



Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade

TIAGO MANUEL DOS SANTOS FANECO

Outubro de 2014

Caraterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade

Tiago Manuel dos Santos Faneco

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto
Departamento de Engenharia Mecânica



24 de outubro de 2014

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

Candidato: Tiago Manuel dos Santos Faneco, N° 1070621, 1070621@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



24 de outubro de 2014

Aos meus pais, à minha irmã e à Márcia.

Agradecimentos

Ao Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Campilho, Orientador Científico da presente dissertação, com quem tive o privilégio de trabalhar, usufruindo da sua sabedoria, pela sua dedicação, disponibilidade e incentivo, revelando-se fundamental para a conclusão da mesma.

Ao Professor Doutor Francisco José Gomes da Silva, Co-orientador da presente dissertação, pela sua ajuda na revisão do texto, tecendo comentários construtivos.

Ao Professor Doutor Arnaldo Manuel Guedes Pinto, pela sua ajuda no fabrico dos provetes de adesivo em bruto e TAST, bem como na realização dos ensaios associados.

Aos meus pais e irmã, por todo o apoio e compreensão, bem como pela privação de convívio que lhes causei.

À Márcia Moreira, por todo o apoio, paciência e compreensão, suportando, por vezes, a minha falta de disponibilidade e mau humor.

Por fim, agradeço ao meu amigo, Engenheiro Ricardo Lopes, pela ajuda e incentivo durante a realização da presente dissertação.

Resumo

A tecnologia de ligação por adesivos estruturais tem vindo a ser utilizada ao longo de várias décadas, permitindo solucionar diversos problemas associados a técnicas chamadas "tradicionais" de ligação, como a soldadura, a rebiteagem ou a ligação aparafusada. Esta é uma alternativa viável para substituir as ligações mecânicas, devido a diversos fatores como o menor peso estrutural, menor custo de fabricação e capacidade de união de diferentes materiais. O crescente recurso a materiais compósitos em diversas indústrias, nomeadamente a aeronáutica e naval, levaram ao conseqüente aumento da aplicação de ligações adesivas, por serem indicadas como forma de união destes materiais, onde é de enaltecer a sua elevada resistência à fadiga.

Uma junta adesiva está maioritariamente sujeita a esforços de corte e arrancamento e portanto o conhecimento dos módulos de elasticidade à tração (E) ou corte (G) do adesivo, e ainda as resistências máximas à tração e ao corte, não é suficiente quando se pretende prever o comportamento da mesma. Na verdade, torna-se necessário abranger na análise a plastificação progressiva verificada nas juntas adesivas antes da rotura, sendo necessário o conhecimento de parâmetros tais como a taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{Ic}) e corte (G_{IIc}).

Este trabalho pretende estudar um adesivo estrutural recentemente lançado no mercado, carecendo portanto da sua caracterização, para facilitar a previsão da resistência de estruturas adesivas ligadas com o mesmo. São 4 os ensaios a realizar: ensaios à tração de provetes em bruto, ensaios ao corte com a geometria *Thick Adherend Shear Test* (TAST), ensaios *Double-Cantilever Beam* (DCB) e ensaios *End-Notched Flexure* (ENF). Com a realização dos ensaios referidos, serão determinadas as propriedades mecânicas e de fratura à tração e ao corte, e serão fornecidos os parâmetros para a previsão da resistência de juntas adesivas com este adesivo por uma variedade de métodos, desde métodos analíticos mais expeditos até aos métodos numéricos mais avançados existentes atualmente.

Os resultados foram de encontro aos disponibilizados pelo fabricante, sempre que estes se encontravam disponíveis, obtendo-se discrepâncias bastante reduzidas nos diversos parâmetros determinados.

Palavras-Chave

Adesivo estrutural; Ductilidade; Tenacidade; *Bulk*; *Thick Adherend Shear Test*; *Double-Cantilever Beam*; *End-Notched Flexure*

Abstract

Bonding by structural adhesives has been used for several decades, allowing to solve various problems related to the "traditional" joining techniques, such as welding, riveting or bolting. This is a viable alternative to replace mechanical joints, due to several factors such as less structural weight, lower manufacturing cost and possibility to join different materials. The increasing use of composite materials in various fields of engineering, including aerospace and shipbuilding, led to the consequent increase in the application of adhesive joints, since these are suited to join these materials, on account of their high fatigue strength.

An adhesive joint is mainly subjected to shear and peel forces. Thus, the knowledge of the tensile (E) or shear (G) moduli of the adhesive, and yet its maximum tensile and shear strength, is not enough to predict the joint behaviour. In fact, the analysis needs to account for the progressive plasticization observed in the adhesive joints before failure, being required to estimate parameters such as the critical strain energy release rate in tension (G_{Ic}) and shear (G_{IIc}).

This work aims to study a structural adhesive recently launched in the market, thus lacking proper characterization, to ease the strength prediction of bonded structures with this adhesive. With this purpose, 4 tests should be performed: tensile testing to bulk specimens, shear testing with Thick Adherend Shear Tests (TAST), and Double-Cantilever Beam (DCB) and End-Notched Flexure (ENF) tests. These tests will enable the estimation of the mechanical and fracture properties of the adhesive in tension and shear. The parameters to predict the strength of adhesive joints with this adhesive by various methods will be provided, ranging from the easy to apply analytical methods to the most advanced numerical methods available nowadays.

The obtained results were in close agreement with the data provided by the manufacturer, with small deviations in the estimated parameters.

Keywords

Structural adhesive; Ductility; Fracture toughness; Bulk; Thick Adherend Shear Test; Double-Cantilever Beam; End-Notched Flexure

Índice

AGRADECIMENTOS	VII
RESUMO	IX
ABSTRACT	XI
ÍNDICE DE FIGURAS	XVII
ÍNDICE DE TABELAS	XXIII
NOMENCLATURA	XXV
1 INTRODUÇÃO	1
1.1 CONTEXTUALIZAÇÃO	1
1.2 OBJETIVOS	2
1.3 CALENDARIZAÇÃO	3
1.4 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	4
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>	11
2.2 ADESIVOS ESTRUTURAIS	12
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i>	16
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	16
2.2.2.1 Epóxidos	16
2.2.2.2 Fenólicos	18
2.2.2.3 Acrílicos	19
2.2.2.4 Poliaromáticos (adesivos de alta temperatura)	20
2.2.2.5 Poliuretanos	20
2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ADESIVOS	20
2.3.1 <i>Caraterização das propriedades mecânicas à tração</i>	21
2.3.1.1 Métodos de ensaio	22
2.3.1.2 Ensaio de provetes em bruto	24
2.3.1.3 Procedimentos de ensaio	29
2.3.2 <i>Caraterização das propriedades mecânicas ao corte</i>	33
2.3.2.1 Métodos de ensaio	34
2.3.2.2 Ensaio Thick Adherend Shear Test	43
2.3.2.3 Procedimentos de ensaio	46
2.3.3 <i>Caraterização das propriedades de fratura à tração</i>	49
2.3.3.1 Métodos de ensaio	50
2.3.3.2 Ensaio Double-Cantilever Beam	52
2.3.3.3 Procedimentos de ensaio	53
2.3.3.4 Métodos para determinação do G_{IC}	54

2.3.3.4.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda.....	54
2.3.3.4.2	Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente	56
2.3.3.4.3	Métodos baseados no Integral J.....	57
2.3.4	<i>Caraterização das propriedades de fratura ao corte</i>	58
2.3.4.1	Métodos de ensaio	58
2.3.4.2	Ensaio End-Notched Flexure	61
2.3.4.3	Procedimentos de ensaio	62
2.3.4.4	Métodos para determinação do G_{IIC}	63
2.3.4.4.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda.....	63
2.3.4.4.2	Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente	63
2.3.4.4.3	Métodos baseados no Integral J.....	64
3	DESENVOLVIMENTO	67
3.1	ADESIVO SELECIONADO	67
3.2	ENSAIOS À TRAÇÃO	69
3.2.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	69
3.2.1.1	Preparação do molde	71
3.2.1.2	Aplicação do adesivo.....	73
3.2.2	<i>Ensaio de tração</i>	77
3.2.2.1	Condições de ensaio	80
3.2.2.2	Medição das deformações	81
3.2.3	<i>Análise de resultados</i>	82
3.2.3.1	Curvas $P-\delta$ e $\sigma-\epsilon$	83
3.2.3.2	Propriedades mecânicas.....	88
3.3	ENSAIOS AO CORTE	88
3.3.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	88
3.3.1.1	Preparação do <i>gabarit</i> e provetes	90
3.3.1.2	Colagem dos provetes.....	93
3.3.2	<i>Ensaio de tração</i>	95
3.3.2.1	Condições de ensaio	95
3.3.2.2	Medição das deformações	96
3.3.3	<i>Análise de resultados</i>	97
3.3.3.1	Curvas $P-\delta$ e $\tau-\gamma$	98
3.3.3.2	Propriedades mecânicas.....	101
3.4	ENSAIOS DOUBLE-CANTILEVER BEAM	102
3.4.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	102
3.4.1.1	Preparação dos provetes	103
3.4.1.2	Colagem dos provetes.....	106
3.4.1.3	Preparação dos provetes para ensaio	107
3.4.2	<i>Ensaio realizado</i>	110
3.4.2.1	Condições de ensaio	110
3.4.2.2	Parâmetros medidos durante o ensaio.....	111
3.4.3	<i>Análise de resultados</i>	112
3.4.3.1	Curvas $P-\delta$ e R	112

3.4.3.2	Propriedades de tenacidade à tração	115
3.5	ENSAIOS END-NOTCHED FLEXURE	116
3.5.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	116
3.5.1.1	Preparação dos provetes	116
3.5.1.2	Colagem dos provetes	117
3.5.1.3	Preparação dos provetes para ensaio	118
3.5.2	<i>Ensaio realizados</i>	119
3.5.2.1	Condições de ensaio	120
3.5.2.2	Parâmetros medidos durante o ensaio	121
3.5.3	<i>Análise de resultados</i>	121
3.5.3.1	Curvas P - δ e R	122
3.5.3.2	Propriedades de tenacidade ao corte	123
3.6	ANÁLISE CRÍTICA DOS RESULTADOS OBTIDOS	124
3.6.1	<i>Ensaio à tração</i>	124
3.6.2	<i>Ensaio ao corte</i>	127
3.6.3	<i>Ensaio Double-Cantilever Beam</i>	130
3.6.4	<i>Ensaio End-Notched Flexure</i>	133
4	CONCLUSÕES	137
	REFERÊNCIAS DOCUMENTAIS	141
	ANEXO A. DESMOLDANTE LOCTITE® FREKOTE 770-NC	145
	ANEXO B. ADESIVO SIKAFORCE® 7752-L60	149
	ANEXO C. ADESIVO SIKAFORCE® 7888-L10	153

Índice de Figuras

Figura 1- Estrutura de fuselagem reforçada (ligação de chapas por intermédio de adesivo) [3]	6
Figura 2 - Esforço de tração [4]	8
Figura 3 - Esforço de compressão [4]	8
Figura 4 - Esforço de corte [4]	8
Figura 5 - Efeito do comprimento e largura de sobreposição na resistência ao corte [2]	9
Figura 6 - Esforço de clivagem [4]	9
Figura 7 - Esforço de arrancamento [4]	9
Figura 8 - Modos de rotura em juntas adesivas [2]	10
Figura 9 - Tipos de juntas adesivas vulgarmente utilizadas [13]	11
Figura 10 - Provetes de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2 a) provete longo, b) provete reduzido (dimensões em mm) [17]	22
Figura 11 - Junta topo a topo com substratos cilíndricos [2, 18]	23
Figura 12 - Aprisionamento de ar entre uma película adesiva e as superfícies do molde: a) aprisionamento inicial, b) deslocamento parcial, c) posicionamento final [19]	24
Figura 13 - Fenómeno chamado de "crazing" [20]	25
Figura 14 - Molde de para fabricação de provetes em adesivo maciço [15, 22]	26
Figura 15 - Representação esquemática de um molde utilizado para o fabrico de provetes em adesivo maciço [17]	26
Figura 16 - Fabrico de provetes maciços por moldação em molde aberto	27
Figura 17 - Placa de adesivo produzida de acordo com a norma NF T 76-142 [21]	28
Figura 18 - Molde exemplificativo para produção de placas de adesivo por pressão entre pratos [2, 15]	28
Figura 19 - Representação de uma célula de carga e um extensómetro numa máquina de ensaios de tração [23]	30
Figura 20 - Extensómetro a) mecânico e b) ótico [2]	31
Figura 21 - Influência da velocidade de ensaio nas curvas tensão-deformação de um adesivo dúctil [26]	31
Figura 22 - Cuva tensão-deformação típica de um adesivo [6]	32
Figura 23 - Métodos para determinação da tensão limite de elasticidade σ_y [17]	33
Figura 24 - Geometria da junta de sobreposição simples ASTM D1002 (dimensões em mm) [29]	34
Figura 25 - Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta [30]	35
Figura 26 - Geometria do provete de junta de sobreposição simples utilizado por Kim et al. [31]	36
Figura 27 - Junta de ressalto [13]	36

Figura 28 - Ensaio <i>Iosipescu</i> e geometria do provete (dimensões em mm) [17, 6]	37
Figura 29 - Provete Arcan (dimensões em mm) [6]	39
Figura 30 - Método Arcan a) vista explodida e b) fixação [8, 6]	40
Figura 31 - Provetes maciços em torção: (a) provete sólido e (b) provete tubular [6]	40
Figura 32 - Junta adesiva com aderentes sólidos (dimensões em mm) [6]	41
Figura 33 - Provete <i>Napkin-ring test</i> [6]	41
Figura 34 - Geometria dos provetes TAST (a) e dimensões em mm (b) (ISO 11003-2) [17].....	42
Figura 35 - Calços ou lâminas para controlar a sobreposição e o filete de adesivo [17].....	43
Figura 36 - Molde para fabrico de provetes TAST [17].....	44
Figura 37 - Fabrico de provetes TAST usando um molde [17].....	45
Figura 38 - Ferramentas para o ensaio TAST [17].....	46
Figura 39 - Extensómetro (LVDT) utilizado no ensaio TAST, segundo ISO 11003-2 [6].....	47
Figura 40 - Medição dos deslocamentos no ensaio TAST [6]	48
Figura 41 - Modos de rotura em juntas adesivas [33]	49
Figura 42 - Geometria do provete DCB segundo a norma ASTM D 3433 - 99 (dimensões em mm) [36]	51
Figura 43 - Representação esquemática do provete DCB [35]	51
Figura 44 - Representação esquemática do provete TDCB [35].....	52
Figura 45 - DCB com blocos de carga (a) e dobradiças (b) [17].....	52
Figura 46 - <i>Setup</i> experimental (a) e demonstração da propagação da fenda (b) (DCB) [33]	53
Figura 47 - Método de obtenção da correção do comprimento de fenda Δ [35]	55
Figura 48 - Representação esquemática da FPZ e do conceito de fenda equivalente [42].....	56
Figura 49 - Representação esquemática do ensaio ENF [17].....	59
Figura 50 - Representação esquemática do ensaio 4ENF [17].....	59
Figura 51 - Representação esquemática do ensaio ELS [17]	60
Figura 52 - <i>Setup</i> do ensaio ELS [17]	60
Figura 53 - Diagrama representativo do ensaio ENF [33]	61
Figura 54 - <i>Setup</i> experimental (a) e demonstração da propagação da fenda (b) (ENF) [33].....	62
Figura 55 - Componentes que constituem o adesivo SikaForce [®] - 7752 L60	67
Figura 56 - Dimensões dos provetes maciços de adesivo pela norma NF T 76-142 (dimensões em mm)	69
Figura 57 - Placa inferior e superior do molde [21]	70
Figura 58 - Placa intermédia obtida por corte laser (seis cavidades) [21].....	70
Figura 59 - Placa superior após cromagem dura e retificação [21].....	71
Figura 60 - Limpeza da placa intermédia com acetona	71
Figura 61 - Aquecimento do molde em forno a 80°C.....	72
Figura 62 - Aplicação do desmoldante no molde	72
Figura 63 - Preparação do molde finalizada.....	73

Figura 64 - Preparação do adesivo: a) pesagem da resina, b) aplicação do endurecedor e c) mistura dos dois componentes	73
Figura 65 - Molde preparado para aplicação do adesivo.....	74
Figura 66 - a) Aplicação do adesivo por moldação em molde aberto e b) adesivo aplicado	74
Figura 67 - Fecho do molde: a) Colocação da placa superior do molde e b) aperto do molde	75
Figura 68 - Abertura do molde: a) desaperto do molde e b) aspeto dos provetes ainda no molde, antes da desmoldação	75
Figura 69 - Extração dos provetes de adesivo	76
Figura 70 - Verificação da existência de vazios nos provetes de adesivo.....	76
Figura 71 - Vazio de dimensão considerável no provete 1	77
Figura 72 - Máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 e computador com <i>software</i> TRAPEZIUM X	77
Figura 73 - Rotura do provete 1 quando sujeito ao ensaio de tração (<i>bulk</i>).....	79
Figura 74 - <i>Setup</i> do ensaio de tração de provetes maciços: a) com extensómetro mecânico colocado e b) após remoção do extensómetro	80
Figura 75 - Extensómetro mecânico utilizado durante o ensaio de tração	81
Figura 76 - Rotura de provetes maciços: a) provete 1 (ensaiado no dia 12 de Março de 2014) e b) provete 3 (ensaiado no dia 19 de Março de 2014)	82
Figura 77 - Curvas $P-\delta$ dos provetes maciços	84
Figura 78 - Curvas $\sigma-\varepsilon$ dos provetes maciços	84
Figura 79 - Determinação da tensão limite elástico à tração a 0,2% (provetes 5)	85
Figura 80 - Rotura dos provetes maciços (provetes 1): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura.....	85
Figura 81 - Rotura dos provetes maciços (provetes 2): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura.....	86
Figura 82 - Rotura dos provetes maciços (provetes 3): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura.....	86
Figura 83 - Rotura dos provetes maciços (provetes 4): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura.....	87
Figura 84 - Rotura dos provetes maciços (provetes 5): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura.....	87
Figura 85 - Rotura dos provetes maciços (provetes 6): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura.....	87
Figura 86 - Provetes TAST desenvolvido por Morais. [29], segundo a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm)	89
Figura 87 - <i>Gabarit</i> utilizado para o alinhamento de provetes [29].....	89
Figura 88 - a) Dispositivo para ensaiar os provetes e b) desenho do dispositivo [29].....	90
Figura 89 - Limpeza e desengorduramento do <i>gabarit</i> com o auxílio da lixa e da acetona	90
Figura 90 - Aquecimento do <i>gabarit</i> e das lâminas	91
Figura 91 - Aplicação do desmoldante no <i>gabarit</i>	91

