Arcan [18]	25
Figura 16 - Representação do ensaio da junta de sobreposição simples [15].....	26
Figura 17 - Provette para <i>Napkin-ring test</i> [4]	27
Figura 18 - Provette TAST (dimensões em mm) [15].....	27
Figura 19 - Gabarito para alinhamento de provetes TAST em vista explodida [16].....	28
Figura 20 - Modo de carregamento do ensaio TAST [21]	28
Figura 21 - Ensaio de arrancamento em junta tipo T [22].....	29
Figura 22 – Geometria da junta de topo a topo (dimensões em mm) [2]	30
Figura 23 – Modos de carregamento [23]	31
Figura 24 – Geometria dos provetes de adesivo maciço para determinação do G_{Ic} : (a) CT; (b) SENB [2]	32
Figura 25 - Geometria do substrato DCB (dimensões em mm)	33

Figura 26 - Esquema do ensaio DCB	34
Figura 27 - Substratos para ensaio TDCB [22]	35
Figura 28 - Ensaio ENF, modo II [29]	36
Figura 29 - Ensaio ELS, modo II [29].....	37
Figura 30 - Ensaio 4ENF, modo II [29]	37
Figura 31 - Esquema do ensaio ADCB [26]	39
Figura 32 - Esquema do ensaio ATDCB.....	40
Figura 33 - Ensaio MMB - modo Misto.....	40
Figura 34 – Esquema do ensaio MMF em modo misto [26].....	41
Figura 35 - Representação do ensaio CLS [32].....	42
Figura 36 - Obtenção da correção do comprimento de fenda, Δ [26]	44
Figura 37 - Representação esquemática da zona de processo de fratura e fenda equivalente [25].....	45
Figura 38 - Ensaio DCB em carregamento com variáveis do método Integral J	47
Figura 39 - Modo de fornecimento resina Araldite [®] AV 138 e endurecedor HV 998.....	52
Figura 40 - Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Araldite [®] AV 138 [41].....	53
Figura 41 - Modo de fornecimento do adesivo Araldite [®] 2015	54
Figura 42 - Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Araldite [®] 2015 [41]	55
Figura 43 - Modo de fornecimento do adesivo SikaForce [®] 7752 L60: Adesivo (a) e endurecedor (b).....	56
Figura 44 - Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Sikaforce [®] 7752 [44].....	56
Figura 45 - Geometria dos substratos com valor de m constante e aproximação por função linear; sistema de coordenadas para início da função do polinómio (ponto de aplicação da carga).....	58
Figura 46 – Comparação entre as funções polinomial e aproximada para a definição da relação entre x e y ou y'	59
Figura 47 - Provete TDCB segundo a norma ASTM D 3433-99 (dimensões em mm).....	60
Figura 48 - Centro de maquinagem CNC HAAS VF2.....	61
Figura 49 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT 6S	65
Figura 50 – Substratos DCB após operação de granalhagem	65
Figura 51 – Extremidade do provete DCB onde é criada a pré-fenda	66
Figura 52 – Espaçadores no forno para cura do desmoldante.....	67
Figura 53 - Aplicação de desmoldante nos espaçadores	67

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 54 - Posicionamento dos calços nos substratos DCB	68
Figura 55 - Preparação do adesivo SikaForce® 7752 L60 (a) adesivo; (b) pesagem do adesivo numa balança digital	69
Figura 56 - Aplicação do adesivo Araldite® 2015	69
Figura 57 – Mó utilizada para a remoção do excesso de adesivo nas laterais dos provetes	70
Figura 58 - Provette TDCB com corretor aplicado	70
Figura 59 - Provette preparados: DCB (a), TDCB (b).....	71
Figura 60 - Equipamento de ensaio Shimadzu AG-X 100	71
Figura 61 - Amarras em U.....	72
Figura 62 - Ensaio (a) DCB (b) TDCB.....	72
Figura 63 - Equipamento fotográfico utilizado para a medição do comprimento de fenda	73
Figura 64 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® AV 138.....	75
Figura 65 – Rotura do adesivo Araldite® AV138 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5.....	76
Figura 66 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® 2015.....	77
Figura 67 – Rotura do adesivo Araldite® 2015 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5.....	78
Figura 68 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752	79
Figura 69 – Rotura do adesivo Sikaforce® 7752 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5.....	79
Figura 70 – Curva-R relativo ao provete 1	80
Figura 71 – Curva-R relativo ao provete 2.....	82
Figura 72 – Curva-R relativo ao provete 2.....	84
Figura 73 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® AV138	85
Figura 74 - Rotura do adesivo Araldite® AV138 no ensaio TDCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5.....	86
Figura 75 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® 2015.....	87
Figura 76 - Rotura do adesivo Araldite® 2015 no ensaio TDCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5.....	88
Figura 77 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752.....	88
Figura 78 - Rotura do adesivo Sikaforce® 7752 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5.....	89
Figura 79 – Curva-R relativo ao provete nº 2.....	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 80 – Curva-R relativo ao provete 2.....	91
Figura 81 – Curva-R relativo ao provete 5.....	93
Figura 82 – Valores de G_{Ic} obtidos pelo ensaio DCB	99
Figura 83 – Valores de G_{Ic} obtidos pelo ensaio TDCB	100

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Propriedades dos adesivos estruturais [12]	21
Tabela 2 – Ensaio em modo misto [26]	38
Tabela 3 -Propriedades do aço C45E	51
Tabela 4 - Propriedades relativas ao adesivo AV 138 [41]	53
Tabela 5 - Propriedades relativas ao adesivo Araldite® 2015 [41].....	55
Tabela 6 - Propriedades relativas ao adesivo Sikaforce® 7752 [44].....	57
Tabela 7 - Comparação entre conjuntos de pontos pela função de m constante (x,y) e pela função linear aproximada (x,y')	59
Tabela 8 – Gama operatória para o primeiro aperto	62
Tabela 9 – Gama operatória para o segundo aperto	63
Tabela 10 – Parâmetros de maquinagem	64
Tabela 11 - Velocidades de ensaio	73
Tabela 12 – Comprimento de fenda inicial no ensaio DCB (em mm)	74
Tabela 13 - Comprimento de fenda inicial no ensaio TDCB (em mm)	74
Tabela 14 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® AV138 (em N/mm).....	81
Tabela 15 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® 2015 (em N/mm).....	83
Tabela 16 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Sikaforce® 7752 (em N/mm)	84
Tabela 17 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® AV138 (em N/mm).....	91
Tabela 18 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® 2015 (em N/mm).....	92
Tabela 19 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Sikaforce® 7752 (em N/mm)	93

Nomenclatura

Caracteres Romanos

t_n - Tensão de tração

a – Comprimento de fenda

B - largura do substrato

C – Flexibilidade do substrato

c - Metade da espessura do aderente

E_I - Módulo de Young dos substratos

E_f - Módulo de flexão equivalente

f_z – Avanço de cada dente da fresa

G – Energia de fractura

G_{13} - Módulo de corte

G_c – Energia crítica de fractura

G_{Ic}, J_{Ic} – Energia crítica de fractura em modo I

G_{IIc} – Energia crítica de fractura em modo II

h, h_1, h_2 – Espessura do substrato

I - momento de inércia da secção reta de um aderente

J - Taxa de energia libertada não linear

k - rigidez

K – Tenacidade à fractura

m – constante para efeitos de ensaio TDCB

M_f - momento de fletor

P – Carga aplicada

P_u - Carga aplicada por unidade de largura dos aderentes

T – Carga máxima de início da propagação da fenda majorada em 150%

V - Esforço transversal em cada braço do provete

V_c – Velocidade de corte

V_f – Velocidade de avanço da mesa

z – Número de dentes da fresa

Caracteres Gregos

θ_o - Rotação dos aderentes na ponta da fenda

θ_p - Rotação relativa dos aderentes no ponto de solicitação P

δ_{nc} - Deslocamento dos aderentes

σ_y - Tensão de cedência do material do substrato

δ - Deslocamento

Operadores

Δ - Fator de correção do comprimento de fenda

ϕ – grau de rácio de modos

Abreviaturas

4ENF - *Four-point End Notched Flexure*

ADCB - *Asymmetric Double Cantilever Beam*

ASTM – American Society for Testing and Materials

ATDCB - *Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam*

BS – British Standard

CBBM - *Compliance Based Beam Method*

CBT - *Corrected Beam Theory*

CCM - *Compliance Calibration Method*

CLS - *Cracked Lap Shear*

CN – Código Numérico

CNC – Controlo Numérico Computurizado

CT - *Compact Tension*

DBT - *Direct Beam Theory*

DCB - *Double Cantilever Beam*

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

DIN – *Deutsches Institut für Normung*

ELS - *End Loaded Split*

EN – *European Normalization*

ENF - *End Notched Flexure*

FPZ – *Fracture Process Zone*

ISEP – Instituto Superior de Engenharia do Porto

ISO – *International Standard Organization*

JSD - Junta de Sobreposição Dupla

JSS - Junta de Sobreposição Simples

LEFM - *Linear Elastic Fracture Mechanics*

LEM – Laboratório de Ensaios Mecânicos

MMB - *Mixed-Mode Bending*

MMF - *Mixed Mode Flexure*

NF – Norma Francesa

SBT – *Simple Beam Theory*

SENB - *Single Edge Notched Bend*

SLB - *Single Leg Bending*

TAST - *Thick Adherend Shear Test*

TDCB - *Tapered Double Cantilever Beam*

ZPF - Zona de processo de fratura

1 Introdução

1.1 Contextualização

As juntas adesivas são cada vez mais utilizadas em detrimento das ligações soldadas, rebitadas e aparafusadas, devido à redução de concentrações de tensão, redução de peso e facilidade em fabricar uma junta colada, entre outras vantagens [1, 2]. No entanto, não existem técnicas simples que permitam a determinação da resistência de juntas adesivas, principalmente quando sujeitas a esforços de longa duração [2]. Com a crescente utilização desta forma de ligação, é de alta importância a existência de técnicas que permitam prever a resistência de juntas coladas, de forma a minimizar os testes durante as várias fases de projeto dos produtos que utilizam esta forma de ligação [3].

Existem vários métodos para determinar a resistência das juntas adesivas. Através da Mecânica da Fratura é possível avaliar se as solicitações impostas numa estrutura são suscetíveis de provocar a rotura. A partir de Modelos de Dano Coesivo é possível simular a iniciação e a propagação de dano com recurso a Elementos Finitos [4].

A Mecânica da Fratura tem como objetivo determinar a taxa crítica de libertação de energia de deformação (G_{Ic}), sendo esta uma propriedade do material. O método mais utilizado para previsão de resistência neste âmbito consiste na utilização de uma abordagem energética. É também possível utilizar a abordagem dos fatores de intensidade de tensão para efeitos de previsão da resistência (K). Para que seja possível utilizar a Mecânica da Fratura é necessário um dano inicial, que por norma corresponde a uma pré-fenda. Existem vantagens em utilizar a abordagem energética, que depende da determinação do valor de G_{Ic} , pois este apresenta um importante significado físico diretamente relacionado com o processo de absorção de energia, enquanto o valor de K não

é tão facilmente calculável, principalmente quando a fenda está localizada numa interface ou respetiva vizinhança.

Pela técnica dos Modelos de Dano Coesivo, o comportamento das estruturas é previsto através de critérios de tensões para o início do dano e de energia para a propagação do dano, pelo que o conhecimento do valor de G_{Ic} também é fundamental.

A determinação de G_{Ic} revela-se assim uma propriedade de grande importância, e devem existir métodos robustos para a sua obtenção para os diferentes tipos de adesivos usados atualmente, que apresentam comportamentos desde o frágil até ao dúctil.

1.2 Objetivos

Este trabalho pretende determinar e comparar o valor de G_{Ic} de juntas adesivas pelos ensaios *Double Cantilever Beam* (DCB) e *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB). São utilizados três tipos de adesivos com diferentes graus de ductilidade, onde também é feita uma comparação entre eles. No ensaio DCB os métodos utilizados para a determinação de G_{Ic} são: *Compliance-Based Beam Method* (CBBM), *Corrected Beam Theory* (CBT) e *Compliance Calibration Method* (CCM). Os métodos utilizados no ensaio TDCB são: *Simple Beam Theory* (SBT), CBT e CCM.

Como referência para comparação ao longo do trabalho, no ensaio DCB é utilizado o método CBBM, e no ensaio TDCB é utilizado o método SBT, uma vez que estes métodos se revelaram os mais robustos e menos sujeitos a erros de medição de parâmetros durante os ensaios.

O trabalho experimental apresentado nesta dissertação segue as seguintes etapas:

- Fabrico de substratos TDCB em aço;
- Fabrico de provetes DCB e TDCB em três tipos de adesivos com diferentes graus de ductilidade, dois dúcteis (Sikaforce[®] 7752 e Araldite[®] 2015) e um frágil (Araldite[®] AV138);
- Determinação dos valores de G_{Ic} pelos vários métodos enunciados;

- Comparação dos valores de G_{Ic} entre os três tipos de adesivos;
- Comparação de valores G_{Ic} entre os dois tipos de ensaios;
- Comparação de valores G_{Ic} entre os vários métodos utilizados.

Este trabalho tem especial importância, uma vez que é estimado o valor de G_{Ic} de vários adesivos, com diferentes graus de ductilidade. Assim, é possível verificar em que tipo de aplicação cada adesivo se enquadra.

1.3 Organização do relatório

No capítulo 1 introduz-se o tema da presente dissertação, onde se dá a conhecer a contextualização, objetivos e a organização do trabalho.

No capítulo 2 é apresentada a revisão bibliográfica, onde serão abordados os vários tipos de ligação, os materiais poliméricos, os principais métodos de ensaio para determinação das propriedades de adesivos e ensaios de caracterização à fratura. São assim apresentados os principais ensaios utilizados em modo I, II e misto. Por fim, são apresentados os métodos existentes na literatura para determinação de G_{Ic} para o ensaio DCB e TDCB.

No capítulo 3 apresenta-se os adesivos utilizados, materiais dos substratos, a gama operatória de fabrico dos substratos TDCB e fabricação dos provetes DCB e TDCB. São também indicadas as condições de ensaio, resultados obtidos, análise comparativa entre métodos, ensaios e resultados de trabalhos já executados anteriormente.

No capítulo 4 são expostas as conclusões relevantes da presente dissertação, bem como sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

As ligações adesivas estão em constante desenvolvimento e expansão, devido às suas vantagens comparativamente aos métodos de ligação tradicionais, tais como soldadura, rebiteagem entre outros. É na indústria aeronáutica que se tem evidenciado o desenvolvimento das juntas adesivas, pois estas estão sujeitas a rigorosas condições de trabalho, como diferenças extremas de temperatura e humidade (Figura 1) [5].

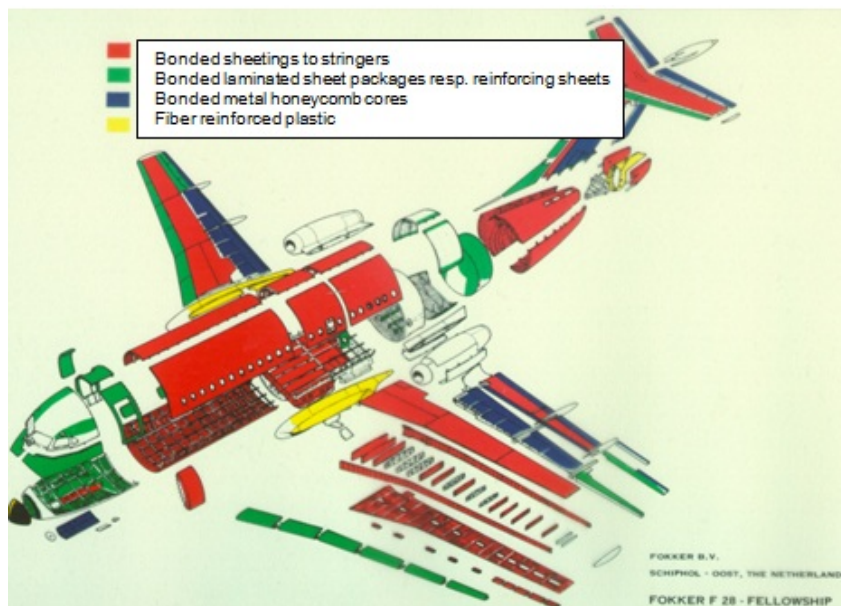


Figura 1- Aplicação de adesivos na indústria aeronáutica [6]

As juntas adesivas estruturais são também aplicadas na indústria automóvel, onde o peso e a resistência ao impacto são as propriedades mais importantes [7].

Para além das aplicações na indústria aeroespacial e indústria automóvel, pode-se encontrar aplicações em muitas outras áreas, como na indústria naval, artigos de desporto, embalagens, entre outros.

As principais vantagens na utilização de ligações adesivas são [4, 8]:

- Permite a ligação entre vários tipos de materiais diferentes, tais como metais, plásticos, compósitos, entre outros. Na ligação entre metais, este tipo de ligação evita a corrosão galvânica;
- Distribuição mais uniforme das tensões relativamente a outros métodos de ligação;
- Através de uma junta bem projetada, é possível o amortecimento de vibrações e ruído, devido à sua capacidade de absorção de energia;
- As ligações adesivas simplificam a ligação de superfícies com formas irregulares, originando montagens mais leves;
- É um método de ligação de baixo custo e permite que o processo de aplicação seja automatizado.

As principais desvantagens das ligações adesivas são [4, 8]:

- É necessário fazer uma preparação das superfícies dos substratos para garantir uma boa adesão. A preparação de superfícies pode ser feita através de vários tipos de tratamento (como por exemplo, abrasão mecânica, desengorduramento com solventes, ataques químicos, entre outros);
- Têm uma temperatura de serviço limitada, comparadas com os outros métodos de ligação;
- As ligações adesivas apresentam baixa resistência a forças de arrancamento, clivagem e impacto, pelo que, devem ser colocadas preferencialmente sob a ação de esforços de corte, situação em que apresentam um melhor comportamento;

- São necessárias ferramentas de fixação para garantir que as peças fiquem posicionadas da maneira pretendida;
- É necessário tempo para que a cura do adesivo seja efetuada;
- Não existe critério de dimensionamento universal para projetar qualquer estrutura, sendo por isso difícil dimensionar estruturas sujeitas a condições adversas e a esforços de fadiga para períodos de longa duração.

2.1.1 Esforços e tipos de rotura em juntas adesivas

É raro conseguir uma distribuição de tensões uniforme numa ligação adesiva. De facto é mais comum encontrar uma distribuição de tensões não uniforme. A atuação de forças externas provoca concentração de tensões que são responsáveis pela diminuição da resistência máxima da junta. Os tipos de esforços a que uma junta adesiva pode ser submetida são: tração, compressão, corte, clivagem e arrancamento (Figura 2) [9].

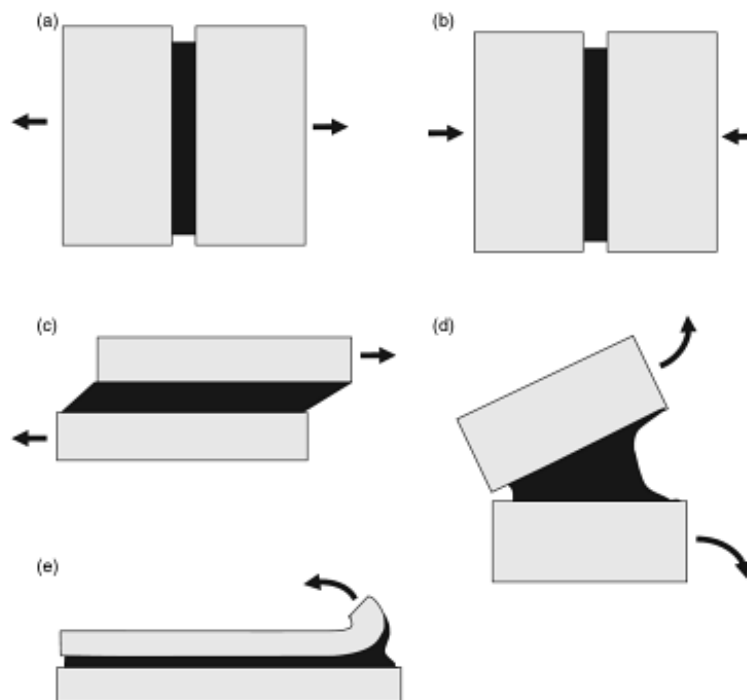


Figura 2 - Tensões numa junta adesiva (a) tração; (b) compressão; (c) corte; (d) clivagem e (e) arrancamento [10]

É de extrema importância que na fase do projeto do processo de ligação sejam eliminadas ou diminuídas todas as tensões localizadas, pois estas são pontos potenciais de início de dano.

Tração

As tensões de tração desenvolvem-se a partir de forças que atuam perpendicularmente ao plano da junta e são distribuídas uniformemente por toda a área colada. Uma junta colada deve ser projetada para que as superfícies dos aderentes fiquem paralelas e que atuem apenas forças axiais (Figura 3), e os substratos devem ser suficientemente rígidos para que a tensão fique uniformemente distribuída. Na prática, a espessura do adesivo é difícil de controlar, e por isso surgem forças não axiais, o que faz com que a junta fique sujeita a tensões de clivagem ou de arrancamento [11].

Compressão

As tensões de compressão desenvolvem-se também a partir de forças que atuam perpendicularmente ao plano da junta, embora sejam forças que tendem a comprimir um aderente contra o outro [10].

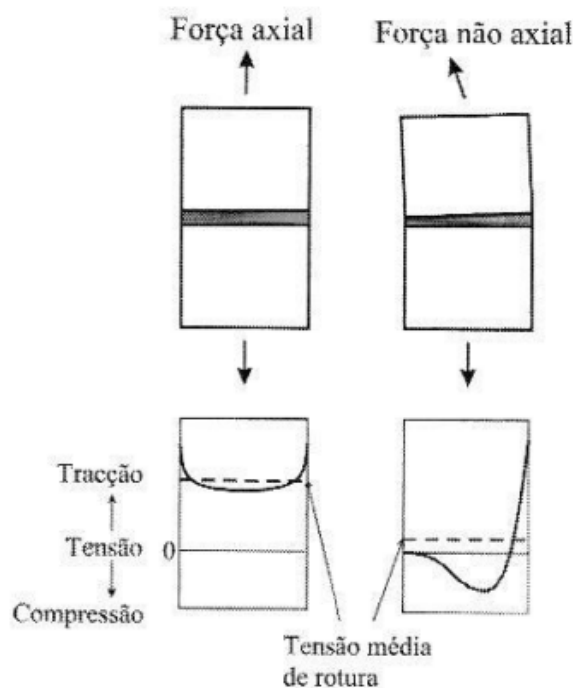


Figura 3 - Distribuição de tensões numa junta topo a topo [4]

Tal como nas forças de tração, é importante garantir que as forças de compressão estejam alinhadas para que o adesivo fique sujeito apenas a compressão pura. Na verdade, quando uma junta está carregada em compressão ‘pura’, praticamente não necessita de adesivo [9].

Corte

As tensões de corte resultam de forças que atuam no plano paralelo ao plano do adesivo que tendem a separar os substratos. Através da Figura 4 é possível verificar a distribuição de tensões de corte numa junta de sobreposição simples (JSS) para um adesivo frágil (a) e dúctil (b) [10].

Os tipos de junta que são utilizadas para testar a resistência ao corte do adesivo são relativamente fáceis de fabricar e são frequentemente utilizadas. Normalmente os adesivos são mais resistentes quando solicitados ao corte, pois toda a área colada contribui para a resistência da junta e os adesivos apresentam valores de tenacidade superior neste modo de solicitação [9].

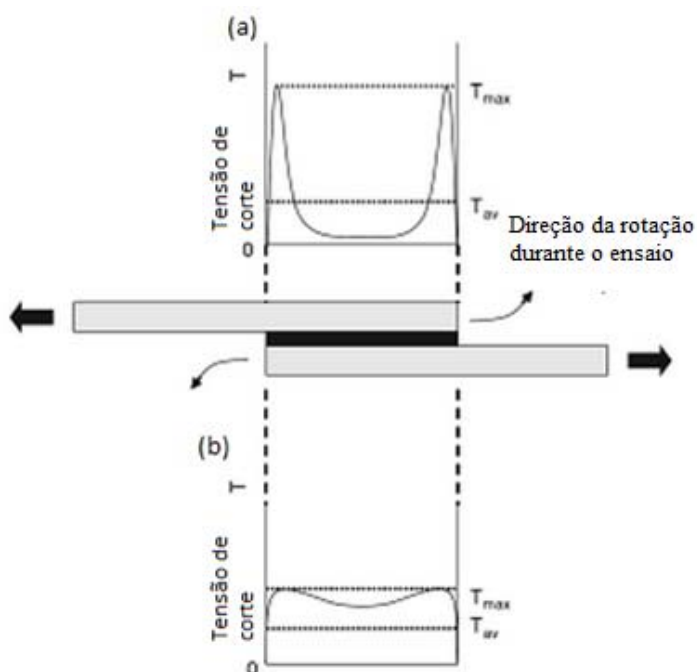


Figura 4 - Tensão de corte: (a) distribuição da tensão num adesivo frágil; (b) distribuição da tensão num adesivo dúctil (adaptado da referência [10])

Clivagem

São tensões que resultam da aplicação de forças numa das extremidades da junta rígida, que tendem a separar os substratos, como se pode verificar na Figura 5 (a).

As tensões de clivagem e de arrancamento devem ser evitadas numa junta colada, pois as juntas apresentam uma resistência muito inferior a este tipo de solicitações, relativamente a esforços de corte. Esta menor resistência deve-se ao facto das tensões estarem concentradas numa área muito mais pequena e na menor capacidade de deformação plástica dos adesivos à tração. Numa distribuição de tensões de clivagem, pode-se notar (Figura 5 (a)) que uma das extremidades está sujeita a elevados esforços. Já a outra extremidade não contribui de forma significativa para a resistência da junta ligada [12].

Arrancamento

As tensões de arrancamento são similares às tensões de clivagem, diferem nos substratos, em que pelo menos um deles é flexível. Desta forma, o ângulo de separação dos substratos pode ser maior para o arrancamento do que para a clivagem. Na Figura 5 pode-se verificar a distribuição de tensões quando ocorrem esforços de arrancamento.

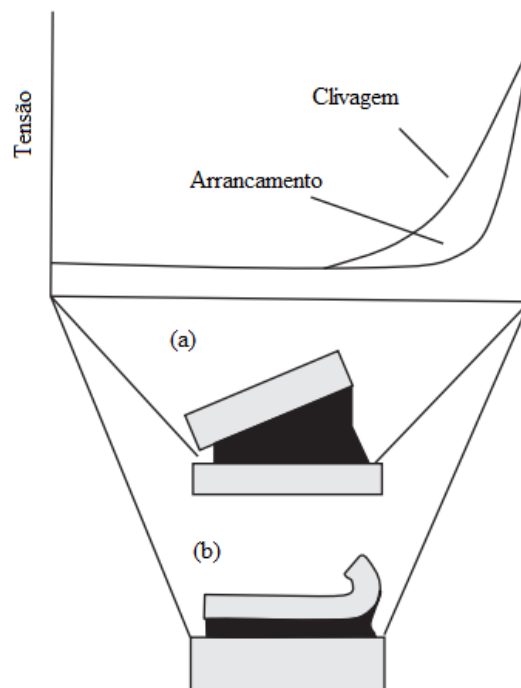


Figura 5 - Distribuição de tensões numa ligação adesiva para esforços de (a) clivagem e (b) arrancamento (adaptado da referência [10])

Tipos de rotura:

Os modos de rotura podem ser classificados da seguinte forma:

- Rotura coesiva;
- Rotura adesiva;
- Rotura mista.

A rotura coesiva pode ocorrer no adesivo ou no aderente.

A rotura coesiva no aderente, como ilustra a Figura 6 (a), ocorre num dos aderentes, em que se verifica que a resistência do substrato é inferior à resistência do adesivo.

A rotura coesiva no adesivo ocorre no interior do próprio adesivo. Neste caso, o substrato é mais resistente do que a resistência interna do adesivo. De acordo com a Figura 6 (b), deve-se constatar a presença de adesivo em ambos os aderentes.

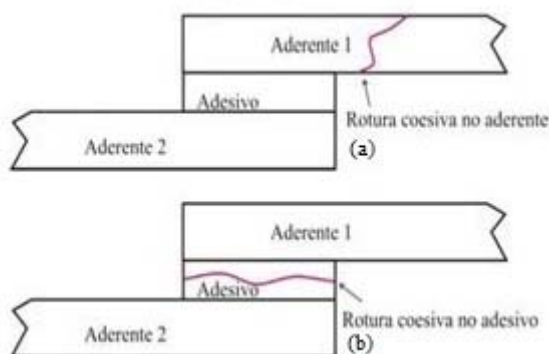


Figura 6 - Rotura coesiva (a) no aderente e (b) no adesivo

A rotura adesiva ocorre pela interface entre o adesivo e um dos aderentes. Na análise após rotura, pode-se verificar que um dos aderentes não apresenta qualquer resíduo de adesivo, estando a totalidade do adesivo no outro aderente.

Este tipo de rotura pode dever-se ao facto das superfícies dos substratos estarem mal preparadas, ou pode ser provocado pelas tensões de arrancamento e de corte que atingem valores máximos junto à interface [12].

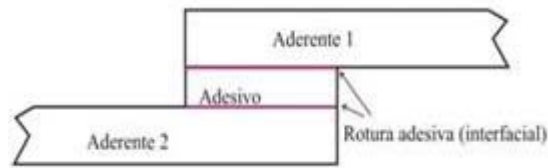


Figura 7 - Rotura adesiva

A rotura mista consiste na combinação de uma rotura adesiva e rotura coesiva pelo adesivo (Figura 8). Este tipo de rotura pode estar relacionado com uma limpeza ineficaz da superfície colada [12].

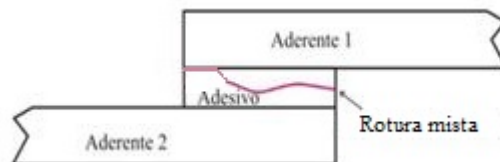


Figura 8 - Rotura mista

2.1.2 Tipos de ligações adesivas

A escolha do tipo de ligação adesiva é um aspeto importante para a resistência, segurança e durabilidade dessa mesma ligação [10]. As juntas coladas ideais são aquelas que são submetidas a tensões orientadas na direção em que o adesivo é mais resistente, ou seja, em corte [9].

Na figura seguinte são apresentados alguns dos vários tipos de junta existentes, sendo que as mais comuns são as JSS, as juntas de sobreposição dupla (JSD), as juntas com chanfro (*scarf joint*) e as juntas em degraus [4].

A junta de sobreposição simples é a mais utilizada, devido à sua facilidade de fabricação [4, 12]. No entanto, devido ao carregamento não ser colinear com a junta colada, provoca flexão nos substratos, sendo o adesivo submetido a esforços de corte e tração (arrancamento) na extremidade da junta [4].

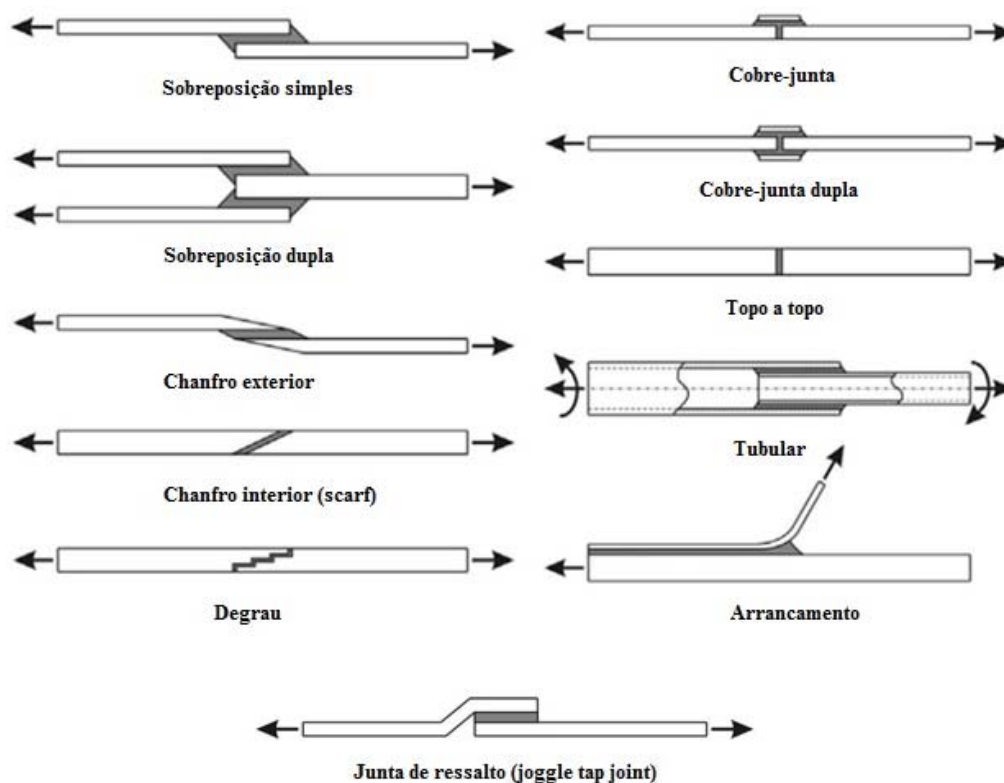


Figura 9 - Tipos de juntas [12]

A junta de sobreposição dupla permite diminuir bastante o momento fletor. A resistência deste tipo de juntas é normalmente duas vezes maior que a resistência das juntas de sobreposição simples para o mesmo comprimento de sobreposição [8]. Na realidade, é superior a duas vezes, devido à diminuição do arrancamento e tensões de corte mais uniformes.

Ao contrário da JSS, na ligação denominada por cobre-junta, é utilizado um remendo para ligar os dois aderentes. Esta junta está sujeita a tensões de arrancamento devido ao carregamento não ser colinear. A junta designada por cobre-junta dupla, como é reforçada com dois calços na zona da ligação colada, o momento fletor é reduzido e portanto a junta é mais resistente [2].

O tipo de juntas de chanfro interior (*scarf*) e em degraus permitem que os esforços de arrancamento sejam inferiores, quando comparadas com as juntas de sobreposição simples

e dupla, o que faz com que, para a mesma área de colagem, a resistência seja superior. No entanto, o fabrico é bastante mais complexo.

A junta de topo a topo apresenta uma geometria simples, e por isso é fácil de fabricar. No entanto, não apresenta grande resistência devido aos esforços de clivagem aplicados no adesivo [12].

A junta de chanfro exterior permite reduzir a concentração de tensões no final da sobreposição dos aderentes. Desta forma, é conseguida uma distribuição de tensões mais uniforme, quando comparado com a JSS [10].

A junta tubular pode ser submetida a carregamentos axiais ou de torção. Quando submetida a uma carga axial, as concentrações de tensões vão ocorrer no final da sobreposição. No caso de ser submetida à torção, existe apenas um diferencial de tensão ao longo do comprimento de sobreposição [2].

A junta sujeita a arrancamento utiliza um substrato mais fino e outro mais espesso, o que faz com que ocorra arrancamento. A resistência deste tipo de junta pode ser melhorada com o aumento da área colada, a flexibilidade das extremidades da junta colada e a rigidez da base [2].

A junta de ressalto é uma solução simples para conseguir o alinhamento das forças, mas quanto à fabricação pode trazer algumas dificuldades, principalmente na utilização de substratos frágeis ou de elevada resistência [2, 12].

2.2 Adesivos estruturais

Os adesivos estruturais começaram por surgir na indústria de construção mecânica, devido à necessidade de assegurar a transmissão de esforços entre componentes, com resistência similar aos tipos de ligações rebitadas, aparafusadas ou soldadas [13].

Um adesivo estrutural é definido como sendo um material de elevada resistência e desempenho, capaz de resistir a cargas elevadas sem exibir deformações significativas. Este tipo de adesivo possui uma resistência ao corte superior a 7 MPa [12].

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Os adesivos podem ser caracterizados por:

- Composição química;
- Modo de aplicação ou reação;
- Forma física;
- Durabilidade;
- Aplicação;
- Tipo ou família.

Composição química

Os adesivos, quando classificados quanto à composição química, subdividem-se em 4 grupos, sendo eles:

- Termoendurecíveis;
- Termoplásticos;
- Elastómeros;
- Híbridos.

Os adesivos termoendurecíveis são formados por uma estrutura molecular reticulada (com pontos de ligação entre cadeias de moléculas), conferindo uma grande rigidez após a sua polimerização [12]. Este tipo de adesivo não permite ser reprocessado. Ao contrário dos termoendurecíveis, os termoplásticos podem ser reprocessados, isto é, reaquecidos e reutilizados. Os adesivos termoplásticos apresentam estruturas moleculares lineares ou ramificadas.

Os elastómeros podem ser constituídos por materiais termoendurecíveis ou termoplásticos. Estes adesivos apresentam boas propriedades, tais como elevada tenacidade e boa capacidade de deformação, devido a serem materiais muito viscoelásticos [2]. Quando

comparados com os termoendurecíveis e termoplásticos, os elastômeros apresentam uma maior resistência ao arrancamento, e uma menor resistência ao corte [10].

Os adesivos híbridos são obtidos a partir da combinação de resinas termoendurecíveis, termoplásticas e elastoméricas, com o objetivo de incrementar algumas propriedades. Este tipo de adesivo é desenvolvido de forma a aproveitar as melhores propriedades de cada componente. Por exemplo, uma resina com boa resistência a altas temperaturas e rígida, pode ser combinada com uma outra resina com boa ductilidade. No entanto, a resistência a alta temperatura vai ser sempre sacrificada pela adição do aditivo que confere a boa ductilidade [9].

Modo de aplicação ou reação

Os modos de reação podem ser classificados da seguinte forma:

- Reação química – Com um endurecedor ou reação com energia exterior (calor, radiação, catalisador de superfície, entre outros);
- Perda de solvente ou perda de água – endurecimento a partir da evaporação de solvente ou água, conseguida a partir de difusão através de um substrato poroso;
- Arrefecimento a partir do estado fundido – alguns adesivos podem endurecer por arrefecimento a partir do estado fundido.

Forma física

Quanto à sua forma física, os adesivos podem ser classificados como:

- Uma parte em solução (líquido);
- Sólido (fita, filme);
- Uma parte sem solvente (líquido ou pasta);
- Várias partes sem solvente (líquido ou pasta).

Durabilidade

A partir da durabilidade e resistência dos adesivos, é possível classifica-los como sendo resistentes a ácidos, a altas temperaturas, à humidade, entre outros.

Aplicação

O material a utilizar como substrato também permite classificar os vários tipos de adesivos. Existem adesivos adequados para serem aplicados em madeiras, metais, vinilo, entre outros.

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

2.2.2.1 Epóxidos

Este tipo de adesivo apresenta uma boa resistência química e mecânica, não produz substâncias voláteis durante a cura, tem baixa contração e formam ligações extremamente fortes e duráveis com a maioria dos materiais [12]. Os adesivos epóxidos podem ser fornecidos num só componente (resina e endurecedor no mesmo componente) ou em dois componentes (o endurecedor é apresentado em separado da resina). É possível alterar as propriedades dos adesivos epóxidos, através da adição de outra resina, formando um adesivo híbrido. De forma geral, os adesivos epóxidos apresentam como vantagens alta resistência mecânica, boa resistência a solventes, custo relativamente baixo, entre outras. Como principais limitações, este tipo de adesivo apresenta uma vida de armazenagem curta e necessita de ser misturado com proporções exatas para garantir as melhores propriedades [2].

De seguida são apresentadas algumas combinações que podem ser realizadas com a resina de epóxido. São enumeradas as principais características e possíveis aplicações para os vários adesivos híbridos.

Epóxido-poliamida

A resina de poliamida neste adesivo funciona como endurecedor e agente flexibilizante. Este adesivo melhora a resistência ao arrancamento e promove uma maior flexibilidade, em comparação com os epóxidos não modificados. Possuem boas características a baixas

temperaturas, na ordem dos -70°C , garantindo igualmente boa resistência ao impacto e boa resistência à fadiga. Este tipo de adesivo, também conhecido por epóxico-nylon, é utilizado para colar folhas de alumínio na indústria aeronáutica.

Epóxico-polisulfido

A resina de polisulfido, quando combinada com a resina de epóxico, contribui para uma melhor resistência química e melhor flexibilidade. Este tipo de adesivo híbrido é adequado para a colagem de substratos com coeficientes de dilatação térmica diferentes. Normalmente, é aplicado na colagem de vidros e de borrachas a metais.

Epóxico-fenólico

Com a adição de resina fenólica, este adesivo híbrido apresenta grande estabilidade e resistência ao corte para temperaturas elevadas, na ordem dos 200°C . Porém, tem baixa resistência ao arrancamento e à clivagem, quando comparado com os restantes adesivos de epóxico [12]. Devido ao seu elevado escoamento, estes adesivos são aplicados para ligar compósitos com estrutura em ninho de abelha (*honeycomb*) [4].

Epóxico-poliuretano

O poliuretano, quando combinado com o epóxico, origina um adesivo com uma resistência ao arrancamento similar aos adesivos híbridos epóxico-poliamida. Possuem também uma boa resistência a choques e vibrações, bem como uma boa resistência à fadiga [12].

Epóxico-nitrilo

Este tipo de adesivo apresenta uma boa resistência ao arrancamento e uma gama de temperatura de serviço entre os -55°C e os 120°C [13]. Normalmente, encontra-se aplicado na construção e manutenção de aviões comerciais a jacto.

2.2.2.2 Fenólicos

Os adesivos fenólicos apresentam como principais vantagens o seu baixo custo, boa resistência mecânica, boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. As principais desvantagens são a baixa resistência à corrosão por solventes e ao impacto, e grande fragilidade [12]. Quando surgiram, eram aplicados na colagem de madeira a

madeira, sendo agora aplicados também na colagem de metais, conferindo uma resistência mecânica satisfatória [13]. As propriedades deste tipo de adesivo podem ser melhoradas com a adição de resina vinílica ou elastômeros.

Fenólico-vinílico

Estes adesivos apresentam elevada resistência ao corte e ao arrancamento, boa resistência à fadiga e têm uma temperatura máxima de utilização de 130°C [12].

Fenólico-nitrilo

São adesivos estáveis até à temperatura de 150°C. Apresentam características um pouco inferiores aos adesivos fenólico-vinílicos. Estes adesivos são por norma utilizados para colar calços de travões ou, na indústria aeronáutica, para colar as folhas de alumínio a estruturas em ninho de abelha (*honeycomb*). São também aplicados na eletrónica, sapataria e mobiliário [4].

Fenólico-policloropreno

Apresentam boa resistência à fadiga e ao impacto. A temperatura normal de serviço destes adesivos varia entre -55 e 95°C. A resistência ao corte é inferior quando comparado com os outros adesivos fenólicos híbridos. São aplicados para ligar uma vasta variedade de materiais [4].

2.2.2.3 Acrílicos

Os adesivos de acrílico subdividem-se em três tipos: os anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

Anaeróbicos

A resistência mecânica dos adesivos anaeróbicos é bastante variável, podendo ser equivalente à dos epóxidos. Estes adesivos apresentam uma boa resistência à humidade e a solventes. A temperatura máxima de trabalho é de 150°C. Este tipo de adesivo é adequado para aplicações estruturais e de maquinaria [4].

Cianoacrilatos

Este tipo de adesivo é conhecido por ‘supercola’ e é adequado para pequenas colagens de plásticos e borrachas. Apresentam excelente resistência à tração, no entanto têm baixa resistência ao calor e à humidade, bem como ao arrancamento e ao impacto [4].

Acrílicos modificados

São adesivos com boa resistência ao arrancamento, ao impacto e ao corte, com temperaturas de trabalho entre -100 e 120°C. Estas propriedades são conseguidas com a adição de polimetilmetacrilato e uma borracha de nitrilo. Quanto às limitações, estes adesivos têm baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada flamabilidade. Estes adesivos modificados são aplicados na colagem de uma vasta variedade de matérias, especialmente plásticos e metais [12].

2.2.2.4 Poliuretanos

Este tipo de adesivo apresenta alta resistência ao corte e ao arrancamento, são flexíveis, têm bom desempenho a baixas temperaturas, boa resistência química e boa tenacidade. Como desvantagem, os poliuretanos apresentam baixa resistência a altas temperaturas. São por norma aplicados na indústria automóvel e na indústria do calçado [4].

2.2.2.5 Poliimidas

São adesivos estáveis a altas temperaturas, sendo capazes de suportar temperaturas dos 250 a 300°C durante longos períodos, e 540°C durante curtos períodos. Estes adesivos apresentam uma grande dureza e uma baixa resistência a choques e vibrações [13]. Devido ao elevado custo e ao difícil processamento e cura, este adesivo é apenas aplicado na indústria aeroespacial [4].

Na tabela seguinte, em forma de resumo, é possível comparar os vários tipos de adesivos estruturais e principais características.

REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Tipo	Apresentação	Temperatura máxima de utilização em contínuo [°C]	Resistência				
			Corte [MPa]	Fluência	Arrancamento	Choques	Solventes
Fenólico-vinílico	Líquido monocomponente	100 a 130	17 a 35	boa	média	boa	mediocre
	Líquido + pó						
	Filme						
Fenólico-nitrilo	Líquido monocomponente	140 a 170	15 a 30	boa	média	boa	boa
	Filme						
Anaeróbicos (acrílicos)	Líquido monocomponente	120 a 150	10 a 40	média	boa	boa	média
Cianoacrilato (acrílicos)	Líquido monocomponente	80	10 a 35	má	mediocre	má	má
Poliuretano	Líquido de dois componentes	90	8 a 15	boa	média	boa	boa
Poliimida	Filme	250 a 300	10 a 15	má	boa	mediocre	boa
Epóxido	Diversa	80 a 150	15 a 45	mediocre	boa	má	má
Epóxido-poliamida	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	boa	mediocre	boa	mediocre
Epóxido-polisulfido	Líquido de dois componentes	80	15 a 25	boa	mediocre	boa	boa
Epóxido-fenólico	Líquido monocomponente	200 a 250	20	mediocre	boa	má	boa
	Filme						
Epóxido-nitrilo	Filme	100 a 120	10 a 46	média	boa	boa	boa

Tabela 1 - Propriedades dos adesivos estruturais [12]

2.3 Determinação das propriedades de adesivos

Antes de utilizar um adesivo para um tipo de aplicação, é necessária a realização de vários ensaios, de forma a comparar e a avaliar as várias propriedades do adesivo. Este aspeto ainda é mais importante quando se trata de adesivos estruturais, em que falhas durante a sua utilização poderão trazer grandes consequências [14]. Atualmente, existem várias normas ASTM e ISO, que têm sido elaboradas para normalizar geometrias, dimensões e procedimentos experimentais, de forma a determinar as propriedades dos adesivos [14]. Estas normas serão referenciadas no próximo capítulo, para cada tipo de ensaio.

Existem vários ensaios para a determinação das propriedades dos adesivos, que podem ser divididos em dois grupos: ensaios de adesivo em bruto e ensaios de adesivo em junta adesiva.

Os ensaios de adesivo em bruto são mais simples de executar e seguem as normas aplicadas aos materiais plásticos. A espessura utilizada nos ensaios de adesivo em bruto deve ser o mínimo possível, para representar a espessura fina de adesivo que pode ser encontrada nas juntas adesivas [2].

Durante os ensaios, é necessário ter em conta alguns fatores que têm um grande impacto nos resultados finais como, por exemplo, a temperatura que é realizado o ensaio, velocidades, entre outros. Os ensaios de adesivo em juntas adesivas representam de uma forma mais próxima a realidade, por solicitarem o adesivo em condições mais próximas daquelas que estes encontram nas estruturas. O tipo de junta utilizada tem uma grande influência na distribuição de tensões na junta colada e, por isso, influenciam os resultados finais de determinação das propriedades [2, 9].

Nos próximos subcapítulos, a apresentação dos vários ensaios será dividida pelos ensaios de adesivo em bruto e ensaios em juntas adesivas. Nos ensaios de adesivo em bruto serão mencionados o ensaio de tração de provetes maciços, ensaio Iosipescu e ensaio de borboleta. No subcapítulo dos ensaios em juntas adesivas, serão abordados o ensaio de sobreposição simples, ensaio de torção em junta topo a topo, *Thick Adherend Shear Test* (TAST), ensaio de arrancamento em junta tipo T e ensaio de tração em juntas topo a topo.

2.3.1 Ensaios de adesivo em bruto

Os ensaios de adesivo em bruto são frequentemente utilizados para estudar o adesivo de forma isolada. Para obtenção dos provetes de adesivo maciço, é utilizado por norma um molde. Alguns aspetos são relevantes quando se fabrica estes provetes, tais como, minimizar a presença de vazios, preencher todo o molde com adesivo, entre outros [2].

2.3.1.1 Ensaio de tração de provetes maciços

Este tipo de ensaio utiliza provetes de adesivo maciço em osso de cão (*dogbone*), e permite determinar propriedades à tração dos adesivos. Os provetes em osso de cão podem ser obtidos de duas formas distintas: a partir de um molde ou prensados em placas.

Na Figura 10 é mostrada a ferramenta para obtenção dos provetes em osso de cão a partir de molde, em que (1) é a base do molde, (2) representa a parte do meio, que dá forma e espessura aos provetes e (3) é o topo do molde.

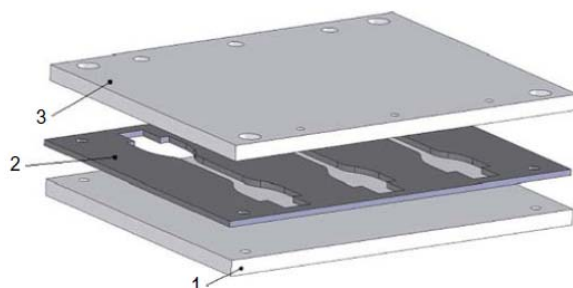


Figura 10 - Molde para produção de provetes em osso de cão [15]

Os provetes também podem ser obtidos a partir de placa, como ilustra a Figura 11, em que (1) representa a base do molde, (2) borracha de silicone, (3) o adesivo obtido em placa e (4) a tampa do molde. As placas são posteriormente maquinadas para obter as dimensões finais do provete [16].

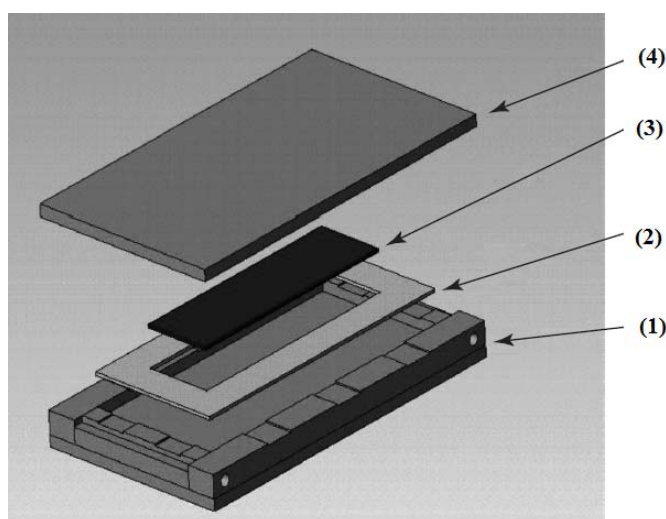


Figura 11 - Molde para produção de placas de adesivo [16]

Neste ensaio, descrito na norma francesa NF T 76-142, o molde de obtenção de placas de adesivo (Figura 11) é prensado à temperatura ambiente ou a quente a alta pressão (2 MPa). A borracha de silicone impede que o adesivo saia fora do molde e confere a espessura da

placa de adesivo. As bases metálicas são utilizadas para manter o adesivo no centro do molde, para garantir que não há lacunas de adesivo entre ele próprio e a borracha de silicone [17, 16].

Na Figura 12 é mostrada uma geometria possível do provete em osso de cão, que segue a norma BS 2782 [17]. Através da norma EN ISO 527-2 podem ser obtidas duas geometrias distintas: uma apresenta um provete com comprimento mais longo, adequado para adesivos rígidos, enquanto a outra geometria apresenta um comprimento mais reduzido [4].

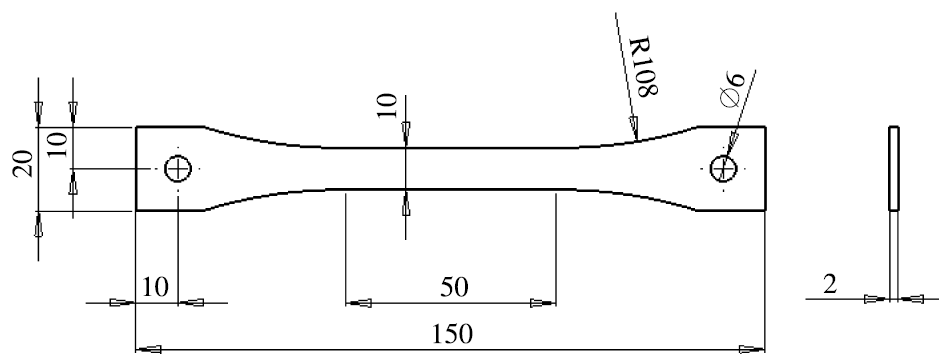


Figura 12 - Geometria dos provetes de *bulk* (dimensões em mm) [17]

2.3.1.2 Ensaio Iosipescu ou *V-Notched beam shear method*

Desenvolvido por Iosipescu, este ensaio teve como principal propósito medir a tensão de corte dos metais e soldaduras. Após várias alterações, deu origem à norma ASTM D5379, em que é possível determinar o módulo de corte dos adesivos [18]. A geometria do provete é mostrada na Figura 13. A espessura do provete deve ser superior a 3 mm, para que seja evitada a flexão do provete [4].

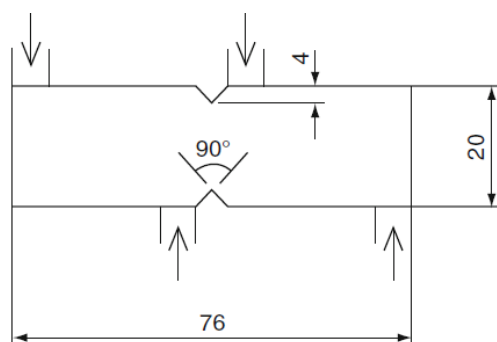


Figura 13 - Geometria e carregamento do provete para o ensaio Iosipescu [2]

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

Este ensaio é utilizado para determinar as propriedades ao corte do adesivo. Quanto à geometria, este provete apresenta uma forma semelhante a uma borboleta, em que tem dois entalhes simétricos a 90° e um raio de concordância de 1,5 mm para minimizar a concentração de tensões (Figura 14).

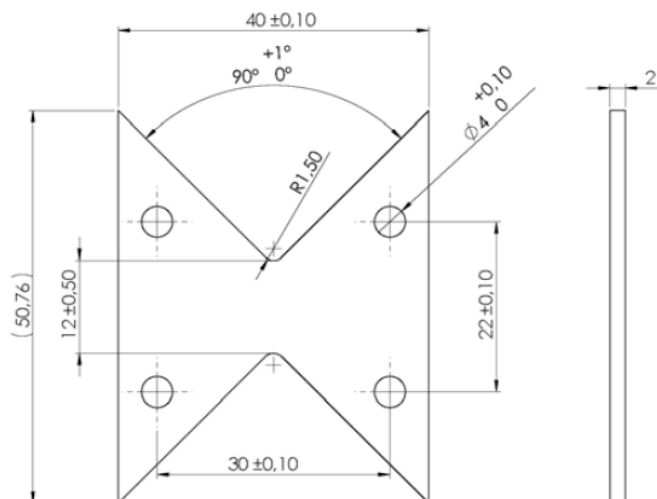


Figura 14 - Provete Arcan

O ensaio é por norma executado com recurso a amarras (Figura 15) que agarram nas duas extremidades do provete por intermédio de pinos. As amarras afastam cada metade do provete em sentidos opostos, aplicando desta forma uma solicação próxima do corte puro [12].

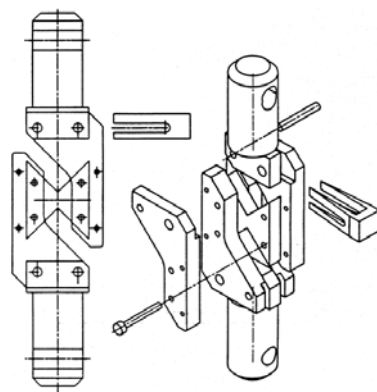


Figura 15 - Fixação do provete com recurso a amarras para o ensaio Arcan [18]

Para além de realizar este ensaio a partir de provetes de adesivo maciço, é também possível realizar este ensaio a partir de provetes em junta. Este ensaio requer a utilização de extensómetros orientados a 45° e a -45° com o eixo do provete, de forma a medir as deformações ao corte [4].

2.3.2 Ensaios de adesivo em junta adesiva

Em termos práticos, os adesivos são utilizados em vários tipos de juntas coladas. Como tal, os ensaios de caracterização dos mesmos devem considerar condições idênticas, o que corresponde à realização de ensaios em junta adesiva. São, por norma ensaios mais complexos, quando comparados com os ensaios de adesivo maciço. Os adesivos são normalmente aplicados em finas camadas, com o objetivo de unir diferentes substratos e resistir à separação dos mesmos. A espessura dos adesivos varia, geralmente, entre 0,1 a 2 mm. A junta adesiva é constituída pelos dois substratos, pelo adesivo e ainda pela região entre o adesivo e o substrato, denominada por interface [2]. É necessária a preparação da superfície neste tipo de ensaios, para evitar roturas adesivas (interfaciais).

2.3.2.1 Junta de sobreposição simples

Como já foi abordado, este tipo de junta é relativamente fácil de executar, tornando este ensaio simples de realizar. Este ensaio permite determinar a tensão ao corte de um adesivo, e pode ser executado segundo a norma ASTM D1002 [12].

De forma a garantir o alinhamento correto do provete na máquina de ensaio de tração, são adicionados calços de alinhamento nos locais de amarração, como se pode verificar na Figura 16 [4].

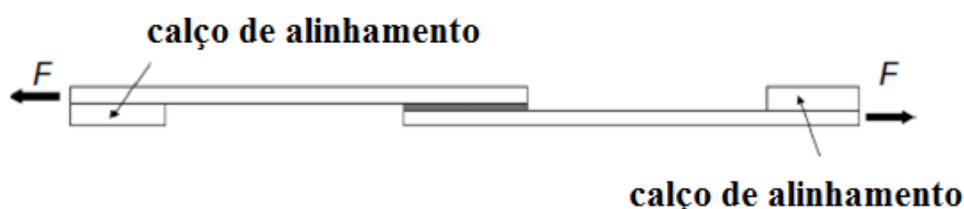


Figura 16 - Representação do ensaio da junta de sobreposição simples [15]

2.3.2.2 Junta topo a topo em torção ou *Napkin-ring test*

Este ensaio foi desenvolvido para determinar as propriedades do adesivo ao corte. É normalmente utilizado quando as deformações são baixas e para testar baixas espessuras de adesivo [4, 16]. Para a medição correta das propriedades do adesivo, é necessário remover o excesso de adesivo (filete interior e exterior) [19].



Figura 17 - Provete para *Napkin-ring test* [4]

A utilização de um adesivo de baixa viscosidade implica maiores dificuldades na fabricação do provete [4, 19]. Este ensaio é regulado pelas normas ASTM E229 e ISO 11003-1.

2.3.2.3 *Thick Adherend Shear Test (TAST)*

O ensaio TAST foi desenvolvido com o objetivo de determinar a resistência ao corte dos adesivos. Rege-se pela norma ISO 11003-2.2, que preconiza a utilização de substratos de aço com as dimensões dos substratos na imagem seguinte (Figura 18) [20].

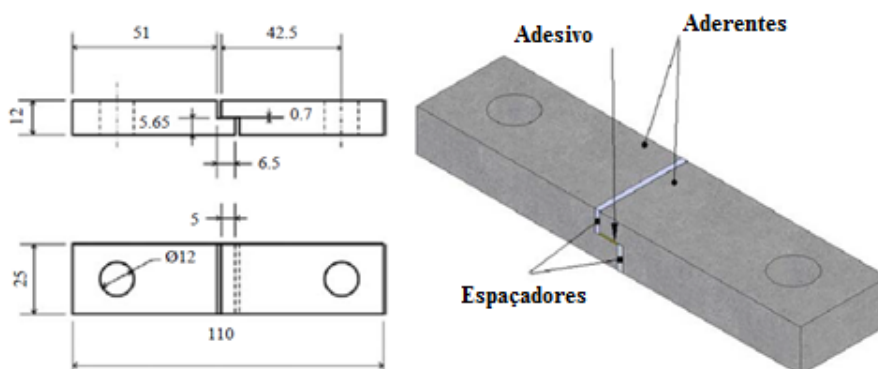


Figura 18 - Provete TAST (dimensões em mm) [15]

Para garantir o alinhamento dos provetes TAST é utilizado um gabarito, de acordo com a Figura 19. Para garantir que a área colada seja igual para todos os provetes, são utilizados calços (*spacers*), como ilustra a Figura 18 [19].

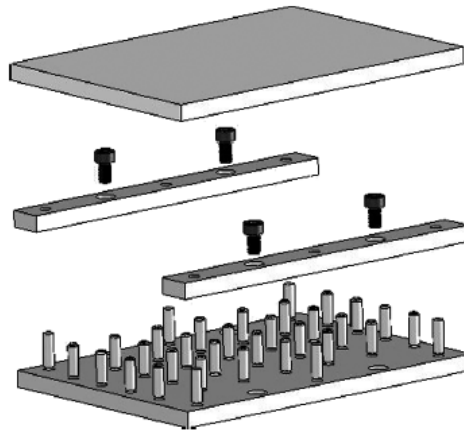


Figura 19 - Gabarito para alinhamento de provetes TAST em vista explodida [16]

Antes de efetuar a colagem, é necessária a preparação da superfície de colagem dos provetes. Para provetes de aço, a preparação é realizada apenas na área de colagem e é executada da seguinte forma: utiliza-se acetona para desengordurar; granalhagem para permitir uma boa molhagem do adesivo; e limpeza novamente com acetona. Este teste requer a utilização de extensômetro, que é utilizado para medir a tensão de corte [14]. A execução deste ensaio pode ser levado a cabo numa máquina de tração, onde a junta é solicitada à tração, conforme é mostrado na Figura 20.

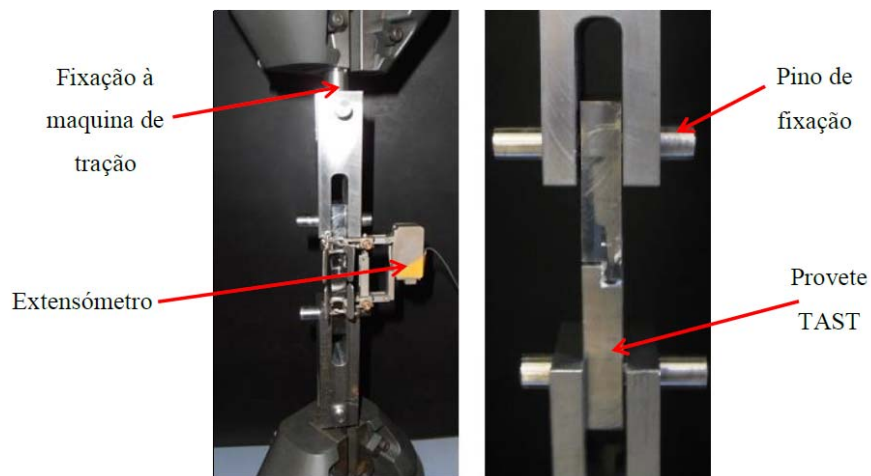


Figura 20 - Modo de carregamento do ensaio TAST [21]

2.3.2.4 Ensaio de arrancamento em junta tipo T

Este ensaio determina a resistência ao arrancamento de ligações adesivas em substratos flexíveis e está normalizado pela ASTM D1876. Este tipo de ensaio pode ser feito numa máquina universal de tração e a velocidade de aplicação da carga deve ser constante [4].

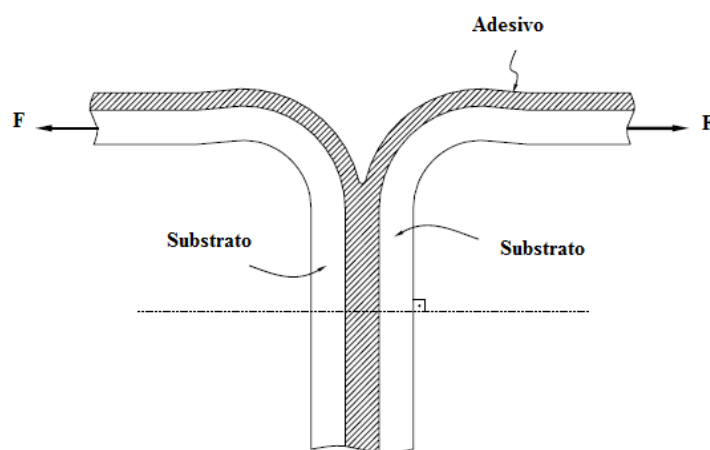


Figura 21 - Ensaio de arrancamento em junta tipo T [22]

Esta junta é composta por dois aderentes dobrados a 90°. O modo de carregamento é realizado conforme ilustra a Figura 21, em que um dos substratos é fixo a uma base rígida e o outro substrato é arrancado pela máquina de ensaios [2].

A velocidade de carregamento por arrancamento é mais importante quando comparado com o carregamento ao corte, sendo essa velocidade é especificada pela norma acima referida. A espessura do adesivo também tem um efeito significativo na resistência da junta, assim como o módulo de elasticidade do adesivo utilizado neste tipo de ensaio [9].

2.3.2.5 Ensaio de tração em juntas topo a topo

A junta topo a topo com substratos cilíndricos é utilizada, neste caso, para determinar as propriedades à tração do adesivo. De forma a garantir o alinhamento dos aderentes e a espessura pretendida de adesivo, é necessária a utilização de um gabarito, cuja geometria é apresentada na norma ASTM D2095. Nessa mesma norma é ainda definida a geometria dos substratos [16].

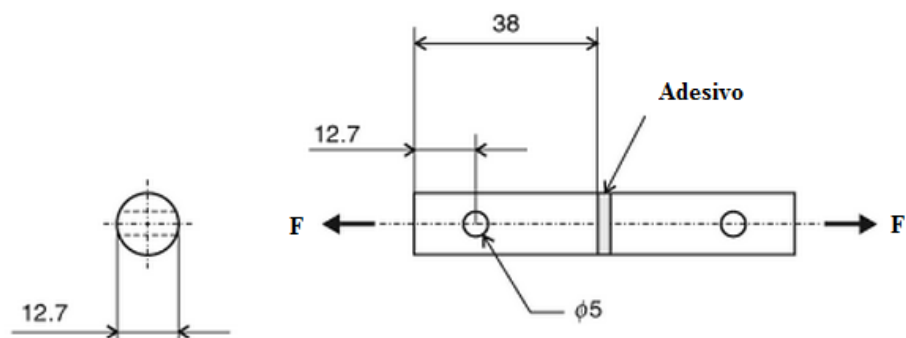


Figura 22 – Geometria da junta de topo a topo (dimensões em mm) [2]

As principais dificuldades apresentadas por este tipo de ensaio ficam a dever-se à precisão dimensional no fabrico dos substratos, bem como ao correto alinhamento destes durante a solicitação. Pequenos desalinhamentos provocam esforços de flexão, diminuindo bastante as propriedades de resistência do adesivo [4].

2.4 Ensaios de caracterização à fratura

A caracterização à fratura de adesivos tem como principal objetivo fornecer propriedades necessárias à previsão da resistência das ligações adesivas. Nos métodos utilizados, os aderentes têm que apresentar um comportamento elástico até à rotura [23]. Ao contrário dos critérios baseados na resistência dos materiais, a Mecânica da Fratura assume a presença de defeito estático na estrutura a ser analisada. Esse defeito é introduzido durante o fabrico ou provocado no início da sua aplicação [23].

Para prever a propagação de uma fenda pela Mecânica da Fratura podem ser seguidos dois tipos de critérios: o critério baseado na taxa de libertação de energia, ou no fator de intensidade de tensão. O critério mais utilizado é o baseado no valor de G . A fratura ocorre quando o valor de G iguala a taxa crítica de libertação de energia (G_c), que é considerada uma propriedade do material [4, 23]. A utilização destes critérios pressupõe a existência de uma pré-fenda ou defeito na zona de colagem. No entanto, em muitas aplicações estruturais a localização e o tamanho da fenda inicial a considerar não é óbvia ou não existe, o que constitui uma das dificuldades de aplicação deste método [4, 24].