Figura 92 - <i>Gabarit</i> após preparação das superfícies	92
Figura 93 - a) Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S e b) pressão de granalhagem	92
Figura 94 - Substratos após processo de granalhagem	93
Figura 95 - Colocação dos aderentes no <i>gabarit</i> : a) alinhamento dos aderentes e b) colocação das lâminas de aço	93
Figura 96 - Fabrico dos provetes TAST: a) aplicação do adesivo e b) aperto do molde.....	94
Figura 97 - Provette após colagem, remoção das lâminas e do excesso de adesivo.....	94
Figura 98 - <i>Setup</i> do ensaio TAST: a) fixação do provete à máquina de ensaios e b) pormenor da instalação do extensómetro mecânico	96
Figura 99 - Rotura de um provete TAST (provette 1).....	97
Figura 100 - Curvas $P-\delta$ dos provetes TAST	99
Figura 101 - Curvas $\tau-\gamma$ dos provetes TAST	99
Figura 102 - Determinação da tensão limite elástico ao corte a 0,2% (provette 4).....	100
Figura 103 - Rotura dos provetes TAST	101
Figura 104 - Representação esquemática dos provetes DCB utilizados (dimensões em mm) [50] 102	
Figura 105 - Localização dos calços calibrados	103
Figura 106 - Fabrico dos calços: a) lâminas e fitas de aço, b) limpeza com acetona e c) calços para criar a pré-fenda inicial.....	103
Figura 107 - Adesivo cianoacrilato (Loctite SuperCola 3 [®]).....	104
Figura 108 - Colocação dos calços no forno	104
Figura 109 - Granalhagem dos substratos: a) substratos dentro da granalhadora e b) substratos a serem granalhados.....	105
Figura 110 - Substratos para provetes DCB granalhados e desengordurados	105
Figura 111 - Colagem dos calços: a) aplicação do calço com lâmina que criará a pré-fenda inicial e b) substratos inferiores com os calços colados.....	106
Figura 112 - Aplicação do adesivo no substrato inferior (provetes DCB)	106
Figura 113 - Provetes DCB com pinças para aplicação de pressão durante a cura	107
Figura 114 - Remoção do excesso de adesivo de um provete DCB com uma mó	108
Figura 115 - Obtenção de dobradiças: a) corte com um serrote e b) dobradiças cortadas	108
Figura 116 - Provetes com dobradiças coladas	108
Figura 117 - Escalas coladas num provete DCB	109
Figura 118 - Provetes preparados para ensaio	109
Figura 119 - <i>Setup</i> do ensaio DCB	111
Figura 120 - Último registo fotográfico de um ensaio (até cerca de 40 mm de escala)	111
Figura 121 - Curvas $P-\delta$ obtidas pelo ensaio DCB	113
Figura 122 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P2 através dos métodos CBBM, CCM e CBT	113
Figura 123 - Aspeto das superfícies de rotura dos provetes DCB: a) provete P1, b) provete P2, c) provete P3, d) provete P4, e) provete P5 e f) provete P6	114

Figura 124 - Corte de substratos para provetes ENF na guilhotina mecânica.....	116
Figura 125 - Substratos ENF após granalhagem	117
Figura 126 - Provetes ENF com pinças para aplicação de pressão durante a cura.....	117
Figura 127 - Remoção dos calços	118
Figura 128 - Marcação do centro do provete	118
Figura 129 - Marcação de um dos pontos de apoio sobre a mesa	119
Figura 130 - Ensaio ENF: a) <i>setup</i> do ensaio e b) pormenor do dispositivo de carga	120
Figura 131 - Folhas de Teflon®	121
Figura 132 - Curvas P- δ obtidas pelo ensaio ENF	122
Figura 133 - Curva R obtida pelo ensaio ENF para o provete P1 através do método CBBM	123
Figura 134 - Tensão de rotura dos provetes maciços P3, P4, P5, e P6.....	125
Figura 135 - Tensão de rotura ao corte dos provetes P1 a P6	128
Figura 136 - Valores de G_{Ic} de todos os provetes pelos vários métodos.....	130
Figura 137 - Média e desvio padrão de G_{Ic} pelos diferentes métodos.....	132
Figura 138 - Gráfico representativo dos valores de G_{Ic} de todos os provetes pelo método CBBM	133

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Calendarização do projeto.....	3
Tabela 2 - Propriedades dos materiais poliméricos [2]	14
Tabela 3 - Classificação dos adesivos através da composição química [9]	15
Tabela 4 - Características técnicas do adesivo SikaForce® - 7752 L60 [47].....	68
Tabela 5 - Dimensões dos provetes <i>bulk</i> (medição no dia 12 de Março de 2014)	78
Tabela 6 - Dimensões dos provetes <i>bulk</i> (medição no dia 19 de Março de 2014)	79
Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas à tração	88
Tabela 8 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte	101
Tabela 9 - Pré-fenda medida nos provetes DCB	110
Tabela 10 - Valores de G_{Ic} obtidos pelo método CCM, CBT e CBBM	115
Tabela 11 - Pré-fenda medida nos provetes ENF	119
Tabela 12 - Valores de G_{IIc} obtidos pelo método CBBM.....	124
Tabela 13 - Comparação das propriedades mecânicas à tração	126
Tabela 14 - Comparação das propriedades mecânicas ao corte	129
Tabela 15 - Comparação das propriedades de fratura à tração.....	132
Tabela 16 - Comparação das propriedades de fratura ao corte	134

Nomenclatura

Caracteres Romanos

A - Área da secção transversal inicial do provete

a - Comprimento de fenda

a_e - Comprimento equivalente de fenda

b - Largura da junta; Largura do provete

C - Flexibilidade

C_0 - Flexibilidade inicial

dA - variação de superfície da fenda

$d_{adesivo}$ - Deslocamento do adesivo

$d_{substrato}$ - Deslocamento do substrato

$d_{transdutor}$ - Deslocamento do transdutor

E ; E_x - Módulo de elasticidade longitudinal ou módulo de Young

E_f - Módulo de flexão equivalente

G - Módulo de elasticidade transversal ou módulo de corte, quando se refere a ensaios ao corte, e taxa de libertação da energia, quando se refere a ensaios de fratura

G_c - Taxa crítica de libertação de energia ou tenacidade à fratura

G_{Ic} - Taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo I

G_{IIc} - Taxa crítica de libertação de energia de deformação em modo II

h - Distância entre extremidades dos dois entalhes; Altura de cada aderente

I - Momento estático de segunda ordem da viga

K - Fator de intensidade de tensão

l - Comprimento de sobreposição

M_f - Momento fletor

P - Força ou carga aplicada

$P_{\text{máx}}$ - Força ou carga aplicada

P_u - Carga aplicada por unidade de largura

t - Espessura da camada adesiva

t_{adesivo} - Espessura do adesivo

t_p - Espessura do provete

$t_{\text{substrato}}$ - Espessura do substrato

U - Energia de deformação interna do sólido~

W - Trabalho realizado pelas forças exteriores

Caracteres Gregos

θ_0 - Rotação relativa dos aderentes na ponta da fenda

θ_p - Rotação relativa dos aderentes na linha de carregamento

ν - Coeficiente de Poisson

ν_0 - Deslocamento de corte entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda

γ - Deformação de corte

$\gamma_{\text{máx}}$ - Deformação de corte máxima

δ - Deslocamento

Δ - Variação; Fator de correção do comprimento de fenda

ε - Deformação à tração

σ - Tensão à tração

σ_r - Tensão de rotura à tração

σ_R - Tensão remota aplicada

σ_y - Tensão limite de elasticidade ou tensão limite elástico

τ - Tensão de corte

$\tau_{\text{máx}}$ - Tensão de corte máxima

τ_r - Tensão de rotura ao corte

Abreviaturas

4ENF - *Four-Point End Notched Flexure*

AISI - *American Iron and Steel Institute*

Al - Alumínio

ASTM - *American Society for Testing and Materials*

CBT - *Corrected Beam Theory*

CCM - *Compliance Calibration Method*

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

LVDT - *Linear Variable Differential Transducer*

NF - Norma Francesa

TAST - *Thick Adherend Shear Test*

TDCB - *Tapered Double Cantilever Beam*

ZPF - Zona de Processo de Fratura

1 Introdução

1.1 Contextualização

A crescente utilização de adesivos como forma de unir materiais tem vindo a ser incrementada nos últimos anos, devido à necessidade constante de combinar resistência com leveza e ainda um elevado tempo de vida das estruturas, contribuindo para isso a elevada resistência à fadiga inerente a esta tecnologia. Ainda não está tão desenvolvida como outras técnicas de ligação como a soldadura, a rebitação ou as ligações aparafusadas, mas, no entanto, a ligação por adesivos tornou-se numa solução quando se pretende unir diferentes materiais, mesmo aqueles mais suscetíveis de desenvolver corrosão galvânica.

Normalmente, as ligações adesivas podem estar sujeitas a quatro modos elementares de carregamento, que passam pela tração, corte, arrancamento e clivagem, podendo-se encontrar na prática qualquer combinação ou variação destes, dependendo assim a importância e interesse de se conhecer as diversas propriedades dos adesivos.

Atualmente, a cadência de criação e desenvolvimento de novos adesivos têm sido elevados, existindo a carência de caracterização dos mesmos, o que leva a que muitos destes possam não vir sequer a ser tidos em conta como uma alternativa viável a outros adesivos já conhecidos e normalmente utilizados em aplicações concretas. Não se pretende com isto dizer que um adesivo possa ser melhor ou pior do que outro, mas sim que todos podem ter o seu espaço para aplicação e que quantos mais adesivos forem caracterizados, maior o leque de escolhas para um determinado parâmetro que pode ser tido com fundamental numa aplicação que se deseje realizar. A motivação deste trabalho passa pela completa caracterização e talvez pioneira de um adesivo estrutural recentemente lançado no mercado,

que ainda não foi estudado e que a informação sobre o mesmo é ainda bastante escassa. Com a informação recolhida, é tornada possível a previsão de resistência de juntas com este adesivo por técnicas analíticas e numéricas, com todas as vantagens daí provenientes.

1.2 Objetivos

Este trabalho tem como objetivo principal a caracterização completa das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de alta ductilidade recentemente lançado no mercado, para facilitar a previsão da resistência de estruturas adesivas ligadas com o mesmo. Para este efeito são realizados ensaios de tração, corte, de fratura em modo I e em modo II. É impreterível determinar:

- O módulo de Young, E ;
- O módulo de corte, G ;
- A tensão limite elástico à tração, σ_y , e ao corte, τ_y ;
- A tensão de rotura à tração, σ_r , e ao corte, τ_r ;
- A deformação de rotura à tração, ε , e ao corte, γ ;
- A taxa limite de libertação de energia em modo I, G_{Ic} ;
- A taxa limite de libertação de energia em modo II, G_{IIc} .

Para isso, será necessária a conceção de amostras apropriadas para a realização dos referidos ensaios, utilizando provetes *bulk* ou "osso de cão" como são conhecidos devido à sua geometria, para determinação das propriedades mecânicas à tração, provetes com a geometria *Thick Adherend Shear Test* (TAST), para determinação das propriedades mecânicas ao corte, provetes *Double-Cantilever Beam* (DCB) e *End-Notched Flexure* (ENF), para determinação das propriedades de fratura em modo I (tração) e em modo II (corte), respetivamente. Como forma de determinar a tenacidade à fratura ou taxa crítica de libertação de energia de deformação à tração (G_{Ic}) e corte (G_{IIc}) utilizaram-se métodos que requerem a medição do comprimento de fenda e métodos baseados no comprimento de fenda equivalente.

1.3 Calendarização

Por forma a organizar o trabalho a ser desenvolvido, realizou-se uma calendarização das várias etapas a serem executadas no decorrer da presente dissertação (Tabela 1).

Tabela 1 - Calendarização do projeto

ID	Designação das tarefas	Duração	Dez-13	Jan-14	Fev-14	Mar-14	Abr-14	Mai-14	Jun-14	Jul-14	Ago-14	Set-14	Out-14
1	Pesquisa/Introdução	3 sem	49	50	51	52							
2	Revisão Bibliográfica/Estado da arte	11 sem											
3	Seleção do adesivo	1 sem											
4	Ensaio DCB - Fabrico dos provetes	2 sem											
5	Ensaio DCB - Realização dos ensaios	1 sem											
6	Ensaio ENF - Fabrico dos provetes	1 sem											
7	Ensaio ENF - Realização dos ensaios	1 sem											
8	Ensaio à tração - Fabrico dos provetes	1 sem											
9	Ensaio à tração - Realização dos ensaios	2 sem											
10	Ensaio ao corte - Fabrico dos provetes	1 sem											
11	Ensaio ao corte - Realização dos ensaios	1 sem											
12	Tratamento de dados	10 sem											
13	Análise de resultados	10 sem											
14	Conclusões	2 sem											
15	Elaboração do relatório	38 sem											

1.4 Organização do relatório

A presente dissertação foi organizada em 4 capítulos, da seguinte forma:

Capítulo 1 - É feita a contextualização da presente dissertação na área dos adesivos, descritos os objetivos propostos, a calendarização das tarefas e definidos os principais conteúdos referentes a cada capítulo.

Capítulo 2 - É realizada uma revisão bibliográfica ou estado da arte sobre adesivos, sendo abordadas e dando a conhecer as suas vantagens e desvantagens, tipos de ligação adesiva e esforços a que podem estar sujeitas, famílias de adesivos estruturais, tipos de ensaios utilizados para determinação de propriedades dos adesivos e metodologias utilizadas para obtenção das mesmas.

Capítulo 3 - Apresenta-se todo o desenvolvimento do trabalho realizado, envolvendo a primeira abordagem ao adesivo selecionado, produção dos provetes, descrição e realização dos ensaios realizados, bem como a análise dos resultados experimentais obtidos, críticas e comparação com elementos bibliográficos.

Capítulo 4 - São apresentadas as conclusões relevantes deste trabalho, demonstração das propriedades obtidas e respetivos desvios padrão, e sugestões de trabalhos futuros.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

Com o passar dos anos, os métodos de ligação de materiais têm vindo a sofrer algumas alterações/evoluções, possuindo hoje em dia um vasto leque de escolhas apropriadas para cada tipo de aplicação e também para o(s) tipo(s) de material(ais) que se deseja ligar. Este leque vai desde as ligações por parafusos, rebites ou soldadura, até ao método de ligação por intermédio de um adesivo. Cada um destes métodos de ligação tem as suas vantagens e desvantagens inerentes, não se podendo afirmar, em geral, qual o melhor ou pior em termos de eficiência de ligação, mas sim qual o melhor ou pior, mediante o tipo de estrutura que se pretende ligar, as restrições de acessibilidade das juntas ou os tipos de materiais em causa.

O incremento no uso de adesivos ficou a dever-se, em grande parte, ao crescimento das indústrias aeronáutica e naval devido ao elevado recurso a materiais compósitos, estando estas duas tecnologias muito associadas [1]. Na Figura 1 é possível verificar algumas das aplicações mais correntes na área da aeronáutica.

Junta adesiva, junta colada ou simplesmente ligação adesiva, são os termos normalmente utilizados para se designar uma união por intermédio de um adesivo. Aos membros estruturais da junta, que são ligados entre si através do adesivo, dá-se o termo de substratos ou aderentes, sendo que o termo substrato é geralmente utilizado para designar os componentes da junta antes da ligação, e o termo aderentes como designação após a colagem. Na prática, estes dois termos são usados sem distinção [2].

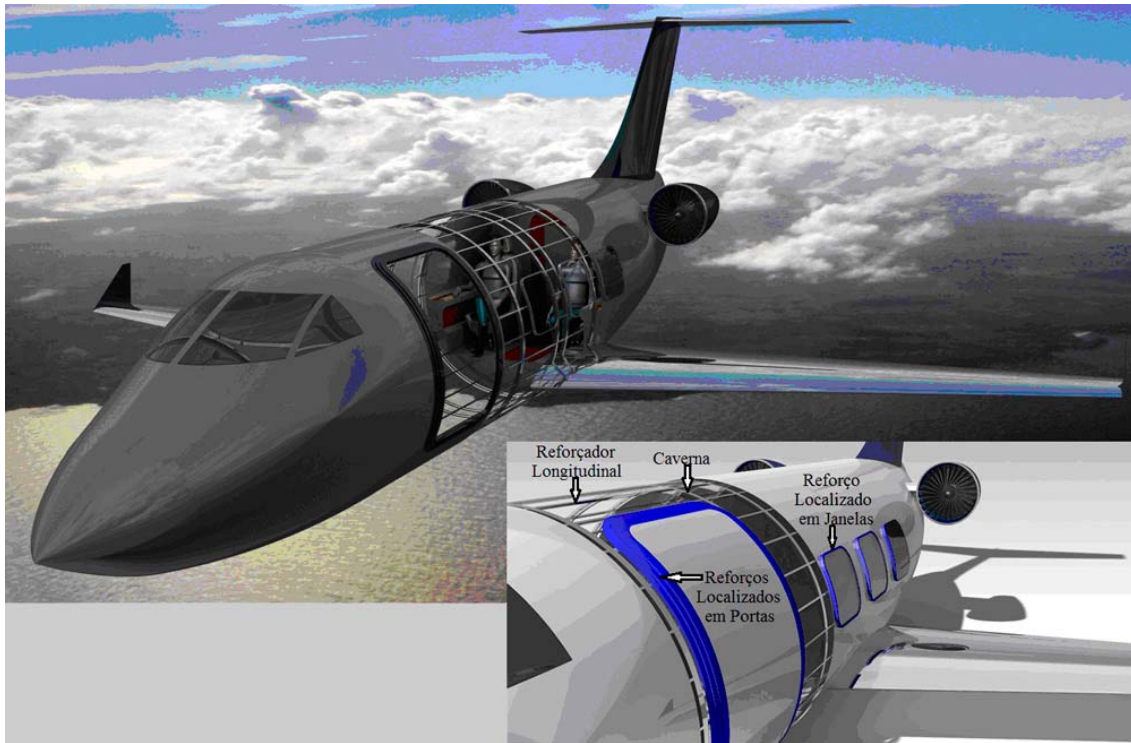


Figura 1- Estrutura de fuselagem reforçada (ligação de chapas por intermédio de adesivo) [3]

Da mesma forma que são referenciadas as vantagens da utilização de juntas coladas é importante não deixar de enaltecer as limitações que lhes estão associadas. De seguida apresentam-se algumas vantagens e desvantagens inerentes a este tipo de ligação [4].

Vantagens:

- ✓ Distribuição e redução mais uniforme de tensões;
- ✓ Capacidade de amortecimento de vibrações;
- ✓ Possibilidade de ligação de materiais diferentes;
- ✓ Ligações eficientes de chapas (espessuras finas);
- ✓ Projeto mais flexível;
- ✓ Estruturas com contornos complexos;
- ✓ Contato contínuo entre superfícies;
- ✓ Redução de custos (possibilidade de automatização);
- ✓ Estruturas mais leves;
- ✓ Resistência elevada à fadiga;
- ✓ Incremento da rigidez e também do isolamento acústico;
- ✓ Permite ligar e vedar em simultâneo, eliminando a possibilidade de desenvolvimento de corrosão que pode ocorrer numa montagem mecânica;

- ✓ Capacidade para unir formas complexas e superfícies irregulares.