Os ensaios de caracterização à fratura estão divididos em três modos diferentes de carregamento, como se pode verificar na Figura 23. O modo I aplica-se quando o adesivo está solicitado à tração, os modos II (cisalhamento) e III (rasgamento) aplicam-se quando o adesivo está sujeito ao corte. Existem ainda ensaios de modo misto, que tipicamente combinam dois modos de carregamento. Numa estrutura real, é igualmente comum a existência combinada de mais de um modo de carregamento.

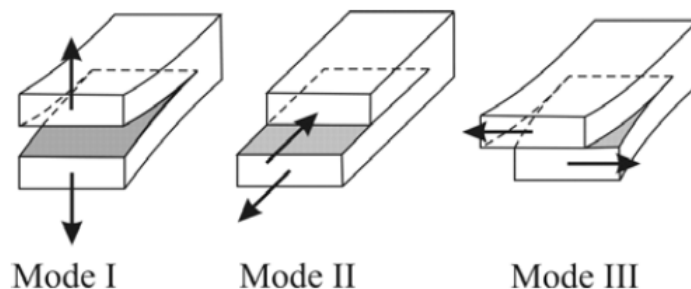


Figura 23 – Modos de carregamento [23]

Os ensaios de ligações adesivas têm sido desenvolvidos para determinar a resistência à fratura nos vários modos de carregamento. De uma forma geral, têm dependido do conceito da Mecânica da Fratura Linear-Elástica, sendo também conhecido por *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM), que consiste na imposição da deformação do substrato ser apenas linear elástica, e que qualquer plasticidade é limitada a uma pequena região à frente da ponta da fenda.

Os principais ensaios em modo I podem ser divididos em dois grupos. Os ensaios de provetes de adesivo maciço: *Compact Tension* (CT) e *Single Edge Notched Bend* (SENB); e os ensaios de juntas adesivas: DCB e TDCB. A grande maioria da caracterização à fratura de um adesivo carregado em modo I é realizada através do ensaio DCB [23, 25].

No que respeita ao carregamento em modo II, os principais ensaios são: *End Notched Flexure* (ENF), *End Loaded Split* (ELS) e *Four-point End Notched Flexure* (4ENF) [23].

No carregamento em modo I+II (misto) os ensaios mais relevantes são os seguintes: *Asymmetric Double Cantilever Beam* (ADCDB), *Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam* (ATDCB), *Mixed-Mode Bending* (MMB) e *Mixed Mode Flexure* (MMF) [26].

2.4.1 Modo I

O valor de G_{Ic} pode ser determinado a partir de ensaios de adesivo em bruto, ou em juntas adesivas. Os principais ensaios para a determinação do G_{Ic} com provetes de adesivo maciço são: CT e SENB. Estes ensaios de adesivo em bruto encontram-se normalizados pela ASTM D5045. No que se refere a juntas adesivas, o G_{Ic} pode ser determinado a partir dos seguintes ensaios: DCB e TDCB, que se encontram normalizados pela norma americana ASTM D3433 – 99.

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

Os ensaios CT e SENB podem ser realizados de acordo com a norma ISO 13586, equivalente à norma americana ASTM D5045. Estas normas especificam como os provetes podem ser preparados.

Relativamente à propagação da fenda, os testes são quase estáticos, caso a propagação da fenda ocorra de forma estável, os provetes do ensaio CT vão ter um maior comprimento de fenda do que os do SENB. A geometria dos provetes CT é apresentada na Figura 24 (a), e dos provetes SENB na Figura 24 (b) [2].

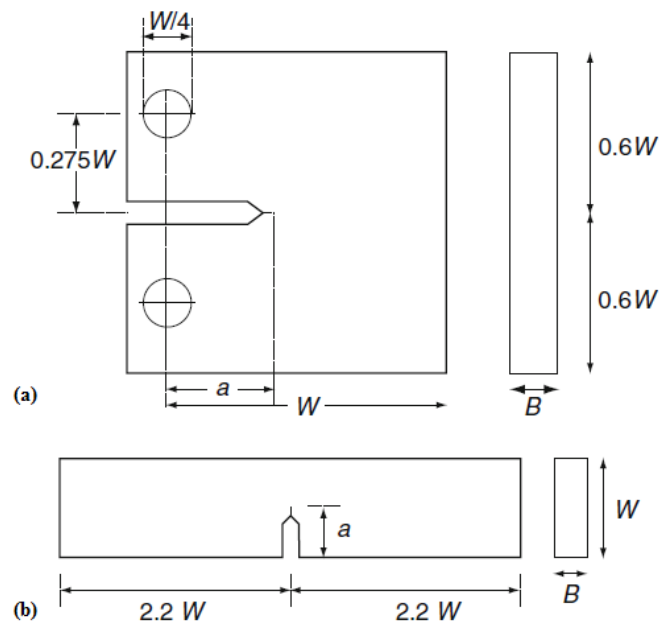


Figura 24 – Geometria dos provetes de adesivo maciço para determinação do G_{Ic} : (a) CT; (b) SENB [2]

Antes do início do ensaio, é necessário introduzir uma fenda no provete. Essa fenda pode ser conseguida através de uma lâmina imersa em azoto líquido [16]. A norma ISO acima referida especifica que os ensaios de adesivo maciço devem decorrer à temperatura de 23°C, com uma velocidade de ensaio igual a 10 mm/min.

2.4.1.2 Ensaio *Double Cantilever Beam* (DCB)

O ensaio DCB é o mais utilizado para determinar a resistência à fratura em modo I. Apresenta como vantagens o fácil fabrico dos substratos, devido à geometria simples, à simplicidade de execução do ensaio e à possibilidade de obter o valor de G_{Ic} matematicamente, usando a Teoria das Vigas.

O ensaio DCB utiliza dois substratos colados entre si com uma fina camada de adesivo. Durante a fabricação do provete, é provocada uma fenda inicial numa das extremidades do mesmo.

Todavia, podem ser sentidas algumas dificuldades quando se determina o valor de G_{Ic} . Por vezes a propagação da fenda pode ser instável e, nesses casos, a medição do comprimento de fenda durante o ensaio torna-se difícil. Em alguns ensaios DCB, a ponta da fenda pode não ser claramente visível, dependendo do adesivo utilizado [23, 25].

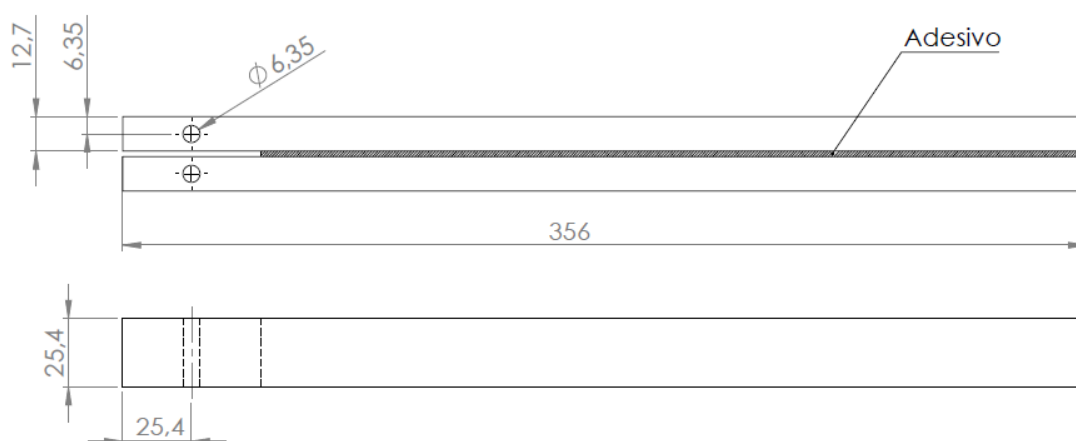


Figura 25 - Geometria do substrato DCB (dimensões em mm)

Segunda a norma ASTM D3433 – 99 os substratos apresentam as dimensões definidas na Figura 25. Na mesma norma é indicada a forma de determinar a altura mínima do substrato, de forma a evitar deformação plástica dos substratos durante o ensaio, sendo determinada pela seguinte equação:

$$h = \sqrt{\frac{6Ta}{B\sigma_y}}, \quad (1)$$

em que h representa a espessura mínima que o substrato deve ter para que só ocorra deformação elástica, T corresponde a 150% da carga máxima necessária para iniciar a fenda na ligação adesiva, B representa a largura do substrato e σ_y corresponde à tensão de cedência do material do substrato [27].

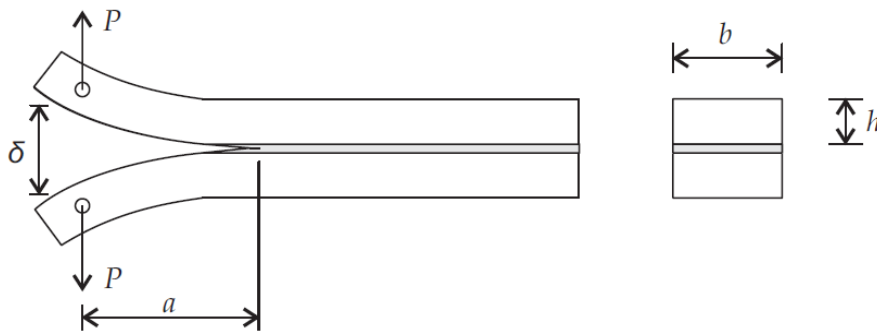


Figura 26 - Esquema do ensaio DCB

O ensaio DCB é solicitado conforme mostra a Figura 26, com uma velocidade de ensaio compreendida entre 0,5 e 3 mm/min, variando conforme as dimensões dos substratos e as características dos materiais a serem ensaiados. Durante o ensaio é registada a carga P , o deslocamento δ e o comprimento de fenda a .

2.4.1.3 Tapered Double Cantilever Beam TDCB

O ensaio TDCB foi inicialmente desenvolvido com o principal objetivo de estudar o crescimento da fenda, sem que seja necessária a medição do comprimento da fenda. A altura do substrato, $h(a)$, (Figura 27) varia de forma a conseguir uma taxa constante da flexibilidade ao longo da propagação da fenda. Por outro, lado o aumento da altura $h(a)$

confere a este substrato uma maior resistência à deformação plástica. Portanto, é mais fácil de manter as condições LFM numa junta de ensaio TDCB do que DCB [2]. No entanto, os substratos TDCB são mais complexos de fabricar, quando comparados com os DCB. A variação da altura $h(a)$ vai aumentando ao longo do comprimento do provete (Figura 27).

Para a mesma velocidade de carregamento e utilizando o mesmo adesivo e espessura, os ensaios TDCB apresentam uma propagação da fenda mais rápida, quando comparado com os ensaios DCB [28].

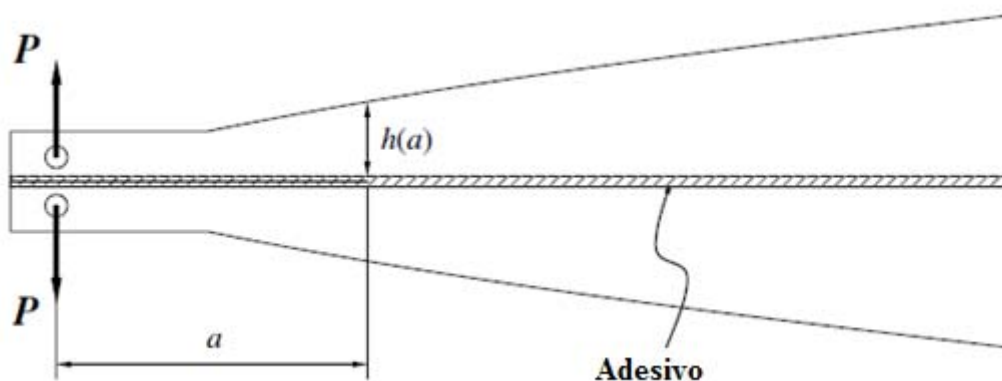


Figura 27 - Substratos para ensaio TDCB [22]

Segundo a norma ASTM D3433 – 99 o substrato TDCB deve ter um comprimento igual a 241,3 mm e uma largura de 25,4 mm. A altura do substrato TDCB varia ao longo do comprimento do mesmo, segundo a equação:

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

onde m é uma constante, a é o comprimento de fenda (medida desde a fenda existente até ao ponto de solicação) e h representa a altura do substrato [27].

2.4.2 Modo II

A caracterização da fratura em modo I encontra-se bem definida e os ensaios normalizados, embora o mesmo já não aconteça quando se trata do modo II, em que ainda

se estão a desenvolver as normas para os respetivos ensaios [2, 23]. Os principais ensaios em modo II são: o ENF, o ELS e o 4ENF.

A medição do comprimento da fenda em modo II tem originado algumas dificuldades. Não existe abertura dos aderentes, e a fenda propaga de forma complexa, muitas vezes através de mecanismos de microfissura. Por isso, a incerteza na medição experimental do comprimento de fenda no modo II pode ser significativa [2].

2.4.2.1 End-Notched Flexure (ENF)

O ensaio ENF consiste numa simples viga carregada a meio do seu comprimento. Num dos lados é criada uma pré-fenda. Este é o ensaio mais conhecido para determinar o G_{IIc} . No entanto, o crescimento da fenda pode ser instável, caso o comprimento inicial de fenda não seja corretamente selecionado. A fenda tende a fechar com a carga aplicada, dificultando a clara visualização da fenda, sendo estes alguns dos problemas ligados à execução deste ensaio [16, 23]. O esquema de carregamento está representado na Figura 28.

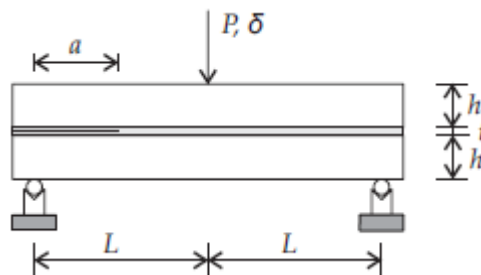


Figura 28 - Ensaio ENF, modo II [29]

2.4.2.2 End-Loaded Split (ELS)

No ensaio ELS, a extremidade do provete oposta à pré-fenda é encastrada. Uma das dificuldades na utilização deste ensaio está relacionada com a correta obtenção do G_{IIc} , devido aos grandes deslocamentos presentes neste ensaio e alguma sensibilidade às condições de aperto [4]. Os aderentes neste ensaio são solicitados na vertical, onde é medida a força aplicada, o deslocamento e o crescimento da fenda durante o ensaio. O esquema desse carregamento é mostrado na Figura 29.

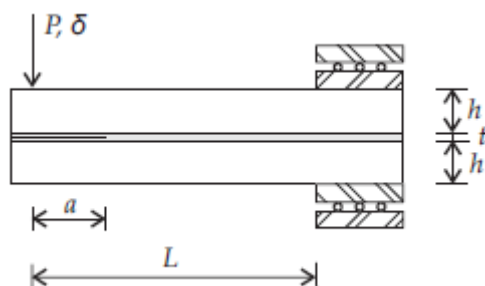


Figura 29 - Ensaio ELS, modo II [29]

2.4.2.3 *Four-Point End-Notched Flexure (4ENF)*

O ensaio 4ENF é semelhante ao ensaio ENF, diferenciando-se no número de pontos em que é carregado. No ensaio ENF é aplicada uma força a meio da viga, opondo-se a esta, duas forças de reação nas extremidades da viga. No caso do ensaio 4ENF, é aplicada uma força, que por sua vez é transmitida às vigas por intermédio de dois cilindros, opondo-se duas forças de reação normal nas extremidades das vigas. A principal desvantagem está presente na necessidade de uma força maior para executar o ensaio, que resulta em problemas relacionados com o atrito. A preparação e os dispositivos de ensaio são mais complexos [4, 23].

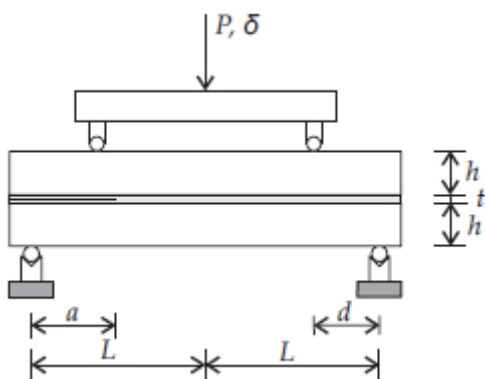


Figura 30 - Ensaio 4ENF, modo II [29]

2.4.3 **Modo misto I + II**

Para além dos ensaios em modo I e modo II a juntas coladas, existe interesse em determinar a resistência dessas mesmas juntas em modo misto (combinação de tensão normais e de corte) [4]. Os ensaios experimentais desenvolvidos para determinar a

resistência à fratura em modo misto, utiliza aderentes semelhantes aos ensaios dos modos I e II [2]. Os ensaios utilizados em modo misto são: ADCB, ATDCB, MMB, *Cracked Lap Shear* (CLS) e MMF.

Na tabela seguinte são apresentados os principais ensaios utilizados para caracterização à fratura de juntas adesivas em modo misto.

Ensaio	Esquema	Grau de rácio de modos, ϕ (°)
ADCB		0 - 34
ATDCB		20
MMB		$Y = f(c)$
CLS		49
MMF		41

Tabela 2 – Ensaios em modo misto [26]

O grau de rácio de modos, ϕ , pode ser calculado através da expressão seguinte:

$$\phi = \tan^{-1} \sqrt{\left(\frac{G_{II}}{G_I}\right)}. \quad (3)$$

Como se pode ver na Tabela 2, todos os ensaios com a exceção do MMB apresentam um rácio de modos fixo. Para o ensaio MMB, o valor de ϕ pode ser alterado, podendo reproduzir o ensaio em puro modo I e puro modo II, dependente do carregamento [2].

2.4.3.1 *Asymmetric Double Cantilever Beam (ADCB)*

O ensaio ADCB é semelhante ao ensaio DCB (modo I). As diferenças estão presentes na espessura dos aderentes (que podem variar entre si) e no material de cada substrato, sendo diferente entre si. A assimetria entre os aderentes irá assegurar que ocorre uma fratura em modo misto, para um valor de ϕ constante [26]. Na Figura 31 é possível ver a representação esquemática do ensaio ADCB, onde o aderente 1 apresenta uma espessura (h_1) inferior à espessura (h_2) do aderente 2.

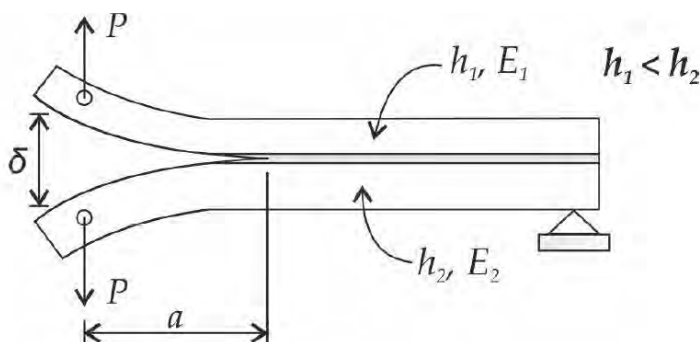


Figura 31 - Esquema do ensaio ADCB [26]

Como principal desvantagem, o ensaio ADCB necessita de substratos com diferentes espessuras, com esses substratos é apenas conseguido realizar o ensaio para um valor de ϕ constante. Como os substratos são simples de obter, pois são fabricados da mesma forma que os substratos DCB, torna-se um tipo de ensaio acessível para caracterizar um adesivo à fratura em modo misto [26, 29].

2.4.3.2 *Asymmetric Tapered Double Cantilever Beam (ATDCB)*

Este ensaio é composto por substratos semelhantes aos utilizados nos ensaios DCB e TDCB (modo I). Na Figura 32 é mostrada a geometria dos substratos.

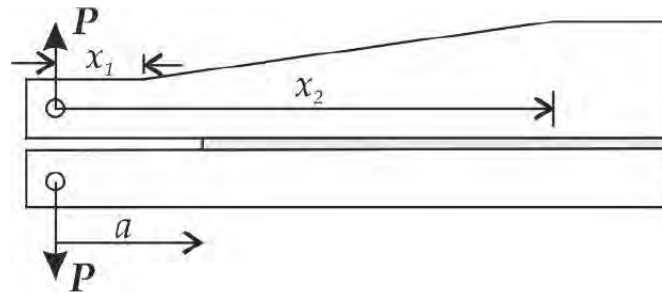


Figura 32 - Esquema do ensaio ATDCB

Nos ensaios ATDCB é necessário determinar o valor de m para um dos substratos. Esse valor de m é calculado da mesma forma que no ensaio TDCB, que é dado pela equação (2).

2.4.3.3 *Mixed-Mode Bending* (MMB)

Neste ensaio existe uma combinação do ensaio DCB (modo I) com o ensaio ENF (modo II), em que ao ensaio ENF é adicionada uma solicitação em modo de abertura de fenda [4, 30]. Na Figura 33 é ilustrada a montagem do provete no dispositivo de ensaio. O valor relativo das cargas resultantes sobre o provete, assim como o grau de rácio de modos, ϕ , está dependente da distância c em que o carregamento é executado [29].

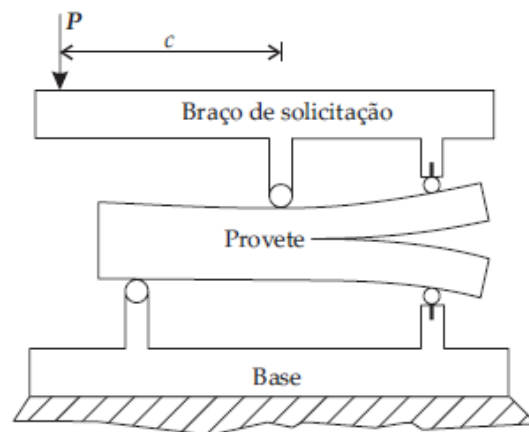


Figura 33 - Ensaio MMB - modo Misto

O ensaio MMB está normalizado pela norma ASTM D6671, para a caracterização à fratura interlaminar de compósitos em modo misto [4].

A utilização deste ensaio apresenta várias vantagens no que respeita à caracterização da fratura em modo misto. As principais vantagens são: flexibilidade para utilizar aderentes com maior largura, em que é crítico para minimizar os efeitos de bordo (*edge effects*); fácil de conseguir uma vasta variedade de modos mistos. As principais desvantagens são: dificuldade na localização da fenda e não tem em conta a dissipação da energia na zona do processo da fratura [31].

2.4.3.4 *Mixed-Mode Flexure (MMF)*

O ensaio MMF, também conhecido por *Single Leg Bending (SLB)*, tem como base o ensaio ENF, em que um dos substratos é modificado. A diferença está no substrato inferior, que tem um menor comprimento, o que faz com que uma das extremidades do provete apoie apenas no braço superior, originando um modo de abertura (modo I) e um modo de corte (modo II). Este ensaio é realizado num dispositivo de flexão em 3 pontos, como é possível constatar na seguinte figura.

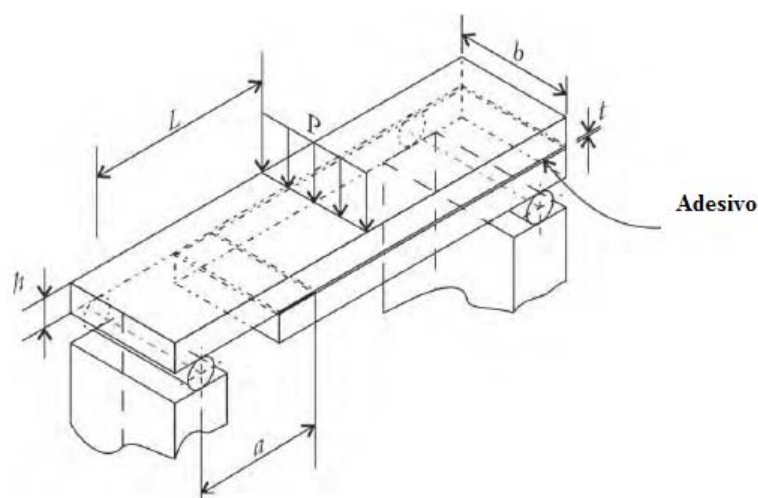


Figura 34 – Esquema do ensaio MMF em modo misto [26]

A preparação deste ensaio revela-se mais simples quando comparado com o ensaio MMB [26]. Este ensaio está regulamentado pela norma ASTM 2004 [2].

2.4.3.5 Cracked Lap Shear (CLS)

O ensaio CLS é dos mais recentes para a caracterização do adesivo à fratura em modo misto. Os substratos utilizados neste ensaio permitem apenas um valor de ϕ igual a 49° , variando consoante a dureza dos mesmos [26].

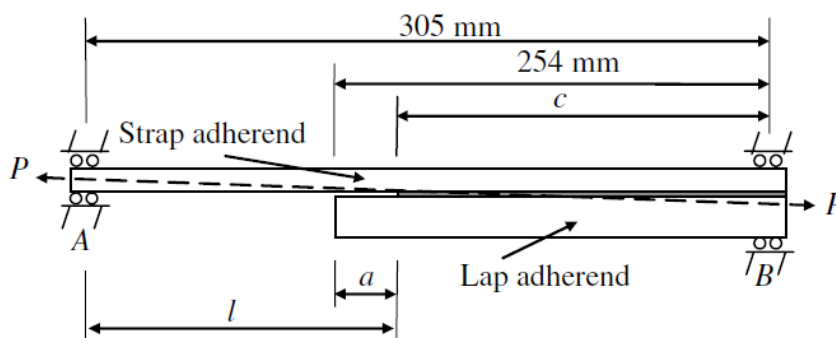


Figura 35 - Representação do ensaio CLS [32]

2.5 Métodos para determinação do G_{IC}

Durante os ensaios de caracterização à fratura desenvolvidos nos vários modos, é necessária a medição da carga, o deslocamento, e para alguns métodos é necessária ainda a medição do comprimento da fenda. Relativamente aos substratos, é necessário conhecer as suas dimensões, bem como algumas propriedades do material do substrato, tal como o módulo de Young [2].

A utilização de G_c em detrimento do parâmetro K , tem sido cada vez mais frequente para a caracterização à fratura das juntas adesivas [2, 23]. Os métodos para obtenção de G_c podem ser agrupados pelos diferentes ensaios, em que para o ensaio DCB os métodos principais referidos na bibliografia são: CBBM, CBT, CCM, *Direct Beam Theory* (DBT) e Integral J . Para o ensaio TDCB, os métodos existentes são: SBT, CCM e CBT.

Relativamente ao ensaio DCB, os métodos CBBM e CBT apresentam resultados G_{Ic} com maior precisão, ao contrário do método DBT que apresenta o maior desvio na determinação da taxa crítica de libertação de energia [23]. Nos ensaios TDCB, o método que apresenta o valor de G_{Ic} mais conservador é o método SBT [33].

2.5.1 Ensaio Double-Cantilever Beam

2.5.1.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Os métodos CCM, CBT e DBT requerem a medição do comprimento da fenda durante a sua propagação [25]. O CCM tem como base a equação de Irwin-Kies [34]:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2B} \cdot \frac{dC}{da}, \quad (4)$$

em que P representa a carga aplicada, B a largura do substrato, $C=\delta/P$ a flexibilidade do substrato e a o comprimento de fenda. A flexibilidade C é uma função polinomial de grau três e pode ser obtida a partir da seguinte expressão:

$$C = C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0 \quad (5)$$

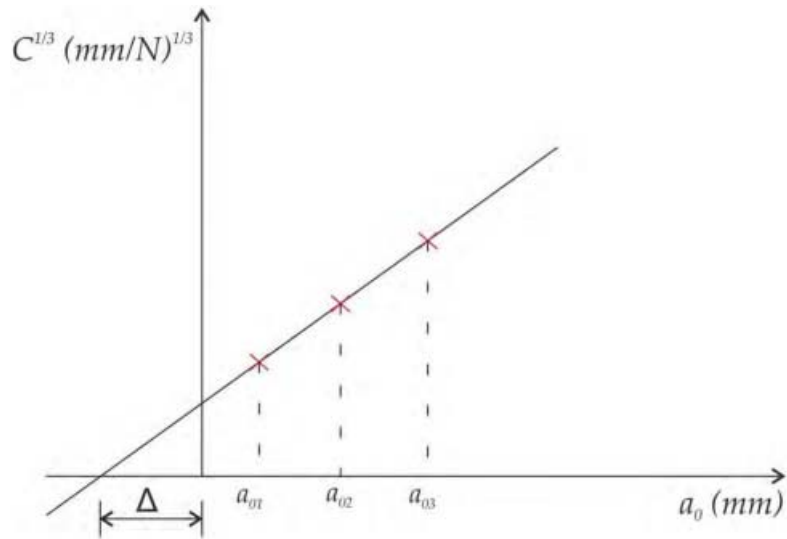
Através do método DBT, baseado no teorema das vigas, é possível determinar o G_{Ic} a partir da seguinte equação:

$$G_{Ic} = \frac{12a^2 P^2}{B^2 h^3 E_1}, \quad (6)$$

onde a representa o comprimento de fenda, h a espessura do substrato e E_1 o módulo de Young dos substratos. O método **CBT** é dado pela seguinte equação [35]:

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2B(a + |\Delta|)}, \quad (7)$$

em que Δ é um fator de correção do comprimento de fenda, devido à rotação e deflexão dos substratos. No método da teoria das vigas é assumido que cada aderente é uma viga encastrada, com comprimento igual a a , o qual não representa as reais condições do ensaio DCB. Desta forma, Δ corrige o valor de a , considerando a rotação e deflexão dos aderentes. O fator de correção do comprimento de fenda Δ é obtido através da regressão linear $C=f(a)$ [23]. A regressão linear pode ser obtida através do teste de 3 juntas (provetes) com diferentes fendas iniciais, como se pode verificar na Figura 36 [26].


 Figura 36 - Obtenção da correção do comprimento de fenda, Δ [26]

O valor de Δ pode também ser obtido através da seguinte expressão [23]:

$$\Delta = h \sqrt{\frac{E_x}{11G_{xy}} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1 + \Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (8)$$

onde Γ é obtido através da seguinte expressão:

$$\Gamma = 1.18 \frac{\sqrt{E_x E_y}}{G_{xy}}. \quad (9)$$

2.5.1.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

O método **CBBM** é o mais recente, e tem como base o conceito de fenda equivalente [23]. Este método tem a particularidade de não necessitar de medição de a durante a propagação da mesma.

Na extremidade da fenda é desenvolvida uma zona de processo de fratura (ZPF), denominada também por *Fracture Process Zone* (FPZ). Na FPZ ocorrem múltiplas microfendas, e plastificações, que absorvem parte da energia. Quando se trata de adesivos dúcteis, a energia dissipada na FPZ é ainda maior, devendo por isso ser considerada. Devido ao método DBT não considerar nenhuma correção, o G_{Ic} é subestimado, tornando

este método inapropriado, principalmente para a análise de adesivos dúcteis. A imagem seguinte ilustra a zona de processo de fratura.

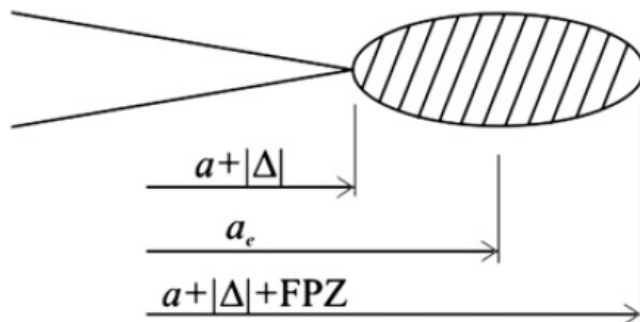


Figura 37 - Representação esquemática da zona de processo de fratura e fenda equivalente [25]

A energia de deformação dos aderentes, devido à rotação dos aderentes na ponta da fenda e incluindo os esforços de corte, é dada pela seguinte expressão:

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2E_1I} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G_{13}} B dz dx \right], \quad (10)$$

em que M_f representa o momento de fletor, I o momento de inércia da secção reta de um aderente, E_1 e G_{13} representam as propriedades elásticas do material, ou seja, o módulo de Young e de corte, respetivamente. A tensão de corte ao longo da espessura de cada aderente é dada pela seguinte equação [25]:

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{Bh} \left(1 - \frac{z^2}{c^2}\right), \quad (11)$$

onde c é metade da espessura do aderente, V o esforço transversal em cada braço do provete ($0 \leq x \leq a$) e z a distância na cota z .

Através do teorema de Castigliano, o deslocamento δ é obtido a partir da seguinte expressão:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{E_1Bh^3} + \frac{12Pa}{5BhG_{13}}. \quad (12)$$

Esta equação tem como base o método da teoria das vigas e permite definir a flexibilidade ($C = \delta/P$) dos substratos. No entanto, o método da teoria das vigas não tem em conta as concentrações de tensões e a rotação dos aderentes na ponta da fenda. De forma a ter em conta todos os fatores referidos, é utilizado um módulo de flexão equivalente E_f , em vez do E_1 utilizado na equação 7. O módulo de flexão equivalente E_f , é obtido através da seguinte equação:

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

Através do método CBBM, o G_{1c} é obtido através da seguinte equação:

$$G_{1c} = \frac{6P^2}{B^2h} \left(\frac{2a_e^2}{h^2E_f} + \frac{1}{5G_{13}} \right) \quad (14)$$

Em que o a_e representa o comprimento de fenda equivalente (Figura 37), onde é considerada a FPZ.

2.5.1.3 Métodos baseados no Integral J

Em materiais elásticos lineares, J_{1c} é igual ao valor de G_{1c} ; em materiais não lineares no domínio elástico, o valor de J representa a taxa de energia libertada não linear [2]. Assim, o método de análise do integral J torna-se útil para aplicação em juntas adesivas, em que os substratos são materiais compósitos. A definição analítica do integral J é dada pela seguinte equação:

$$G_{1c} = 12 \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + P_u \theta_o \quad \text{ou} \quad G_{1c} = P_u \theta_p, \quad (15)$$

em que P_u representa a carga aplicada por unidade de largura dos aderentes, θ_o corresponde a rotação dos aderentes na ponta da fenda, θ_p representa a rotação relativa dos aderentes no ponto de solitação P (representado na Figura 38). Foi considerado anteriormente [36] que o valor de θ_o é mais fácil de medir pelo método ótico, do que pelo método do θ_p .

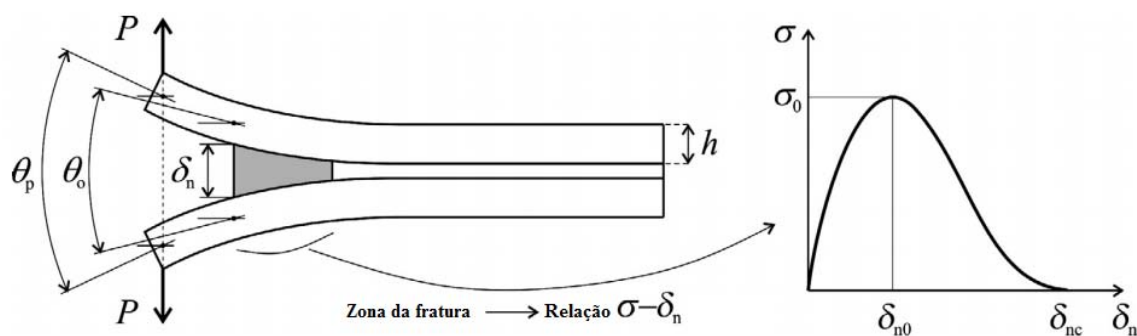


Figura 38 - Ensaio DCB em carregamento com variáveis do método Integral J

O integral J pode ser calculado ao longo de um caminho arbitrário circundante à extremidade da fenda, resultando [37]:

$$G_n = \int_0^{\delta_{nc}} t_n(\delta_n) d\delta_n, \quad (16)$$

onde δ_{nc} representa o deslocamento dos aderentes, medido até iniciar a propagação da fenda, e t_n é a tensão de tração. O valor de G_{Ic} pode ser considerado igual a G_I no início da propagação da fenda [37]. A curva $t_n(\delta_n)$ pode ser obtida pela seguinte equação

$$t_n(\delta_n) = \frac{\partial G_n}{\partial \delta_n}, \quad (17)$$

assim concluindo que, para o cálculo do G_{Ic} pelo integral J , devem ser registados durante o ensaio os valores de P , a , δ_n e θ_o [37].

2.5.2 Ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam*

2.5.2.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Para determinar o G_{Ic} pelo método CCM, utiliza-se a seguinte equação [38]:

$$G_c = \frac{P^2}{2B} \frac{dC}{da}. \quad (18)$$

Ao contrário do ensaio DCB, no ensaio TDCB é possível evitar a medição do comprimento de fenda por este método, uma vez que dC/da é constante, o que é possível devido à espessura variável dos substratos TDCB [38].

A partir do método CBT, é possível ter em conta fatores que não são tidos em conta no método SBT, tais como a rotação da viga na zona de encastramento. A Equação (2), que define o fator da geometria do substrato TDCB, está dependente do termo $1/h$. Para efeitos de simplificação da expressão do método CBT, a Equação (2) é simplificada para [39]:

$$m = \frac{3a^2}{h^3} \quad (19)$$

De forma a corrigir a flexibilidade, é efetuada uma correção no comprimento da fenda, a , sendo este substituído por $a + \Delta$, em que

$$\Delta^4 = \frac{EBh^3}{3k}, \quad (20)$$

onde h e B representam a altura e a largura do substrato, respetivamente. A rigidez k pode ser deduzida, simplificando a expressão para [39]:

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{1/4}, \quad (21)$$

sendo o valor de rotação dos aderentes na extremidade da fenda Δ aproximadamente $0,64h$. Contabilizando os esforços ao corte e a rotação dos aderentes, obtém-se $\Delta=0,67h$. Tendo em consideração ambos os substratos e a camada de adesivo, o valor de Δ pode ser expresso por:

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{1/4} \cdot \left(1 + \frac{h_a E}{2h E_a} \right)^{1/4}, \quad (22)$$

em que h e E representam a altura e o módulo de Young do substrato respetivamente, e h_a e E_a a espessura e módulo de Young do adesivo respetivamente. Sendo $\lambda=2h/h_a$ e $R=E/E_a$, a expressão é simplificada para:

$$\Delta = h \left(\frac{1}{6} \right)^{1/4} \left(1 + \frac{R}{\lambda} \right)^{1/4}. \quad (23)$$

Simplificando de novo, utilizando a Equação (21) e a Equação (19), obtém-se:

$$\Delta = 0,64 \left(\frac{3}{m} \right)^{1/3} a^{2/3}. \quad (24)$$

Desta forma, a flexibilidade é dada pela seguinte equação [39]:

$$C = \frac{8m}{EB} \left(a + 0,64 \left(\frac{3}{m} \right)^{1/3} a^{2/3} - \frac{2}{3} x_0 \right) \quad (25)$$

Por fim, para determinar o valor de G_{Ic} , substitui-se a equação (25) na equação (18) e simplificando, obtém-se o G_{Ic} do método CBT a partir da seguinte expressão [40]:

$$G_{Ic} = \frac{4P^2}{EB^2} m \left[1 + 0,43 \left(\frac{3}{ma} \right)^{1/3} \right]. \quad (26)$$

2.5.2.2 Método baseado na flexibilidade constante

O método baseado na flexibilidade constante é designado por SBT. Considerando os substratos DCB, a flexibilidade das vigas é determinada tendo em conta algumas das contribuições como o momento fletor e ao corte. Desta forma, dC/da é dada pela seguinte expressão [39]:

$$\frac{dC}{da} = \frac{8}{Eb} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right). \quad (27)$$

Para manter a dC/da constante, a altura dos substratos tem que ter em conta o fator m na sua geometria, dado pela equação (2). Mantendo desta forma dC/da constante, a

flexibilidade vai variar linearmente com a propagação da fenda. Assim, utilizando as Equações (18) e (27), o valor de G_{lc} é dado pela seguinte expressão [39]

$$G_{lc} = \frac{4P^2}{EB^2} \left(\frac{3a^2}{h^3} + \frac{1}{h} \right) = \frac{4P^2}{EB^2} m. \quad (28)$$

3 Trabalho experimental

Neste capítulo, são apresentados todos os dados registados em toda a fase experimental, tais como os materiais utilizados, bem como as suas principais propriedades, fabrico dos provetes DCB e TDCB e o ensaio desses mesmos provetes, em que 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. Toda a componente prática deste trabalho foi desenvolvida no Departamento de Engenharia Mecânica (DEM), no Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP).

3.1 Substratos para os provetes DCB e TDCB

Para o fabrico dos substratos DCB e TDCB foi utilizado o aço C45E. Este material é um aço ao carbono de baixa liga, que apresenta as propriedades apresentadas na seguinte tabela.

Propriedades	C45E
Tensão de cedência [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

Tabela 3 -Propriedades do aço C45E

O aço C45E, também designado comercialmente por F10 (designação dada pelo F. Ramada), apresenta uma elevada rigidez igual à de qualquer aço (210 GPa), razoável maquinabilidade aliados ao baixo custo de aquisição. Para além destas características, este aço também designado por AISI 1045, possui propriedades menos favoráveis, tais como: fraca resistência ao impacto a baixas temperaturas e baixa resistência à corrosão. Este aço pode ser encontrado em aplicações como veios, cavilhas e parafusos, por exemplo. É possível encontrar o C45E em elementos estruturais de ferramentas de injeção de plástico.

3.2 Adesivos

Os adesivos estruturais utilizados nos ensaios DCB e TDCB 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 moderadamente dúctil, já o SikaForce® 7752 é um adesivo poliuretano e o seu comportamento é dúctil.

3.2.1 Araldite® AV138

O adesivo Araldite® AV138 é um adesivo epóxico de alta resistência e é fabricado pela empresa HUNTSMAN. É composto por dois componentes, a resina AV138M e o endurecedor HV 998 (Figura 1). A mistura resina/endurecedor deve ser realizada na razão de 100/40, respetivamente.



Figura 39 - Modo de fornecimento resina Araldite® AV 138 e endurecedor HV 998

A partir da curva tensão-deformação (Figura 40), obtida em trabalhos anteriores [41] por ensaio de tração em provetes maciços, verifica-se que este adesivo apresenta um comportamento frágil.

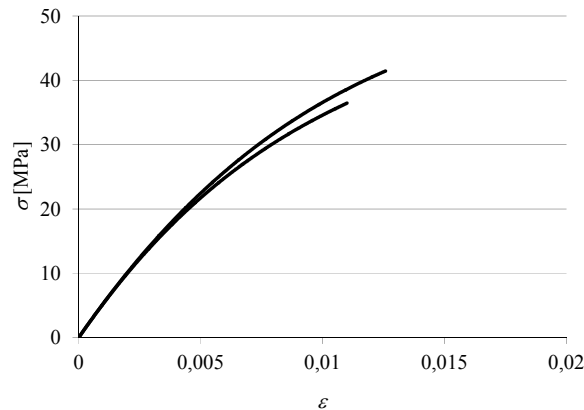


Figura 40 - Curva σ - ε relativa ao adesivo Araldite® AV 138 [41]

O adesivo estrutural AV 138 apresenta excelente resistência química, é resistente a temperaturas até 120°C, a cura pode ser feita a baixas temperaturas (acima de 5°C) e tem baixa emissão de gases durante a cura. Devido ao seu comportamento frágil, este adesivo é mais sensível aos defeitos de fabricação, quando comparado com o Araldite® 2015 [41]. As principais propriedades do adesivo AV 138 foram obtidas experimentalmente na referência [41], e apresentam-se na seguinte tabela.

Propriedades	AV 138
Módulo de Young, E [GPa]	4,89±0,81
Coefficiente de Poisson, ν^*	0,35
Tensão de cedência, 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 [36]
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	0,636±0,105 [42]

*Dados do fabricante

Tabela 4 - Propriedades relativas ao adesivo AV 138 [41]

A aplicação deste adesivo é efetuada com espátula, por aplicação manual do adesivo nas superfícies a colar. Após a mistura dos componentes, o tempo de manuseamento do adesivo (*working life* ou *pot life*) tem a duração de 30 minutos. Note-se que as superfícies requerem de um pré-tratamento adequado para melhorar a resistência da junta a colar.

Este adesivo é utilizado na área das telecomunicações, eletrónica e aeroespacial devido à baixa emissão de gases durante a cura.

3.2.2 Araldite® 2015

O Araldite® 2015 é um adesivo epóxico e é fabricado pela empresa HUNTSMAN. É composto por dois componentes (componente A resina, componente B endurecedor). É fornecido em bisnaga, na quantidade de 25 ml por componente (Figura 41).



Figura 41 - Modo de fornecimento do adesivo Araldite® 2015

Apresenta um comportamento moderadamente dúctil (Figura 42), ao contrário do adesivo abordado no ponto anterior. O adesivo Araldite® 2015 apresenta uma componente plástica de deformação até rotura [41].

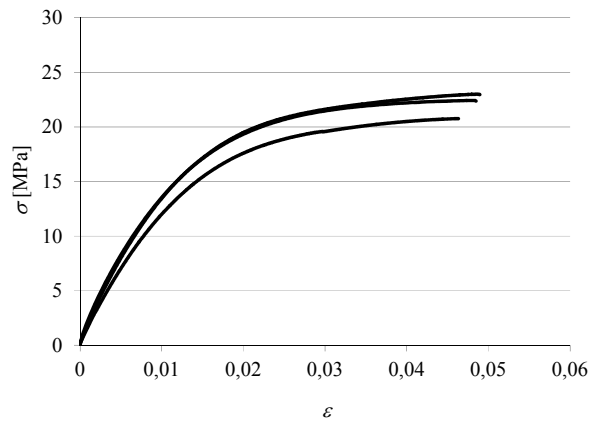


Figura 42 - Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Araldite® 2015 [41]

Este adesivo é bastante utilizado para ligar substratos metálicos e compósitos. É um adesivo modificado com partículas de borracha, de forma a aumentar a tenacidade e a resistência ao arrancamento [29].

Na tabela seguinte são apresentadas as principais propriedades do adesivo Araldite® 2015, obtidas experimentalmente num trabalho anterior [41].

Propriedades	Araldite® 2015
Módulo de Young, E [GPa]	$1,85 \pm 0,21$
Coefficiente de Poisson, ν^*	0,33
Tensão de cedência, σ_y [MPa]	$12,63 \pm 0,61$
Tensão de rotura, σ_f [MPa]	$21,63 \pm 1,61$
Deformação de rotura, ϵ_f [%]	$4,77 \pm 0,15$
Módulo de corte, G [GPa]	$0,56 \pm 0,21$
Tensão de cedência de corte, τ_y [MPa]	$14,6 \pm 1,3$
Tensão de rotura de corte, τ_f [MPa]	$17,9 \pm 1,8$
Deformação de rotura de corte, γ_f [%]	$43,9 \pm 3,4$
Tenacidade à tração, G_{Ic} [N/mm]	$0,43 \pm 0,02$ [36]
Tenacidade ao corte, G_{IIc} [N/mm]	$4,70 \pm 0,34$ [42]

*Dados do fabricante

Tabela 5 - Propriedades relativas ao adesivo Araldite® 2015 [41]

Para aplicar este adesivo é utilizada uma pistola, onde é feita a mistura do adesivo com o endurecedor por intermédio do bico de aplicação. O tempo de manuseamento do adesivo

(*working life* ou *pot life*) situa-se entre os 30 e 40 minutos. A cura pode ser feita à temperatura ambiente (23°C) com a duração de 6 horas para atingir a resistência ao corte de 10 MPa, ou 35 minutos a 60°C. De forma geral os adesivos epóxicos são bastante utilizados na indústria aeronáutica e automóvel. Devido à boa tenacidade do Araldite® 2015, este é indicado para colar materiais dissimilares [43].

3.2.3 Sikaforce® 7752

O Sikaforce® 7752 L60 é um adesivo de poliuretano de resistência moderada e ductilidade elevada e é fornecido pela empresa Sika. É composto por dois componentes (A e B). A mistura resina/endurecedor deve ser efetuada na razão de 5/1, respetivamente.

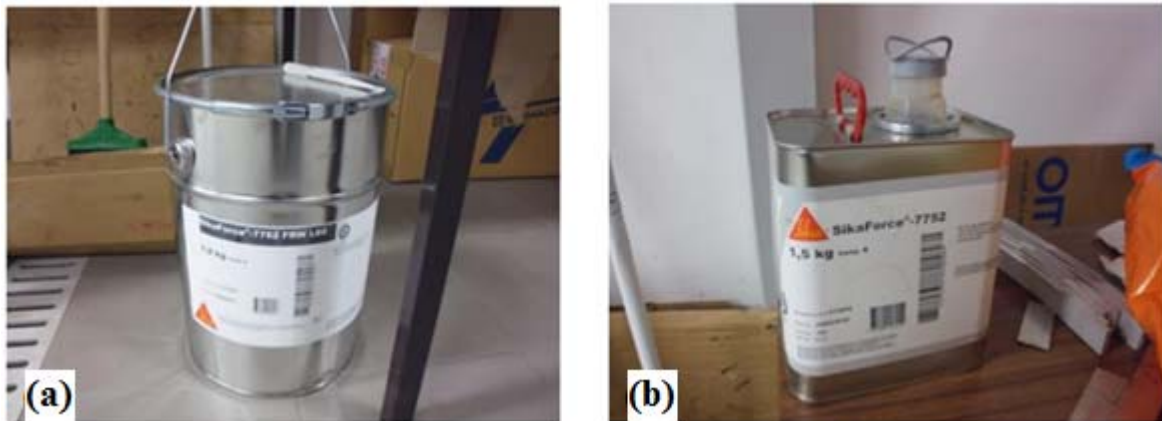


Figura 43 - Modo de fornecimento do adesivo SikaForce® 7752 L60: Adesivo (a) e endurecedor (b)

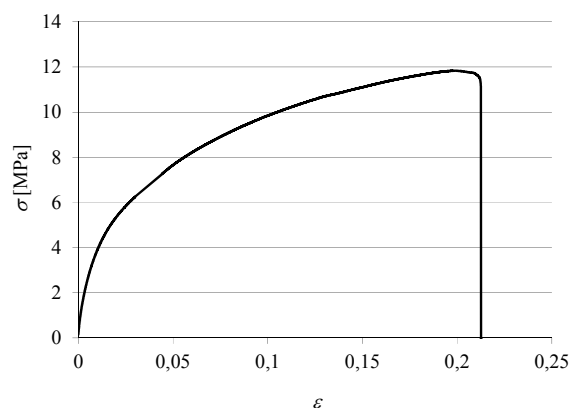


Figura 44 - Curva σ - ϵ relativa ao adesivo Sikaforce® 7752 [44]

O Sikaforce[®] 7752 é um adesivo de poliuretano com um comportamento dúctil, como é possível verificar na Figura 44. Este adesivo é resistente a temperaturas 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.

Na tabela seguinte são apresentadas as principais propriedades do adesivo Sikaforce[®] 7752, obtidas experimentalmente na referência [44].

Propriedades	Sikaforce[®] 7752
Módulo de Young, E [MPa]	493,81±89,60
Coefficiente 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

Tabela 6 - Propriedades relativas ao adesivo Sikaforce[®] 7752 [44]

A aplicação deste adesivo é feita manualmente com espátula, colocando-se o adesivo nas superfícies a colar. Após a mistura dos componentes, o tempo de manuseamento do adesivo (*working life* ou *pot life*) é de 60 minutos.

3.3 Fabrico dos substratos TDCB

Para que fosse possível realizar os ensaios práticos foram necessários os substratos para os ensaios DCB e TDCB. Para o ensaio DCB já existem no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP 14 substratos em aço C45E, com a geometria definida na norma ASTM D3433-99.

No caso dos substratos TDCB, foi necessário proceder ao seu fabrico. O material utilizado foi igualmente o aço C45E, e recorreu-se ao processo de fabrico por maquinaria dos substratos para obter a geometria pretendida. Para a elaboração do desenho técnico dos substratos TDCB foi tida em conta a norma ASTM D 3433-99. Os substratos TDCB caracterizam-se por apresentarem uma espessura crescente desde a zona de aplicação da carga até à extremidade oposta do substrato, por forma a garantir a taxa constante de flexibilidade ao longo do ensaio (ou seja, valor de m constante na equação (2)). Assim, é possível obter pelo método CCM o valor de G_{Ic} sem que seja necessária a medição do comprimento de fenda. O valor de m considerado para a realização dos substratos foi de $1,968386 \text{ mm}^{-1}$. Este valor é o especificado na norma ASTM D 3433-99, no sentido de se obter os substratos com as dimensões preconizadas na norma. A utilização de um valor de m constante traduz-se numa parábola cuja diferença para uma função linear entre os dois patamares de espessura constante é reduzida (Figura 45), mas cuja consideração é de extrema importância para a obtenção de uma curva-R com propagação de dano a G_I constante.



Figura 45 - Geometria dos substratos com valor de m constante e aproximação por função linear; sistema de coordenadas para início da função do polinómio (ponto de aplicação da carga)

A partir da equação (2), que define o valor de m constante, obtém-se a função polinomial que relaciona a coordenada y em função de x (Figura 45), o que permite a construção geométrica representada na Figura 45. De referir que y (mm) representa o valor de a (mm) na equação (2) enquanto x representa o valor de h .

$$y = \sqrt{\left(m - \frac{1}{x}\right) \cdot \frac{x^3}{3}}. \quad (29)$$

Considerou-se $12,70 \text{ mm} \leq x \leq 38 \text{ mm}$ (correspondente ao fim da zona de espessura constante próxima do ponto de carregamento e ao topo na extremidade oposta) e $y \geq 35,92$

mm (correspondente ao início da função polinomial). Para efeitos de comparação, na Tabela 7 apresentam-se alguns pontos da função referida (em polegadas), bem como a aproximação da função a uma função linear, representada pelos valores de y' . Por esta comparação confirma-se a existência de uma diferença não negligenciável entre as duas funções. Na Figura 46 são traçadas estas duas funções, o que permite uma melhor visualização da diferença entre estas.

Polegadas		
x	y	y'
0,5	1,914	1,742
0,6	2,522	2,496
0,7	3,182	3,250
0,8	3,892	4,005
0,9	4,646	4,759
1	5,447	5,514
1,1	6,287	6,268
1,2	7,167	7,023

Tabela 7 - Comparação entre conjuntos de pontos pela função de m constante (x,y) e pela função linear aproximada (x,y')

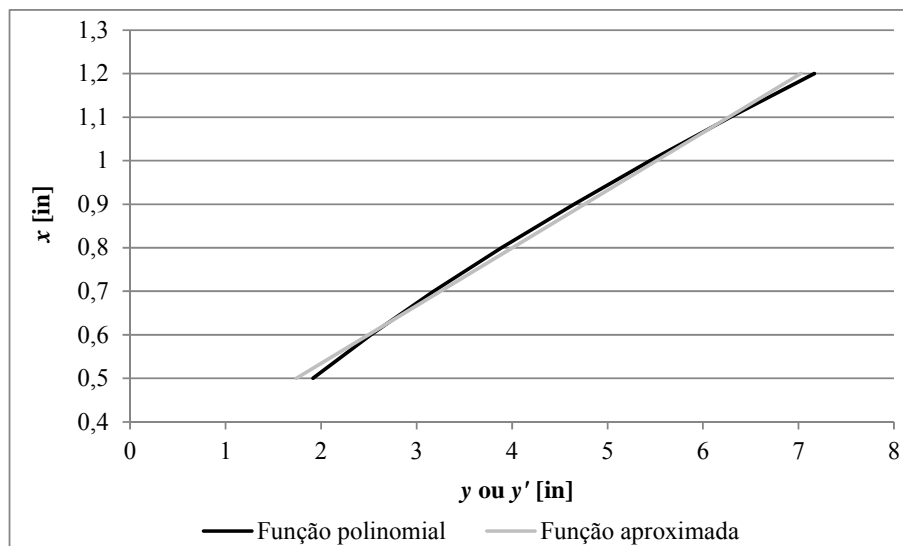


Figura 46 – Comparação entre as funções polinomial e aproximada para a definição da relação entre x e y ou y'

A Figura 47 representa os desenhos de detalhe 2D do substrato TDCB enviado para as oficinas mecânicas para fabrico dos mesmos.

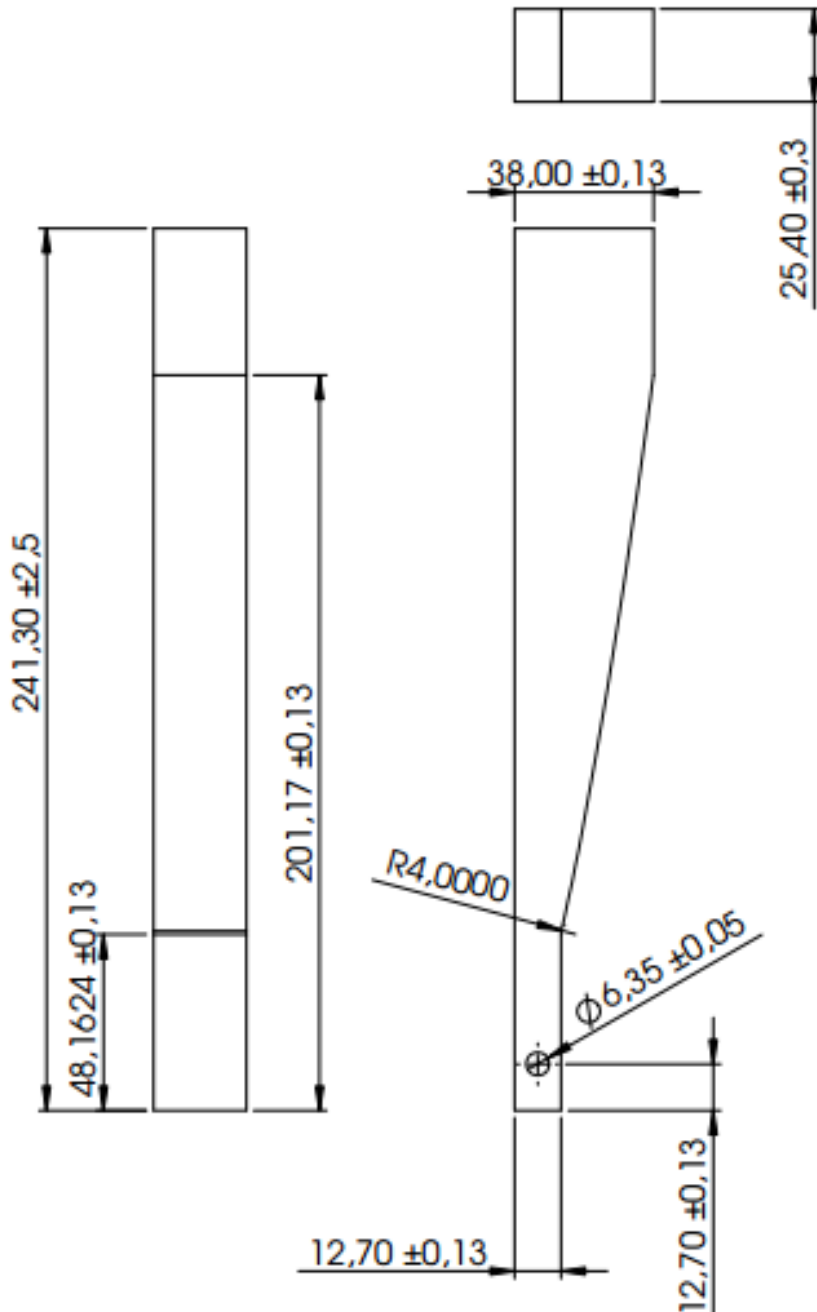


Figura 47 - Provete TDCB segundo a norma ASTM D 3433-99 (dimensões em mm)

Este substrato foi desenhado em Solidworks, utilizando a função descrita pela equação (29) para geração da aresta correspondente ao aumento da espessura do provete, considerando como início do eixo x o ponto de aplicação da carga. O *software* utilizado para a

programação do código numérico (CN) foi o *FeatureCAM*. Os provetes foram fabricados nas Oficinas de Mecânica do Instituto Superior de Engenharia do Porto, onde foi utilizado um centro de maquinagem HAAS VF2 (Figura 48).



Figura 48 - Centro de maquinagem CNC HAAS VF2

Para a execução dos 14 provetes foram utilizados 14 blocos em esquadria com as seguintes dimensões: $244 \times 40 \times 31 \text{ mm}^3$.

Para a determinação dos parâmetros de maquinagem devem ser tidas em conta as propriedades do material, características das máquinas-ferramentas utilizadas para a maquinagem, estado final da superfície, entre outros.

Para a execução dos provetes foram necessários dois apertos e utilizadas as ferramentas disponíveis nas oficinas mecânicas. A sequência de maquinagem foi a que se apresenta na Tabela 8 e Tabela 9.

DESENVOLVIMENTO

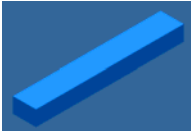


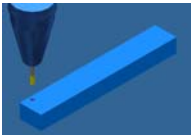
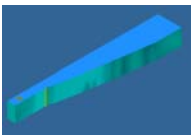
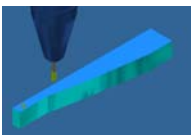
Operação	1º Aperto	
1	Utilizou-se a ferramenta SANDVIK® Face Mill R245 de Ø80 mm com 4 navalhas para facejar a superfície do bloco.	
2	Utilizou-se a ferramenta de pontear Dormer A200 de Ø2,5 mm. Marcou-se o centro do furo de Ø6,35 mm com uma penetração da ferramenta no material de 2 mm.	
3	Utilizou-se uma 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	Utilizou-se a fresa de topo cilíndrica sólida Dormer C135 de Ø6 mm com 2 navalhas. Terminou-se o furo para o diâmetro final de 6,35 mm.	
5	Utilizou-se a fresa de topo cilíndrica sólida Dormer C353 de Ø20 mm com 3 navalhas para desbaste lateral da superfície inclinada e acabamento.	
6	Utilizou-se a fresa de topo cilíndrica sólida Dormer C135 de Ø6 mm com 2 navalhas. Operação de acabamento do raio de 4 mm (na transição entre a espessura de 12,7 mm e a superfície inclinada).	

Tabela 8 – Gama operatória para o primeiro aperto

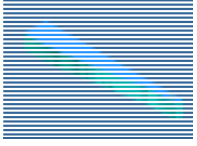
Operação	2° Aperto	
1	Utilizou-se a ferramenta SANDVIK® Face Mill R245 de Ø80 mm com 4 navalhas para facejar a superfície do bloco. Facejamento do lado oposto para a cota final de 25,40 mm.	

Tabela 9 – Gama operatória para o segundo aperto

A velocidade de avanço da mesa V_f (m/min) é dada pela expressão [45]

$$V_f = n \cdot f_z \cdot z, \quad (30)$$

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 equação

$$V_c = \frac{\pi \times DC_{ap} \times n}{1000}, \quad (31)$$

em que DC_{ap} é o diâmetro de corte (mm) na profundidade de corte designada por AP. A Tabela 11 apresenta os parâmetros de maquinagem utilizados.

Posição	Designação	Ø [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 C353	20	Desbaste	100	1591	811	0,5
T19	Dormer C353	20	Acabamento	110	1751	892	0,1

Tabela 10 – Parâmetros de maquinagem

3.4 Fabrico dos provetes DCB e TDCB

Para o ensaio DCB foram preparados 5 provetes para cada adesivo utilizado. As dimensões dos substratos compreendem um comprimento igual a 356 mm, largura de 25,4 mm e espessura de 12,7 mm. Os provetes DCB foram todos preparados no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) e Oficinas Mecânicas, no Departamento de Engenharia Mecânica do ISEP. A preparação dos provetes TDCB é similar aos DCB, em que foi utilizado o mesmo número de provetes e foram preparados nas mesmas instalações. De forma a garantir uma boa colagem e evitar uma rotura pela interface (rotura entre o adesivo e o substrato), é necessária uma preparação adequada da superfície de colagem. Neste trabalho foram utilizados processos de preparação da superfície passivos mecânicos e

químicos. Aos substratos foi aplicado de uma forma inicial um processo passivo químico. Para isso, recorreu-se à utilização de acetona para desengordurar as superfícies do mesmo (substratos). De seguida aplicou-se como processo passivo mecânico a granalhagem. A granalhagem foi executada a seco na granalhadora CIDBLAST RT 6S (Figura 49), instalada no LEM e o abrasivo utilizado foi óxido de alumínio.



Figura 49 - Granalhadora CIDBLAST, modelo RT 6S

Na imagem seguinte pode-se verificar o aspeto final dos substratos DCB granalhados. Esta operação deve ser executada imediatamente antes da aplicação do adesivo, de forma a evitar possíveis contaminações antes da aplicação do adesivo e garantir assim uma boa adesão.



Figura 50 – Substratos DCB após operação de granalhagem

Posteriormente à granalhagem, os substratos são limpos com jato de ar e de seguida são de novo limpos com acetona de forma a eliminar qualquer partícula de abrasivo. Após estarem devidamente limpos, são secos com recurso a papel.

A espessura do adesivo utilizado para todos os adesivos foi igual a 1 mm. Para garantir essa espessura foram utilizados espaçadores calibrados de aço e uma lâmina para criar a pré-fenda inicial. Na extremidade mais próxima do ponto de solicitação do provete DCB (representado na Figura 51), foi utilizado um calço de 1 mm constituído por uma lâmina de 0,1 mm espessura, ladeada por calços de 0,45 mm de ambos os lados. Na extremidade oposta é utilizado apenas um espaçador com 1 mm de espessura.

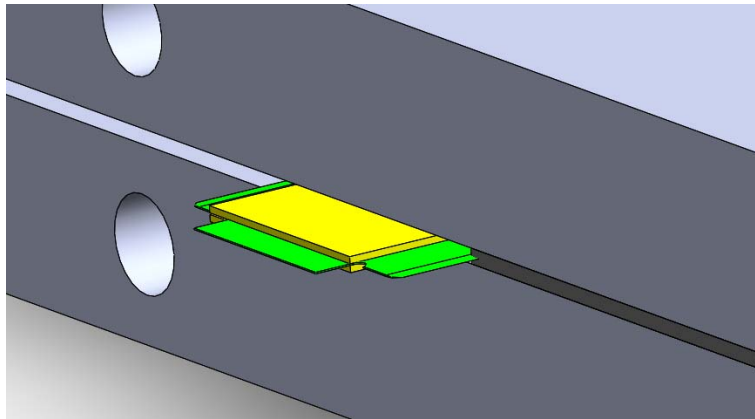


Figura 51 – Extremidade do provete DCB onde é criada a pré-fenda

Os espaçadores com 0,45 mm de espessura são colados à lâmina com uma cola LOCTITE Super Cola3, seguindo-se a limpeza do conjunto com acetona de forma a remover possível gordura devido ao manuseamento (corte das lâminas e colagem).

Após a colocação da cola LOCTITE Super Cola3, os espaçadores compostos pela lâmina e espaçadores de 0,45mm e os espaçadores de 1 mm, são introduzidos num forno elétrico à temperatura aproximada de 100°C durante 15 minutos (Figura 52).



Figura 52 – Espaçadores no forno para cura do desmoldante

De seguida é aplicado o desmoldante Loctite® 770-NC de forma a facilitar a remoção dos calços antes de executar o ensaio. O desmoldante é aplicado 3 vezes em cada uma das faces do conjunto lâmina/espaçadores, como é demonstrado na Figura 53.



Figura 53 - Aplicação de desmoldante nos espaçadores

De forma a garantir o mesmo posicionamento dos espaçadores que contêm a lâmina em todos os substratos, estes são posicionados 50 mm desde o ponto de solicitação (de referenciar que é o furo mais distante da extremidade a ser utilizado dos três furos

existentes em cada substrato). Os espaçadores de 1 mm são colocados na extremidade oposta. A colocação dos espaçadores nos substratos (Figura 54), é realizada utilizando cola LOCTITE Super Cola3.



Figura 54 - Posicionamento dos calços nos substratos DCB

Após terminada a colocação dos espaçadores nos substratos, é iniciada a preparação do adesivo. A preparação dos três tipos de adesivos é distinta (SikaForce® 7752 L60, Araldite® 2015 e Araldite® AV138).

O SikaForce® 7752 L60 é um adesivo constituído por dois componentes (adesivo e endurecedor) e é fornecido em duas embalagens separadas, uma de resina com 7,5 kg e outra de endurecedor com 1,5 kg. É efetuada a mistura de resina/endurecedor na razão peso de 5/1 respetivamente, como indicado no capítulo 3.2.3 (Figura 55).

Após a pesagem e colocação num recipiente para a mistura, deve-se efetuar a mistura manual de ambos os componentes o tempo suficiente para se obter uma mistura homogénea do adesivo. A aplicação do adesivo nos substratos é feita através da utilização de uma espátula. A quantidade de adesivo aplicado deve ser sempre superior à quantidade necessária para perfazer a espessura de 1 mm, de forma a evitar preenchimento insuficiente da zona destinada ao adesivo e vazios na junta colada. De seguida, adiciona-se o substrato superior e pressiona-se esse mesmo substrato, para que sejam evitadas formações de porosidades e vazios na camada de adesivo. A cura foi realizada à temperatura ambiente durante 7 dias.