Desvantagens:

- ✓ Necessário prever e projetar a junta de modo a evitar esforços de arrancamento, clivagem e impacto;
- ✓ Não utilizar geometrias propícias a tensões localizadas;
- ✓ Durabilidade limitada em condições extremas;
- ✓ Fraca resistência à temperatura e ao fogo;
- ✓ Tempo de ligação (endurecimento);
- ✓ Necessidade de uma cuidada preparação de superfícies;
- ✓ Controlo de qualidade e segurança mais difíceis;
- ✓ Inexistência de critério de dimensionamento;
- ✓ Fraca resistência ao arrancamento;
- ✓ Fraca resistência à propagação de fissuras de alguns adesivos;
- ✓ Processo tipicamente irreversível;
- ✓ Resistência e durabilidade fortemente dependentes das condições de processamento;
- ✓ Flamabilidade e toxicidade de alguns adesivos;
- ✓ Podem ser mais caras que a ligação mecânica.

2.1.1 Esforços e tipos de rotura em juntas adesivas

As ligações adesivas podem estar sujeitas a diversos tipos de esforços, existindo essencialmente quatro modos fundamentais de carregamento: tração/compressão, corte, clivagem e arrancamento.

Esforços de tração e compressão

As tensões de tração surgem quando são aplicadas forças perpendicularmente ao plano de colagem (Figura 2), sendo a sua distribuição uniforme ao longo do comprimento de colagem. Na prática, a espessura da cola é difícil de controlar e as forças raramente são rigorosamente perpendiculares ou uniformes, o que origina tensões indesejáveis de clivagem ou de arrancamento.

As forças de compressão são como as de tração, mas em sentidos opostos (Figura 3), sendo que estas tendem a comprimir um aderente contra o outro. Caso a distribuição de tensões seja uniforme, a junta adesiva jamais romperá, não precisando praticamente de adesivo. A este tipo de solitação chama-se "compressão pura" [1].

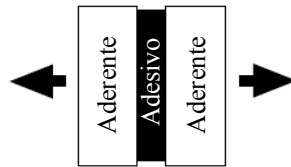


Figura 2 - Esforço de tração [4]

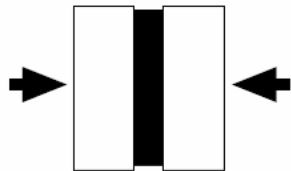


Figura 3 - Esforço de compressão [4]

Esforços de corte

As tensões de corte surgem sempre que as forças são aplicadas no plano de colagem, provocando escorregamento entre os dois aderentes (Figura 4). A distribuição das tensões não é uniforme, sendo os extremos da junta sujeitos a um maior nível de tensões, em comparação com a região central da sobreposição, que pouco contribui para a sustentação da carga. O aumento da largura de sobreposição terá um efeito benéfico superior ao aumento do comprimento, no que à resistência da junta diz respeito (Figura 5) [2]. Tal acontece, devido às tensões máximas estarem situadas nas extremidades da junta, pelo que o aumento da largura beneficiará fortemente a resistência, enquanto o aumento do comprimento de sobreposição provocará um efeito mais acentuado de deformação diferencial dos aderentes [2].

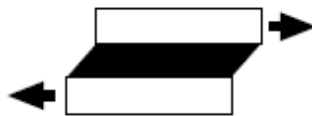


Figura 4 - Esforço de corte [4]

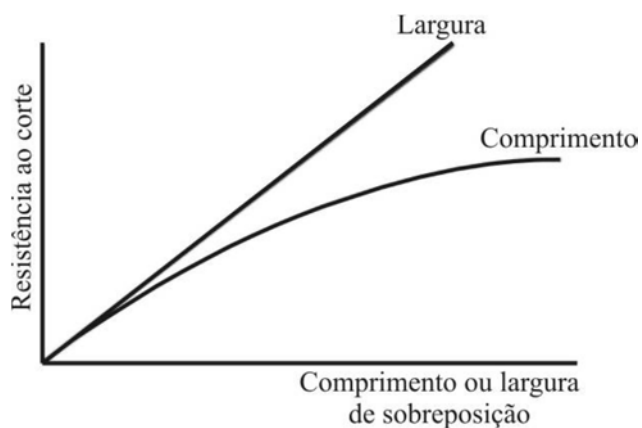


Figura 5 - Efeito do comprimento e largura de sobreposição na resistência ao corte [2]

Esforços de clivagem e arrancamento

As tensões de clivagem e arrancamento são o principal inimigo das juntas adesivas, sendo esforços a evitar sempre que se pretenda unir dois materiais por intermédio de um adesivo. Define-se clivagem como sendo o resultado da tensão provocada quando são aplicadas forças numa das extremidades da junta, de forma a separar os substratos (Figura 6). O resultado dos esforços de arrancamento é bastante idêntico ao verificado pelos esforços de clivagem, sendo que neste caso um ou ambos os substratos são flexíveis, podendo originar um ângulo de separação bastante superior comparativamente à clivagem (Figura 7). Como tal, a concentração de esforços ocorre numa zona localizada junto a uma das extremidades da ligação [1, 2].



Figura 6 - Esforço de clivagem [4]

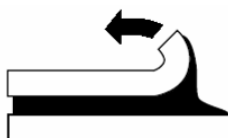


Figura 7 - Esforço de arrancamento [4]

A ductilidade e a rigidez têm enorme influência na resistência da junta a este tipo de esforços, sendo que quanto mais frágeis e rígidos são os adesivos, mais sensíveis aos esforços de clivagem e arrancamento se tornam. Isto deve-se principalmente à falta de flexibilidade deste

tipo de adesivo, que não consegue transferir os esforços para a zona interior do mesmo, conduzindo a uma menor resistência da junta [2].

Os esforços aplicados a juntas adesivas podem gerar diversos tipos de rotura. A norma ASTM D 5573 - 99 [5] classifica os modos de rotura em juntas de plástico reforçado com fibras (PRF), prevendo sete modos de rotura. No entanto, os mais frequentes são:

- Rotura adesiva (interface entre o aderente e o adesivo) (a);
- Rotura coesiva (interior do adesivo) (b);
- Rotura de um dos aderentes (c);
- Rotura mista (d).

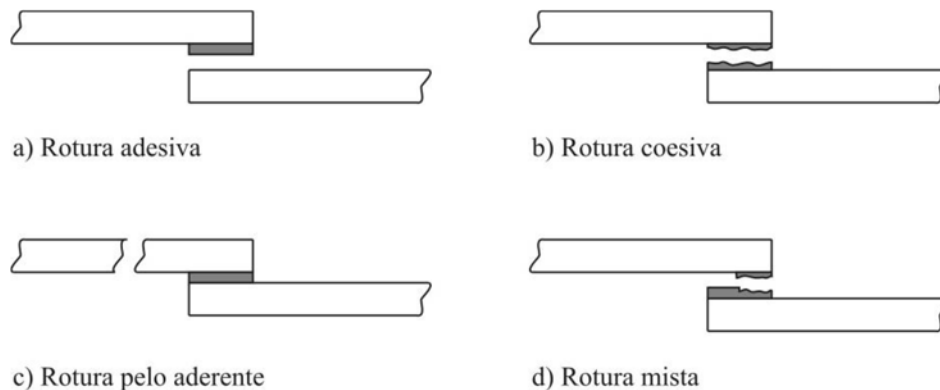


Figura 8 - Modos de rotura em juntas adesivas [2]

Rotura adesiva

A rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes, ficando esse aderente sem resíduos de adesivo. O adesivo fica totalmente no outro aderente, sendo indício de falha na adesão provocada possivelmente por uma má preparação da superfície. Na realidade, o que aparentemente pode parecer uma rotura adesiva, pode nem o ser, pois por vezes existe uma fina película de adesivo na superfície do aderente que inicialmente se possa ter considerado sem adesivo. Nestes casos, as roturas são consideradas coesivas e não adesivas [2].

Rotura coesiva

A rotura coesiva ocorre quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo, estando ambas as superfícies dos aderentes cobertas por adesivo [2].

Rotura de um dos aderentes

Uma junta deve ser projetada de modo que a rotura nunca ocorra pelo adesivo. Uma junta corretamente projetada e concebida é aquela onde a rotura ocorra no próprio substrato [1].

Rotura mista

A rotura mista não é mais do que uma combinação entre rotura adesiva e rotura coesiva. Este tipo de rotura pode indicar uma limpeza deficiente numa dada região das superfícies a ligar [2].

2.1.2 Tipos de ligações adesivas

As juntas adesivas podem ter inúmeras configurações, sendo as mais comuns a junta de sobreposição simples (JSS), a junta de sobreposição dupla (JSD), as juntas com chanfro e as juntas em degraus (Figura 9). Destas juntas, a mais estudada em termos experimentais e teóricos tem sido a JSS, devido à sua facilidade de fabricação. Contudo, este tipo de juntas apresenta um grave problema na análise de tensões, pois o carregamento não é colinear, introduzindo flexão nos substratos. É aqui que aparecem as juntas de sobreposição dupla, as juntas com chanfro e as juntas em degrau, diminuindo o arrancamento provocado (não intencional) pelas juntas de sobreposição simples. Infelizmente, algumas das alternativas às JSS são bastante morosas e dispendiosas na execução, sendo um entrave à sua prática.

De todos os tipos de juntas, as de topo a topo são as mais simples de fabricar, embora não apresentem uma eficácia elevada, devido à

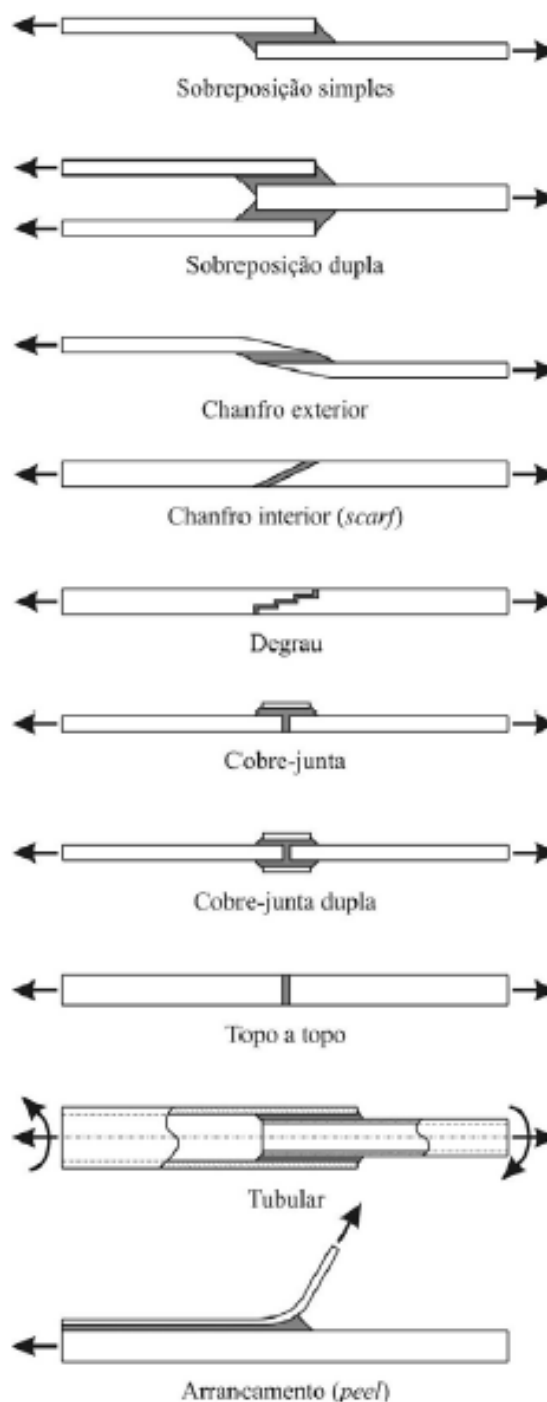


Figura 9 - Tipos de juntas adesivas vulgarmente utilizadas [13]

ocorrência de elevadas concentrações de tensões de arrancamento e de corte nas extremidades da ligação [2].

Existem as chamadas juntas em tira ou cobre-junta. A junta com apenas uma tira está sujeita a esforços de arrancamento, devido à carga não colinear com a ligação adesiva. A articulação com duas tiras ou cobre-junta dupla reduz o momento-fletor, sendo por isso preferível.

As juntas tubulares ou cilíndricas são utilizadas quando se pretende colar varões e tubos, sendo uma solução vantajosa relativamente às juntas topo a topo, pois consegue-se uma maior área resistente e uma diminuição do efeito de arrancamento.

Por fim, a colagem de substratos finos a componentes espessos introduz geralmente forças de arrancamento (*peel*) [6].

2.2 Adesivos estruturais

Os adesivos utilizados nas diferentes aplicações estruturais são materiais poliméricos e podem ser classificados de diversas formas, podendo ser distinguidos como produtos naturais ou sintéticos [1]. Quando um adesivo provém de produtos naturais, este torna-se um subproduto de origem animal ou agrícola, e pode ser aplicado nas colagens de papel ou madeiras, pois são adesivos biodegradáveis [7]. Um adesivo sintético tem origem em materiais feitos pelo Homem, tais como polímeros, com vista a aplicações estruturais muito exigentes [7].

No entanto, este tipo de classificação torna-se demasiado abrangente para muitas aplicações, existindo outras classificações de acordo com os seus objetivos [1, 7, 8, 9]:

- Função;
- Composição química;
- Método de aplicação e apresentação;
- Forma física;
- Método e tempo de cura;
- Substratos e ambiente de trabalho;
- Custo;
- Aplicação;

- Entre outros.

Destes métodos, aquele que é correntemente utilizado (tanto na indústria como em bibliografia) é a classificação segundo a composição química. Esta, aplicada a produtos sintéticos, pode ser dividida segundo quatro grupos característicos (sendo que um deles é a combinação de dois ou mais) dos materiais poliméricos [2, 7, 10]:

- Resinas termoendurecíveis: epóxidos, poliésteres, poliimidas, fenólicas, etc.;
- Resinas termoplásticas: celulósicas, poliamidas, vinílicas, acrílicas, etc.;
- Elastómeros: silicones, poliuretanos, neoprenos, nitrilos, etc.;
- Ligas adesivas (híbridos): combinação de pelo menos dois dos outros grupos.

As resinas termoendurecíveis curam com a temperatura, não amolecendo, possuem uma estrutura fortemente reticulada, grande rigidez após polimerização, embora se possam degradar a temperaturas elevadas [2].

As resinas termoplásticas têm uma temperatura de serviço mais limitada do que os termoendurecíveis, possuem uma estrutura molecular linear ou ramificada e podem ser fundidas pela adição de calor. Podem também ser moldadas e remoldadas usando técnicas convencionais, permitindo assim uma fácil deposição nas juntas a serem coladas [1, 2].

Quanto aos elastómeros, as características que melhor os classificam são a elevada tenacidade e capacidade de deformação (quando tracionados ou comprimidos, retomam o seu comprimento inicial após a remoção da carga), absorvendo muita energia e dando uma boa resistência a juntas submetidas a carregamentos não uniformes. Os elastómeros, tanto podem ser materiais termoplásticos como termoendurecíveis, consoante a sua composição, e apresentam boa resistência ao arrancamento e uma boa flexibilidade, que permite ligar substratos com coeficientes de expansão térmica diferentes [9].

Por fim, as ligas adesivas (chamados adesivos híbridos) são realizadas combinando resinas termoendurecíveis, termoplásticas e/ou elastómeros num só adesivo, podendo também, se necessário, recorrer à utilização de aditivos para enaltecer propriedades de maior interesse. Foram desenvolvidos com vista a tirar partido das melhores propriedades de cada componente que compõem o adesivo final (adesivo híbrido), sendo ideais para aplicações de alta resistência a elevadas temperaturas [7, 9].

Cada um destes grupos apresenta pontos fortes e fracos nas suas propriedades, podendo de uma forma resumida serem comparados através da Tabela 2.

Tabela 2 - Propriedades dos materiais poliméricos [2]

MATERIAL	PROPRIEDADES			
	Flexibilidade (Resiliência)	Resistência Mecânica	Resistência Térmica	Resistência a Agentes Químicos
Resinas Termoendurecíveis	má	boa	boa	boa
Resinas Termoplásticas	média	mediocre	mediocre	boa
Elastômeros	muito boa	má	variável	mediocre

Como complemento à classificação dos adesivos mediante a sua composição química, a Tabela 3 demonstra de uma forma sintetizada as características e tipos de aplicações que podem ser relacionadas com cada um dos grupos.

Tabela 3 - Classificação dos adesivos através da composição química [9]

Classificação	Termoplástico	Termoendurecível	Elastômero	Híbridos
Famílias	Celulósicos, poliâmidas, vinílicos, acrílicos	Epóxidos, poliésteres, poliimidas, fenólicos	Silicones, poliuretanos, neoprenos, nitrilos	Epóxido-nylon, epóxido-polissulfido, epóxido-fenólico, epóxido-vinilo, epóxido-poliuretano, epóxido-nitrilo, nitrilo-fenólico, vinilo, fenólico, neopreno-fenólico
Forma mais utilizada	Líquido, mas por vezes em filme	Líquido, mas, também, todas as formas comuns	Líquido, por vezes em filme	Líquido, pasta, filme
Características da ligação	Boa para 65°C-90°C; fraca resistência à fluência; baixa resistência ao arrancamento	Boa para 90°C-260°; boa resistência à fluência; baixa resistência ao arrancamento	Boa para 65°C-200°C; nunca funde completamente; baixa resistência; elevada flexibilidade	Características dependem da combinação dos outros grupos; geralmente maior resistência numa maior gama de temperaturas
Principal tipo de utilização	Juntas com solicitações reduzidas, alterações geométricas e reforços para aumento de rigidez	Juntas com grandes solicitações a temperaturas relativamente elevadas	Juntas com solicitações reduzidas de materiais leves; juntas solicitadas à flexão	Para condições adversas de temperatura, humidade e carregamento; por vezes à custa de um custo mais elevado; uso militar
Materiais normalmente ligados	Abrange todos os materiais, com maior ênfase nos não-metálicos (madeira, couro, cortiça, papel, etc.)	Maioria dos materiais em utilizações estruturais	Sem modificações para borracha, tecido, papel, couro, plásticos	Metais, cerâmicos, vidros, plásticos termoendurecíveis; o material dos aderentes não é tão importante como o projeto da junta e as condições de serviço (temperatura e esforços aplicados)

2.2.1 Caracterização dos adesivos estruturais

Pode-se definir um adesivo como sendo um material polimérico que, assim que aplicado em superfícies, pode ligá-las, resistindo à sua separação pela ação combinada de diferentes forças adesivas e coesivas. Por sua vez, um adesivo estrutural é um adesivo que resiste a forças consideráveis, permitindo que a resistência ao corte da ligação seja, pelo menos, de aproximadamente 7 MPa. Este tipo de adesivo é responsável pela resistência e rigidez da estrutura [1].

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Os adesivos estruturais são adesivos que são usados em aplicações permanentes, necessitando assim de elevada resistência, podendo ser consideradas as seguintes famílias [9]:

- Epóxicos;
- Fenólicos;
- Acrílicos;
- Poliaromáticos;
- Poliuretanos.