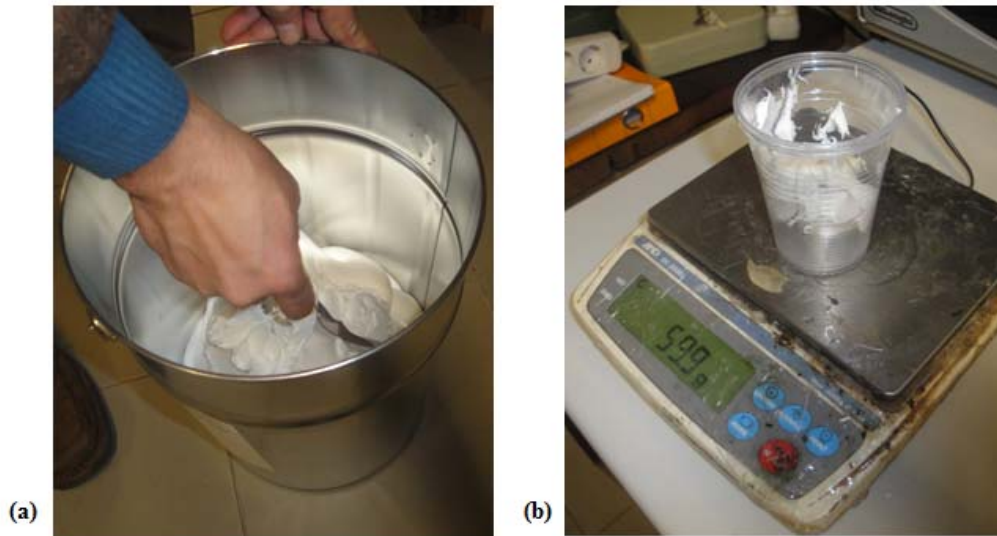


Figura 55 - Preparação do adesivo SikaForce® 7752 L60 (a) adesivo; (b) pesagem do adesivo numa balança digital

No caso do adesivo Araldite® AV138, a preparação é muito similar ao Sikaforce® 7752, diferenciando a razão da mistura adesivo/endurecedor, sendo neste caso de 100 g de adesivo para 40 g de endurecedor. A cura foi efetuada à temperatura ambiente e teve a duração de uma semana. Para o adesivo Araldite® 2015 a preparação e o modo de aplicação foram diferentes aos restantes adesivos utilizados. A sua aplicação é levada a cabo por intermédio de uma pistola acionada manualmente, como é ilustrado na Figura 56. Como se pode observar, a aplicação do adesivo foi em zigue-zague desde a extremidade oposta à aplicação da carga no sentido da pré-fenda, com o cuidado de deposição sem folga entre fios de adesivo consecutivos para evitar a formação de bolhas de ar durante a operação do fecho dos substratos.



Figura 56 - Aplicação do adesivo Araldite® 2015

Após a aplicação de cada um dos adesivos, coloca-se o substrato superior e pressiona-se esse mesmo substrato em báscula, de forma a evitar formação de porosidades e vazios na camada do adesivo. Para todos os adesivos foi considerado um tempo de cura de 7 dias à temperatura ambiente, sendo em todos os casos o tempo de cura superior ao especificado pelo fabricante.



Figura 57 – Mó utilizada para a remoção do excesso de adesivo nas laterais dos provetes

Após a cura, o excesso de adesivo foi eliminado com uma mó numa máquina de furar (Figura 57), instalada nas oficinas mecânicas do ISEP. Posteriormente, os provetes foram limpos com acetona, com especial atenção às faces laterais dos provetes, e de seguida aplicou-se corretor numa das laterais do provete (a que vai ser utilizada para medição do comprimento de fenda), como é possível observar na Figura 58.



Figura 58 - Provetes TDCB com corretor aplicado

Deixou-se secar, e aplicou-se a escala impressa em papel autocolante, distante do adesivo aproximadamente 1 mm. Identificou-se o número do provete junto ao início da escala. Na Figura 59 pode-se observar o provete preparado para iniciar o ensaio DCB e TDCB.

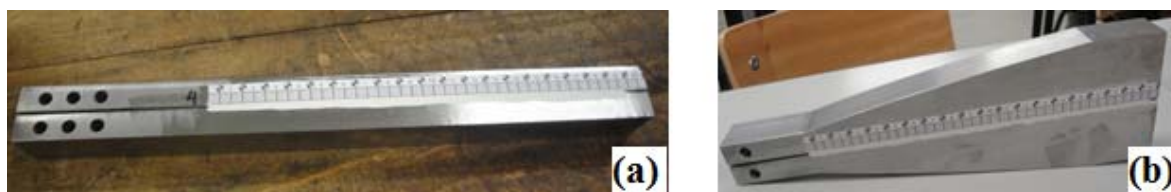


Figura 59 - Provete preparados: DCB (a), TDCB (b)

3.5 Condições de ensaio

Os ensaios DCB e TDCB foram ambos realizados no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP. O equipamento utilizado para a realização dos vários ensaios foi a máquina de ensaios Shimadzu AG-X 100 (Figura 60), equipada com uma célula de carga de 100 kN.



Figura 60 - Equipamento de ensaio Shimadzu AG-X 100

Para a execução do ensaio DCB e TDCB foi necessário a utilização de amarras em U (Figura 61) para a fixação do provete à máquina.



Figura 61 - Amarras em U

Através da Figura 62 (a) é ilustrada a preparação do ensaio DCB, enquanto a Figura 62 (b) demonstra a preparação do ensaio TDCB. De forma a nivelar os provetes dos dois tipos de ensaio, foi utilizado um fio ligado ao travessão da máquina de ensaios a suportar a extremidade livre dos provetes.

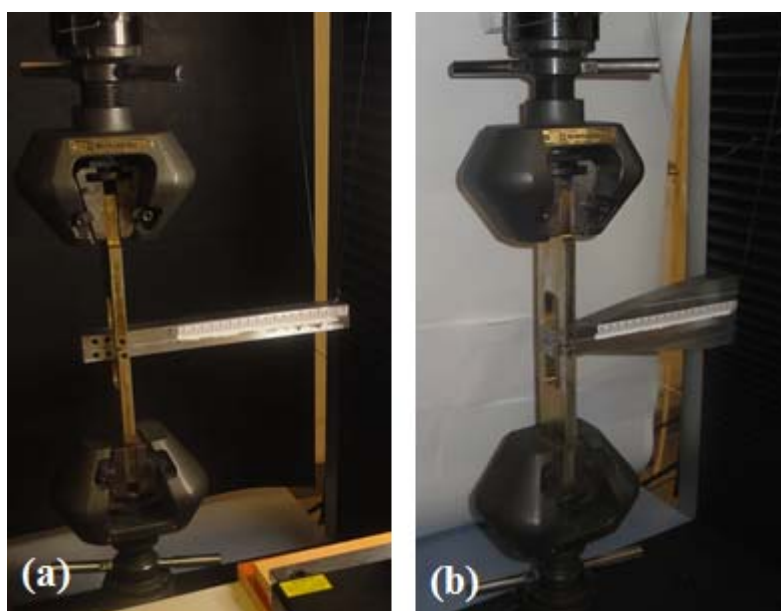


Figura 62 - Ensaio (a) DCB (b) TDCB

Durante o ensaio, a aquisição de valores correspondentes à força e ao deslocamento foi efetuada a uma taxa de 5 registos por segundo, enquanto o comprimento da fenda foi medido através de uma máquina fotográfica CANON modelo EOS 650D com uma resolução de 18MPixel, em que se fotografou a zona de interesse do provete com intervalos de 5 segundos. O equipamento utilizado é exibido na Figura 63.



Figura 63 - Equipamento fotográfico utilizado para a medição do comprimento de fenda

De acordo com as características de cada adesivo foram alteradas as velocidades de ensaio, no sentido de evitar a morosidade dos ensaios e respetivas consequências a nível de tratamento de dados, nomeadamente de imagens de cada ensaio. Sendo assim, considerou-se a variação da velocidade de ensaio para obter cerca de 100 imagens por ensaio. Considera-se que, para a gama de velocidades de ensaio selecionadas, não são significativos efeitos viscoelásticos de variação de G_I [46].

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

Tabela 11 - Velocidades de ensaio

Em função destes pressupostos, observou-se que as velocidades de ensaio para os provetes TDCB são sempre superiores às dos provetes DCB, devido à maior rigidez destes e consequente propagação mais rápida de fenda. As velocidades de ensaio para os provetes colados com o adesivo Araldite® AV138 foram as mais baixas pois, para além de ser um adesivo frágil, é mais rígido, o que significa que a propagação ocorre com deslocamentos inferiores.

Devido à rigidez dos provetes TDCB ser superiores aos DCB, as velocidades utilizadas foram cerca de metade, como se pode verificar na Tabela 11. Desta forma foi garantido um número de fotos idêntico relativamente aos dois tipos de ensaios. Os adesivos Araldite® 2015 e SikaForce® 7752 são ambos dúcteis, embora um mais que o outro. No entanto, as velocidades utilizadas foram iguais (entre ensaios DCB e TDCB). Os provetes DCB foram pré-carregados para evitar uma propagação de fenda brusca [25]. No ensaio DCB, os valores obtidos da fenda inicial a_0 (mm), para o $t=0$ segundos são apresentados na Tabela 12.

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 12 – Comprimento de fenda inicial no ensaio DCB (em mm)

Para cada um dos ensaios TDCB, os valores de a_0 (mm), para o $t=0$ segundos são apresentados na Tabela 13.

Provete	a_0		
	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

Tabela 13 - Comprimento de fenda inicial no ensaio TDCB (em mm)

3.6 Resultados

Este capítulo está dividido em quatro subcapítulos, em que os resultados serão apresentados por tipo de ensaio. Sendo assim, o capítulo está dividido em resultados dos ensaios DCB, resultados dos ensaios TDCB, análise de resultados e comparação entre os dois métodos de ensaio.

3.6.1 Ensaio Double-Cantilever Beam

Para cada adesivo serão apresentadas as respectivas curvas $P-\delta$, para todos os provetes ensaiados. Seguidamente serão apresentadas as curvas-R, que relacionam a evolução de G_I com a e que servem de base para a estimativa de G_{Ic} . Serão também apresentadas as roturas para cada provete utilizado em cada adesivo.

3.6.1.1 Curvas $P-\delta$

A curva $P-\delta$ foi registada durante o ensaio para cada um dos 5 provetes DCB. Na Figura 64 estão representadas essas mesmas curvas para os provetes DCB realizados com o adesivo Araldite® AV138.

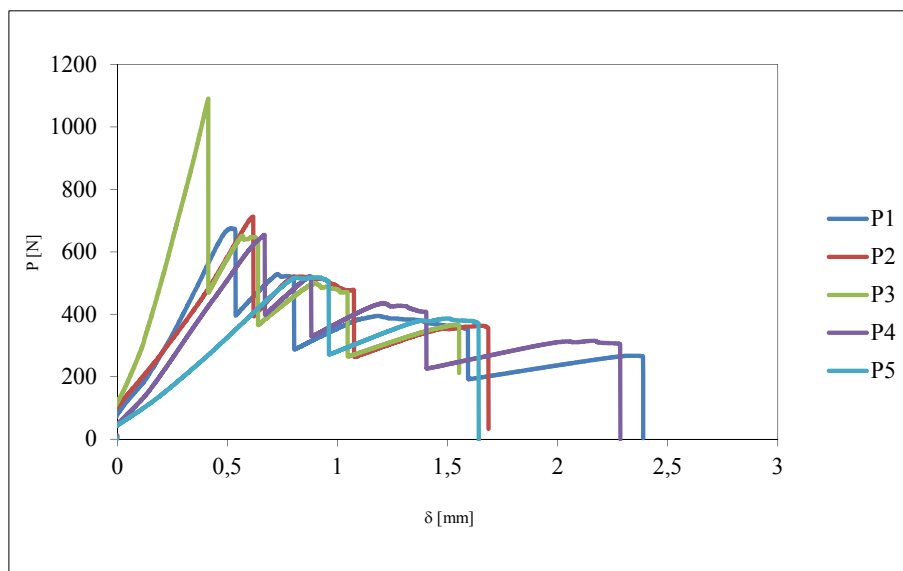


Figura 64 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® AV 138

Através da Figura 64, verifica-se que este adesivo não apresenta uma boa repetibilidade, quando comparado com os restantes adesivos estudados neste trabalho. Destacou-se apenas o provete 3 com uma rigidez inicial superior e valor máximo de P também bastante mais elevado. Esta força pode estar relacionada com o valor de a_0 apresentar um dos valores mais baixos, como se pode ver na Tabela 12.

Em todos os provetes verificou-se que há períodos de propagação instável da fenda, alternados com regiões de propagação estável (Figura 65). Contudo, foi possível determinar o valor de G_{Ic} a partir de zonas de propagação de fenda estável. Na Figura 64 verificam-se as várias propagações instáveis durante o ensaio para cada um dos provetes, em que cada queda acentuada da força P representa uma propagação abrupta da fenda.

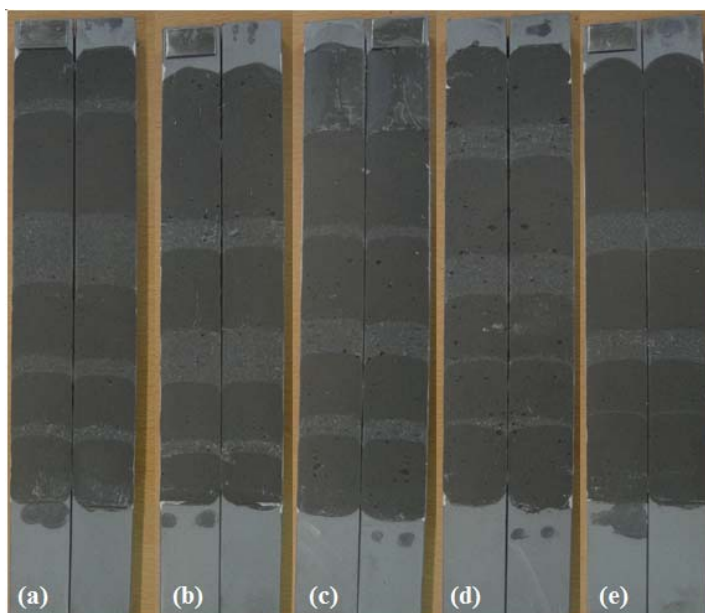


Figura 65 – Rotura do adesivo Araldite® AV138 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5

Na Figura 65 é possível verificar que as zonas de adesivo com a cor de cinzento-claro representam a propagação estável da fenda onde se formam os patamares que possibilitam a determinação do G_{Ic} . A cor mais escura, cinzento-escuro, corresponde às zonas de propagação instável. No provete 4 (Figura 65 (d)) é possível verificar uma propagação instável até aproximadamente 30 mm, de seguida 5 mm de propagação estável, seguindo-se aproximadamente 20 mm de rotura abrupta, passando cerca de 15 mm por propagação

estável, voltando a ocorrer cerca de 40 mm de propagação da fenda de forma instável, propagando cerca de 15 mm em rotura estável, terminando com rotura instável o restante da junta colada. Embora tenha ocorrido uma propagação instável da fenda, a rotura dos vários provetes foi sempre coesiva, como se pode verificar na Figura 65. O facto de a rotura ter sido coesiva demonstra a adequabilidade do processo de preparação superficial durante o fabrico dos provetes, ou seja, foram devidamente granalhados e desengordurados.

Para todos os 5 provetes do ensaio DCB foi registada a curva $P-\delta$. Na Figura 66 estão representadas essas mesmas curvas para os provetes DCB realizados com o adesivo Araldite® 2015.

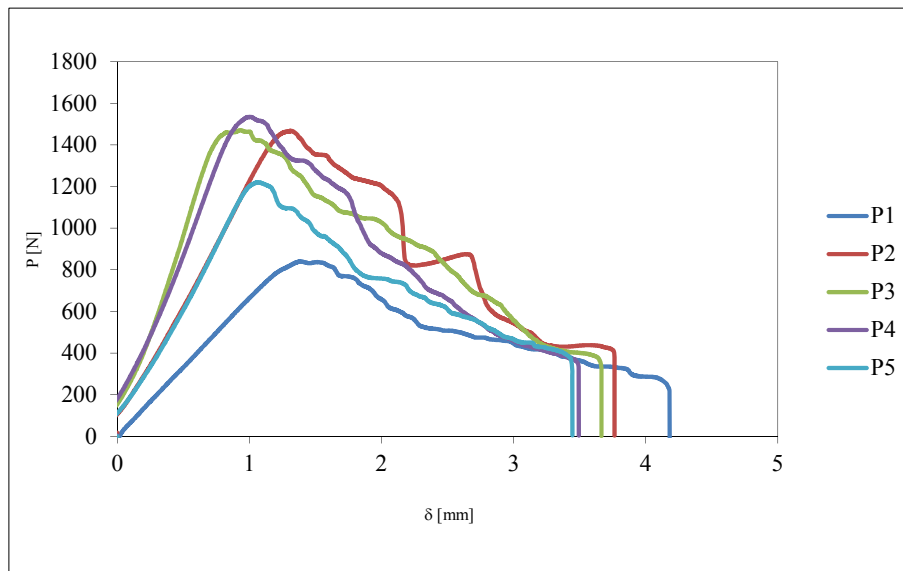


Figura 66 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® 2015

O provete 1 apresentou uma rigidez inicial inferior quando comparado com os restantes provetes. Isto deve-se ao valor de a_0 ser superior ao dos restantes provetes, como se pode verificar na Tabela 12 para o adesivo Araldite® 2015, onde o valor de a_0 para o provete 1 é igual a 99,5 mm. Verifica-se de uma forma geral que, através das curvas apresentadas na Figura 66 foi obtida uma boa repetibilidade no comportamento durante a propagação e no deslocamento final. No provete 2 verifica-se uma queda acentuada da rigidez do provete (para um valor aproximado de δ igual a 2,10 mm), o que se deveu a uma propagação de fenda instável.

A preparação da superfície antes da colagem dos substratos foi bem executada, o que se constata pelo facto da rotura ser coesiva para todos os 5 provetes ensaiados com o adesivo Araldite® 2015 (Figura 67). Em todos os substratos ficou uma pequena porção de adesivo, apesar de isto não ser perfeitamente perceptível na Figura 67. Está assim afastada a hipótese de rotura mista ou adesiva em qualquer provete.

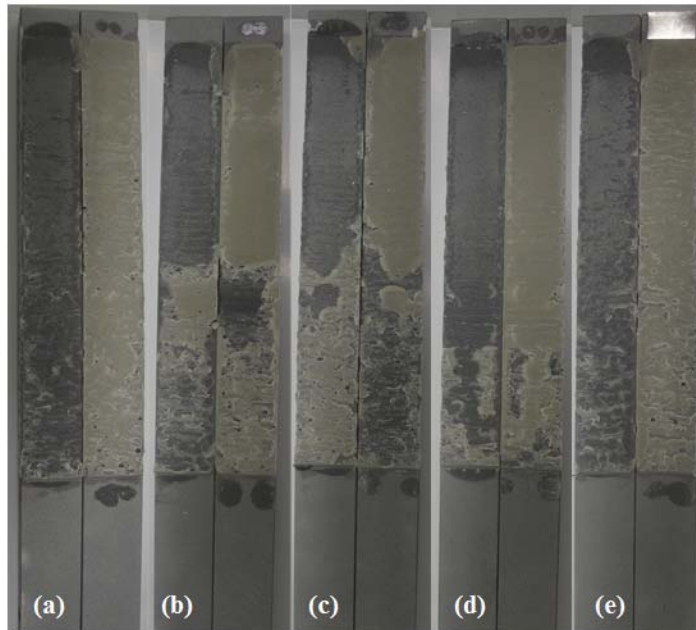


Figura 67 – Rotura do adesivo Araldite® 2015 no ensaio DCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5

A curva $P-\delta$ foi registada durante o ensaio para cada um dos 5 provetes DCB, sendo o ensaio realizado com o adesivo Sikaforce® 7752. Na Figura 68 estão representadas essas mesmas curvas para os provetes DCB.

A boa repetibilidade na rigidez inicial, assim como no comportamento durante a propagação do dano e deslocamento, antevê resultados coerentes entre provetes do valor de G_{Ic} para o adesivo Sikaforce® 7752.

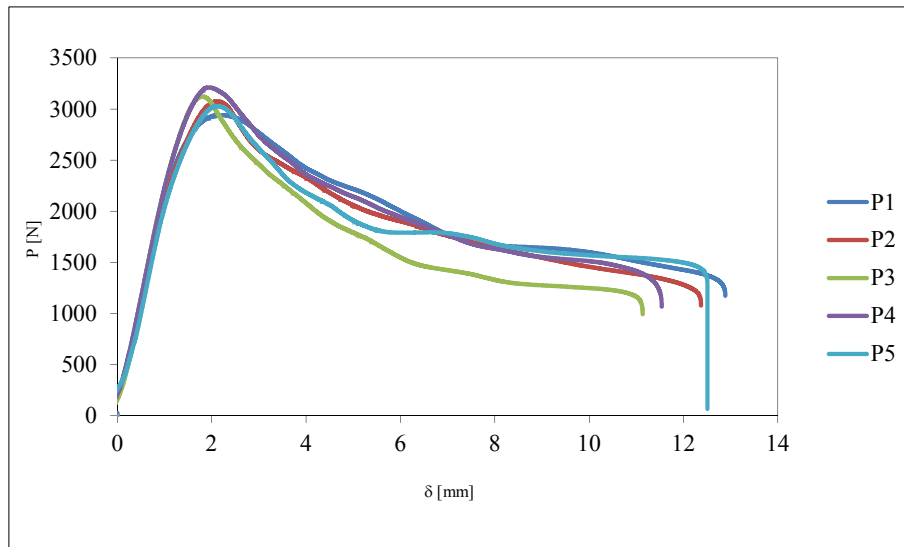


Figura 68 - Curvas P - δ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752

Para todos os provetes do ensaio DCB que utilizaram o adesivo Sikaforce® 7752 ocorreu rotura coesiva, como é demonstrado na Figura 69. Neste caso, ao contrário do adesivo Araldite® 2015, é claramente perceptível que a rotura ocorreu pela zona intermédia do adesivo, isto é, a rotura não ocorreu perto da interface.

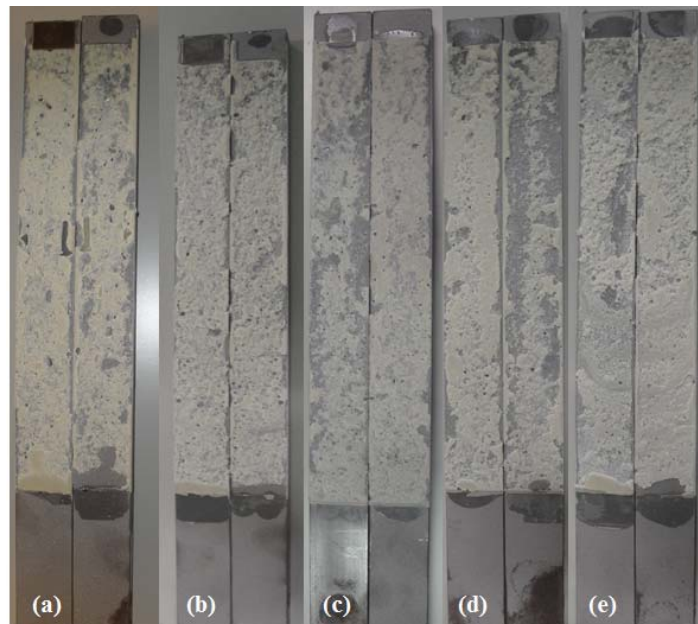


Figura 69 – Rotura do adesivo Sikaforce® 7752 no ensaio DCB (a) Provetete 1 (b) Provetete 2 (c) Provetete 3 (d) Provetete 4 (e) Provetete 5

3.6.1.2 Determinação do G_{Ic}

Para a determinação do G_{Ic} nos ensaios DCB foram utilizados três dos cinco métodos abordados no capítulo 2.5.1. Os métodos utilizados foram CBBM, CBT e CCM.

A comparação dos valores G_{Ic} é feita sempre em relação ao método CBBM, pois este método tem em conta a FPZ, em que o valor de a é determinado sem que seja necessária a medição do comprimento de fenda durante o ensaio. Como tal, uma vez que este método não está sujeito a erros de medição e já se observou que é suficientemente robusto, a comparação vai ser feita em relação a este método [47].

3.6.1.2.1 Adesivo Araldite® AV138

Como já foi referido, a propagação da fenda foi instável nalgumas porções do comprimento do adesivo. Assim, para efetuar a medição do G_{Ic} foi feita a média do valor medido de G_{Ic} nas zonas (patamares) de propagação estável da fenda, caracterizadas pelo valor de G_I aproximadamente constante com a evolução de a .

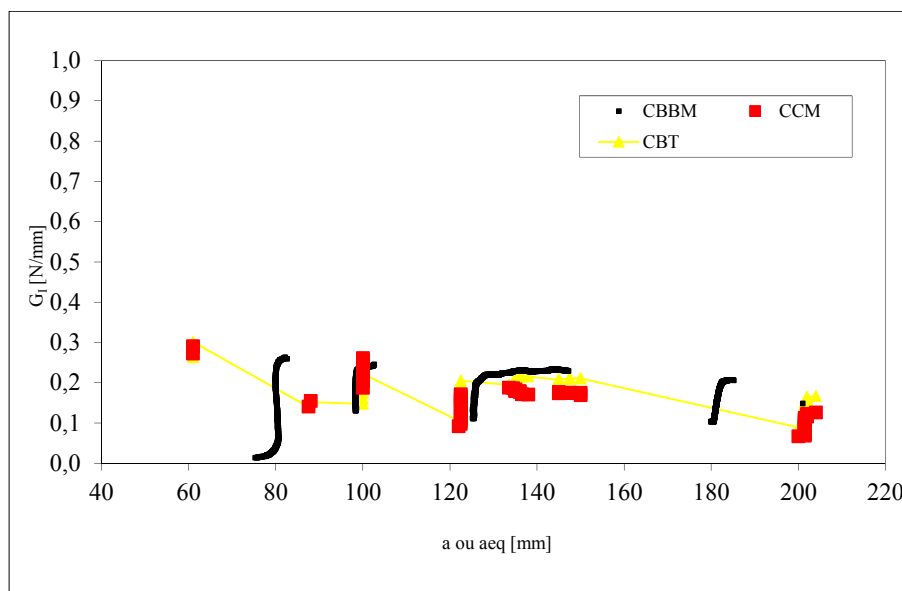


Figura 70 – Curva-R relativo ao provete 1

Na Figura 70 é apresentada a curva-R para o provete nº 1, em que é mostrada a variação de G_I durante a propagação da fenda para os métodos CBBM, CCM e CBT. Os resultados

apresentados são representativos dos resultados globais em termos de instabilidade na propagação da fenda, uma vez que é apresentada apenas uma curva-R de um dos cinco provetes ensaiados.

Na Figura 70 nota-se a existência de três patamares. O primeiro patamar está desfasado entre métodos, isto é, para o CBT e CCM o valor de a é aproximadamente 60 mm, enquanto para o método CBBM o a_{eq} situa-se nos 80 mm, para valores de G aproximadamente de 0,3 N/mm, o segundo e o terceiro patamares encontram-se em concordância entre os três métodos, estando o segundo patamar apresentado na figura para valores de a e a_{eq} iguais a cerca de 100 mm. E, por fim, o terceiro patamar compreendido entre os valores de a e a_{eq} de 120 a 150 mm, valores estes aproximados. Como já referenciado, o método CBBM apresenta um primeiro patamar desfasado para a direita de aproximadamente 20 mm. Isto deve-se ao facto deste método contabilizar os efeitos da FPZ, em detrimento dos outros métodos que não têm em conta os efeitos da FPZ.

O valor de G_{Ic} foi determinado para cada provete, sendo apresentados todos os resultados obtidos na Tabela 14 para cada um dos métodos. No final da tabela são indicados os valores médios para cada método e respetivo desvio padrão. O valor médio do G_{Ic} obtido através do método CBBM é igual a 0,256 N/mm, sendo o desvio padrão igual a 0,0257 N/mm. Comparando o método CBBM com o CBT verifica-se um desvio deste último de 9,38%. Já o método CCM apresenta um desvio superior quando comparado com o CBBM, sendo igual a 25,78%. Ambos os desvios são por defeito comparativamente ao CBBM.

Provete	CCM	CBT	CBBM
1	0,1610	0,2016	0,2213
2	0,1810	0,2429	0,2876
3	0,1990	0,2356	0,2412
4	0,1750	0,2161	0,2701
5	0,2373	0,2656	0,2614
Média	0,190	0,232	0,256
Desvio Padrão	0,0294	0,0247	0,0257

Tabela 14 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® AV138 (em N/mm)

O método CCM é o que apresenta o valor médio de G_{Ic} inferior comparativamente aos restantes métodos. Este facto está diretamente relacionado com o ajuste do polinómio $C=f(a)$, uma vez que um pequeno ajuste provoca uma grande alteração no resultado final de obtenção de G_{Ic} .

3.6.1.2.2 Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 71 é apresentada a curva-R correspondente ao provete 2 do ensaio DCB, obtida através dos três métodos utilizados (CBBM, CCM e CBT), que apresenta o comportamento idêntico aos provetes testados por este método. A partir da mesma figura verifica-se um valor constante de G_{Ic} ao longo da propagação da fenda. Nota-se também que para o método CBBM a curva-R está desviada para a direita relativamente aos restantes dois métodos, o que se deve ao facto do valor de a_e ser superior a a devido à contabilização da FPZ, tal como acontece com o adesivo anteriormente estudado. Provavelmente neste adesivo é maior do que no adesivo Araldite® AV138, pois é mais dúctil. Desta forma espera-se que a FPZ do adesivo mais dúctil seja maior, e por isso o desfasamento na medição do comprimento de fenda entre o CBBM e os restantes métodos seja superior.

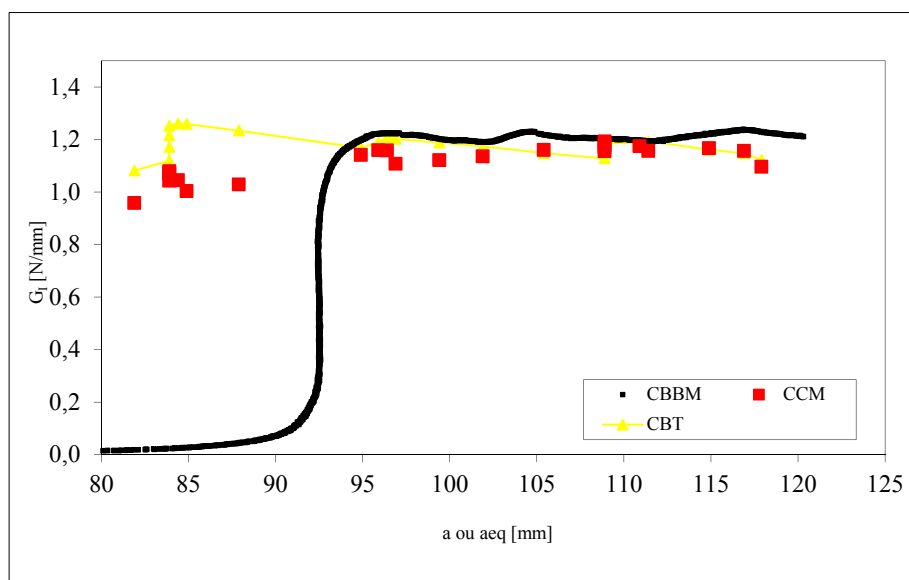


Figura 71 – Curva-R relativo ao provete 2

A média do valor G_{Ic} correspondente ao provete 2 (Figura 71) para o método CBBM foi calculada para um valor de a_{eq} compreendido entre 95 mm e 118 mm, aproximadamente. O

valor médio de G_{Ic} para o método CBBM é igual a 1,01 N/mm, apresentando um desvio padrão entre os 5 provetes igual a 0,255 N/mm. Comparando o CBBM com os restantes métodos utilizados, o CBT apresenta um desvio relativamente ao método CBBM igual a 5,74% e o CCM apresenta um desvio em relação ao CBBM igual a 2,48%, ambos por defeito. Os valores de G_{Ic} são apresentados na Tabela 15.

Provete	CCM	CBT	CBBM
1	0,5739	0,6202	0,6352
2	1,1520	1,1876	1,2117
3	1,0178	1,0031	1,0967
4	1,2842	1,1188	1,2281
5	0,8962	0,8277	0,8522
Média	0,985	0,952	1,01
Desvio Padrão	0,272	0,230	0,255

Tabela 15 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® 2015 (em N/mm)

Sendo o adesivo Araldite® 2015 mais dúctil do que o Araldite® AV138, verifica-se que o primeiro adesivo apresenta um valor G_{Ic} superior ao segundo adesivo. Quanto ao método CCM, não se verifica uma disparidade tão grande (como acontece no adesivo estudado anteriormente), devido à maior uniformidade obtida na curva $C=f(a)$, o que se refletiu no correto ajuste de dC/da .

3.6.1.2.3 Adesivo Sikaforce® 7752

Na Figura 72 são apresentadas as curvas-R correspondentes ao provete 2 para cada um dos três métodos utilizados (CBBM, CBT e CCM). Durante a propagação da fenda observou-se o valor de G_I aproximadamente constante em função do crescimento de fenda.

Neste adesivo obteve-se o valor mais elevado de G_{Ic} devido ao adesivo Sikaforce® 7752 ser o mais dúctil entre os 3 adesivos estudados. O valor de G_I foi determinado para cada provete, estando representados todos os resultados obtidos na Tabela 16 para cada um dos métodos. No final da tabela são indicados os valores médios para cada método e respetivo desvio padrão.