2.2.2.1 Epóxicos

Este tipo de adesivo tem vindo a ser fortemente utilizado na indústria de construção mecânica dada a sua elevada versatilidade, aderindo bem a muitos substratos, excetuando alguns polímeros e os elastómeros, devido à sua baixa energia de superfície. Possuem uma elevada resistência mecânica, à tração e ao corte, são de fácil aplicação, mas têm uma fraca resistência ao arrancamento, a não ser que sejam modificados com um polímero mais tenaz [8, 9]. No entanto, em geral, são muito rígidos e apresentam tempos de cura longos [11].

Os epóxicos podem ser comercializados sob a forma de um só componente ou de dois componentes, sendo compostos em ambos os casos por uma resina epóxida e um endurecedor, também conhecido por agente de cura, podendo ser disponibilizados como adesivos líquidos, pastas sólidas e filmes.

No caso de um só componente, o endurecedor é incorporado na resina e o processo de cura tem de ser efetuado normalmente a quente (temperaturas superiores a 120°C) de forma a ativar o catalisador. Após a sua ativação, o processo de cura é então iniciado.

Para os adesivos de dois componentes, a cura pode ser processada a partir dos 5°C ou até à temperatura ambiente (como em muitos casos), devendo-se ter sempre especial atenção para que se consiga garantir as quantidades exatas de resina e endurecedor (sua relação), bem como uma mistura homogénea entre os mesmos. No entanto, o processo de cura poderá ser acelerado pelo aumento da temperatura a que são curados [2].

Contudo, torna-se incorreto definir adesivo "epóxico" de uma maneira generalizada, como se todos estes adesivos tivessem propriedades similares. Dependendo do tipo de resina e agente de cura (endurecedor) utilizado, assim como da formulação específica dos mesmos, podem oferecer ao utilizador uma variedade quase infinita de propriedades, bem como uma ampla diversidade de aplicação e características de cura [9]. As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser então modificadas pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfido, fenólico, etc.) ou por um elastómero (poliuretano ou nitrilo) [2].

Epóxico-poliamida (epóxico-nylon)

A resina de poliamida tem a função combinada de endurecedor e agente flexibilizante, sendo tanto mais flexível quanto maior a razão entre a quantidade de resina poliamida e resina epóxico. Estes adesivos apresentam maior flexibilidade e resistência ao arrancamento quando comparados com adesivos de epóxico não modificados. Possuem boas características a baixas temperaturas e boa resistência à fadiga e ao impacto, sendo o principal inconveniente a fraca resistência à humidade [2, 9].

Epóxico-polisulfido

São vocacionados para aplicações sujeitas a choques e vibrações, apresentando elevada resistência ao impacto, boa resistência química e bom comportamento quando expostos a intempéries [2].

Epóxico-fenólico

A resistência a elevadas temperaturas é melhorada através da resina fenólica, sendo as maiores limitações a resistência ao arrancamento e ao impacto, bem como o custo relativamente elevado desta solução [2].

Epóxico-vinilo

A resistência ao impacto e ao arrancamento são melhoradas, embora a resistência a altas temperaturas seja prejudicada [2].

Epóxico-poliuretano

Foram desenvolvidos com o objetivo de se obter o melhor das características dos adesivos epóxico-poliamida e epóxico-polisulfido, possuindo uma boa resistência ao arrancamento, a choques e a vibrações. Também apresentam boa resistência à fadiga [2].

Epóxico-nitrilo

Adesivos com boa resistência ao arrancamento, permitindo vastas temperaturas de utilização (-55 a 120°C), sendo utilizados na construção e manutenção de aviões comerciais a jato (sob a forma de filmes) [2].

2.2.2.2 Fenólicos

Os adesivos fenólicos são usados principalmente para colar madeira, sendo também usados para ligar este material a metal, originando uma ligação metal-madeira que, apesar de tudo, se torna frágil e tende a estilhaçar sob impacto ou vibração. Possuem boa resistência mecânica, ao calor e boa estabilidade dimensional, bem como elevada resistência à humidade [9]. As principais limitações estão na baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e grande fragilidade. Com vista à resolução destas limitações, têm sido desenvolvidos adesivos híbridos de resina fenólica com uma resina vinílica ou um elastómero (nitrilo ou neopreno) [2].

Nitrilo-fenólicos

Possuem elevada resistência ao corte, arrancamento e fadiga, bem como ao impacto a ainda uma boa resistência à temperatura. Esta, é tanto maior, quanto maior for a temperatura de cura [9].

Vinilo-fenólicos

As características mecânicas destes adesivos são ainda superiores aos nitrilo-fenólicos, sendo os adesivos estruturais de primeira escolha para colar metais. No entanto, a temperatura máxima de serviço é inferior devido à existência de constituintes termoplásticos [9].

Neopreno-fenólicos

Estes adesivos podem resistir a tensões prolongadas devido à sua elevada resistência à fluência. No entanto, a resistência ao corte é inferior à dos outros adesivos fenólicos modificados e tornam-se muito sensíveis a ambientes adversos [9].

2.2.2.3 Acrílicos

Na família dos adesivos acrílicos fazem parte os adesivos anaeróbicos, os cianoacrilatos e os acrílicos modificados.

Anaeróbicos

Os anaeróbicos são conhecidos por serem fáceis de manusear, terem uma cura rápida à temperatura ambiente e um custo por kg bastante elevado, sendo este diluído assim que aplicado, devido à reduzida quantidade de adesivo necessária para se proceder a uma colagem correta. No entanto, conforme a própria designação "anaeróbico" indica, estes só curam quando o ar é excluído da resina. Têm a vantagem de poderem ligar todos os metais comuns, vidro, cerâmicos e plásticos termoendurecíveis, sendo normalmente utilizados na fixação de peças de geometria cilíndrica. A preparação da superfície não necessita de grandes cuidados e possuem boa resistência à humidade e solventes [1, 2, 9].

Cianoacrilatos

São normalmente conhecidos como colas instantâneas, supercolas ou, ainda, por cola tudo. A sua grande vantagem (tempo de cura reduzido) torna-se também numa desvantagem por impedir a colagem de grandes áreas, sendo também frágil e possuir uma baixa capacidade de preencher espaços. Aderem bem a muitos substratos, possuindo uma boa resistência ao corte, mas possuem uma baixa resistência ao calor e à humidade [1, 2, 9].

Acrílicos modificados

Devido à sua rápida cura e alta resistência (20-35 MPa), os acrílicos são usados em operações altamente automatizadas, possuindo uma boa resistência ao arrancamento, impacto e ao corte numa ampla gama de temperaturas, possuindo, ainda, uma boa resistência à alta humidade. A resistência mecânica é afetada pelas elevadas temperaturas, estando este adesivo sujeito a degradação [1, 2].

2.2.2.4 Poliaromáticos (adesivos de alta temperatura)

Possuem elevada resistência a temperaturas muito elevadas (superiores a 200°C), sendo grandemente utilizados na indústria aeroespacial, principalmente em aplicações de alta temperatura. O seu processamento torna-se muito difícil, requerendo longos tempos de cura com ciclos de pressão e temperatura elevada, e são frágeis à temperatura ambiente [1, 2].

2.2.2.5 Poliuretanos

Apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes e possuem elevada aderência sobre metais, polímeros (mesmo os difíceis de colar), compósitos e plásticos de engenharia, apresentando baixa contração e longos tempos de cura à temperatura ambiente. Possuem bom desempenho a baixa temperatura, boa tenacidade, molhabilidade, resistência ao arrancamento e à abrasão, a choques e vibrações e, ainda, bom comportamento na presença de humidade. São bastante flexíveis, exigindo uma boa preparação da superfície e uma correta proporção na mistura sendo muito sensíveis à sua variação [2, 12].

2.3 Determinação das propriedades de adesivos

Desde que os adesivos começaram a ser utilizados como forma de juntar materiais, sempre houve a necessidade de definir uma série de testes que pudessem ser realizados a fim de quantificar (ou pelo menos qualificar) a sua adequabilidade na indústria. Vários testes foram propostos e alguns ainda estão em uso, hoje em dia, para caracterizar adesivos estruturais [13]. Para se caracterizar um adesivo é necessário determinar muitos parâmetros, de carácter elástico, plástico e de fratura, onde cada um destes campos envolve a realização de testes específicos para o efeito. Posto isto, deve-se diferir o modo de solicitação, com vista à determinação de cada propriedade: modo I (tração-compressão) ou modo II (corte), devendo na maioria dos casos serem utilizados testes diferentes para cada modo de solicitação [2].

As propriedades dos adesivos podem variar bastante e uma seleção adequada é essencial para se proceder a um correto projeto de uma junta [14]. Além disso, para prever a resistência de uma junta, são fundamentais a distribuição de tensões e um apropriado critério de rotura [15].

Neste ponto, ir-se-á abordar as formas de caracterização das propriedades mecânicas e de fratura dos adesivos, tanto à tração como ao corte. Não se pode dizer que uma forma de

caracterizar propriedades se sobrepõe a outras, mas sim que todas se complementam para, assim, se proceder a uma completa caracterização das propriedades de um determinado adesivo.

Para se caracterizar um adesivo mecanicamente, deve-se realizar pelo menos dois tipos de carregamento (tração e corte são os mais utilizados), sendo normalmente utilizados os ensaios com provetes *bulk* para determinação das propriedades mecânicas à tração, e com provetes TAST para determinação das propriedades mecânicas ao corte. Vários autores demonstraram que as propriedades elásticas obtidas por cada método correlacionam razoavelmente bem. Para um material homogêneo, a relação entre E e G , é demonstrada na Equação (1):

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

onde ν é o coeficiente de Poisson do adesivo. Se o módulo de elasticidade e de corte for determinado através dos ensaios referidos, os valores de ν para a maior parte dos adesivos é superior a 0,3 e inferior a 0,5 [6].

2.3.1 Caracterização das propriedades mecânicas à tração

O ensaio de tração é o ensaio destrutivo por excelência na Engenharia Mecânica. Tal deve-se ao facto da sua fácil e rápida execução, mas também das inúmeras propriedades e resultados que se podem retirar, sendo o tipo de ensaio que apresenta maior bibliografia e estudos dentro da área.

Como não poderia deixar de ser, é também aplicado quando se pretende analisar um determinado adesivo, devendo ser quase primordial, pois através da curva tensão-deformação que resulta do ensaio consegue-se determinar o módulo de elasticidade longitudinal (declive da curva no domínio elástico), a tensão correspondente à transição elasto-plástica (tendo em conta a força correspondente a essa transição), a tensão máxima e a deformação de rotura. Para o cálculo das referidas tensões, deve-se dividir a força nesse instante pela área inicial transversal da zona útil do provete [16]. Esta é a zona onde se prevê a rotura do mesmo.

Em alguns materiais, como é o caso dos aços na sua generalidade, verifica-se um patamar de cedência na zona de transição elasto-plástica.

2.3.1.1 Métodos de ensaio

Existem várias formas de determinar as propriedades de um adesivo à tração, sendo divididas em duas categorias principais: ensaios que utilizam provetes de adesivo maciço (*bulk*) e ensaios de junta adesiva. Tem vindo a ser debatido qual destes métodos é o mais apropriado, havendo quem defenda que as propriedades obtidas através de provetes maciços possam não ser as mesmas que as obtidas através de uma junta, pois os processos de cura destes podem não ser idênticos. Os ensaios em provetes *bulk* e as juntas topo a topo, são os mais utilizados para determinação das propriedades à tração [17].

Tração em provetes de adesivo maciço (*bulk*)

É um dos ensaios mais utilizados para determinar as propriedades à tração, sendo comparável aos ensaios usados em materiais plásticos. As propriedades determinadas são intrínsecas ao próprio material, obtendo uma tensão uniforme e uniaxial, sem que haja influência dos aderentes [17].

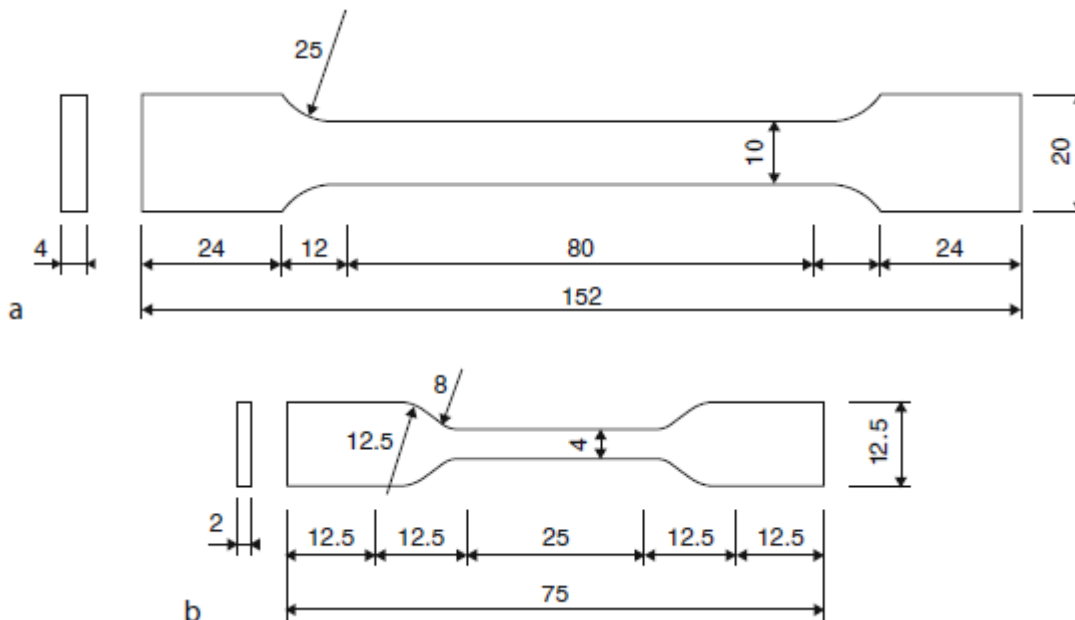


Figura 10 - Provetes de tração de acordo com a norma EN ISO 527-2
a) provete longo, b) provete reduzido (dimensões em mm) [17]

Existem diversas normas para fabricação de provetes *bulk*, sendo uma das mais utilizadas a norma EN ISO 527-2 (Figura 10), que prevê dois tipos de provetes (longo ou reduzido) em que a escolha é determinada pela rigidez do adesivo. Nos adesivos mais rígidos, as deformações são menores, e por conseguinte, o provete que melhor se adapta é o de maiores dimensões. Estes provetes são conhecidos por "osso de cão", devido à sua geometria.

O ensaio consiste em solicitar um provete em bruto, segundo a direção longitudinal do mesmo até à ocorrência de rotura, registando-se uma curva tensão-deformação. Através desta curva, pode-se obter várias propriedades do adesivo em estudo, tais como o módulo de elasticidade longitudinal (ou de Young), a tensão limite de cedência, a tensão de rotura e a deformação de rotura.

Tração em juntas topo a topo

Outro ensaio bastante utilizado para a determinação das propriedades à tração é o ensaio em juntas de ligação topo a topo. O suporte é realizado com dois substratos em material metálico (normalmente aço), que são ligados entre si no topo dos mesmos. A secção dos substratos pode ser retangular ou circular, como mostra o exemplo da Figura 11.

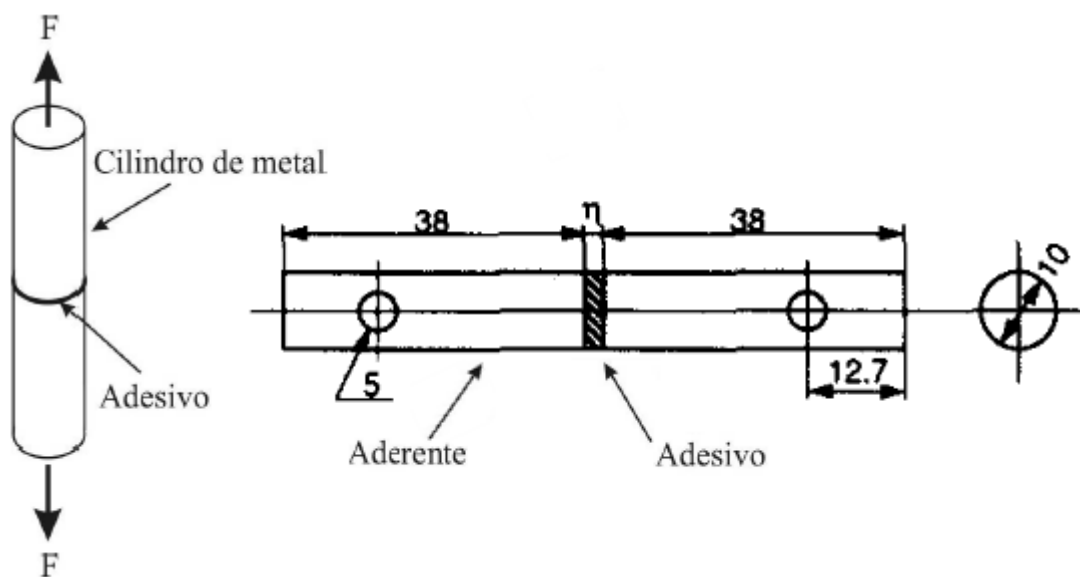


Figura 11 - Junta topo a topo com substratos cilíndricos [2, 18]

Tal como o ensaio com provetes de adesivo em bruto, o corpo de prova é solicitado axialmente até a ocorrência da rotura, embora neste caso não se verifique um estado uniaxial de tensão uniforme. Tal resulta do efeito de Poisson, da constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos, na ocorrência de uma diferença sensível de rigidez entre eles, ou

ainda por desalinhamento dos aderentes. As dificuldades inerentes à obtenção de propriedades mecânicas em tração por este processo estão relacionadas com a precisão no fabrico dos provetes, e no correto alinhamento destes durante a solicitação. Para isso, geralmente torna-se necessária a utilização de *gabarits* de posicionamento. Os pequenos desalinhamentos que possam ocorrer introduzem esforços de flexão que reduzem fortemente as propriedades de resistência.

2.3.1.2 Ensaio de provetes em bruto

Para além de serem utilizados para a determinação das propriedades à tração, os ensaios de provetes em bruto também podem ser usados para determinar propriedades ao corte e à compressão. O maior problema deste tipo de provetes é a facilidade com que podem ocorrer defeitos como vazios ou porosidades, aquando a fabricação dos mesmos. A causa dos mesmos pode estar relacionada com a entrada de ar entre o filme de adesivo e a base do molde, e a progressão destes defeitos está relacionada com o processo de cura, como se pode verificar na Figura 12 [19].