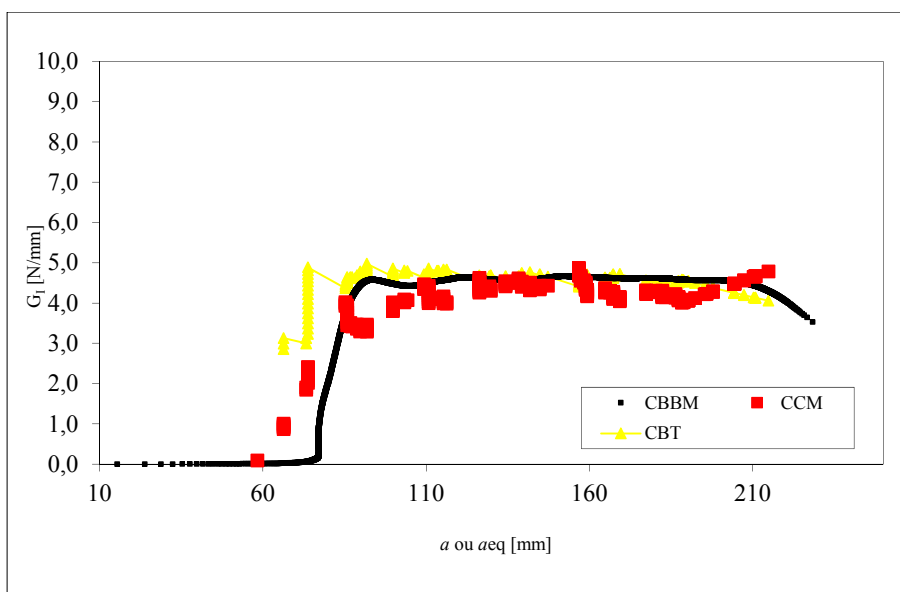


Figura 72 – Curva-R relativo ao provete 2

O valor médio do G_{Ic} pelo método CBBM é igual a 4,51 N/mm, sendo o desvio padrão igual a 0,566 N/mm. Comparando o método CBBM com o CBT, verifica-se um desvio deste último de 1,11%. Já o método CCM apresenta um desvio de 6,21% relativamente ao CBBM. Ambos os desvios do CCM e CBT são por defeito relativamente ao CBBM.

Provete	CCM	CBT	CBBM
1	5,0890	4,9119	4,6612
2	4,3070	4,5463	4,5801
3	3,2283	3,6668	3,5762
4	4,4843	4,6821	5,1211
5	4,0804	4,5027	4,6001
Média	4,24	4,46	4,51
Desvio Padrão	0,677	0,472	0,566

Tabela 16 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Sikaforce® 7752 (em N/mm)

Tal como acontece nos ensaios dos adesivos já abordados, o método CCM é o que apresenta o valor médio de G_{Ic} inferior comparativamente aos restantes métodos. Este facto está diretamente relacionado com o ajuste do polinómio $C=f(a)$.

3.6.2 Ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam*

Neste subcapítulo serão apresentadas as curvas $P-\delta$ para todos os provetes ensaiados, as respectivas roturas e uma curva-R representativa. Nas curvas $P-\delta$ o comportamento esperado será o aumento linear da força aplicada até a fenda começar a propagar. Teoricamente, a partir deste ponto, ou seja, durante a propagação da fenda, a carga mantém-se constante até à rotura do provete. Este comportamento deve-se à geometria dos substratos TDCB, nos quais com o aumento da espessura do substrato a flexibilidade diminui [48].

3.6.2.1 Curvas $P-\delta$

Para o ensaio TDCB foram utilizados 5 provetes para determinar o valor de G_{Ic} correspondente ao adesivo Araldite® AV138. No entanto, devido a uma disparidade notória relativamente aos restantes, um dos provetes não foi considerado na análise. As curvas $P-\delta$ para cada um dos 4 provetes são apresentadas na Figura 73. Estas apresentam uma boa repetibilidade na rigidez inicial, no comportamento durante a propagação da fenda e no deslocamento de rotura, embora um dos provetes apresente força de patamar e deslocamento superior aos restantes. Apenas o provete três se destacou das restantes curvas, apresentando uma propagação de fenda instável no início da propagação da fenda (para um deslocamento de aproximadamente 0,65 mm).

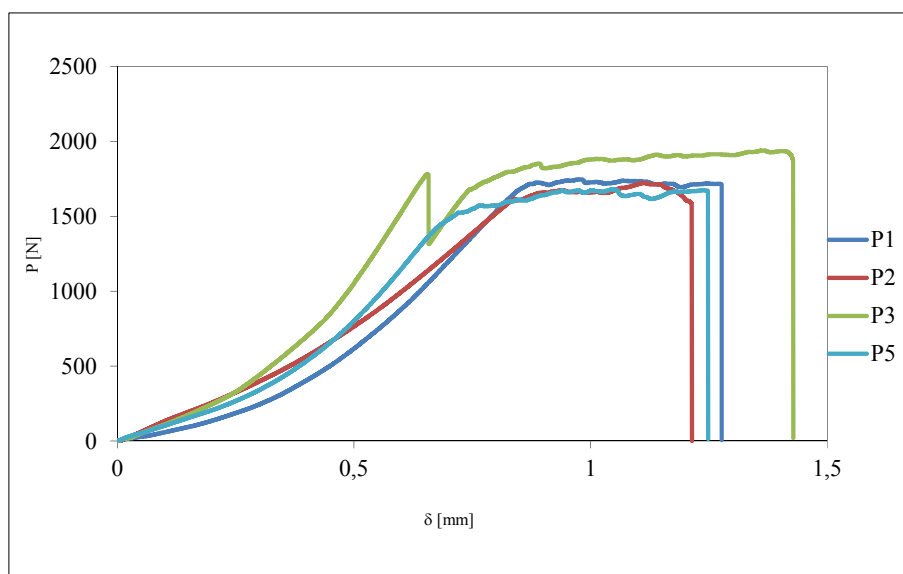


Figura 73 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® AV138

Confirma-se o anteriormente exposto, em que a propagação do dano ocorre a valor constante de carga aplicada, embora experimentalmente haja sempre variações decorrentes de instabilidade na propagação e pequenas variações de propriedades decorrentes de eventuais defeitos internos, entre outros.

O tipo de rotura nos provetes foi coesivo, como se pode verificar na Figura 74. A propagação dos mesmos provetes foi instável. Verifica-se na Figura 74 as diferentes zonas de rotura, identificáveis pela tonalidade do adesivo, em que o cinzento-escuro representa a rotura instável e cinzento-claro representa a rotura estável. Como exemplo do fenómeno anteriormente referido, de uma forma geral a rotura iniciou de forma estável (não contabilizando a parte inicial que corresponde à propagação manual da fenda). A zona estável estendeu-se por um comprimento considerável (cerca de 0,5 mm), a partir do qual houve uma rotura abrupta. Considera-se que este comportamento ocorreu devido ao aumento da rigidez da secção reta na raiz da fenda com a progressão do ensaio, até se atingir um ponto no qual o adesivo, devido à sua fragilidade, não consegue suportar as deformações e fratura abruptamente no sentido de separar os substratos. No provete 3 (Figura 74 (c)) pode-se verificar que ocorreu cerca de 20 mm rotura instável, à qual se seguiu cerca de 100 mm em propagação estável da fenda, terminando com uma rotura instável o restante comprimento da junta colada.

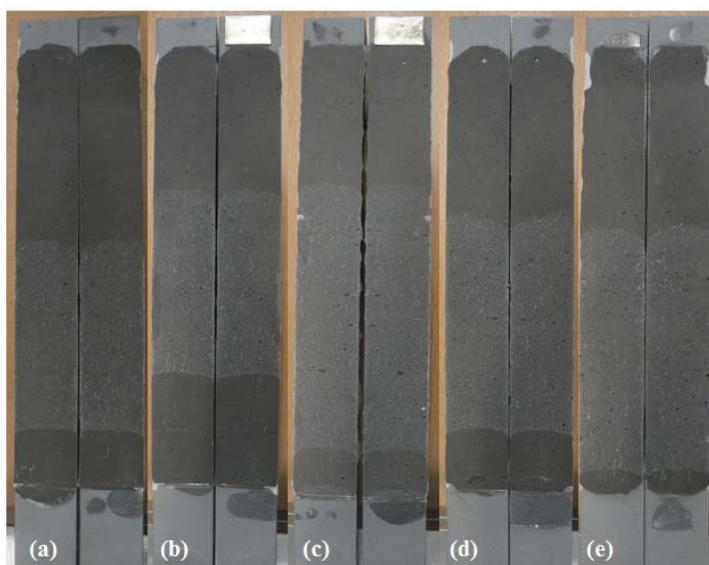


Figura 74 - Rotura do adesivo Araldite® AV138 no ensaio TDCB (a) Provetes 1 (b) Provetes 2 (c) Provetes 3 (d) Provetes 4 (e) Provetes 5

Para o ensaio do adesivo Araldite® 2015 foram igualmente utilizados 5 provetes para os quais foram registados os valores de carga e deslocamento. Após tratamento de dados foram obtidas as curvas $P-\delta$ apresentadas na Figura 75.

Foi obtida uma boa repetibilidade, principalmente na rigidez inicial (antes do início da propagação da fenda) e na carga de patamar, como se pode ver na Figura 75. A consistência obtida na carga de patamar indica a reprodutibilidade dos valores de G_{Ic} a serem medidos pelo método SBT, cujos resultados não dependem de parâmetros externos às curvas $P-\delta$.

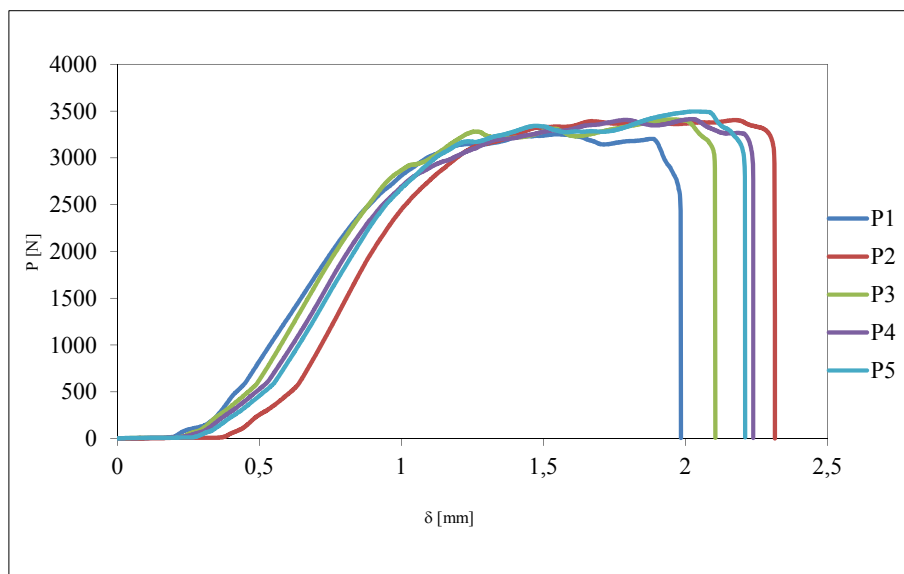


Figura 75 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Araldite® 2015

As roturas dos 5 provetes utilizados no ensaio TDCB foram todas coesivas, como é demonstrado na Figura 76. Nos provetes 1, 3 e 5, nas regiões em que visualmente aparenta existir uma rotura adesiva na metade final da camada de adesivo, observou-se visualmente que ficou uma película de adesivo em cada substrato. Portanto, verifica-se que o tratamento da superfície foi bem executado, ocorrendo a rotura pelo adesivo e permitindo deste modo a determinação das propriedades do adesivo Araldite® 2015.

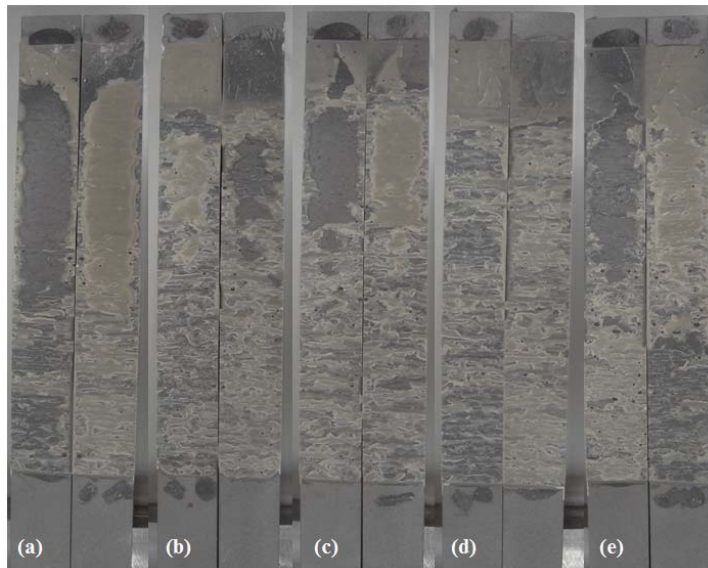


Figura 76 - Rotura do adesivo Araldite® 2015 no ensaio TDCB (a) Provete 1 (b) Provete 2 (c) Provete 3 (d) Provete 4 (e) Provete 5

Para a determinação do G_{Ic} do adesivo Sikaforce® 7752 foram utilizados 5 provetes, onde após tratamento dos dados obtidos durante o ensaio foi possível obter a curva $P - \delta$ apresentada na Figura 77. Na figura referida pode-se verificar a excelente repetibilidade dos ensaios, ao nível da rigidez inicial, comportamento durante a propagação do dano e deformação final.

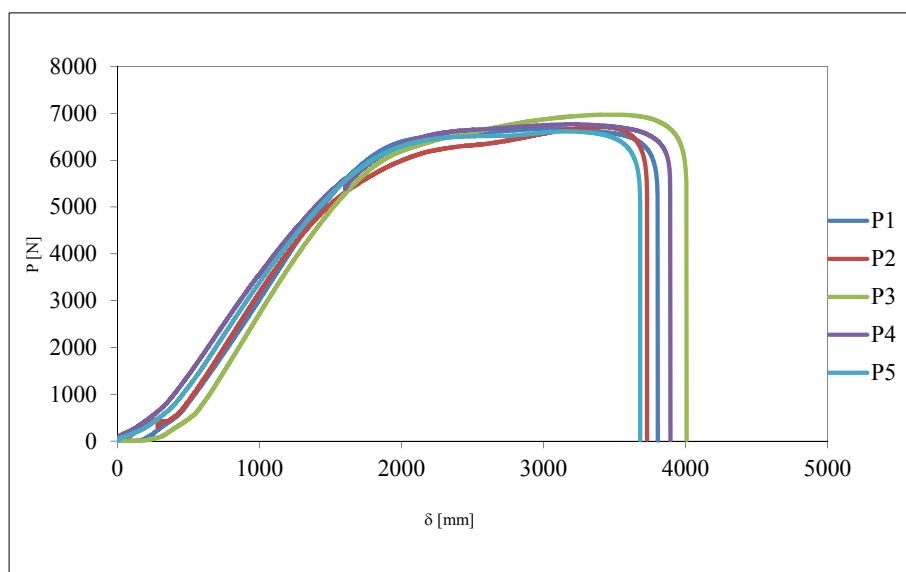


Figura 77 - Curvas $P-\delta$ relativas ao adesivo Sikaforce® 7752

Assim como nos restantes ensaios TDCB, é de igual modo identificada a propagação de dano a carga aproximadamente constante. Nas curvas $P - \delta$ deste adesivo (Figura 75) é possível verificar pequenas descontinuidades. Essas descontinuidades podem estar relacionadas com o aparecimento de micro-fendas que se propagam numa curta distancia, provocando desta forma uma diminuição da força.

A rotura dos 5 provetes TDCB colados com o adesivo Sikaforce[®] 7752 foi coesiva (Figura 78). Portanto, verifica-se que a superfície colada foi devidamente granalhada e desengordurada, permitindo uma boa ligação do adesivo com a superfície dos substratos.

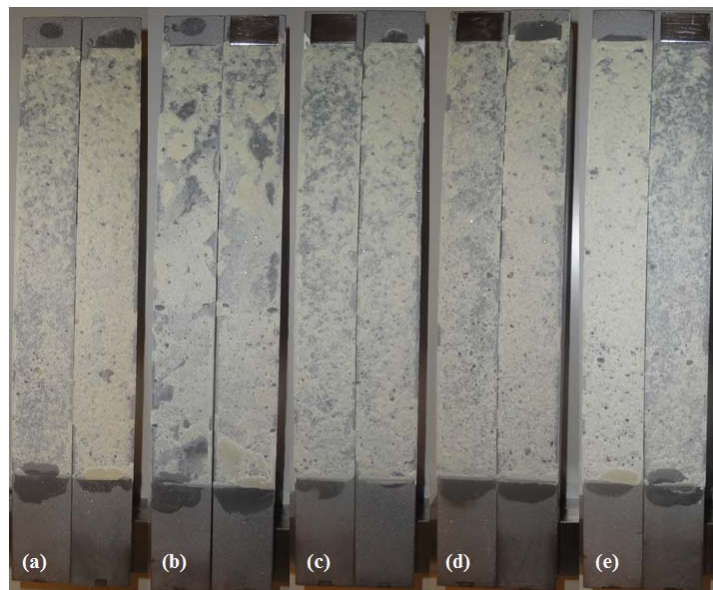


Figura 78 - Rotura do adesivo Sikaforce[®] 7752 no ensaio DCB (a) Provette 1 (b) Provette 2 (c) Provette 3 (d) Provette 4 (e) Provette 5

3.6.2.2 Determinação do G_{Ic}

Para obter o valor de G_{Ic} nos ensaios TDCB foram utilizados os três métodos abordados no capítulo 2.5.2. Os métodos utilizados foram SBT, CBT e CCM. A comparação dos valores G_{Ic} é realizada sempre em relação ao método SBT, pois este método é baseado na flexibilidade constante, o que significa que não depende da medição do comprimento de fenda durante a progressão da mesma. Como tal, uma vez que este método não está sujeito a erros de medição de a é o mais comumente utilizado (até pelo facto de estar normalizado), a comparação entre os 3 métodos vai ser efetuada em relação a este método [39].

3.6.2.2.1 Adesivo Araldite® AV138

Como já referido atrás, no ensaio TDCB do adesivo Araldite® AV138 foram executados 5 ensaios, porém, devido a uma disparidade significativa relativamente aos restantes provetes ensaiados, o provete nº 4 não foi considerado na análise. Na Figura 79 é apresentada a curva-R do provete nº 2 considerado representativo do conjunto de ensaios, onde é apresentada a variação de G_I ao longo do comprimento de fenda para os métodos SBT, CCM e CBT.

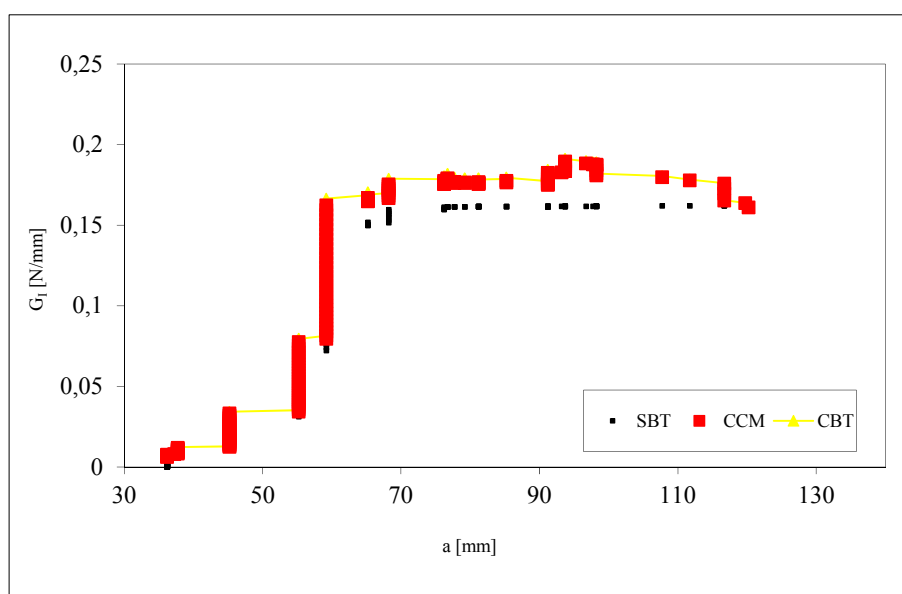


Figura 79 – Curva-R relativo ao provete nº 2

Os valores de G_{Ic} são apresentados na Tabela 17, em que o valor de G_{Ic} obtido pelo método SBT é igual a 0,170 N/mm, apresentando um desvio padrão igual a 0,0186 N/mm. Comparando o método CCM com o SBT, verifica-se que o primeiro apresenta uma variação em relação ao segundo igual a 17,65%. O método CBT, comparativamente com o SBT, apresenta uma variação igual a 14,11%. Ambos os métodos CCM e CBT apresentam em relação ao método SBT uma diferença por excesso.

Provete	SBT	CCM	CBT
1	0,1725	0,2073	0,1937
2	0,1601	0,1770	0,1792
3	0,1949	0,2319	0,2308
4			
5	0,1524	0,1820	0,1713
Média	0,170	0,200	0,194
Desvio Padrão	0,0186	0,0253	0,0264

Tabela 17 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® AV138 (em N/mm)

3.6.2.2.2 Adesivo Araldite® 2015

Na Figura 80 é apresentada a curva-R relativa ao provete nº 2 do adesivo Araldite® 2015, para o ensaio TDCB, considerado representativo do conjunto de ensaios, onde é apresentada a variação de G_I ao longo do comprimento de fenda. Os métodos utilizados para a determinação do G_{Ic} foram o SBT, CCM e CBT.

O valor de G_{Ic} manteve-se mais uniforme durante a propagação da fenda, quando comparado com os resultados do adesivo anterior.

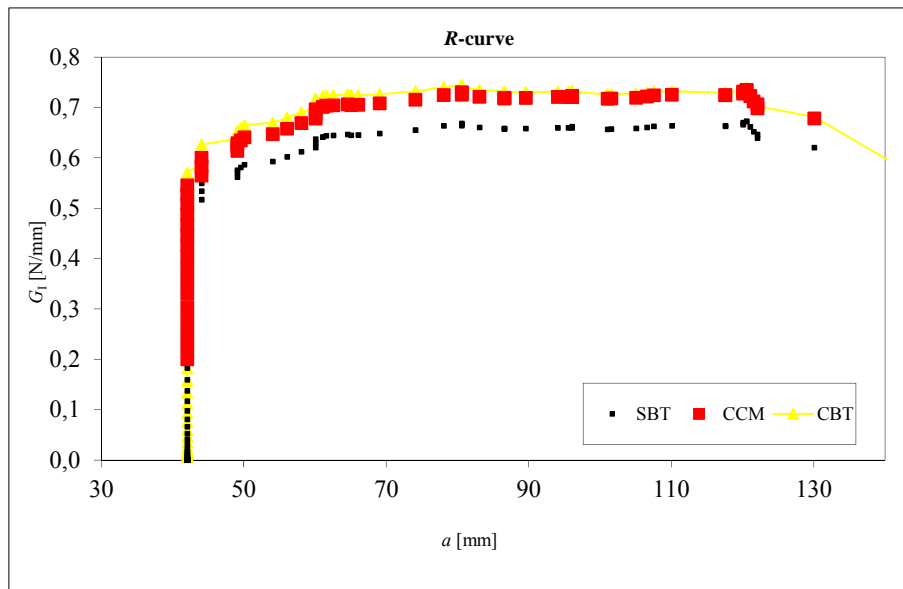


Figura 80 – Curva-R relativo ao provete 2

Na Tabela 18 são apresentados os valores de G_{Ic} , determinados para cada provete a partir dos métodos acima citados. No caso específico da determinação de G_{Ic} para o provete 2, foi determinada a média para um intervalo de valores de a entre 44 mm e 79,5 mm para todos os métodos. Para o método SBT foi obtido um valor médio de G_{Ic} igual a 0,632 N/mm e um desvio padrão igual a 0,0240 N/mm. O método CCM apresenta um valor médio de G_{Ic} superior ao obtido através do método SBT, apresentando uma diferença de 10,28% (por excesso). O método CBT, comparativamente ao método SBT, apresenta uma diferença percentual igual a 11,39% por excesso.

Provete	SBT	CCM	CBT
1	0,5917	0,6771	0,6631
2	0,6419	0,7011	0,6905
3	0,6297	0,7021	0,6876
4	0,6422	0,7172	0,7146
5	0,6539	0,7248	0,7268
Média	0,632	0,704	0,697
Desvio Padrão	0,0240	0,0183	0,0249

Tabela 18 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Araldite® 2015 (em N/mm)

Numa comparação entre o adesivo Araldite® 2015 e o Araldite® AV138 verifica-se que a curva-R do primeiro apresenta um valor de G_{Ic} mais constante, ao longo da propagação da fenda. Verifica-se também que o primeiro adesivo apresenta um valor mais elevado de G_{Ic} que o segundo, devendo-se ao facto do Araldite® 2015 possuir um comportamento mais dúctil.

3.6.2.2.3 Adesivo Sikaforce® 7752

No ensaio TDCB o valor de G_{Ic} do adesivo Sikaforce® 7752 foi determinado pelos métodos SBT, CCM e CBT. Na Figura 81 são apresentadas as curvas para cada um dos métodos relativas a um provete que traduz o comportamento e tendência global de todos os ensaios realizados neste trabalho.

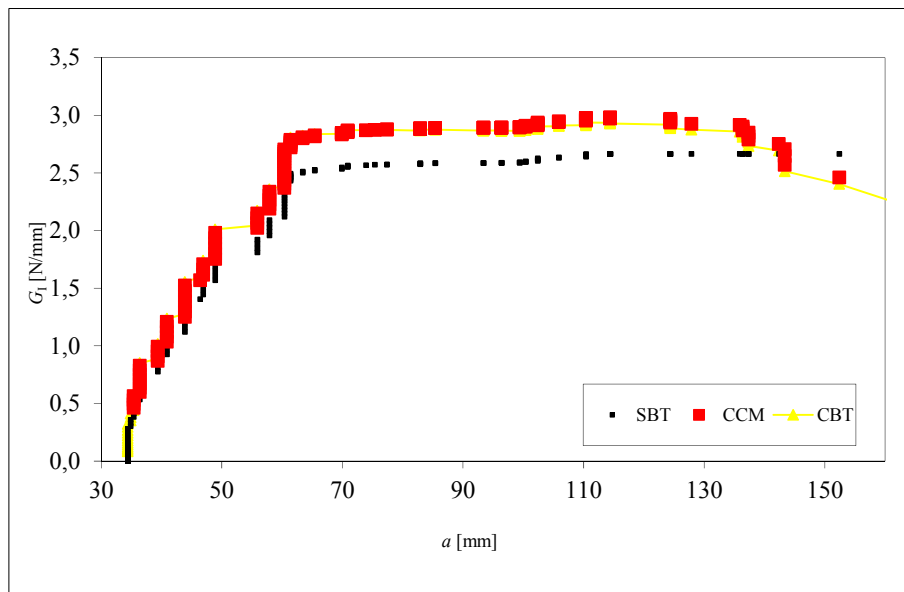


Figura 81 – Curva-R relativo ao provete 5

Para este ensaio foi obtido um valor constante de G_I , durante a propagação da fenda, o qual se fica a dever ao comportamento dúctil do adesivo Sikaforce® 7752.

Os valores de G_{Ic} obtidos através do ensaio TDCB do adesivo Sikaforce® 7752 são apresentados na Tabela 19. O valor médio obtido pelo método SBT é igual a 2,61 N/mm e apresenta um desvio padrão igual a 0,100 N/mm. O valor de G_{Ic} obtido através do método CCM comparativamente ao método SBT, apresenta uma diferença percentual igual a - 10,73%. Relativamente ao método CBT, quando comparado com o SBT apresenta uma diferença percentual de - 9,96%.

Provete	SBT	CCM	CBT
1	2,6228	2,9211	2,9225
2	2,4834	2,8379	2,7415
3	2,7567	3,0583	3,0184
4	2,6053	2,7690	2,8534
5	2,5592	2,8419	2,8268
Média	2,61	2,89	2,87
Desvio Padrão	0,100	0,111	0,104

Tabela 19 - Resultados de G_{Ic} do adesivo Sikaforce® 7752 (em N/mm)

3.6.3 Análise dos resultados

Como se foi verificando ao longo da apresentação dos resultados dos ensaios DCB, o adesivo Araldite® AV 138 é o mais frágil dos três adesivos testados. Devido a este facto, este apresentou propagação instável da fenda, alternando regiões de propagação estável com instável. Pela consideração das zonas de propagação estável, foi possível a medição de G_{Ic} pelos 3 métodos preconizados, e obteve-se um valor médio de G_{Ic} igual a **0,256 N/mm** obtido pelo método CBBM. Comparando o valor G_{Ic} obtido pelo método CBBM com os métodos CCM e CBT, nestes últimos foi obtido um G_{Ic} inferior em 25,78% e 9,38%, respetivamente. A variação do método CCM e CBT está relacionada com a necessidade de medição do comprimento de fenda ao longo da propagação da mesma, durante o ensaio, o que pode originar erros de leitura [38]. No caso do método CCM ainda é acrescido o erro do ajuste do polinómio $C=f(a)$, o que justifica o maior desvio em relação ao método CBBM.

Através do ensaio DCB o adesivo Araldite® 2015 apresentou valores de G_{Ic} superiores aos do adesivo Araldite® AV 138 e inferiores ao Sikaforce® 7752. O valor médio de G_{Ic} para o método CBBM é igual a **1,01 N/mm**. Relativamente ao anterior, o método CCM apresenta um desvio de G_{Ic} igual a 2,48% (por defeito). O método CBT, comparado com o CBBM, apresenta um desvio de G_{Ic} igual a 5,74% (por defeito). Tal como no ensaio do adesivo abordado anteriormente, os métodos CBT e CCM requerem medição da fenda durante o ensaio, enquanto o CBBM se baseia no comprimento de fenda equivalente. Para além do erro na medição do comprimento de fenda, o método CCM requer o ajuste do polinómio $C=f(a)$.

Relativamente ao adesivo Sikaforce® 7752, que também foi caracterizado pelo ensaio DCB, o valor G_{Ic} é superior aos restantes adesivos abordados neste trabalho, sendo igual a **4,51 N/mm** (pelo método CBBM). Este resultado deve-se à grande ductilidade do adesivo quando comparado com os restantes 2 adesivos. Comparando o método CBBM com o CCM, este último apresenta um desvio de 6,21% (por defeito) na obtenção do G_{Ic} , enquanto o método CBT, que comparado com o CBBM, apresenta um desvio inferior de 1,11% na determinação do G_{Ic} . O método CBT é menos sujeito a erros de processo, já que a principal fonte de erro está relacionada com a medição do comprimento de fenda. O

método CCM está de igual forma dependente da medição do comprimento de fenda e, também ao ajuste do polinómio $C=f(a)$.

Com os resultados obtidos verifica-se que o método CBBM é o mais fiável devido à consideração de a_{eq} que contabiliza a FPZ. Ambos os métodos CBT e CCM necessitam da medição do comprimento de fenda, obtida através de fotografias a cada provete em intervalos pré-definidos. Para garantir bons resultados é necessário que a foto seja tirada com desvio reduzido relativamente ao instante estipulado. Acresce que, para efeitos de correlação com os dados fornecidos pela máquina de ensaios, nomeadamente os valores de P e δ , a eventual inexistência de uma ou mais fotos da sequência de imagens provoca erros significativos na medição de G_{Ic} . Após o registo fotográfico, é necessário medir através da escala inserida no provete o comprimento de fenda, o que se pode revelar difícil de executar em adesivos muito dúcteis, em que a camada de corretor aplicado na junta colada poderá estalar previamente à progressão da fenda, e dar a perceção errada do comprimento da fenda. É por isso um processo complicado de executar. Para além de todo este processo de medição de fenda, o método CCM ainda está dependente do ajuste do polinómio $C=f(a)$. Este ajuste é iniciado com a seleção de dados para produzir a curva $a - C$, onde só são selecionados os dados após o início da propagação de fenda. A curva é ajustada de uma forma empírica alterando o grau do polinómio, se necessário. Observou-se que os coeficientes do polinómio e a derivada da respetiva função são bastante sensíveis à consideração de mais ou menos pontos de $C=f(a)$. Como tal, não é recomendada a utilização do método CCM sem a consideração paralela dos restantes métodos para termo de comparação.

Nos ensaios TDCB verifica-se que os resultados de G_{Ic} comprovam que o adesivo Araldite® AV138 é o mais frágil e o adesivo Sikaforce® 7752 é o mais dúctil, como já se tinha confirmado anteriormente nos ensaios DCB. Para o adesivo Araldite® AV138, o valor médio de G_{Ic} obtido pelo método SBT foi igual a **0,170 N/mm**. Comparando o SBT com o CCM e CBT verifica-se nestes últimos uma variação percentual de 17,65% e 14,11%, respetivamente. No ensaio TDCB do adesivo Araldite® 2015 o resultado médio obtido de G_{Ic} pelo método SBT foi igual a **0,632 N/mm** com desvio padrão igual a 0,0240 N/mm. Com a comparação entre o SBT e os métodos CCM e CBT verifica-se nestes últimos uma diferença percentual de 10,28% e 11,39% respetivamente. Através do ensaio TDCB do adesivo Sikaforce® 7752 obteve-se um G_{Ic} médio igual a **2,61 N/mm**, obtido

pelo método SBT. O método CCM apresenta uma diferença percentual relativamente ao método SBT igual a 10,73%, enquanto o método CBT apresenta uma diferença percentual relativamente ao método SBT menor, igual a 9,96%.

Comparando os valores obtidos com os disponíveis na literatura, Campilho et al. [1] determinaram o valor de G_{Ic} para o adesivo Araldite® AV138, sendo este igual a **0,2 N/mm**. Este valor foi obtido através de um método inverso, que consiste num método numérico. Pelos resultados obtidos nesta dissertação, o valor de G_{Ic} obtido pelo ensaio DCB, em comparação com o valor determinado por Campilho et al. [1] apresenta uma variação de -21,88% (obtido pelo método CBBM). Comparando o valor obtido pelos autores [1], a variação de G_{Ic} em comparação com o ensaio TDCB apresenta uma variação igual a 17,65%.

Pelo ensaio DCB, Constante [36] caracterizou o adesivo Araldite® AV138 em modo I. As dimensões dos substratos em alumínio AW 6082-T651 são: $143 \times 27 \times 3 \text{ mm}^3$, e a espessura de adesivo utilizado foi igual a 1 mm. O valor de G_{Ic} obtido por Constante [36], através do método CBBM é igual a **0,249 N/mm**. Ao comparar os resultados obtidos por Constante [36] com os resultados obtidos nesta dissertação através do ensaio DCB verifica-se que existe uma variação percentual igual a -2,73%. A variação entre os resultados obtidos pelo autor e pelo G_{Ic} obtido nesta dissertação, pelo ensaio DCB, é igual a -2,73%. Comparando os mesmos resultados obtidos pelo autor e o valor de G_{Ic} determinado pelo ensaio TDCB é igual a 46,47%.