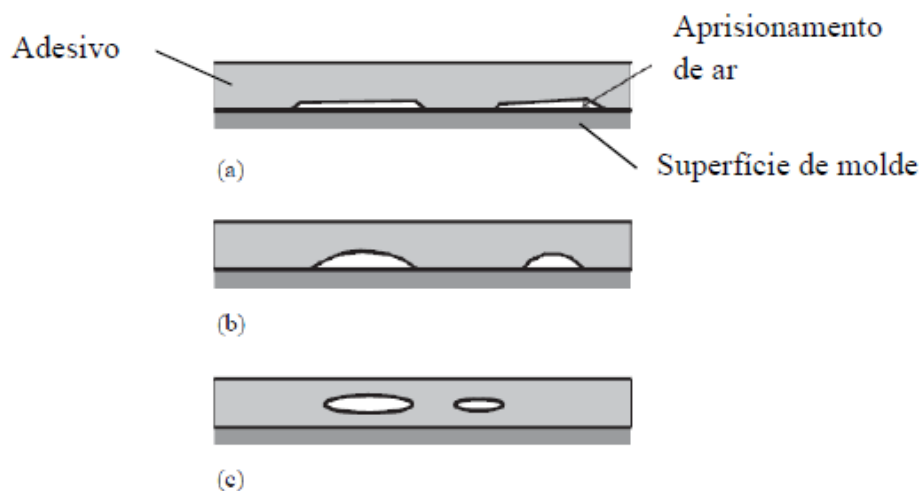


Figura 12 - Aprisionamento de ar entre uma película adesiva e as superfícies do molde: a) aprisionamento inicial, b) deslocamento parcial, c) posicionamento final [19]

A resistência dos provetes é então afetada pela diminuição da área, originando zonas frágeis que podem comprometer, e que normalmente comprometem, a ocorrência da rotura. Quando sujeita a carga, a secção do provete pode ser caracterizada como ilustra a Figura 13, sendo este fenómeno conhecido por "*crazing*" [20].

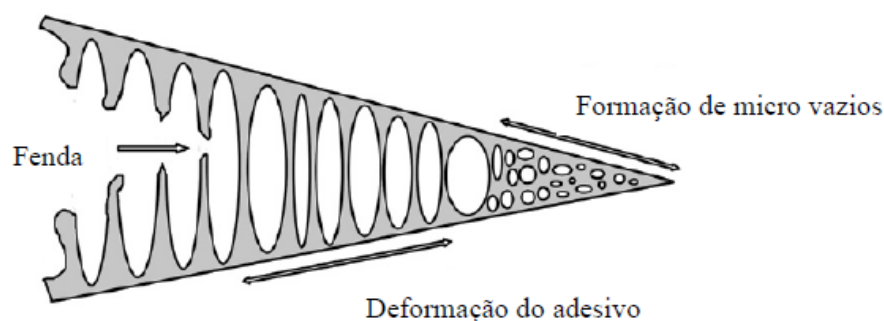


Figura 13 - Fenómeno chamado de "crazing" [20]

No entanto, existem técnicas para a diminuição deste defeito, vulgarmente chamado de "bolhas de ar", como a "técnica de libertação de vácuo" em que a temperatura é elevada até um ponto que o adesivo se torna mais fluido, e as bolhas fluem para fora da sobreposição, ou a "técnica de aplicação de pressão hidrostática" que comprime o ar existente até volumes insignificantes, fazendo com que este se dissolva no adesivo [19].

Os provetes *bulk* são normalmente fabricados através da injeção do adesivo num molde (moldação) ou por pressão entre pratos [17]. O primeiro método é usualmente utilizado para adesivos que se apresentam numa forma relativamente líquida, mas quando o adesivo é demasiado viscoso, a injeção do mesmo torna-se difícil ou até impossível, pelo que se obtêm melhores resultados recorrendo ao segundo método [17].

Fabrico de provetes por moldação

O fabrico de provetes por moldação está dividido em dois métodos: injeção em molde fechado ou moldação em molde aberto. Utiliza-se o primeiro método quando o adesivo é aplicado por intermédio de uma pistola, enquanto o segundo é preferencialmente utilizado em adesivos de aplicação manual [21].

O molde utilizado para este propósito é normalmente metálico e é apresentado conforme a Figura 14. Este é constituído por três partes distintas: (1) placa inferior, que suporta todo o conjunto; (2) placa intermédia, utilizada para garantir a geometria e a espessura do provete; e (3) placa superior, responsável pelo fecho do molde [15].

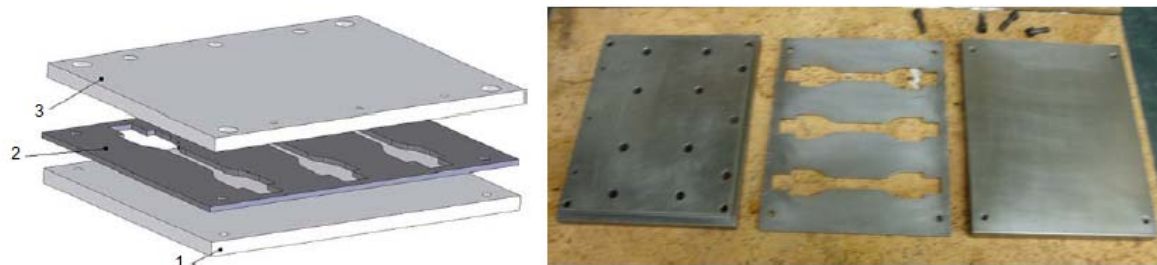


Figura 14 - Molde de para fabricação de provetes em adesivo maciço [15, 22]

Quando se utiliza a injeção em molde fechado, a placa superior tem mais duas funções, sendo utilizada para a injeção do adesivo, através dos orifícios de maior diâmetro, e a libertação do ar acumulado no interior do molde, através dos furos de menor diâmetro (Figura 15) [17].

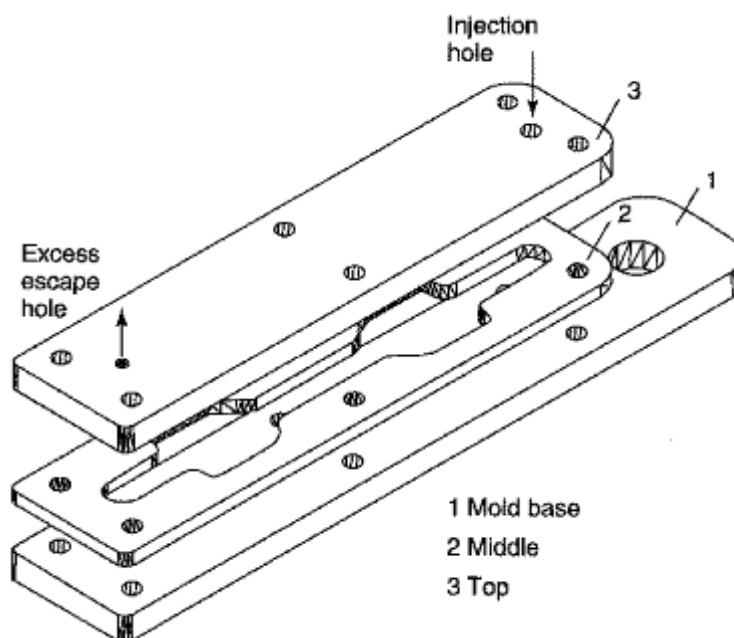


Figura 15 - Representação esquemática de um molde utilizado para o fabrico de provetes em adesivo maciço [17]

No processo de moldação em molde aberto, a placa intermédia é colocada sobre a placa inferior e o adesivo aplicado sobre as cavidades (Figura 16), sendo posteriormente colocada a placa superior sobre o mesmo. Neste caso as furações são utilizadas com vista a expulsar o adesivo em excesso.



Figura 16 - Fabrico de provetes maciços por moldação em molde aberto

É de extrema importância a aplicação de um desmoldante em todas as superfícies do molde, de maneira a facilitar a remoção dos provetes, correndo, sem isto, o risco de adesão do provete ao molde, dificultando ou impossibilitando a desmoldação. No fim, coloca-se a placa superior para fecho do molde [21].

Fabrico de provetes por pressão entre pratos

Se o adesivo for relativamente duro e rígido, o método indicado e utilizado para a fabricação dos provetes maciços é a pressão entre pratos [15]. Esta técnica, descrita na norma Francesa NF T 76-142 (Figura 17), resulta particularmente bem, produzindo provetes em forma de placas sem porosidades [17]. Utiliza-se um molde que consiste em duas placas separadas por uma moldura retangular de borracha de silicone, estando esta circundada por uma moldura de suporte constituída por quatro barras fixadas por parafusos (Figura 18).

Todas as peças constituintes do molde devem ter um ótimo acabamento superficial e possuir uma espessura uniforme. As superfícies do molde deverão ser limpas e revestidas com um agente desmoldante antes da colocação do adesivo, de forma a facilitar a remoção das placas após cura [15]. Por fim, tendo em vista o sucesso da fabricação das placas de adesivo por este processo, é necessário referir que a quantidade de adesivo a ser utilizada deve ser superior ao volume da cavidade do molde, de forma a garantir o seu completo enchimento, assim que aplicada a pressão.

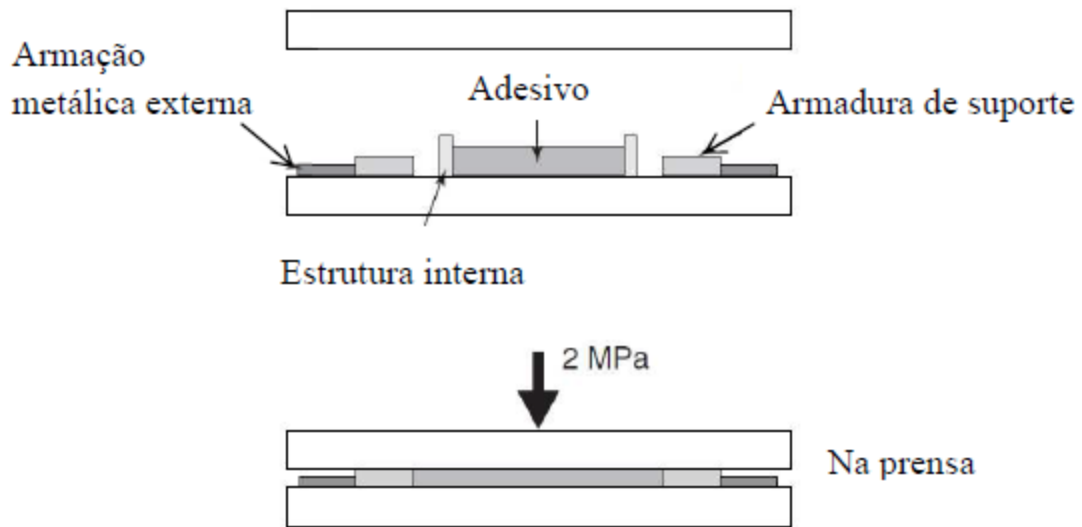


Figura 17 - Placa de adesivo produzida de acordo com a norma NF T 76-142 [21]

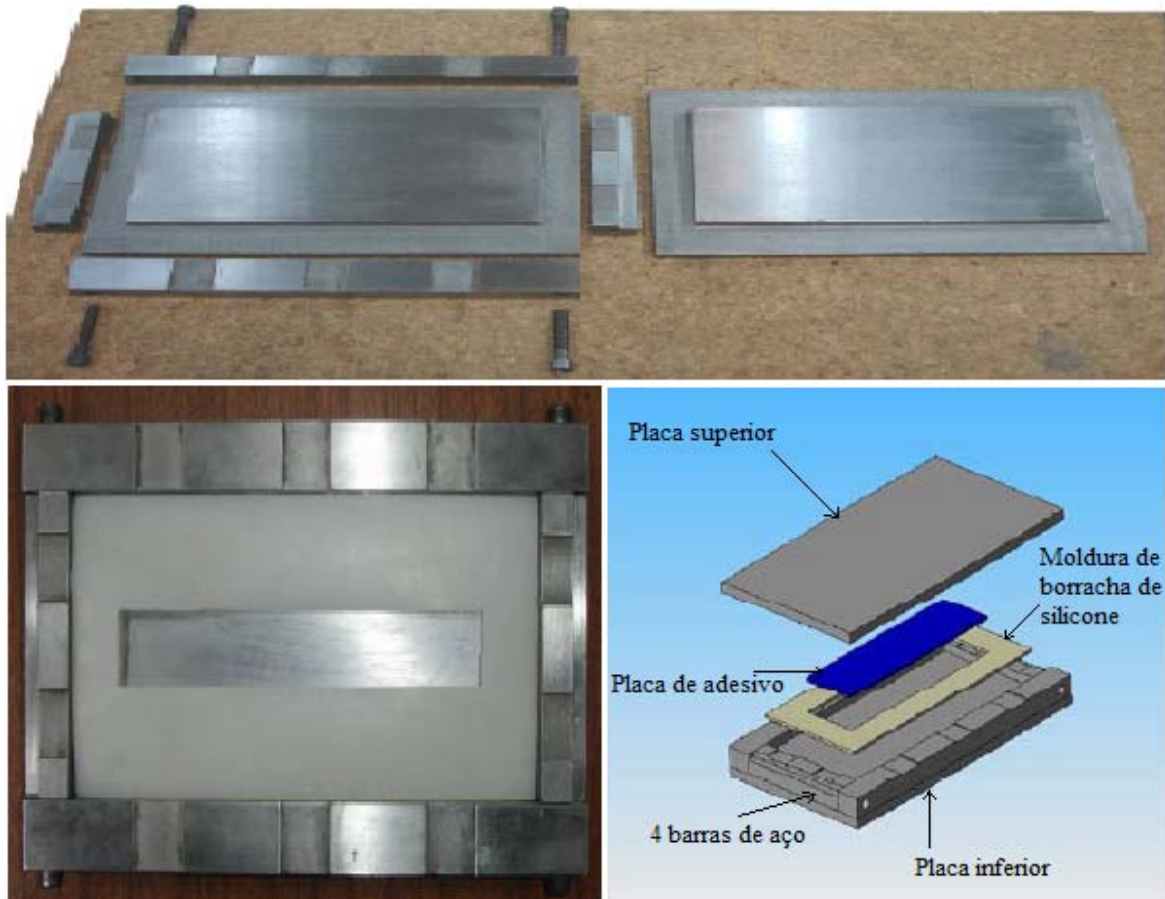


Figura 18 - Molde exemplificativo para produção de placas de adesivo por pressão entre pratos [2, 15]

2.3.1.3 Procedimentos de ensaio

Os procedimentos de um determinado ensaio devem, sempre que possível, seguir o transcrito nas normas em que é baseado. Estas expõem as condições necessárias para o sucesso dos ensaios, definindo os procedimentos dos ensaios, geometria, preparação das amostras, velocidade dos ensaios, tratamentos superficiais (se aplicável), entre outros.

Um ponto fundamental e que deverá ser sempre o primeiro a ser registado antes de se proceder à realização de qualquer ensaio, são as condições ambiente. A temperatura e a humidade relativa do espaço em que o ensaio é realizado têm forte influência no resultado e nas características mecânicas dos corpos de prova. Isto torna-se mais relevante nos adesivos cuja temperatura de transição vítrea esteja próxima da temperatura a que o ensaio é realizado. Posto isto, os ensaios devem ser realizados em condições de temperatura e humidade relativa típicas de laboratórios (25 °C e 50%, respetivamente) [6].

Deve ser utilizada uma máquina universal de ensaios, devendo-se garantir que os provetes são presos através de amarras (devidamente apertadas, de maneira a que seja assegurado o não escorregamento) e o utilizador deverá garantir o seu alinhamento (Figura 19). As amarras garantirão que a rotura ocorrerá sempre na zona útil do provete, enquanto o alinhamento deste evitará esforços transversais e de flexão, bem como a rotação das amarras. A distância entre amarras vem normalmente descrita nas normas e deverá ser assegurada sempre que possível.

As tensões limite requerem equipamentos de medição extremamente precisos, como a célula de carga, que mede a força aplicada a cada instante. Para uma maior precisão de resultados, recomenda-se que a carga máxima que esta célula pode aplicar seja superior em apenas uma ordem de grandeza, relativamente à força de rotura registada [9]. Para geometrias de provete idênticas às apresentadas na Figura 10, deve-se prever uma célula de carga de 5kN para adesivos com elevada resistência, e 1kN no caso de adesivos com uma baixa resistência, como por exemplo os poliuretanos [17].

É também recomendado o uso de um extensómetro, especialmente para adesivos flexíveis e dúcteis, de forma a se poder avaliar as deformações longitudinais (Figura 20) [6]. Este equipamento ajuda a medir o deslocamento real dos provetes, uma vez que contabiliza apenas o deslocamento destes e não o de todos os constituintes da máquina, que é o que

acontece quando se baseia apenas no deslocamento medido na maxila móvel do equipamento de ensaio.

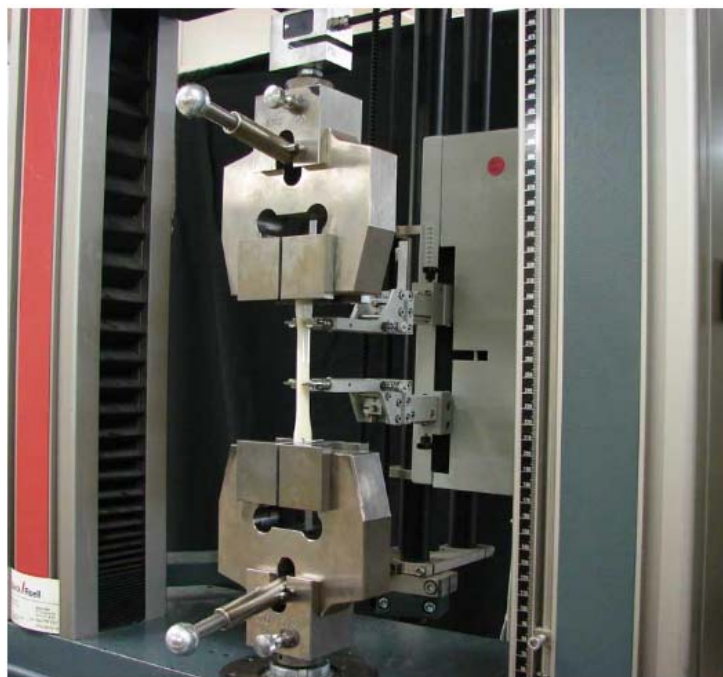


Figura 19 - Representação de uma célula de carga e um extensómetro numa máquina de ensaios de tração [23]

Quanto mais dúctil e flexível for o adesivo, mais importante se torna o recurso a um extensómetro, dado que o deslocamento no regime elástico será superior, o que compromete a medição do módulo de elasticidade. Para medir este deslocamento no regime elástico, podem ser utilizados dois tipos de extensómetros: mecânicos e óticos. Um maior rigor da curva tensão-deformação é conseguido com a utilização do extensómetro ótico, pois como é um equipamento sem contacto, garante a inexistência de qualquer tipo de tensão adicional no provete, enquanto o ensaio é realizado. Para além disso, este tipo de extensómetro permite realizar medições até à rotura do provete, contrariamente ao que acontece com o uso do extensómetro mecânico. De facto, devido ao curso limitado deste tipo de extensómetro, é necessário interromper o ensaio de forma a poder retirá-lo dos provetes antes destes atingirem a rotura [9, 24]. Normalmente, retira-se o extensómetro antes que ocorra a transição do regime de deformação elástica para a plástica do provete, altura em que já se obteve os dados para a determinação do módulo de elasticidade.

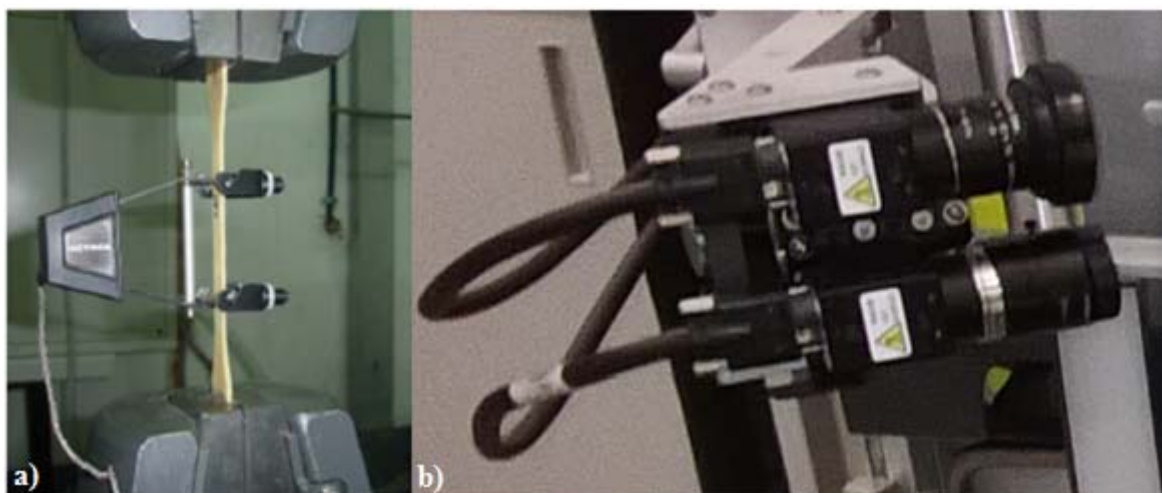


Figura 20 - Extensômetro a) mecânico e b) ótico [2]

As velocidades de ensaio têm uma influência direta nos resultados obtidos, devendo ser utilizadas dentro dos limites que vêm expressos nas normas. Estas variam normalmente entre 1 e 100 mm/min, sendo a primeira geralmente utilizada para se retirar o módulo de elasticidade [6, 25]. A influência da velocidade de ensaio pode ser expressa através da Figura 21.

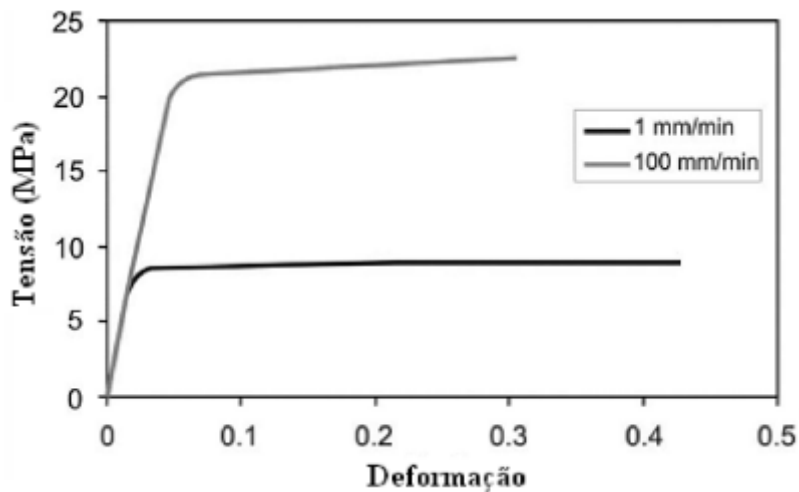


Figura 21 - Influência da velocidade de ensaio nas curvas tensão-deformação de um adesivo dúctil [26]

Após a realização do ensaio, procede-se à determinação das propriedades mecânicas que se baseiam na curva tensão-deformação obtida, idêntica à mostrada na Figura 22.

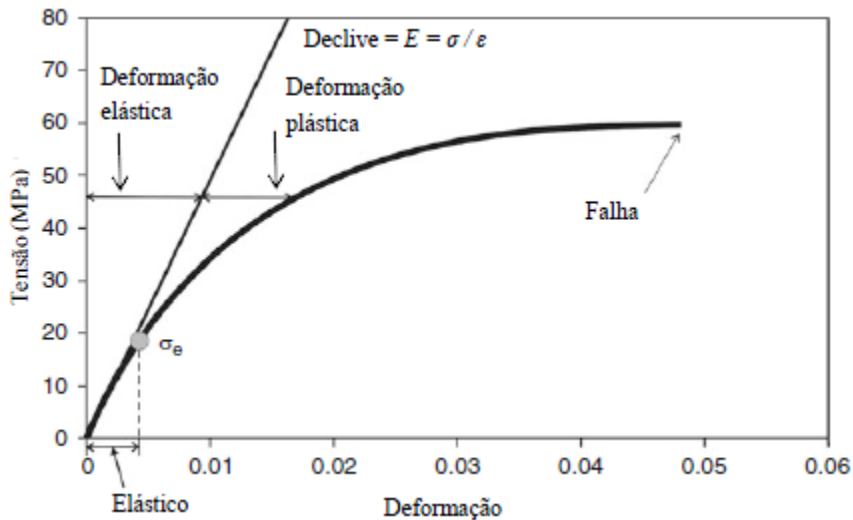


Figura 22 - Curva tensão-deformação típica de um adesivo [6]

Tal como referido anteriormente, as propriedades possíveis de determinar são o módulo de elasticidade longitudinal, a tensão de limite elástico, a tensão de rotura à tração e a deformação de rotura à tração.

Segundo a norma EN ISO 527-2 [27], o módulo de elasticidade deve ser calculado no intervalo de 0,05% e 0,25% da deformação (regime elástico), selecionando dois pontos no gráfico. A interceção das deformações na curva do gráfico correspondem a dois valores de tensão, que serão também utilizados no cálculo de E [MPa], tomando por base a Equação (2):

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}, \quad (2)$$

em que, $\Delta\sigma$ [MPa] representa a diferença da tensão e $\Delta\varepsilon$ a variação da deformação entre os pontos com $\varepsilon = 0,05\%$ e $0,25\%$.

Existem outros métodos para se obter o módulo de elasticidade, nomeadamente através da aplicação de uma reta tangente à zona elástica do adesivo, iniciada desde a origem do gráfico [17], como se pode observar no gráfico da Figura 22. No caso dos adesivos (materiais poliméricos), o cálculo para a obtenção da tensão limite de elasticidade não é tão linear, uma vez que os polímeros não apresentam patamares de cedência na transição do regime elástico-plástico, como se verifica, por exemplo, na maior parte dos aços. Quando se está perante adesivos dúcteis, deve-se considerar que a tensão limite de elasticidade (σ_y) é

aproximadamente igual à tensão de rotura (σ_r), enquanto no caso de adesivos frágeis, deve-se interseccionar uma reta tangente à zona elástica do adesivo com uma reta tangente à zona plástica do mesmo [6], como se pode observar no gráfico da Figura 23.

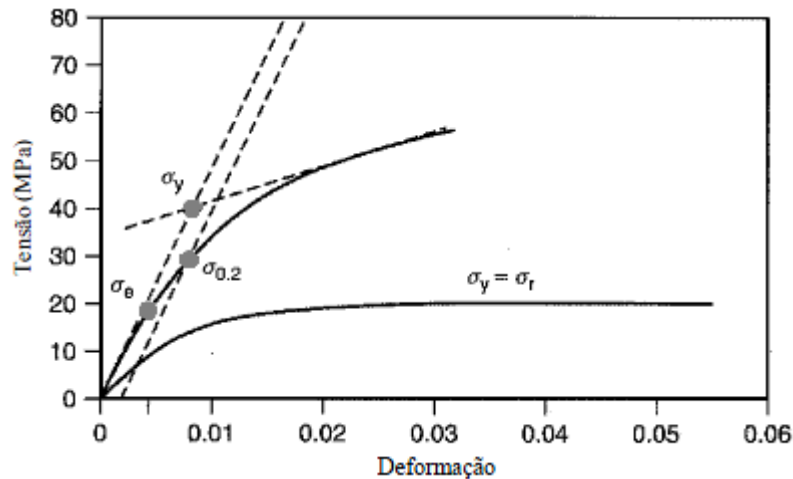


Figura 23 - Métodos para determinação da tensão limite de elasticidade σ_y [17]

Outro método possível passa pela determinação do valor da "tensão limite de proporcionalidade n " adotando um número n correspondente a uma deformação escolhida arbitrariamente e, traçando uma reta paralela à reta de proporcionalidade entre a tensão e a deformação, obtendo-se o valor de "tensão limite de proporcionalidade n ". Geralmente é utilizado o valor de 0,2%, correspondente a uma deformação plástica de 0,002 por unidade de comprimento [28], como demonstra a Figura 23.

2.3.2 Caracterização das propriedades mecânicas ao corte

O estudo do comportamento dos adesivos ao corte é muito importante, pois é aquele em que as tensões apresentam distribuições mais favoráveis, devendo-se assim, sempre que possível, projetar as estruturas coladas de maneira a que estas estejam essencialmente sujeitas a esforços de corte.

Tal como nos ensaios de tração, através dos ensaios de corte é possível traçar a curva tensão-deformação, que nos permite fazer uma análise do comportamento do adesivo e determinar propriedades importantes, como a tensão de corte máxima, a deformação de corte máxima e o módulo de corte.

Para determinar as propriedades ao corte, dever-se-ia recorrer a métodos que única e exclusivamente solicitassem as amostras a esforços de corte. Isso seria possível aplicando diretamente um momento torsor na junta adesiva, mas para tal seriam precisos equipamentos de ensaio, de aperto e medição mais complexos, razão pela qual não é muito comum a utilização deste tipo de ensaio. Normalmente utilizam-se equipamentos convencionais de ensaios para aplicação de solicitações de tração ou compressão [2, 29].

2.3.2.1 Métodos de ensaio

Tal como os ensaios à tração, os ensaios ao corte podem ser divididos em ensaios com provetes maciços e ensaios de junta adesiva. O deslocamento do adesivo em testes em junta adesiva é muito pequeno e, portanto, torna-se mais difícil de medir com precisão. Os provetes maciços fornecem resultados mais precisos, uma vez que o comprimento de medida é maior. No entanto, pode-se argumentar que o tamanho e a espessura dos provetes utilizados não são representativos das propriedades adesivas numa junta [6].

Os ensaios normalmente utilizados para a determinação das propriedades mecânicas ao corte são: ensaio em JSS, ensaio Iosipescu ou *V-Notched beam shear method*, ensaio de borboleta ou *Notched plate shear method* (Arcan), ensaio de provetes de adesivo em bruto à torção, ensaio em juntas topo a topo em torção ou *Napink ring test*, e o ensaio TAST [6].

Junta de sobreposição simples (JSS)

Testes com aderentes em placas pouco espessas, em particular o ensaio em JSS, são muito comuns na indústria. Este facto está relacionado com a sua aplicação em estruturas aeronáuticas, sendo esta indústria a pioneira da tecnologia de ligação adesiva.

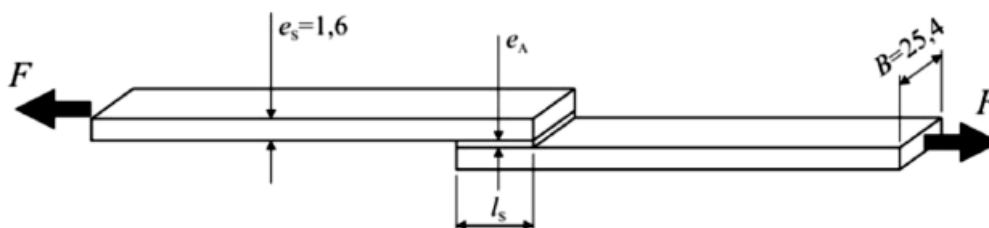


Figura 24 - Geometria da junta de sobreposição simples ASTM D1002 (dimensões em mm) [29]

A JSS é descrita nas normas ASTM D 1002 e ISO 4587, como é mostrado na Figura 24. Estas normas recomendam que se corte os provetes a partir de duas placas coladas de 178

mm de largura. No entanto, as juntas podem ser realizadas individualmente num molde, reduzindo os defeitos introduzidos pelo corte [6].

Como se pode verificar, a JSS está sujeita a um estado de tensão complexo devido ao desalinhamento da carga, que origina um momento fletor que induz outros esforços, os quais podem originar a deformação dos substratos, e não apenas o de corte como se pretende (Figura 25).

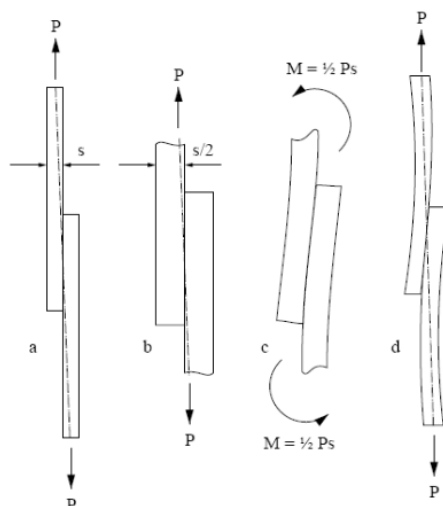


Figura 25 - Representação esquemática da flexão dos aderentes: (a) junta antes da deformação, (b) excentricidade da carga, (c) momento fletor, (d) deformação final da junta [30]

Contudo, existem diversas formas de atenuar o efeito da deformação da junta, sem que para isso seja necessário projetar um diferente tipo de ligação. Um dos métodos convencionalmente utilizado é a junta de sobreposição dupla, que adiciona um novo substrato. Kim et al. [31], propôs um trabalho de comparação experimental, em termos de modo de rotura e resistência de provetes ligados por sobreposição simples solicitados à tração, e uma das soluções utilizadas para contornar os efeitos de flexão foi a utilização de calços de alinhamento com espessura igual à de cada um dos substratos (Figura 26). Desta forma, a carga axial aplicada fica alinhada, sendo teoricamente anulado o efeito fletor sobre o provete. Teoricamente, pois, também a espessura do adesivo e do substrato têm influência no mesmo. Quando estas espessuras aumentam, o momento fletor conseqüentemente aumenta e, por sua vez, a resistência da junta diminui. Em alguns casos, o aumento da espessura pode ser benéfico, tornando os substratos mais resistentes e menos suscetíveis à deformação plástica [32].

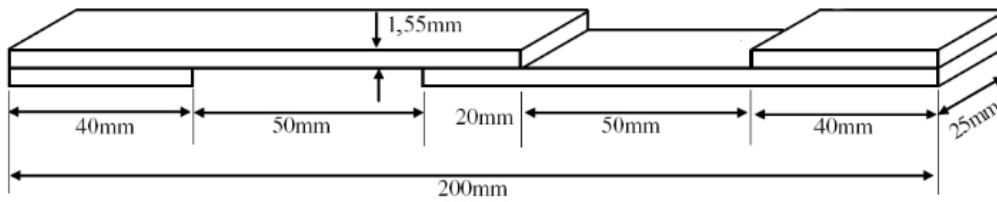


Figura 26 - Geometria do provete de junta de sobreposição simples utilizado por Kim et al. [31]

Continuando dentro do método da junta de sobreposição simples, a solução mais simples e eficaz para garantir um alinhamento das forças é a utilização da junta de ressalto (Figura 27). No entanto, a fabricação deste tipo de junta pode tornar-se complexa, quando se pretende ligar substratos frágeis ou de elevada resistência [9].



Figura 27 - Junta de ressalto [13]

O ensaio em junta de sobreposição simples tem a vantagem de ser um método simples e barato, e que pode ser realizado em máquinas universais convencionais. É um ensaio que pode ser usado como método comparativo em estudo de adesivos, desde que a uniformização dos restantes parâmetros que podem afetar o resultado sejam garantidos.

O parâmetro principal é a obtenção da tensão média de corte a que o adesivo é submetido quando ocorre a rotura, que pode ser determinado recorrendo à Equação (3):

$$\tau = \frac{P}{lb}, \quad (3)$$

em que τ [MPa] representa a tensão de corte, P [N] a força ou carga aplicada, b [mm] a largura da junta e l [mm] o comprimento de sobreposição [6].

Contudo, tornou-se consensual que a média da tensão de corte obtida nos resultados, dificilmente tem alguma relevância prática, pois não permite determinar nenhuma propriedade intrínseca do adesivo ou da própria junta [1]. Verifica-se que, antecedendo a rotura do adesivo, existe frequentemente uma deformação não desprezável do substrato, levando a problemas de não linearidade geométrica e material. Apesar de tudo isto, mesmo com as limitações reconhecidas, é um ensaio largamente utilizado [1].

Iosipescu ou *V-Notched Beam Shear Method*

O ensaio Iosipescu ou *V-Notched Beam Shear Method* pode ser realizado em provetes de adesivo em bruto ou em junta, e foi originalmente desenvolvido para medir a resistência ao corte de metais soldados. Ambos os métodos são similares, diferindo apenas no tipo de carga e geometria dos provetes. Estes são retangulares, com dois entalhes em V no centro, como mostra a Figura 28. A geometria do provete é normalmente $76 \times 20 \times 4 \text{ mm}^3$ (comprimento \times altura \times espessura), sendo solicitado a uma carga em quatro pontos, criando uma área de corte linear entre os dois entalhes, uma vez que os momentos fletores provenientes dos dois lados se anulam [6].

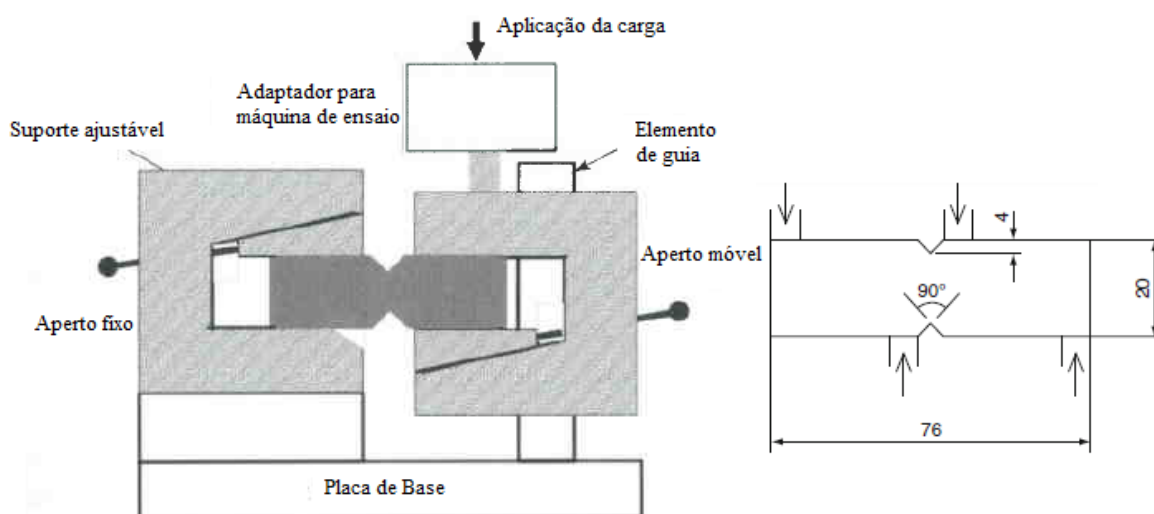


Figura 28 - Ensaio *Iosipescu* e geometria do provete (dimensões em mm) [17, 6]

Na presença de adesivos muito flexíveis, tais como poliuretanos, o método de teste pode não ser adequado, mesmo com amostras de espessura considerável. Existe uma concentração de tensão na raiz do entalhe, mas a tensão de corte calculada com a força e a área de secção transversal, é uma boa aproximação. Como alternativa, uma análise por elementos finitos pode corrigir o efeito da concentração de tensões. Para adesivos frágeis, a concentração de tensões na base do entalhe pode ser suficiente para induzir a falhas prematuras, dando apenas uma parte da curva tensão-deformação. Esta é uma das principais desvantagens deste tipo de ensaio [6]. Outros problemas são característicos deste ensaio, como por exemplo a dificuldade na medição precisa das deformações e o facto das deformações de corte em lados opostos do provete poderem diferir consideravelmente, podendo ainda provocar deformações locais nas faces laterais do mesmo [1].