O adesivo Araldite® 2015 já foi estudado por vários autores, em que o valor de G_{Ic} foi obtido através de ensaios DCB. Os autores da referência [25] obtiveram um valor de G_{Ic} igual a **0,43 N/mm** ($\pm 0,02 \text{ N/mm}$), determinado a partir do método CBBM. O material dos substratos foi compósito (carbono/epóxico) com um comprimento de 120 mm, largura de 15 mm e espessura da camada de adesivo de 0,2 mm. O valor de a_0 utilizado pelos autores da referência [25] ($a_0=45 \text{ mm}$) foi próximo do utilizado neste trabalho ($a_0=50 \text{ mm}$). Este resultado, quando comparado com o resultado obtido neste trabalho pelo ensaio DCB, apresenta uma diferença percentual de -56,44%. Esta desigualdade deve-se a vários fatores, nomeadamente à espessura dos substratos e adesivo, e também ao próprio material dos substratos, que induzem diferentes tipos de sollicitação e disposição da FPZ na extremidade da fenda. De facto, estes parâmetros têm influência direta no valor de G_{Ic} , uma vez que a

dimensão da FPZ tende a apresentar maiores dimensões quanto mais espessa for a camada do adesivo e dos substratos [26].

Enquanto a geometria no trabalho referenciado provoca uma sollicitação mais próxima do arrancamento, a utilização de substratos de aço com espessura de 12,7 mm conduz a um esforço de clivagem. Como tal, é expectável que, para adesivos com alguma ductilidade, a energia de deformação seja superior. Campilho et al. [3] estudaram precisamente este efeito, e observou-se um valor de G_{Ic} crescente com o aumento da espessura dos substratos para adesivos dúcteis. Outros autores [49] não obtiveram diferença significativa no valor medido de G_{Ic} para adesivos frágeis, o que confirma os resultados expostos neste trabalho. Outro fator a ter em conta é a espessura do adesivo, em que a diferença de 0,2 mm para 1 mm é significativa. Quanto maior for a espessura do adesivo, maior tenderá a ser o valor de G_{Ic} [50].

Através do ensaio DCB, Silva et al. [51] ensaiaram o adesivo Araldite® 2015 e obtiveram um valor de G_{Ic} igual a **0,44 N/mm** ($\pm 0,05$ N/mm), valor esse determinado pelo método CBBM. Os substratos utilizados têm um comprimento de 290 mm, uma largura igual a 25 mm e uma espessura de 12,7 mm. A espessura de adesivo é de 0,2 mm. Os valores de G_{Ic} determinados pelos autores da referência [51] apresentam um valor bastante próximo dos autores da referência [25]. Observa-se que o valor de G_{Ic} obtido é bastante inferior ao obtido na presente dissertação, apesar da espessura idêntica dos substratos. Esta variação está então relacionada com a diferença na espessura do adesivo, uma vez que no presente trabalho se utilizou 1 mm. Conforme já referido, esta diferença, para um adesivo com alguma ductilidade, causa variação significativa do valor de G_{Ic} .

Através do ensaio DCB, o adesivo Sikaforce® 7752 foi caracterizado por Faneco [44], em que foi determinado pelo autor o valor de G_{Ic} , sendo este igual a **2,29 N/mm** ($\pm 0,252$ N/mm). Os substratos de alumínio 6082-T651, utilizados nesta caracterização, apresentam um comprimento de 140 mm por uma largura de 25 mm e espessura de 3 mm. A espessura do adesivo utilizado nestes provetes foi de 0,2 mm e a_0 igual a 50 mm. O resultado obtido pelo autor e os valores obtidos neste trabalho apresentam uma diferença percentual igual a 49,22% (para os ensaios realizados em DCB) e 12,26% (para os ensaios realizados em TDCB), sendo portanto os valores obtidos neste trabalho superiores aos determinados pelo autor da referência [44]. Verifica-se que o ensaio TDCB apresenta o valor mais próximo

com o determinado pelo autor da referência [44]. Devido à escassa informação sobre as propriedades do adesivo Sikaforce® 7752, é difícil a comparação dos valores de G_{Ic} obtidos neste trabalho com outros.

De forma geral, as curvas-R dos ensaios TDCB demonstraram que os métodos CBT e CCM apresentam uma melhor concordância de valores de G_{Ic} . Os valores de G_{Ic} determinados a partir do método SBT são inferiores aos métodos atrás referidos, pois esses mesmos métodos são considerados mais precisos em termos de contabilização da FPZ existente devido à plasticidade dos adesivos [16]. No trabalho efetuado por Blackman [52], os resultados de G_{Ic} do método SBT apresentam uma variação de - 9% em comparação com os métodos CBT e CCM. Nesse trabalho elaborado pelo autor atrás referido verifica-se que os valores dos métodos CBT e CCM apresentam um valor de G_{Ic} bastante próximo. Pode-se por isso concluir que os métodos CBT e CCM preveem de uma forma mais precisa a flexibilidade dos provetes TDCB do que o método SBT o que leva à determinação de valores G_{Ic} mais fiáveis, do que quando determinados pelos métodos CCM e CBT [39].

3.6.4 Comparação dos resultados pelos dois tipos de ensaio

Os valores de G_{Ic} determinados através dos métodos de ensaios DCB e TDCB são apresentados na Figura 82 e Figura 83, respetivamente. Os métodos utilizados no ensaio DCB são: CBBM, CBT e CCM e no TDCB são: SBT, CBT e CCM. Para ambos os tipos de ensaio (DCB e TDCB) foi utilizada a mesma espessura de adesivo (1 mm) e o valor de a_0 também foi relativamente próximo (aproximadamente 50 mm). A grande diferença prende-se com a geometria dos provetes.

Pelos resultados da Figura 82 e Figura 83 verifica-se que o adesivo que apresenta maior ductilidade é o Sikaforce® 7752 e o mais frágil é o Araldite® AV 138. O Araldite® 2015 apresenta um comportamento intermédio comparativamente com os primeiros dois adesivos referidos. A resistência de uma junta é altamente influenciável pelas propriedades dos adesivos, contudo um adesivo mais rígido não significa que confere uma resistência na junta colada. É de reforçar que um adesivo resistente mas frágil atinge localmente nas extremidades da junta adesiva uma tensão elevada, não permitindo uma distribuição do esforço no interior dessa mesma junta. Portanto, a tensão de corte média de rotura é muito

baixa quando comparada com um adesivo menos resistente e dúctil. Quando é utilizado um adesivo dúctil e com baixo módulo de elasticidade, este apresenta geralmente uma baixa resistência, todavia, estes tipos de adesivos têm a capacidade de distribuir as tensões de forma uniforme ao longo da junta colada por deformação plástica. Esta discussão é aplicável aos adesivos caracterizados na dissertação realizada, em que o adesivo Araldite® 2015 representa um adesivo com comportamento dúctil moderado, e com uma resistência à tração e corte inferiores ao Araldite® AV138.

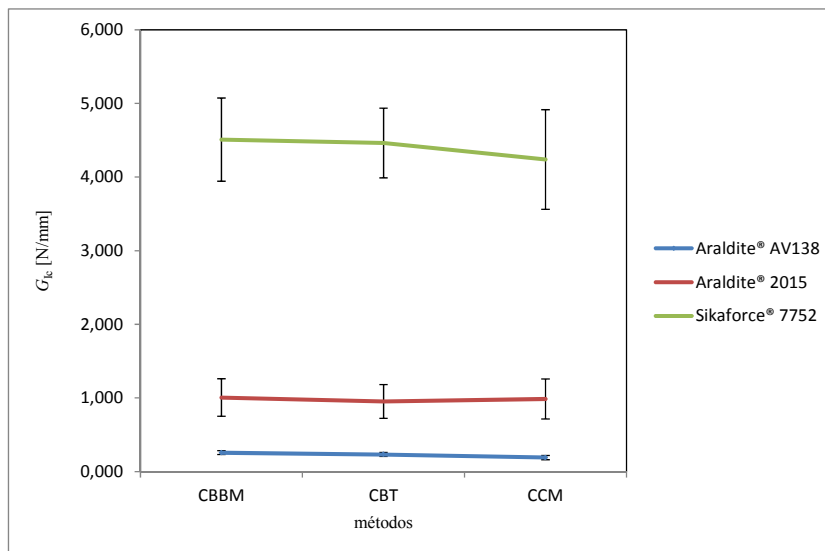


Figura 82 – Valores de G_{Ic} obtidos pelo ensaio DCB

Um adesivo mais dúctil, como apresenta uma maior flexibilidade do que os adesivos mais rígidos, permite uma maior deformação quando os aderentes são sujeitos a movimento durante o carregamento, pois a tensão é distribuída ao longo de uma área maior. Os adesivos frágeis apresentam também uma fraca resistência à fadiga de juntas coladas pois, como já referido, as tensões para os adesivos dúcteis são mais uniformes, para além de estes adesivos apresentarem uma maior energia de amortecimento. Nesta dissertação foi utilizado o adesivo Sikaforce® 7752, que apresenta uma resistência razoável e grande ductilidade. Esta combinação de propriedades apresenta uma vantagem relativamente aos adesivos anteriormente apresentados, uma vez que se atinge tensões de corte relativamente elevadas na junta e tem uma capacidade superior de distribuição de tensões na junta adesiva, após o limite elástico ser atingido. Os adesivos frágeis são por norma mais suscetíveis à presença de defeitos, como espaços vazios e microfissuras. Já os adesivos

dúcteis apresentam uma capacidade superior para suportar esforços de clivagem e de arrancamento, sendo por isso preferenciais para unir chapas de espessura fina.

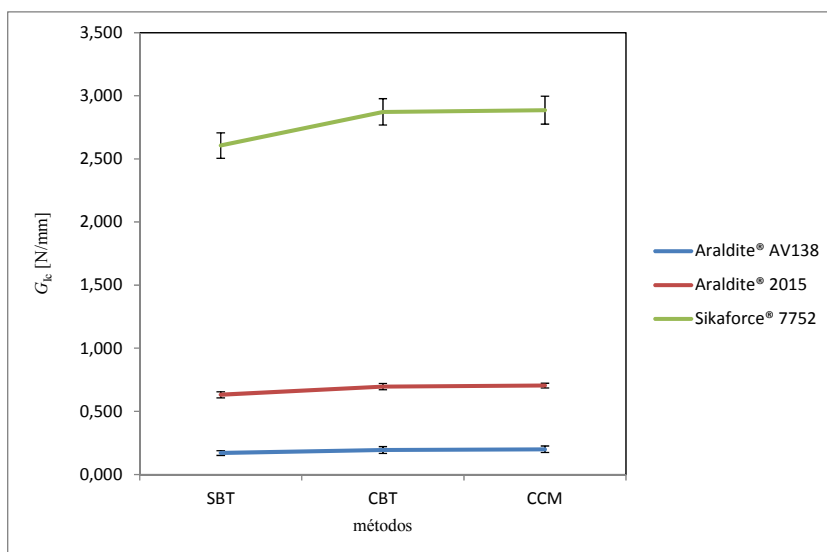


Figura 83 – Valores de G_{Ic} obtidos pelo ensaio TDCB

Numa comparação direta entre tipos de ensaios, pode-se verificar, através da Figura 82 e Figura 83, que o ensaio que reproduz resultados com menor variação (com um desvio padrão mais baixo) é o TDCB. No ensaio TDCB verifica-se que os métodos CBT e CCM apresentam valores de G_{Ic} próximos entre si, enquanto o método SBT apresenta uma maior discrepância, por defeito relativamente aos anteriores. Pela literatura existente, esta variação deve-se ao erro associado ao cálculo do valor de C , assim como no cálculo conservativo do valor de G_{Ic} [39].

Comparando os resultados obtidos pelos ensaios DCB e TDCB, verifica-se uma crescente diferença percentual que aumenta desde o adesivo mais frágil até ao mais dúctil. Este resultado é oposto ao obtido por Marzi et al. [53], que utilizaram vários métodos para a determinação de G_{Ic} , com recurso a ensaios DCB e TDCB, sendo os métodos utilizados o Integral J e o CCM, respetivamente. No referido trabalho, observou-se para um adesivo frágil, valores de G_{Ic} ligeiramente superiores pelo ensaio TDCB comparativamente ao DCB. Os autores justificaram este comportamento com a maior capacidade de deformação do adesivo antes da propagação da fenda no ensaio TDCB devido à maior rigidez dos substratos. Neste trabalho, considera-se que a diferença descrita está relacionada com o conservadorismo dos métodos de redução utilizados no ensaio TDCB e com questões relacionadas com o fabrico dos provetes (temperatura de cura e problemas com adesão).

4 Conclusões

A presente dissertação teve como principal objetivo a obtenção do valor de G_{Ic} de três adesivos pelos ensaios DCB e TDCB, de forma a comparar resultados obtidos pelos dois métodos. Os adesivos selecionados para a determinação de G_{Ic} foram o Araldite® AV138, Araldite® 2015 e o Sikaforce® 7752, que apresentam comportamento frágil, moderadamente dúctil e dúctil, respetivamente. Todos os ensaios foram efetuados com a mesma espessura de adesivo, igual a 1 mm.

Todos os provetes apresentaram uma rotura coesiva, embora nalguns casos essa rotura tenha ocorrido muito próxima da interface, nomeadamente para os ensaios DCB e TDCB do adesivo Araldite® 2015. O adesivo Araldite® AV138 apresentou ao longo do ensaio DCB de cada provete várias propagações abruptas da fenda, devido à sua fragilidade, enquanto no ensaio TDCB se observou apenas uma região de propagação abrupta para cada provete. No entanto, foi possível determinar o G_{Ic} no ensaio DCB a partir do cálculo da média dos vários patamares de G_I apresentados. No ensaio TDCB obteve-se apenas um patamar de G_I (ao contrário do que aconteceu no ensaio DCB), sendo calculada a média desse patamar para determinar o valor de G_{Ic} . As curvas-R para os adesivos Araldite® 2015 e Sikaforce® 7752 apresentaram um valor de G_I aproximadamente constante ao longo da propagação da fenda, para ambos os ensaios DCB e TDCB.

Para a determinação do valor de G_{Ic} recorreu-se a vários métodos de cálculo. Para o ensaio DCB foram utilizados os métodos CBBM, CBT e CCM. Já para o ensaio TDCB foram utilizados os métodos SBT, CBT e CCM. Para o adesivo Araldite® AV138 foram obtidos valores médios de G_{Ic} iguais a 0,256 N/mm e 0,170 N/mm pelos ensaios DCB e TDCB, respetivamente. A diferença percentual entre estes dois resultados é igual a 34%. Para o

adesivo Araldite® 2015 foram obtidos valores médios de G_{Ic} iguais a 1,01 N/mm e 0,632 N/mm pelos ensaios DCB e TDCB, respetivamente, o que se traduz numa diferença percentual de 37%. Para o adesivo Sikaforce® 7752 foram obtidos valores médios de G_{Ic} iguais a 4,51 N/mm e 2,61 N/mm pelos ensaios DCB e TDCB, respetivamente. A diferença percentual entre estes dois resultados é igual a 42%. Os resultados percentuais atrás apresentados foram obtidos por comparação do método CBBM para o ensaio DCB e método SBT para o ensaio TDCB.

Os métodos utilizados no ensaio DCB possuem condicionantes diferentes na determinação de G_{Ic} . O método CBBM é o mais expedito, uma vez que não necessita da medição do comprimento de fenda e contabiliza os efeitos da FPZ. Os métodos CBT e CCM necessitam da medição do comprimento de fenda ao longo do ensaio. Para isso foi necessário medir o comprimento de fenda através de uma média de 150 fotografias para cada provete. O método CCM ainda requer um ajuste do polinómio $C=f(a)$, o que poderá induzir um maior erro na determinação do valor de G_{Ic} . Os resultados obtidos apresentam-se próximos entre os vários métodos de determinação de G_{Ic} para o ensaio DCB, com exceção do resultado obtido através do CCM para o adesivo Araldite® AV138, em que se verificou uma maior dificuldade no ajuste do polinómio, obtendo-se uma diferença percentual de 25,78% relativamente ao método CBBM.

Os métodos utilizados no ensaio TDCB possibilitam a determinação de G_{Ic} de formas distintas. Enquanto o método SBT não necessita da medição do comprimento de fenda, os métodos CBT e CCM necessitam dessa medição ao longo do ensaio. O método CCM requer ainda o ajuste da reta dada pela expressão $C=f(a)$.

A comparação pode ser estendida a trabalhos efetuados por outros autores. Relativamente ao adesivo Araldite® AV138, os resultados obtidos pelo ensaio DCB neste trabalho revelaram-se próximos dos obtidos pelo com o autor [36], para os quais se constata uma diferença percentual igual a -2,73%. Em ambos os casos a espessura do adesivo foi igual a 1 mm, pelo que se verifica que se obtiveram resultados bastantes homogéneos.

Em todas as restantes comparações com outros trabalhos que determinam o G_{Ic} dos adesivos Araldite® 2015 [25, 51] e Sikaforce® 7752 [44], a espessura do adesivo utilizado pelos autores atrás referenciados foi igual a 0,2 mm. Verificou-se que estes resultados de G_{Ic} da literatura foram inferiores aos obtidos neste trabalho pelos métodos CBBM do

ensaio DCB e SBT do ensaio TDCB. Esta diferença é facilmente explicada pela conhecida variação do valor de G_{Ic} com a espessura de adesivo, mais especificamente com o seu aumento com este parâmetro geométrico [50].

Como propostas de trabalhos futuros, referem-se as seguintes:

- Quanto à análise dos métodos empregues nesta dissertação, será interessante a comparação de ambos os ensaios DCB e TDCB com diferentes espessuras de adesivo, de forma a contabilizar a disparidade entre os métodos utilizados para a determinação de G_{Ic} em diferentes condições.
- Utilização de métodos numéricos baseados no Método de Elementos Finitos e Modelos de Dano Coesivo para obtenção da lei coesiva de cada um dos adesivos à tração, como complemento à obtenção de G_{Ic} .
- Avaliação numérica da precisão de cada um dos métodos de redução utilizados para os ensaios DCB e TDCB pela utilização das curvas $P-\delta$ numéricas para reproduzir o valor de G_{Ic} de entrada nos modelos numéricos.

Referências Documentais

- [1] R. D. S. G. Campilho, M. D. Banea, A. M. G. Pinto, L. F. M. da Silva e A. M. P. da Jesus, “Strength prediction of single- and double-lap joints by standard and extended finite element modelling,” *Internacional Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 31, pp. 363-372, 2011.
- [2] L. F. M. da Silva, A. Öchsner e R. D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*, Verlag Berlin: Springer, 2011.
- [3] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, M. D. Banea e L. F. M. da Silva, “Adherend thickness effect on the tensile fracture toughness of a structural adhesive using an optical data acquisition method,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 53, pp. 15-22, 2014.
- [4] L. F. M. da Silva, A. G. Magalhães e M. F. S. F. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, Porto: Publindústria, 2007.
- [5] R. Leger, A. Roy e J. C. Grandidier, “A study of the impact of humid aging on the strength of industrial adhesive joints,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 44, pp. 66-77, 2013.
- [6] P. Cognard, *Adhesives and Sealants General Knowledge, Application Techniques, New Curing Techniques - Volume 2*, Versailles, France: Elsevier, 2006.
- [7] B. Bartczak, J. Mucha e T. Trzepieciniski, “Stress distribution in adhesively-bonded joints and the loading capacity of hybrid joints of car body steel for the automotive industry,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 45, pp. 42-52, 2013.
- [8] D. E. Packham, *Handbook of adhesion*, 2nd ed., UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2005.

- [9] E. M. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, United States of America: The McGraw-Hill Companies, 2000.
- [10] M. J. Troughton, *Handbook of Plastics Joining A Practical Guide*, 2nd ed., New York: William Andrew Inc., 2008.
- [11] R. D. Adams, J. Comyn e W. C. and Wake, *Structural Adhesive Joints in Engineering*, Chapman & Hall, 1997.
- [12] A. M. G. Pinto, *Ligações Adesivas Entre Materiais Poliméricos Com E Sem Alteração Superficial Dos Substratos*, Dissertação Para Obtenção Do Grau de Doutor, Porto, 2007.
- [13] J. L. Esteves, “Estudo Do Comportamento de Adesivos Estruturais, Dissertação para obtenção de grau Mestre,” Porto, 1990.
- [14] M. D. Banea, “High Temperature Adhesives for Aerospace Applications, PhD thesis,” Porto, 2011.
- [15] M. D. Banea, L. F. M. da Silva e R. D. S. G. Campilho, “Moulds design for adhesive bulk and joint,” *Assembly Automation*, vol. 32, pp. 284 - 292, 2012.
- [16] L. F. M. da Silva, D. A. Dillard, R. D. Adams, R. Blackman e R. Bamber, *Testing Adhesive Joints: Best Practices*, First Edition, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA., 2012.
- [17] M. D. Banea, L. F. M. da Silva e R. D. S. G. Campilho, “Effect of Temperature on Tensile Strength and Mode I Fracture Toughness of a High Temperature Epoxy Adhesive,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 26, p. 939–953, 2012.
- [18] W. R. Broughton e R. D. Mera, “Review of Durability Test Methods and Standards for Assessing Long Term Performance of Adhesive Joints, National Physical Laboratory,” United Kingdom, 1997.
- [19] L. F. M. da Silva, R. A. M. Silva, J. A. G. Chousal e P. A. M. G., “Alternative

- Methods to Measure the Adhesive Shear Displacement in the Thick Adherend Shear Test,” *Journal of Adhesion Science and Technology*, vol. 22, pp. 15-29, 2008.
- [20] M. D. Banea, L. F. M. da Silva e R. D. S. Campilho, “Mode II Fracture Toughness of Adhesively Bonded Joints as a Function of Temperature: Experimental and Numerical Study,” *The Journal of Adhesion*, vol. 88, pp. 534-551, 2012.
- [21] J. F. A. Morais, “Desenvolvimento de ferramentas e provetes para ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST), Dissertação para obtenção de grau Mestre,” Porto, 2013.
- [22] H. Hadavinia, L. Kawashita, A. J. Kinloch, D. R. Moore e J. G. Williams, “A numerical analysis of the elastic-plastic peel test,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 73, pp. 2324-2335, 2006.
- [23] R. D. S. G. Campilho, “Repair Of Composite And Wood Structures, PhD thesis,” Porto, 2009.
- [24] M. F. S. F. Moura, R. D. S. G. Campilho e J. P. M. Gonçalves, “Pure modeII fracture characterization of composite bonded joints,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 1589-1595, 2009.
- [25] M. F. S. F. Moura, R. D. S. G. Campilho e J. P. M. Gonçalves, “Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading,” *Composites Science and Technology*, 2008.
- [26] F. J. P. Chaves, “Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints, PhD,” Porto, 2013.
- [27] ASTM D 3433 - 99, Standard Test Method for Fracture Strength in Cleavage of Adhesives in Bonded Metal Joints.
- [28] B. R. K. Blackman, A. J. Kinloch, F. S. R. Sanchez, W. S. Teo e J. G. Williams, “The fracture behavior of structural adhesives under high rates of testing,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 76, pp. 2868-2889, 2009.

- [29] V. H. C. Esteves, “Determinação da Tenacidade de um Adesivo em Solicitações de Modo Misto (I+II), Dissertação para obtenção do grau de Mestre,” Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [30] M. Shahverdi, A. P. Vassilopoulos e T. Keller, “Mixed-Mode I/II fracture behavior of asymmetric adhesively-bonded putruded composite joints,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 115, pp. 43-59, 2014.
- [31] H. Cui, S. Koussios, Y. Li e A. Beukers, “Constitutive law of adhesive layer measured with mixed mode bending test,” *Engineering Fracture Mechaincs*, 2014.
- [32] L. F. M. da Silva e A. Öchsner, *Modeling of Adhesively Bonded Joints*, Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2008.
- [33] W. Z. Wang, C. J. Li e F. X. Ye, “Effect of specimen geometry on fracture toughness measurement of plasma-sprayed ceramic coatings by the tapered double cantilever beam approach,” *Vacuum*, vol. 73, pp. 649-654, 2004.
- [34] M. F. Kanninen e C. H. Popelar, “Advanced fracture mechanics,” University Press, Oxford, 1985.
- [35] M. F. S. F. Moura, A. B. Pereira e A. B. Morais, “Influence of intralaminar cracking on the apparent interlaminar mode I fracture toughness of cross-ply laminates,” *Fatigue Fract Engng Master Struct*, vol. 27, pp. 759-766, 2004.
- [36] C. J. Constante, “Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fractura de adesivos estruturais. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Construções Mecânicas,” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014..
- [37] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, D. J. S. Gonçalves, J. F. M. G. Silva, M. D. Banea e L. da Silva, “Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites,” *Composites: Part B*, vol. 50, pp. 120-126, 2013.

- [38] P. Qiao, J. Wang e J. F. Davalos, “Tapered beam on elastic foundation model for compliance rate change of TDCB specimen,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, pp. 339-353, 2003.
- [39] B. R. K. Blackman, H. Hadavinia, A. J. Kinloch, M. Paraschi e J. G. Williams, “The calculation of adhesive fracture energies in mode I: revisiting the tapered double cantilever beam (TDCB) test,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 70, pp. 233-248, 2003.
- [40] V. Cooper, A. Ivankovic, A. Karac, D. McAuliffe e N. Murphy, “Effects of bond gap thickness on the fracture of nano-toughened epoxy adhesive joints,” *Polymer*, vol. 53, pp. 5540-5553, 2012.
- [41] R. D. S. G. Campilho, A. M. G. Pinto, M. D. Banea, R. F. Silva e L. F. M. da Silva, “Strength Improvement of Adhesively-Bonded Joints Using a Reverse-Bent Geometry,” *Journal Of Adhesion Science and Technology*, vol. 25, pp. 2351-2368, 2011.
- [42] J. C. S. Azevedo, “Determinação da tenacidade à fractura em tracção de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF). Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Construções Mecânicas.” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [43] M. Khoshravan e F. A. Mehrabadi, “Fracture analysis in adhesive composite material/aluminum joints under mode-I loading; experimental and numerical approaches,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 39, pp. 8-14, 2012.
- [44] T. M. d. S. Faneco, “Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade. Tese de Mestrado em Engenharia Mecânica – Ramo de Materiais e Tecnologias de Fabrico.” Instituto Superior de Engenharia do Porto, 2014.
- [45] U. F. R. Gomeringer, M. H. R. Kilgus, F. N. S. Oesterle e H. P. A. Stephan, *Manual de Tecnologia Metal Mecânica*, SP - Brasil: Blucher, 2008.

- [46] D. J. Pohlit, D. A. Dillard, G. C. Jacob e J. M. Starbuck, "Evaluating the Rate-Dependent Fracture Toughness of an Automotive Adhesive," *The Journal of Adhesion*, vol. 84, pp. 143-163, 2008.
- [47] M. D. Banea, L. F. M. da Silva e R. D. S. G. Campilho, "Mode I fracture toughness of adhesively bonded joints as a function of temperature: experimental and numerical study.," *International Journal of Adhesion and Adhesives*, vol. 31, pp. 273-279, 2011.
- [48] D. Álvarez, B. R. K. Blackman, F. J. Guild e A. J. Kinloch, "Mode I fracture in adhesively-bonded joints: A mesh-size independent modelling approach using cohesive elements," *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 115, pp. 73-95, 2014.
- [49] G. Fernlund e J. K. Spelt, "Mixed-mode fracture characterization of adhesive joints," *Composites Science Technology*, vol. 54, pp. 441-449, 1994.
- [50] C. Yan, Y. W. Mai e L. Ye, "Effect of bond thickness on fracture behaviour in adhesive joints," *Journal of Adhesion*, vol. 75, pp. 27-44, 2001.
- [51] L. F. M. da Silva, V. H. C. Esteves e F. J. P. Chaves, "Fracture toughness of a structural adhesive under mixed mode loadings," *Mat.-wiss. u. Werkstofftech.*, vol. 42, pp. 460 - 470, 2011.
- [52] B. R. K. Blackman, "Quasi-Static Fracture Tests: Double Cantilever Beam and Tapered Double Cantilever Beam Testing.," em *Testing Adhesive Joints Best Practices*, Wiley, 2012.
- [53] S. Marzi, A. Biel e U. Stigh, "On experimental methods to investigate the effect of layer thickness on the fracture behavior of adhesively bonded joints," *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 31, pp. 840-850, 2011.

Anexo A. Desmoldante Loctite® Frekote 770-NC



1001 Trout Brook Crossing
Rocky Hill, CT 06067-3910
Telephone: (860) 571-5100
FAX: (860) 571-5465

Product Description Sheet

FREKOTE® 770-NC Mold Release Agent

Industrial Products, October 2003

Description

Loctite® Frekote® 770-NC is a low odor, fast evaporating version of Frekote 700-NC. Frekote 770-NC offers excellent release for various molding applications and can be used as a direct replacement for Frekote 700-NC. Frekote 770-NC can be used for the release of epoxies, polyester resins, vinyl ester resins, thermoplastics, adhesives, and rotationally molded plastics. Frekote 770-NC is particularly well suited for tougher to release processes such as filament winding and non gel coated polyester and fiberglass molding.

Features

Versatile - releases most resins
No contaminating transfer
High gloss and high slip
Room temperature cure
No mold build-up
Low odor

Physical Properties

Appearance	Clear liquid
Odor	Hydrocarbon
Solvents	Aliphatic Hydrocarbon
Specific Gravity	0.720 +/- .015
Shelf Life	One year from date of manufacture
Special Cautions	Moisture sensitive, keep container tightly closed when not in use.
Cured thermal stability	400°C (750°F)
Application Temp	3°C - 60°C (55°F -140°F)

Mold Preparation

The mold surface must be clean and free of any release agent or other contaminants for Frekote 770-NC to be completely effective. Remove any contaminants with Frekote PMC or another suitable cleaning solvent. Light industrial abrasives can be used to remove heavy resin build up.

New Molds

Full curing of new molds is advisable to ensure the best bonding of the Frekote to the mold surface. New fiberglass and epoxy molds should be cured per manufacturer's instructions before starting full scale production.

Note For porous or repaired molds, a Frekote Sealer should be used - technical data is available. Consult with your Frekote Representative for assistance.

Application *Consult MSDS prior to use*

Frekote 770-NC can be applied to mold surfaces at room temperature up to 60°C (140°F) by spraying, brushing or wiping with a clean lint-free, cloth. When spraying, ensure a dry air source is used or use an airless spray system. If possible, warm the mold prior to applying Frekote 770-NC to approximately 50°C (120°F) to drive off any moisture entrapped on the mold surface.

1. Only a thin wet film is required. Wipe or spray on a smooth, thin, continuous, wet film. Avoid wiping or spraying over the same area that was just coated until the solvent has evaporated. If spraying, hold nozzle 8-10 inches (from mold surface). It is suggested that small areas be coated working progressively from one side of the mold to the other.
2. Initially, apply 2 - 3 base coats, allowing 5-10 minutes after each application for complete solvent evaporation.
3. Wait 5-10 minutes after the final coat for curing of the polymer resin prior to molding. The film should be dry and not feel tacky.
3. Aerosols may sometimes leave a matte surface finish. To enhance gloss, use a cotton cloth to gently buff up dry film, if required.
4. Performance is enhanced by re-coating once, after the first few initial pulls. Maximum releases will be obtained as the mold surface becomes conditioned to Frekote 770-NC.
5. When any release difficulty is experienced, the area in question can be "touched-up" by re-coating the entire mold surface or just those areas where release difficulty is occurring. For temperatures up to 60°C (140°F), use Frekote 770-NC and cure as per instructions above. For mold temperatures above 60°C (140°F), Frekote HMT-2 is recommended

Note Touch-up coats applied at regular intervals before the base film breaks down will extend the number of releases obtainable and reduce possible resin attack/build-up.

Precaution Users of closed mold systems (i.e. rotomolding) must be certain that solvent evaporation is complete and that all solvent vapors have been ventilated from the mold cavity prior to closing the mold. An oil-free compressed air source can be used to assist in evaporation of solvents and ventilation of the mold cavity.

Flammability/Storage

Frekote 770-NC contains flammable solvents. The product should always be used in well ventilated areas. Store in a cool, dry place. Consult MSDS for complete details.

NOT FOR PRODUCT SPECIFICATIONS
THE TECHNICAL DATA CONTAINED HEREIN ARE INTENDED AS REFERENCE ONLY.
PLEASE CONTACT LOCTITE CORPORATION QUALITY DEPARTMENT FOR ASSISTANCE AND RECOMMENDATIONS ON SPECIFICATIONS FOR THIS PRODUCT.
ROCKY HILL, CT FAX: +1 (860)-571-5473 DUBLIN, IRELAND FAX: +353-(1)-451 - 9959

Loctite and Frekote are Registered Trademarks of Loctite Corporation U.S.A.

Note

The data contained herein are furnished for information only and are believed to be reliable. We cannot assume responsibility for the results obtained by others over whose methods we have no control. It is the user's responsibility to determine suitability for the user's purpose of any production methods mentioned herein and to adopt such precautions as may be advisable for the protection of property and of persons against any hazards that may be involved in the handling and use thereof. In light of the foregoing, **Loctite Corporation specifically disclaims all warranties expressed or implied, including warranties of merchantability or fitness for a particular purpose, arising from sale or use of Loctite Corporation's products. Loctite Corporation specifically disclaims any liability for consequential or incidental damages of any kind, including lost profits.** The discussion herein of various processes or compositions is not to be interpreted as representation that they are free from domination of patents owned by others or as a license under any Loctite Corporation patents that may cover such processes or compositions. We recommend that each prospective user test his proposed application before repetitive use, using this data as a guide. This product may be covered by one or more, United States, or foreign patents or patent applications.

Anexo B. Adesivo Araldite® AV138

Advanced Materials**Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998****Structural Adhesives****Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998****Two component epoxy adhesive****Key properties**

- Low out gassing / volatile loss
- Excellent chemical resistance
- Temperature resistant to 120°C
- Thixotropic, gap filling paste

Description

Araldite® AV 138M-1 / Hardener HV 998 is a two component, room temperature curing paste adhesive of high strength. When fully cured the adhesive will have excellent performance at elevated temperatures and has high chemical resistance. It is suitable for bonding a wide variety of metals, ceramics, glass, rubbers, rigid plastics and other materials, and is widely used in many industrial applications where resistance to aggressive or warm environments are required. The low out gassing makes this product suitable for specialist electronic telecommunication and aerospace applications.