No entanto, este ensaio também oferece algumas vantagens tais como:

- Provete compacto e de fácil execução;
- Propriedades ao corte determinadas facilmente a partir do conhecimento da carga aplicada e das dimensões do provete;
- Possibilidade de conhecer G e a resistência ao corte.

A tensão de corte pode ser calculada através da Equação (4):

$$\tau = \frac{P}{t_p h} \quad (4)$$

e G , como

$$G = \frac{P}{t_p h (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})}, \quad (5)$$

em que t_p [mm] representa a espessura do provete e h [mm] a distância entre extremidades dos dois entalhes. As deformações ε são determinadas com recurso a extensómetros colados na secção central do provete, a 45° e a -45° com o eixo do mesmo [1, 6].

Borboleta ou *Notched plate shear method* (Arcan)

O ensaio *Notched plate shear method*, também conhecido por Arcan, é usado para obter propriedades ao corte em provetes de adesivo em bruto. Contrariamente ao método Iosipescu, é utilizado para pequenas espessuras, possuindo uma geometria muito próxima à de uma borboleta. O provete possui dois entalhes simétricos com ângulo de aproximadamente 90° e raio de concordância no entalhe de 1,5 mm, com vista à minimização da concentração de tensões (Figura 29) [6].

Os furos nas laterais da amostra permitem a aplicação de uma carga de corte, que é uniforme entre os dois entalhes. Este arranjo do carregamento evita o problema da instabilidade nas extremidades, que se verifica no ensaio Iosipescu, permitindo trabalhar com amostras mais finas. Isto torna-se útil para adesivos flexíveis ou adesivos que têm uma grande reação exotérmica durante a cura. Existem, no entanto, concentrações de tensões perto dos entalhes que podem induzir a falhas prematuras, especialmente em adesivos frágeis [6].

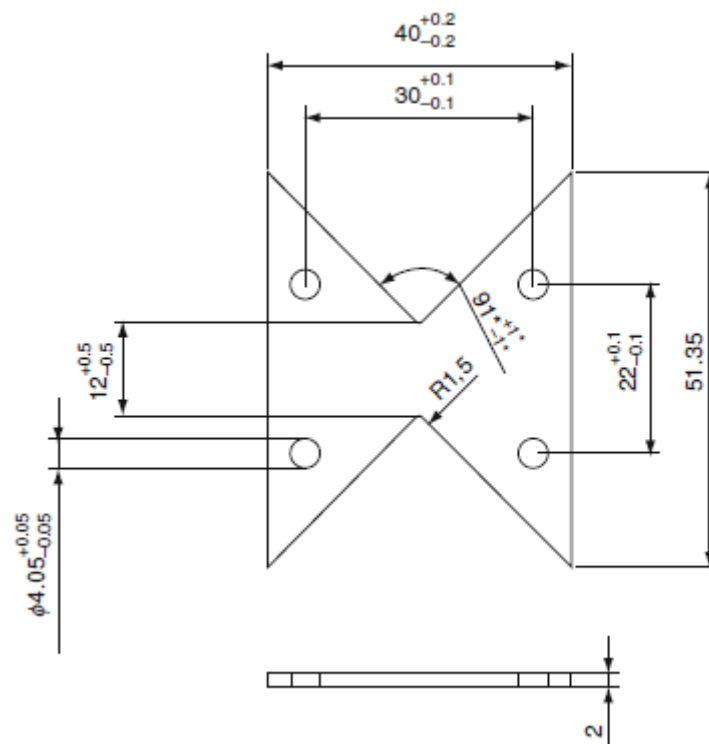


Figura 29 - Provete Arcan (dimensões em mm) [6]

A tensão é obtida dividindo a carga pela superfície resistente entre os dois entalhes. O deslocamento da zona de deformação de corte uniforme entre os dois entalhes pode ser medido com extensómetros montados sobre o provete, orientados a 45° e -45° com o eixo do carregamento, ou recorrendo a métodos sem contacto. Neste último caso, a grande dificuldade prende-se com a amplitude das deformações a medir, que muitas vezes se situam à volta de apenas 1% [1, 6].

Arcan propôs um dispositivo de fixação biaxial, vulgarmente conhecido por "*fixação Arcan*" (Figura 30), para produzir estados de deformação biaxiais. A natureza compacta do dispositivo Arcan permite a obtenção das propriedades de corte em todas as direções no plano de uma forma relativamente simples. A fixação Arcan pode ser utilizada para aplicar tanto forças de corte como forças axiais nas amostras de teste [6]. Mais recentemente foram propostas modificações à fixação original de Arcan, podendo ser aplicado como complemento, o ensaio de compressão.

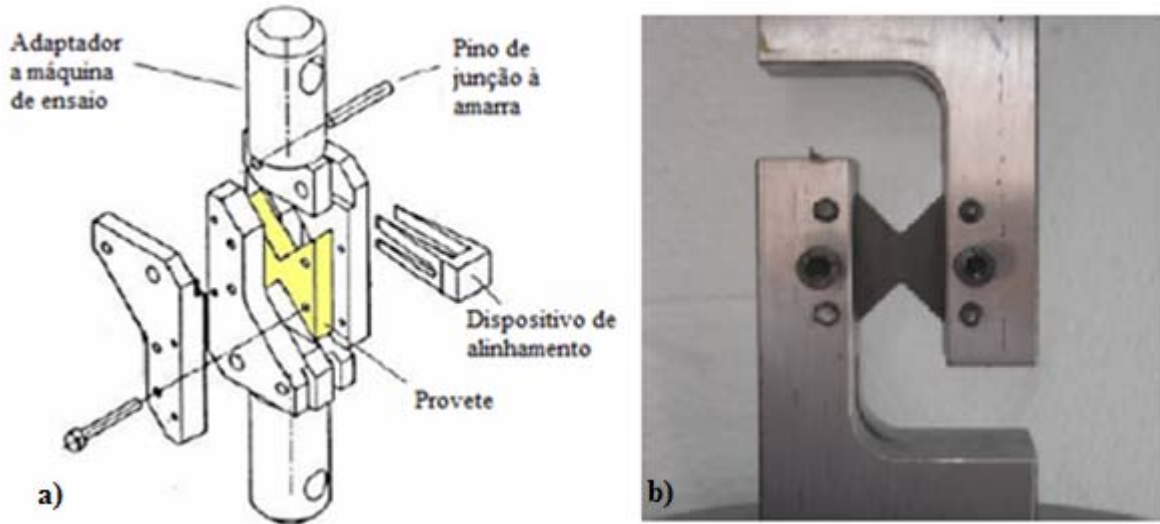


Figura 30 - Método Arcan a) vista explodida e b) fixação [8, 6]

Torção em provetes maciços

As propriedades de corte neste tipo de ensaio podem ser obtidas com provetes sólidos ou tubulares sujeitos à torção (Figura 31). A forma redonda é obtida recorrendo à maquinagem dos provetes, o que significa que não é viável para adesivos muito flexíveis. As secções quadradas nas duas extremidades são utilizadas para fixação nas garras da máquina de ensaio e para transmissão de binário [6].

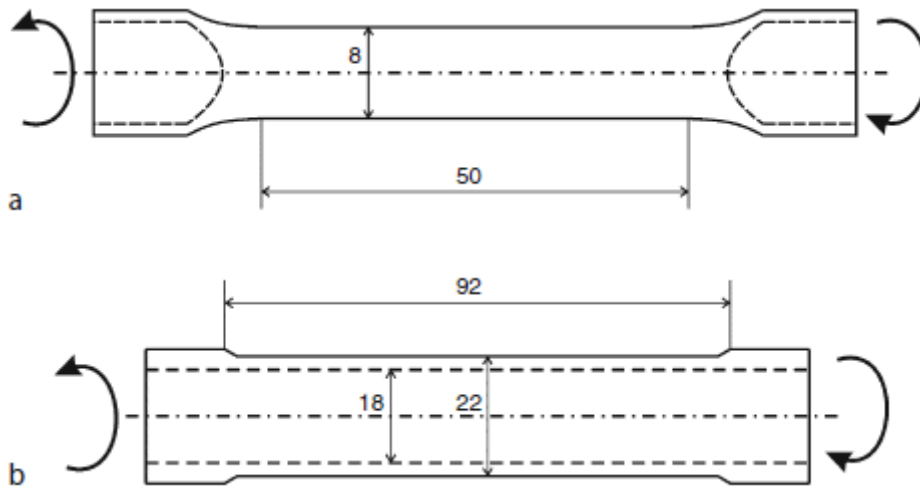


Figura 31 - Provetes maciços em torção: (a) provete sólido e (b) provete tubular [6]

A forma redonda é livre de concentrações de tensões e, portanto, as verdadeiras propriedades adesivas podem ser medidas com este ensaio.

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

Também se pode recorrer ao ensaio de uma junta topo a topo à torção, podendo-se utilizar substratos sólidos (Figura 32) ou tubulares (Figura 33).

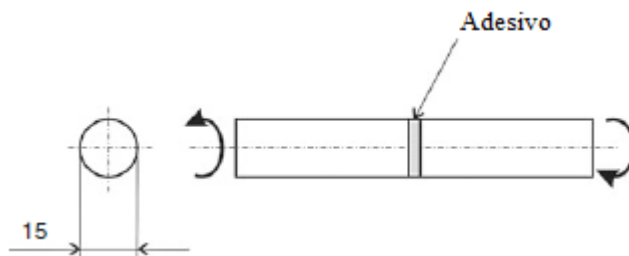


Figura 32 - Junta adesiva com aderentes sólidos (dimensões em mm) [6]

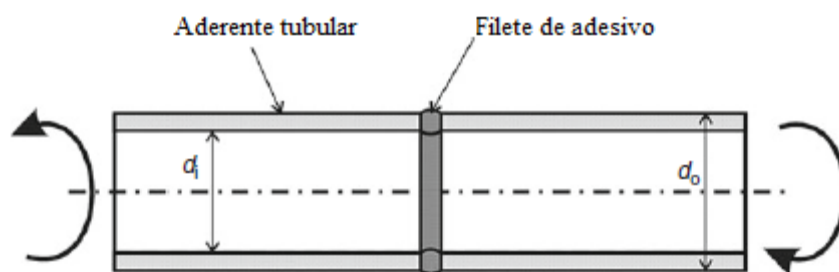


Figura 33 - Provete *Napkin-ring test* [6]

O ensaio mais comum deste género designa-se por *napkin-ring test* (Figura 33). É realizado em juntas topo a topo entre dois cilindros de paredes muito finas, com o objetivo de reduzir a variação das tensões de corte ao longo do adesivo. Mecanicamente, é um dos métodos mais precisos para caraterizar as propriedades de corte do adesivo, pois se os dois cilindros estiverem perfeitamente alinhados promove-se um estado de tensão de corte puro [1, 29].

A principal desvantagem deste tipo de ensaio é a complexidade de fabrico dos provetes e do equipamento necessário, já para não referir o elevado custo que comporta, razão pela qual outros métodos mais simples são comumente utilizados para determinação de propriedades mecânicas ao corte [1, 6].

Tal como no ensaio com provetes de adesivo maciço à torção, este ensaio consiste num sistema que aplica uma torção num provete, medindo-se a torção e a rotação aplicada no provete.

Quando o adesivo utilizado possui uma baixa viscosidade, o fabrico do provete é particularmente difícil porque o adesivo não ficará na posição desejada. Será criado um filete externo e outro interno (Figura 33), comprometendo, assim, o cálculo da força e módulo de corte exato. Estes filetes devem ser removidos, sendo que o filete externo é de fácil remoção, enquanto o filete interno é impossível de remover por completo [6].

Thick Adherend Shear Test, (TAST)

O ensaio TAST é um dos mais populares ensaios de corte, porque é fácil de conceber e testar os provetes. Os principais parâmetros que se podem determinar são: a tensão de corte em função da curva de tensão de corte até à rotura do adesivo, $\tau_{\text{máx}}$, G , e a deformação máxima de corte, $\gamma_{\text{máx}}$, sendo a geometria dos provetes ilustrada na Figura 34.

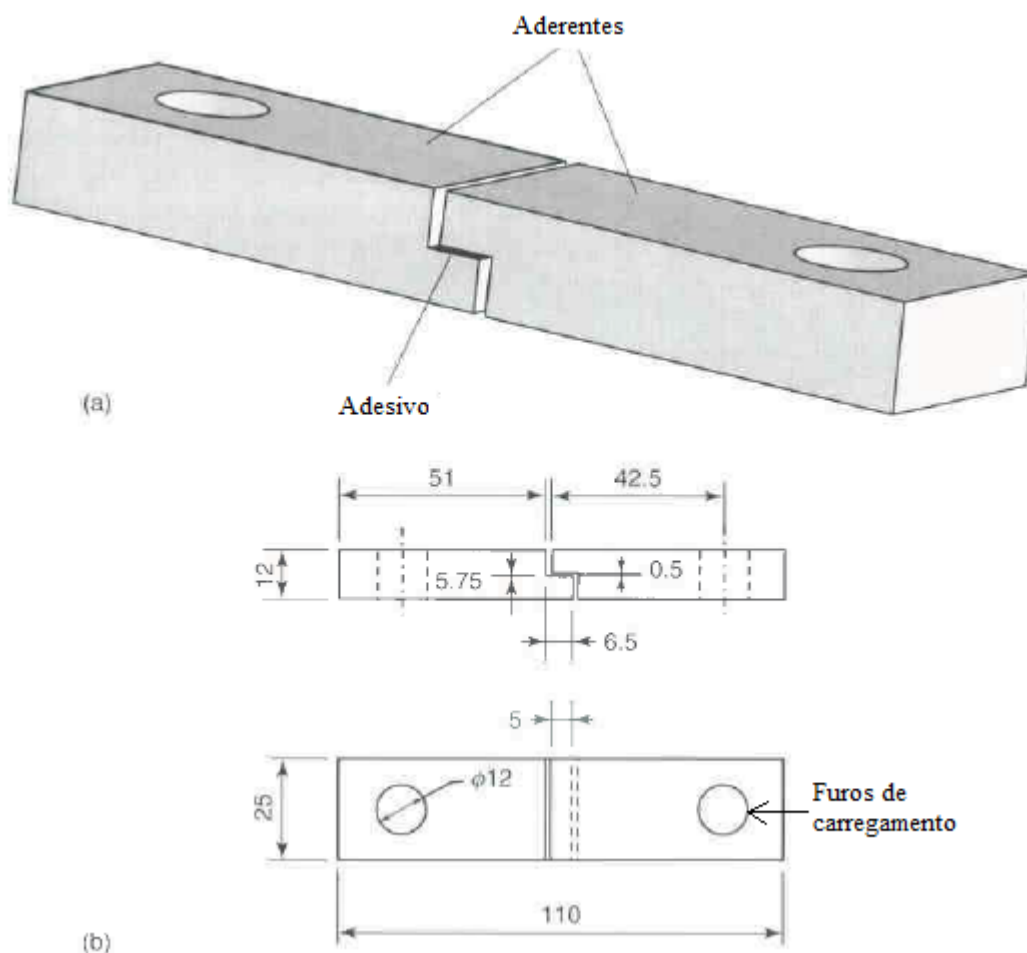


Figura 34 - Geometria dos provetes TAST (a) e dimensões em mm (b) (ISO 11003-2) [17]

Os provetes utilizados para o ensaio TAST são em aço, devido à sua elevada rigidez, o que contribui para que se esteja perante um estado de tensão no adesivo praticamente de corte

puro. A geometria do próprio provete também contribui para este estado, uma vez que utiliza um elevado rácio de espessura de substratos relativamente ao comprimento da ligação. Com isto, a probabilidade de arrancamento nas extremidades da junta é diminuta [6].

O ensaio consiste em tracionar o provete através dos furos de carregamento até à rotura. A junta adesiva é submetida a um esforço de corte devido à geometria dos aderentes. Para tal, utiliza-se uma máquina de ensaios universal, sendo neste caso necessário utilizar ou fabricar (caso não estejam à disposição) ferramentas adequadas ao ensaio TAST e de ligação à máquina de ensaios. São utilizados calços ou lâminas para garantir a geometria normalizada dos provetes, evitando a sua sobreposição e que ocorra um filete de adesivo indesejável (Figura 35).

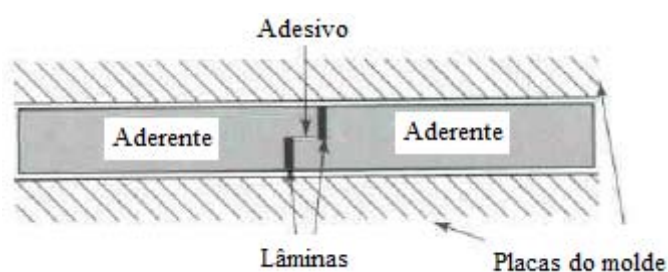


Figura 35 - Calços ou lâminas para controlar a sobreposição e o filete de adesivo [17]

Através deste ensaio é possível determinar o módulo e a tensão de corte, tendo a vantagem do estado de tensão ser relativamente uniforme ao longo da junta adesiva. Torna-se um processo simples e económico, na execução e aquisição de dados. É um ensaio indicado para diferentes condições ambientais, apesar da difícil análise de tensões. Podem ocorrer concentrações de tensões indesejáveis nos bordos da ligação. A precisão na maquinagem dos provetes é fundamental, para não comprometer a sua adaptabilidade com o molde de fabrico da junta, nem o próprio ensaio [2, 29].

2.3.2.2 Ensaio Thick Adherend Shear Test

Os substratos são sempre preparados de forma que haja uma boa ligação interfacial. Para isso são sempre preparados de maneira a que poeiras, sujidade, óleos, óxidos ou outros agentes sejam removidos. Para a maioria dos adesivos, a preparação da superfície consiste em processos de desengorduramento com acetona ou outro solvente, granalhagem e desengorduramento novamente. É utilizado um molde (Figura 36) para o fabrico e alinhamento dos provetes, posicionando primeiro os substratos inferiores e as lâminas que

vão servir de calços (Figura 37a). Só depois se aplica o adesivo e o substrato superior (Figura 37b) [17].