Typical product data

Property	Araldite® AV 138M-1	Hardener HV 998	Mix
Colour (visual)	beige	grey	grey
Specific gravity	ca. 1.7	ca. 1.7	ca. 1.7
Viscosity (Pas)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	35 mins

Processing**Pretreatment**

The strength and durability of a bonded joint are dependant on proper treatment of the surfaces to be bonded. At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt. Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used. The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite® AV 138M-1	100	100
Hardener HV 998	40	40

Resin and hardener should be blended until they form a homogeneous mix.

Application of adhesive

The resin/hardener mix is applied with a spatula, to the pretreated and dry joint surfaces. A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. The joint components should be assembled and clamped as soon as the adhesive has been applied. An even con-

tact pressure throughout the joint area will ensure optimum cure.

Mechanical processing

Specialist firms have developed metering, mixing and spreading equipment that enables the bulk processing of adhesive. We will be pleased to advise customers on the choice of equipment for their particular needs.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Curing times

Temperature	°C	10	15	23	40	60	80	100
Cure time	hours	48	36	24	16	1	-	-
	minutes	-	-	-	-	-	15	10
LSS at 23°C	N/mm ²	10	11	13	14	15	16	18

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

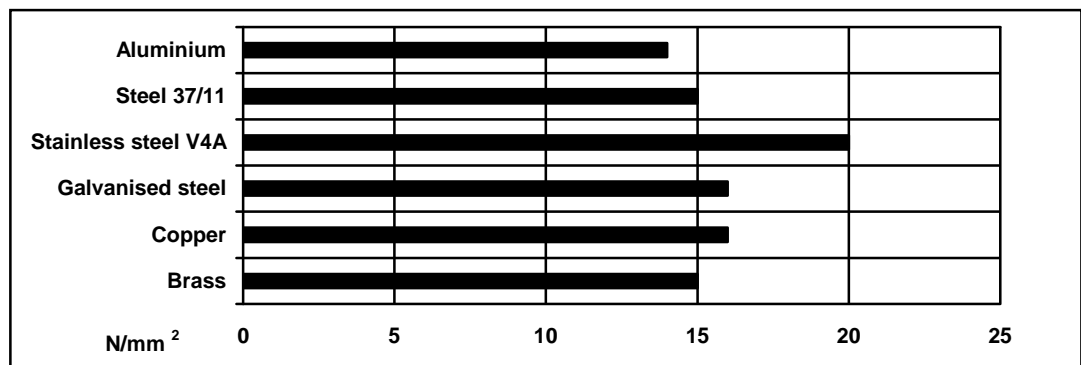
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cure: 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



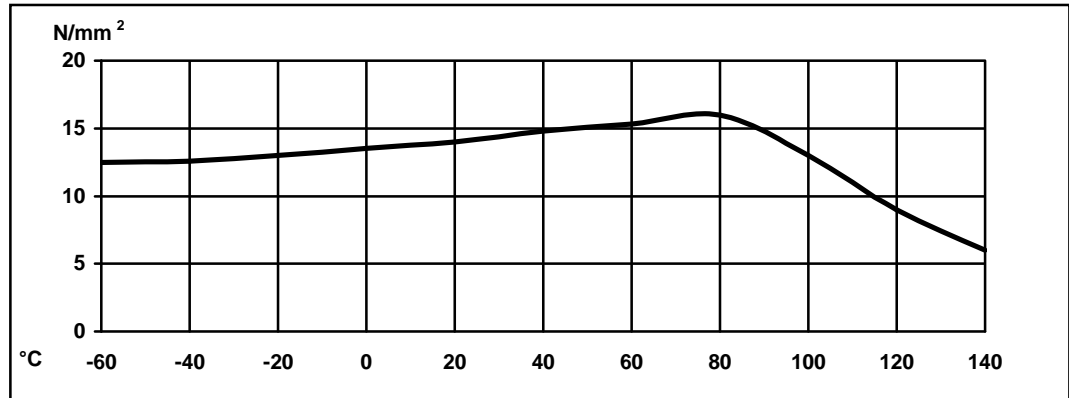
Shear modulus (DMA ISO 6721)

Cure: 16 hours at 40°C

-25°C	2175 MPa
0°C	2030 MPa
20°C	1890 MPa
60°C	780 MPa
100°C	34 Mpa
120°C	27 MPa

Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C



Roller peel test (ISO 4578)

Cure: 16 hours at 40°C

1.8 N/mm

Shore hardness

D84-86

Tensile strength

Cure: 16 hours at 40°C

43 MPa

Tensile modulus

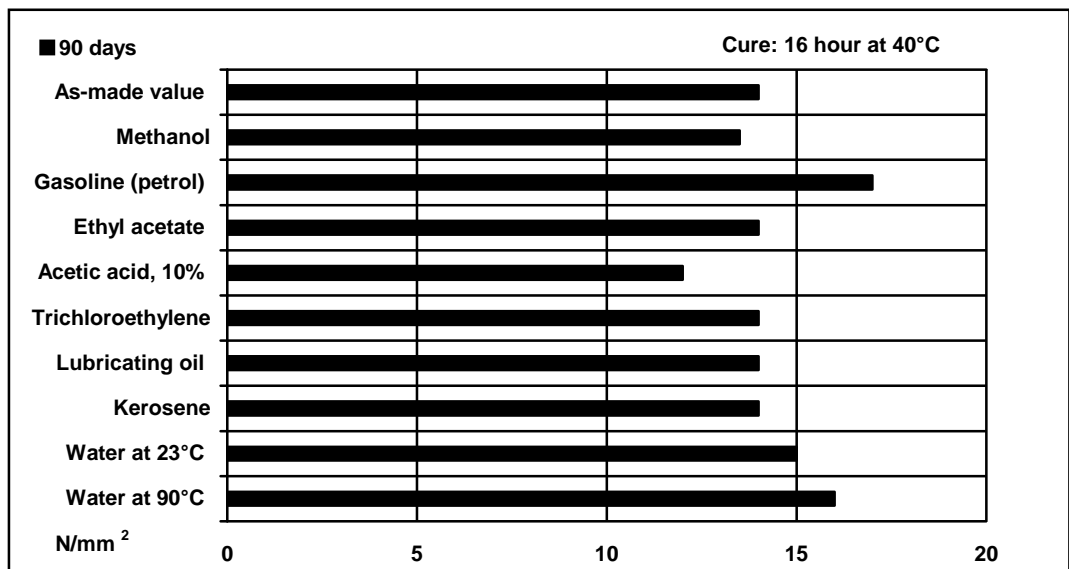
4.7 GPa

Elongation at break

1.2%

Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

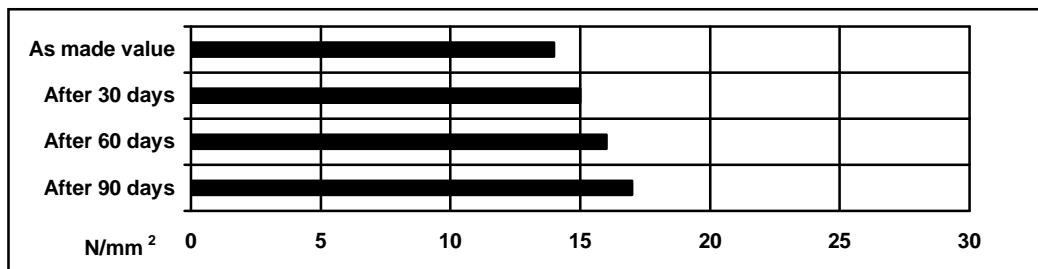
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



Lap shear strength versus tropical weathering

(40/92, DIN 50015; typical average values)

Test at 23°C

**Storage**

Araldite® AV 138M-1 and Hardener HV 998 may be stored for up to 6 years and 3 years respectively at room temperature provided that the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

**Handling
Precautions****Caution**

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with food-stuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.

IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

Araldite is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2008 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

Huntsman Advanced Materials

(Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 Basel
Switzerland

Tel: +41 (0)61 299 11 11
Fax: +41 (0)61 299 11 12

www.huntsman.com/advanced_materials
Email: advanced_materials@huntsman.com

Anexo C. Adesivo Araldite® 2015

Advanced Materials**Araldite® 2015****Structural Adhesives****TECHNICAL DATA SHEET**

Araldite® 2015

Two component epoxy paste adhesive

Key properties

- Toughened paste
- Ideal for bonding GRP, SMC and dissimilar substrates
- Low shrinkage
- Gap filling, non sagging up to 10mm thickness
- High shear and peel strength

Description

Araldite 2015 is a two component, room temperature curing paste adhesive giving a resilient bond. It is thixotropic and non sagging up to 10mm thickness. It is particularly suitable for SMC and GRP bonding.

Product data

Property	2015 A	2015 B	Mixed Adhesive
Colour (visual)	neutral paste	neutral paste	neutral paste
Specific gravity	1.4	1.4	1.4
Viscosity at 25°C (Pas)	thixotropic	thixotropic	thixotropic
Pot Life (100 gm at 25°C)	-	-	30 - 40 minutes

Processing**Pretreatment**

The strength and durability of a bonded joint are dependent on proper treatment of the surfaces to be bonded.

At the very least, joint surfaces should be cleaned with a good degreasing agent such as acetone, iso-propanol (for plastics) or other proprietary degreasing agents in order to remove all traces of oil, grease and dirt.

Low grade alcohol, gasoline (petrol) or paint thinners should never be used.

The strongest and most durable joints are obtained by either mechanically abrading or chemically etching ("pickling") the degreased surfaces. Abrading should be followed by a second degreasing treatment.

Mix ratio	Parts by weight	Parts by volume
Araldite 2015/A	100	100
Araldite 2015/B	100	100

Araldite 2015 is available in cartridges incorporating mixers and can be applied as ready to use adhesive with the aid of the tool recommended by Huntsman Advanced Materials.

Application of adhesive

The resin/hardener mix may be applied manually or robotically to the pretreated and dry joint surfaces. Huntsman's technical support group can assist the user in the selection of a suitable application method as well as suggest a variety of reputable companies that manufacture and service adhesive dispensing equipment.

A layer of adhesive 0.05 to 0.10 mm thick will normally impart the greatest lap shear strength to the joint. Huntsman stresses that proper adhesive joint design is also critical for a durable bond. The joint components should be assembled and secured in a fixed position as soon as the adhesive has been applied.

For more detailed explanations regarding surface preparation and pretreatment, adhesive joint design, and the dual syringe dispensing system, visit www.araldite2000plus.com.

Equipment maintenance

All tools should be cleaned with hot water and soap before adhesives residues have had time to cure. The removal of cured residues is a difficult and time-consuming operation.

If solvents such as acetone are used for cleaning, operatives should take the appropriate precautions and, in addition, avoid skin and eye contact.

Times to minimum shear strength

Temperature	°C	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	hours	12	7.5	4	1	-	-
LSS > 1MPa	minutes	-	-	-	-	17	6
Cure time to reach	hours	21	13	6	2	-	-
LSS > 10MPa	minutes	-	-	-	-	35	7

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

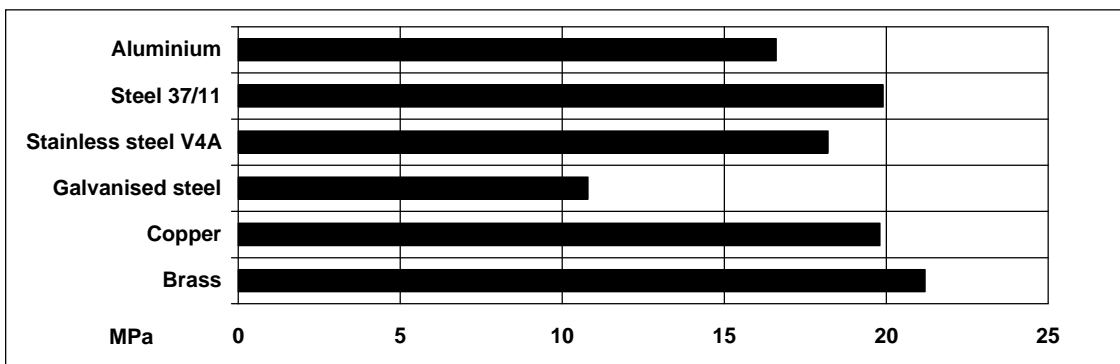
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 114 x 25 x 1.6 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

The figures were determined with typical production batches using standard testing methods. They are provided solely as technical information and do not constitute a product specification.

Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

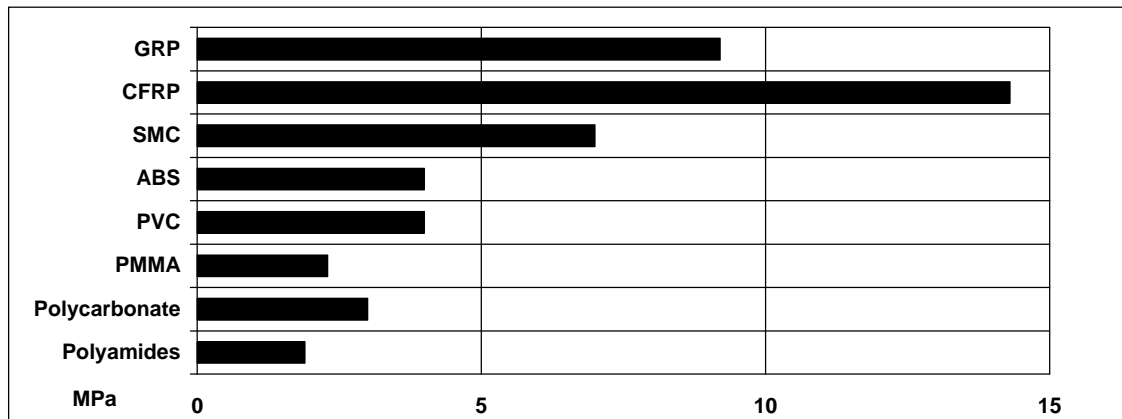
Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C

Pretreatment - Sand blasting



Average lap shear strengths of typical plastic-to-plastic joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment – Lightly abrade and alcohol degrease.



Tensile strength at 23°C (ISO 527)

30 MPa

Tensile modulus

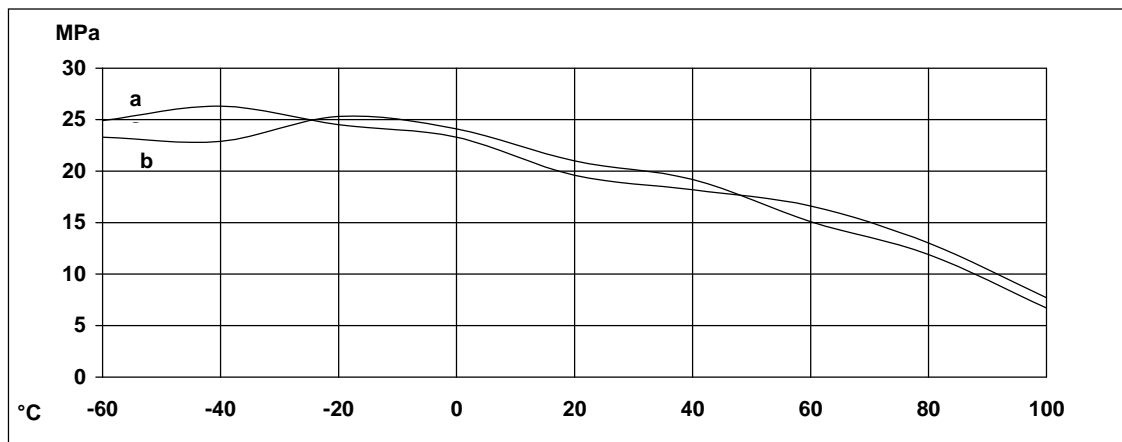
2 GPa

Elongation at break

4.4 %

Lap shear strength versus temperature (ISO 4587) (typical average values)

Cure: (a) = 7 days at 23°C; (b) = 24 hours at 23°C + 30 minutes at 80°C



Roller peel test (ISO 4578)

Cured: 16 hours at 40°C

4 N/mm

Glass transition temperature

Cure: 16 hours at 40°C

67°C by DSC

Cure: 1 hour at 80°C

87 by shear modulus

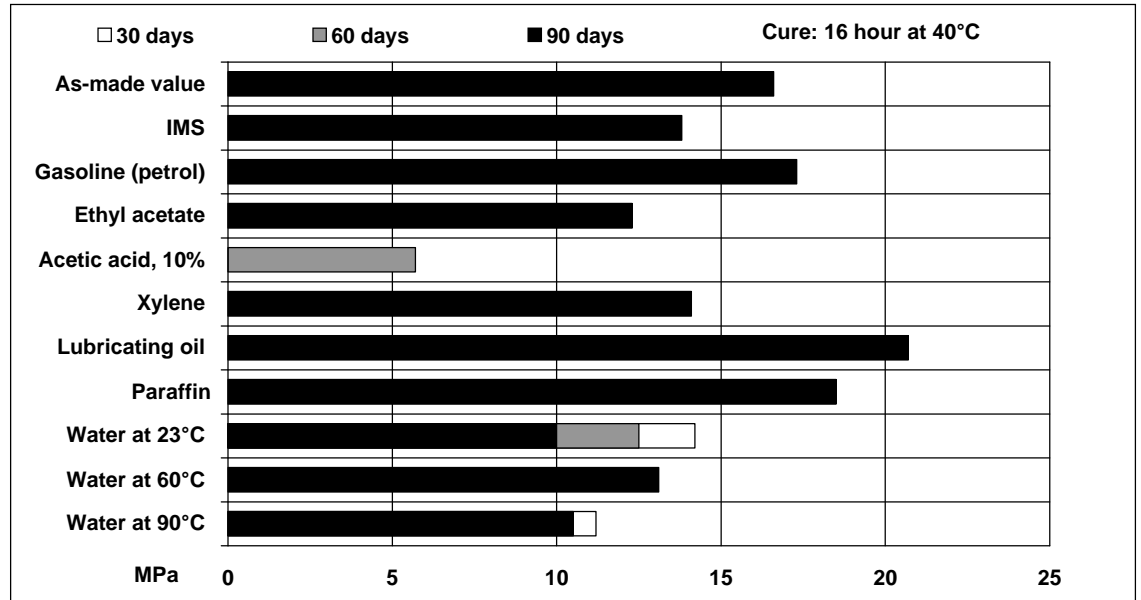
DIN 53445

Dielectric constant (500v at 25°C)

5.6 at 1 kHz

Lap shear strength versus immersion in various media (typical average values)

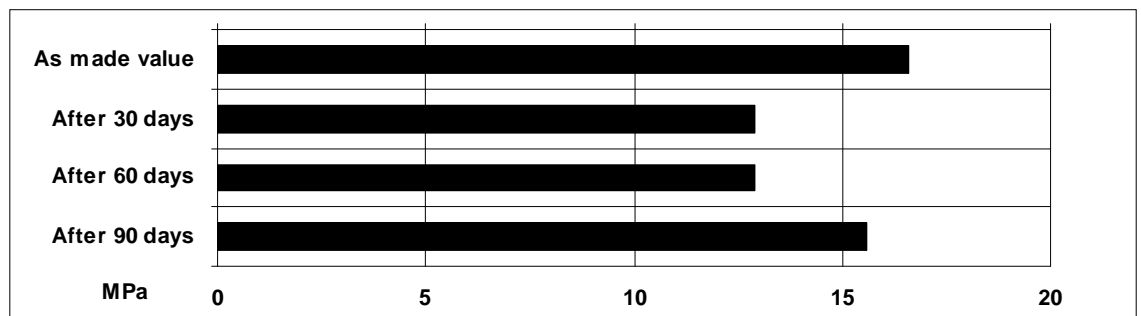
Unless otherwise stated, L.S.S. was determined after immersion for 90 days at 23°C



Lap shear strength versus tropical weathering

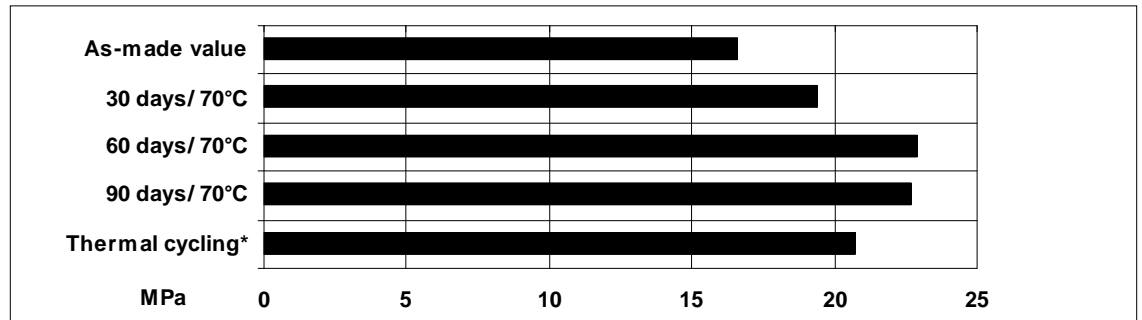
(40/92, DIN 50015; typical average values)

Cure: 16 hours at 40°C Test: at 23°C



Lap shear strength versus heat ageing

Cure: 16 hours at 40°C



*25 cycles -30°C to + 70°C

Shear modulus (DIN 53445)

Cure: 1 hour at 80°C

Temperature	G'	Δ
0°C	1.0 Gpa	0.25
25°C	0.9 Gpa	0.25
50°C	0.8 Gpa	0.35
75°C	0.2 Gpa	1.9
100°C	2 MPa	0.5

Flexural Properties (ISO 178) Cure 16 hours/ 40°C tested at 23°C

Flexural Strength

42.7 MPa

Flexural Modulus

1813.6 MPa

Resistance to fatigue (40 Hz at 23°C) (quoted as cycles to failure)

Maximum applied load	Sandblasted aluminium	Chromate pickled aluminium
20% of static failing load	>10 ⁷	>10 ⁷
25% of static failing load	>10 ⁷	10 ⁷
30% of static failing load	3 x 10 ⁶	8 x 10 ⁵

(Static failing load 16 MPa)

Storage

Araldite 2015/A and Araldite 2015/B may be stored for up to 3 years at room temperature provided the components are stored in sealed containers. The expiry date is indicated on the label.

Handling precautions**Caution**

Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from coming in contact with the skin, since people with particularly sensitive skin may be affected. The wearing of impervious rubber or plastic gloves will normally be necessary; likewise the use of eye protection. The skin should be thoroughly cleansed at the end of each working period by washing with soap and warm water. The use of solvents is to be avoided. Disposable paper - not cloth towels - should be used to dry the skin. Adequate ventilation of the working area is recommended. These precautions are described in greater detail in the Material Safety Data sheets for the individual products and should be referred to for fuller information.

Huntsman Advanced Materials

All recommendations for the use of our products, whether given by us in writing, verbally, or to be implied from the results of tests carried out by us, are based on the current state of our knowledge. Notwithstanding any such recommendations the Buyer shall remain responsible for satisfying himself that the products as supplied by us are suitable for his intended process or purpose. Since we cannot control the application, use or processing of the products, we cannot accept responsibility therefor. The Buyer shall ensure that the intended use of the products will not infringe any third party's intellectual property rights. We warrant that our products are free from defects in accordance with and subject to our general conditions of supply.



Huntsman Advanced Materials
(Switzerland) GmbH
Klybeckstrasse 200
4057 Basel
Switzerland

Tel: +41 (0)61 966 33 33
Fax: +41 (0)61 966 35 19
www.huntsman.com/advanced_materials

Huntsman Advanced Materials warrants only that its products meet the specifications agreed with the buyer. Typical properties, where stated, are to be considered as representative of current production and should not be treated as specifications.

The manufacture of materials is the subject of granted patents and patent applications; freedom to operate patented processes is not implied by this publication.

While all the information and recommendations in this publication are, to the best of our knowledge, information and belief, accurate at the date of publication, NOTHING HEREIN IS TO BE CONSTRUED AS A WARRANTY, EXPRESS OR OTHERWISE.

IN ALL CASES, IT IS THE RESPONSIBILITY OF THE USER TO DETERMINE THE APPLICABILITY OF SUCH INFORMATION AND RECOMMENDATIONS AND THE SUITABILITY OF ANY PRODUCT FOR ITS OWN PARTICULAR PURPOSE.

The behaviour of the products referred to in this publication in manufacturing processes and their suitability in any given end-use environment are dependent upon various conditions such as chemical compatibility, temperature, and other variables, which are not known to Huntsman Advanced Materials. It is the responsibility of the user to evaluate the manufacturing circumstances and the final product under actual end-use requirements and to adequately advise and warn purchasers and users thereof.

Products may be toxic and require special precautions in handling. The user should obtain Safety Data Sheets from Huntsman Advanced Materials containing detailed information on toxicity, together with proper shipping, handling and storage procedures, and should comply with all applicable safety and environmental standards.

Hazards, toxicity and behaviour of the products may differ when used with other materials and are dependent on manufacturing circumstances or other processes. Such hazards, toxicity and behaviour should be determined by the user and made known to handlers, processors and end users.

Except where explicitly agreed otherwise, the sale of products referred to in this publication is subject to the general terms and conditions of sale of Huntsman Advanced Materials LLC or of its affiliated companies including without limitation, Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA, Huntsman Advanced Materials Americas Inc., and Huntsman Advanced Materials (Hong Kong) Ltd.

Huntsman Advanced Materials is an international business unit of Huntsman Corporation. Huntsman Advanced Materials trades through Huntsman affiliated companies in different countries including but not limited to Huntsman Advanced Materials LLC in the USA and Huntsman Advanced Materials (Europe) BVBA in Europe.

[Araldite® 2015] is a registered trademark of Huntsman Corporation or an affiliate thereof.

Copyright © 2007 Huntsman Corporation or an affiliate thereof. All rights reserved.

Anexo D. Adesivo Sikaforce® 7752

SikaForce® -7752 FRW L60

Der schwerentflammbare standfeste strukturelle Klebstoff

Technische Eigenschaften

	Komponente A (Harz) SikaForce® -7752 FRW L60	Komponente B (Härter) SikaForce® -7752 B
Chemische Basis	Polyole, gefüllt	Isocyanatderivate, ungefüllt
Farbe	Weiss	Braun, transparent
Mischfarbe	Beige	
Härtungsmechanismus	Polyaddition	
Dichte (25 °C)	ca. 1,6 kg / l	ca. 1,2 kg / l
Festkörpergehalt	100%	100%
Mischungsverhältnis	Volumen Gewicht	27 20
Viskosität (20 °C), P/P 30 mm, 0,2 mm Spalt	ca. 200.000 mPas (standfest)	ca. 200 mPas
Mischviskosität (20 °C), P/P 30 mm, 0,2 mm Spalt	ca. 70.000 mPas (standfest)	
Verarbeitungstemperatur	15 – 30 °C	
Topfzeit 20 °C ¹⁾	ca. 60 min	
Shore-D-Härte ²⁾ (DIN 53505)	ca. 60	
Zugfestigkeit ²⁾⁴⁾ (ISO 527)	ca. 10 MPa	
Bruchdehnung ²⁾⁴⁾ (ISO 527)	ca. 25 %	
Zugscherfestigkeit ²⁾³⁾ (DIN EN 1465)	ca. 10 MPa (abhängig vom Untergrund)	
Anfangsfestigkeit (0,5 MPa)	ca. 5h 23 °C / 110 min 40 °C / 35 min 60 °C	
Winkelschälfestigkeit ²⁾ (DIN 53282)	ca. 120 N/3 cm	
Haltbarkeit in ungeöffnetem Gebinde	6 Monate	12 Monate

¹⁾ Viskositätsanstieg bis 150.000 mPas im Rheolab MC 10

²⁾ Prüftemperatur: 23 °C, 50 % relative Luftfeuchtigkeit; Aushärtung: 48 Std. RT + 3 Std. 105 °C + 24 Std. RT

³⁾ Substrat: AlCuMg₂ platinert; Klebstoffschichtdicke: 1,5 mm ⁴⁾ Schichtdicke der Zugprüfkörper: 4 mm

Beschreibung

SikaForce® -7752 FRW L60 ist ein nach IMO FTPC Teil 5 schwerentflammbares 2K-Klebstoff-System, welches aus einem gefüllten polyolbasierenden Harz und einem isocyanatbasierenden Härter besteht. Die zwei Komponenten werden mit geeigneten Pumpanlagen dosiert, gemischt und aufgetragen.

SikaForce® -7752 FRW L60 wird nach dem Qualitätssicherungssystem ISO 9001 / 14001 und dem Responsible Care Programm hergestellt.

Produktvorteile

- Schwerentflammbar
- Raumtemperaturhärtend
- Alterungsbeständig
- Standfest
- PVC- und lösungsmittelfrei
- Gute Schlagzähigkeit
- Hervorragende Kälteflexibilität

Anwendungsbereich

SikaForce® -7752 FRW L60 ist ein standfester zweikomponentiger Polyurethanklebstoff mit breitem Haftspektrum für strukturelle Verklebungen.

Dieses Produkt ist nur für erfahrene Anwender geeignet. Um Haftung und Materialverträglichkeit gewährleisten zu können, müssen Vorversuche mit Originalmaterialien unter den jeweiligen Bedingungen durchgeführt werden.



Härtungsmechanismus

Die Aushärtung von SikaForce®-7752 FRW L60 erfolgt durch Reaktion der beiden Komponenten. Hohe Temperaturen beschleunigen, niedrige Temperaturen verlangsamen die Aushärtung.

Chemische Beständigkeit

SikaForce®-7752 FRW L60 ist hydrolysebeständig. Die Beständigkeit gegen Chemikalien ist immer von der Beschaffenheit des Untergrundes, Konzentration, Temperatur und Einwirkungsdauer abhängig. Das gleiche gilt auch bezüglich Temperaturen. Ohne Chemikalieneinwirkung ist der Klebstoff dauerhaft beständig bis 120 °C, kurzfristig kann der Klebstoff auch höheren Temperaturen ausgesetzt werden.

Bei vorhersehbarer chemischer oder thermischer Belastung ist eine objektbezogene Prüfung notwendig.

Verarbeitungshinweise

Untergrundvorbereitung

Die Untergründe müssen sauber, trocken und frei von Verunreinigungen (Fette, Öle, staubförmige Ablagerungen) sein. Aufgrund der Vielzahl der möglichen Untergründe und der mechanischen Anforderungen an den Klebstoff werden Vorversuche und eine objektbezogene Beratung empfohlen.

Verarbeitung

Die Dosierung des Klebstoffes erfolgt mittels geeigneter Dosiermaschinen mit dynamischen oder statischen Mischköpfen im Raupen- oder Sprühauftrag. Die Verarbeitungstemperatur sollte oberhalb 15 °C liegen. Für weitere Informationen zur Auswahl geeigneter Verarbeitungsgeräte setzen Sie sich bitte mit der Abteilung System Engineering der Sika Industry in Verbindung.

Reinigung

Nicht ausgehärtetes SikaForce®-7752 FRW L60 kann von Geräten und Werkzeugen mit Sika® Remover-208 entfernt werden. Ausgehärtetes Material kann nur noch mechanisch entfernt werden. Hände/Haut sollten sofort mit Sika® Handclean oder einer geeigneten Handwaschpaste und Wasser gereinigt werden. Keine Lösemittel verwenden!

Lagerung

Trocken und zwischen 10 °C und 30 °C. Vor direktem Sonnenlicht und Frost schützen. Nach Produktentnahme müssen die Gebinde umgehend wieder luftdicht verschlossen werden, um das Material vor Luftfeuchtigkeit zu schützen. Zu Transportzwecken dürfen die Komponenten kurzfristig Temperaturen bis -10 °C während maximal 3 Tagen ausgesetzt werden. Kristallisierte oder nicht homogene Komponenten dürfen nicht verwendet werden.

Weitere Informationen

Folgende Dokumente sind auf Anfrage erhältlich:
- Sicherheitsdatenblatt

Gebinde

SikaForce®-7752 FRW L60

Komponente A	Eimer	7,5 kg
--------------	-------	--------

SikaForce®-7752 B

Komponente B	Dose	1,5 kg
	Kanister	2 kg
	Hobbock	25 kg
	Fass	250 kg

Hinweis Messwerte

Alle technischen Daten, Maße und Angaben in diesem Datenblatt beruhen auf Labortests. Tatsächlich gemessene Daten können in der Praxis aufgrund von Umständen außerhalb unseres Einflussbereiches abweichen.

Arbeitsschutzbestimmungen

Für den Umgang mit unseren Produkten sind die wesentlichen physikalischen, sicherheitstechnischen, toxikologischen und ökologischen Daten den stoffspezifischen Sicherheitsdatenblättern zu entnehmen. Die einschlägigen Vorschriften, wie z.B. die Gefahrstoffverordnung, sind zu beachten. Auf Wunsch stellen wir Ihnen unser System-Merkblatt TM 7510 "Allgemeine Hinweise zum Arbeitsschutz" beim Umgang mit Produkten der Sika Deutschland GmbH zur Verfügung.

Hinweis

Die vorstehenden Angaben, insbesondere die Vorschläge für Verarbeitung und Verwendung unserer Produkte, beruhen auf unseren Kenntnissen und Erfahrungen im Normalfall, vorausgesetzt die Produkte wurden sachgerecht gelagert und angewandt. Wegen unterschiedlichen Materialien und Untergründen sowie abweichenden Arbeitsbedingungen kann eine Gewährleistung eines Arbeitsergebnisses oder eine Haftung, aus welchem Rechtsverhältnis auch immer, weder aus diesen Hinweisen noch aus einer mündlichen Beratung begründet werden, es sei denn, dass uns insoweit Vorsatz oder grobe Fahrlässigkeit zur Last fällt. Hierbei hat der Anwender nachzuweisen, dass schriftlich alle Kenntnisse, die zur sachgemäßen und erfolversprechenden Beurteilung durch Sika erforderlich sind, Sika rechtzeitig und vollständig übermittelt wurden. Der Anwender hat die Produkte auf ihre Eignung für den vorgesehenen Anwendungszweck zu prüfen. Änderungen der Produktspezifikationen bleiben vorbehalten. Schutzrechte Dritter sind zu beachten. Im Übrigen gelten unsere jeweiligen aktuellen Verkaufs-, Liefer- und Zahlungsbedingungen. Es gilt das jeweils neueste lokale Produktdatenblatt, das von uns angefordert werden sollte oder im Internet unter www.sika.de heruntergeladen werden kann.

Weitere Informationen:
www.sika.de, E-Mail: industry@de.sika.com
www.sika.com

Sika Deutschland GmbH
Stuttgarter Str. 139
72574 Bad Urach
Deutschland
Tel. +49 7125 940 761
Fax +49 7125 940 763