No ensaio TAST espera-se que o tipo de rotura no adesivo seja sempre coesiva. Quando tal não acontece, deve ser utilizado um tratamento químico [17].

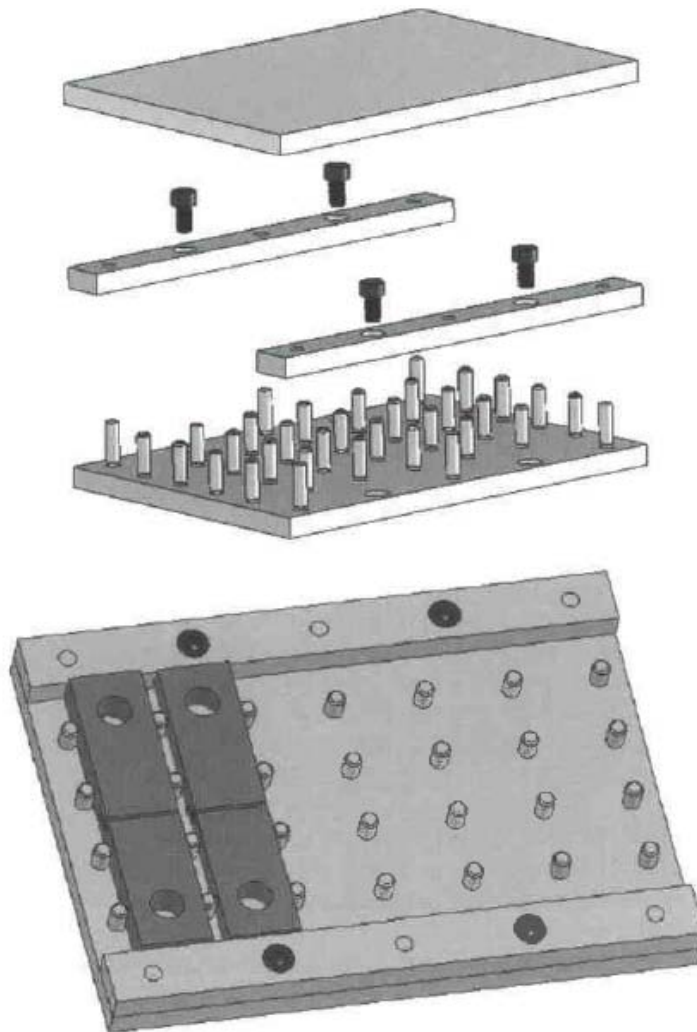


Figura 36 - Molde para fabrico de provetes TAST [17]

Com este processo é possível fabricar vários provetes para ensaio ao mesmo tempo, reduzindo o tempo de fabrico dos mesmos. No caso de adesivos com baixa viscosidade, deve-se cobrir bem a área a colar, de forma a que o adesivo em excesso saia pelas extremidades. Depois da aplicação do adesivo e colocação do substrato superior, a parte superior do molde é montada para garantir que as partes aderentes ficam paralelas (controlando a junção), e para manter a junta em contacto (Figura 37c) [17].

A cura pode ser realizada a temperaturas elevadas (Figura 37d) ou à temperatura ambiente, dependendo do adesivo, sendo os provetes removidos com bastante cuidado após a realização da mesma (Figura 37e). Os calços devem ser removidos com especial cuidado (Figura 36f), de forma a evitar que a junta se quebre, introduzindo fissuras na mesma, o que pode comprometer todo o processo de ensaio e resultados obtidos [17].

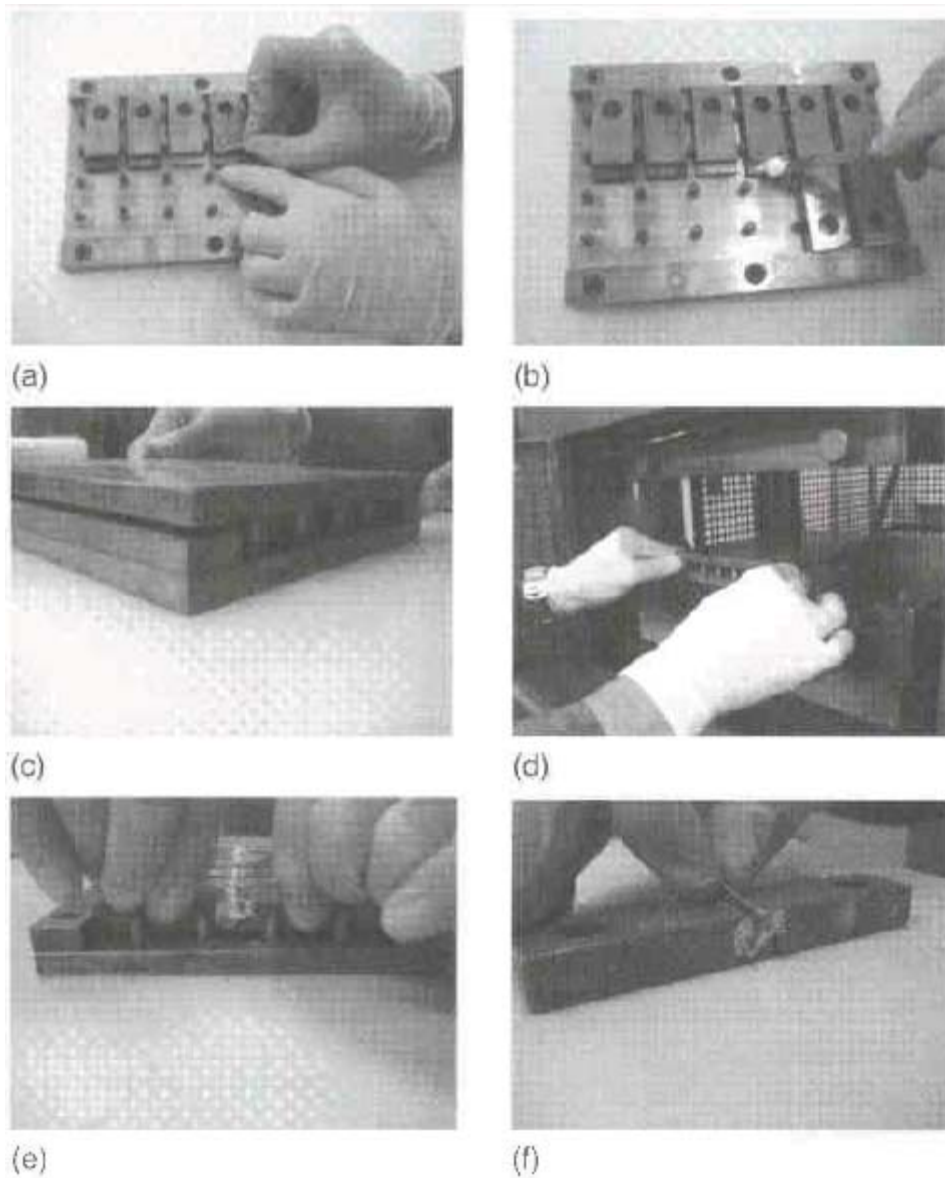


Figura 37 - Fabrico de provetes TAST usando um molde [17]

2.3.2.3 Procedimentos de ensaio

O ponto de extrema importância e que pode condicionar todo o ensaio é como vai ser fixado ou adaptado o provete de ensaio à máquina de tração, e quais as ferramentas necessárias para que tal seja realizado de forma a que o objetivo seja cumprido.

É necessário o fabrico das amarras que fixam o provete através de dois pinos e as peças de acoplamento com a máquina de ensaios, conforme ilustra a Figura 38. Esta fixação permite eliminar, teoricamente, os momentos fletores introduzidos no provete.

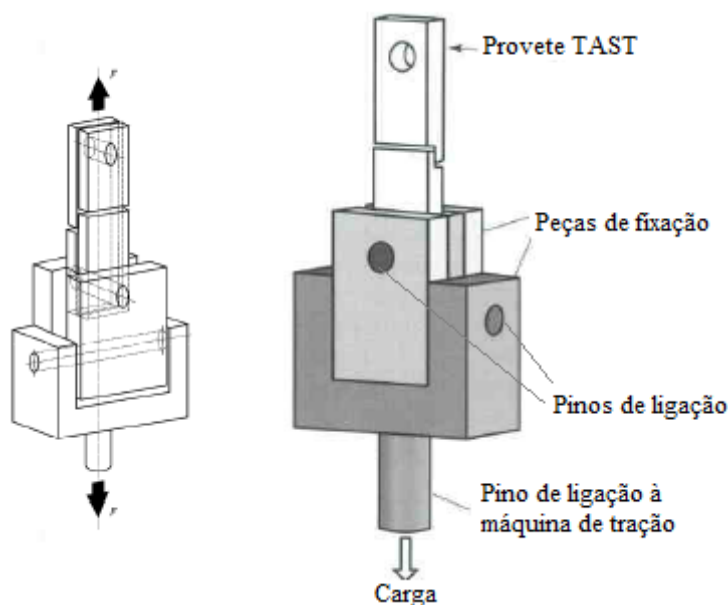


Figura 38 - Ferramentas para o ensaio TAST [17]

A deformação da junta é de tal forma reduzida que requer correções analíticas, de maneira a se poder determinar a deformação de corte real do adesivo. Para isso, é imperativo o uso de um extensómetro para a medição do deslocamento longitudinal do provete.

O ensaio pode ser caracterizado pela extensometria baseada em *Linear Variable Diferencial Transducer* (LVDT), com parte móvel dentro de uma moldura rígida unida por molas. O transdutor deverá ser posicionado na zona central da amostra, como ilustra a Figura 39.

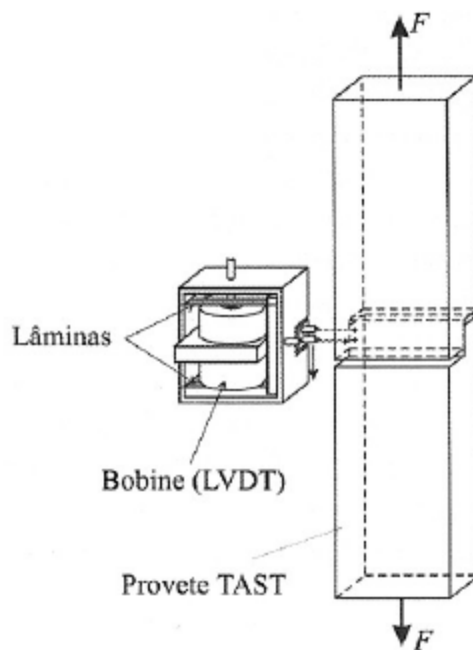


Figura 39 - Extensômetro (LVDT) utilizado no ensaio TAST, segundo ISO 11003-2 [6]

O movimento realizado é função do deslocamento entre os dois pinos que fixam o provete, o que obriga a correções posteriores dos dados para a determinação das deformações, sem referir a relativa dificuldade da aplicação deste transdutor no provete [2].

A existência de desalinhamentos introduz deformações provenientes da flexão dos substratos, o que provoca erros grosseiros nas medições. Assim sendo, é aconselhável a utilização de dois extensômetros, ligados em faces opostas da amostra. Neste caso, qualquer flexão da amostra será evidente, a partir das leituras de deslocamentos divergentes. De acordo com a norma ISO 11003-2, a correção deve ser efetuada considerando a deformação de corte num provete compensador (*dummy*), constituído apenas pelo material do substrato. Estudos realizados demonstram que a distribuição da tensão de corte no provete não é uniforme, pelo que a correção por este processo não é totalmente fiável [6].

Resta então considerar que os substratos apenas apresentam corte puro, tomando isto como base para se efetuar a devida correção. Um extensômetro resistivo atravessará a espessura do provete e, por sua vez, a zona de ligação. Com isto, pode-se isolar o deslocamento do adesivo no ensaio TAST ($d_{adesivo}$). De acordo com o ilustrado na Figura 40, pode-se verificar que:

$$d_{adesivo} = d_{transdutor} - 2d_{substrato} \quad (6)$$

$$2d_{substrato} = \frac{2t_{substrato}P}{G_{substrato}lb}, \quad (7)$$

$$2t_{substrato} = 3,8 - t_{adesivo}, \quad (8)$$

em que P [N] é a força aplicada, G [MPa] o módulo de corte, l [mm] o comprimento de sobreposição e b [mm] a largura do provete.

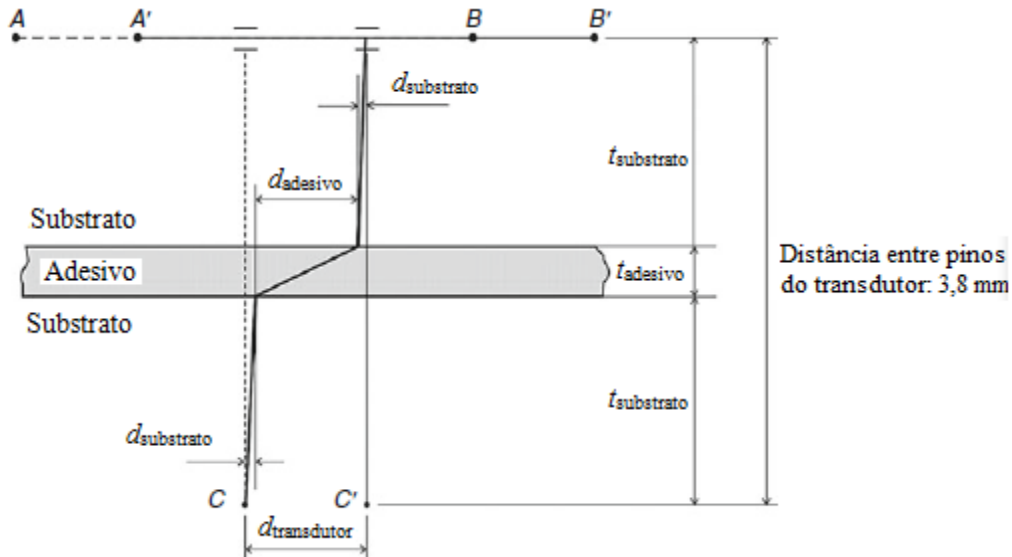


Figura 40 - Medição dos deslocamentos no ensaio TAST [6]

No entanto, resultados obtidos pelo método dos elementos finitos mostraram que os substratos também estão sujeitos a esforços longitudinais, não se podendo supor que os mesmos só estão sujeitos ao corte, para se obter a correção desejada. Esta correção só poderá ser aceitável se a espessura do adesivo não for demasiado pequena, visto que quanto maiores forem as espessuras do adesivo e do substrato, mais uniforme se torna a distribuição da tensão de corte [1].

A velocidade de ensaio recomendada pela norma ISO 11003-2 é de 0,5 mm/min. No entanto, uma taxa de deslocamento das amarras constante irá induzir uma aceleração da taxa de deformação, o que poderá influenciar as propriedades do adesivo. Esta é uma característica comum a todas as juntas submetidas a ensaio, ao contrário do que se verifica em ensaios de provetes em bruto, onde a taxa de deformação é mais constante para uma dada taxa de deslocamento das amarras. Para se ter uma velocidade de deformação constante no adesivo, a velocidade das amarras pode ser controlada utilizando as medições de deslocamento do adesivo [6].

2.3.3 Caracterização das propriedades de fratura à tração

Para prever a resistência mecânica de juntas adesivas com precisão, as abordagens pela Mecânica da Fratura apresentam algumas vantagens significativas relativamente aos métodos baseados na Resistência dos Materiais [2]. Contrariamente a estes, as abordagens baseadas na Mecânica da Fratura assumem a presença de um defeito inerente à estrutura a ser examinada, induzido durante o processo de fabrico ou produzido quando a estrutura é solicitada. Sob estas condições, a questão que se coloca é se estes defeitos podem induzir uma falha catastrófica ou se, durante o tempo de vida previsto, estes podem propagar-se estavelmente, mantendo as suas dimensões inferiores à dimensão crítica. No entanto, em muitas aplicações estruturais, o local onde o dano se inicia não é evidente, nem o comprimento do dano é fácil de determinar [33].

No contexto de caracterizar um adesivo à fratura, a taxa crítica de libertação da energia ou tenacidade à fratura G_c é um parâmetro essencial a determinar e também o mais correntemente utilizado [34]. O crescimento da fenda pode desenvolver-se sob três modos diferentes, conforme demonstrado através da Figura 41. O modo I representa o modo de abertura, enquanto os modos II e III são os modos de corte. Em muitas estruturas, a carga aplicada cria uma combinação de modos no crescimento da fenda, o que implica a utilização de um modo misto para simular a propagação do dano [33, 35].

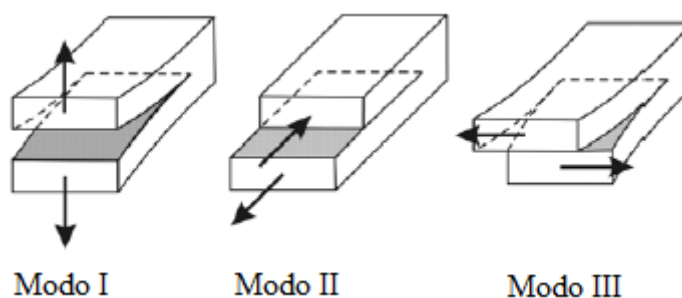


Figura 41 - Modos de rotura em juntas adesivas [33]

O modo I corresponde a uma solicitação de abertura na extremidade da fenda, e o parâmetro correspondente para a caracterização à fratura é G_{Ic} . [33, 34].

A taxa de libertação da energia é dada por [1]

$$G = \frac{dW}{dA} - \frac{dU}{dA}, \quad (9)$$

sendo W [J] o trabalho realizado pelas forças exteriores, U [J] a energia de deformação interna do sólido e dA [mm²] a variação de superfície da fenda.

A taxa crítica de libertação de energia é uma propriedade do material, portanto, a condição fundamental para evitar a propagação de fissuras é [35]:

$$G < G_c. \quad (10)$$

A caracterização à fratura também se pode basear no fator de intensidade de tensão, K , que representa um fator de escala definidor da alteração do estado de tensão na vizinhança da extremidade da fenda:

$$K = \sigma_R \sqrt{\pi a}, \quad (11)$$

sendo σ_R [MPa] a tensão remota aplicada e a [mm] o comprimento de fenda.

2.3.3.1 Métodos de ensaio

Os ensaios normalmente utilizados para a determinação do G_{Ic} são o DCB e o *Tapered Double Cantilever Beam* (TDCB) [17], descritos na norma Americana ASTM D 3433 - 99 [36] e recentemente transposta para a norma ISO 252117:2009 [37].

***Double Cantilever Beam* (DCB)**

O ensaio DCB é o ensaio mais utilizado para a medição de G_{Ic} e análise do comprimento de fenda em juntas coladas, tendo sido desenvolvido por Benbow e Roesler [38] e também por Gilman [39].

O ensaio é realizado com recurso a provetes constituídos por duas vigas de igual comprimento e espessura constante (Figura 42), sendo o adesivo colocado entre os mesmos, promovendo a sua adesão. O adesivo não é colocado na totalidade do comprimento dos substratos, uma vez que se considera uma região inicial de comprimento a_0 isenta de adesivo, designada por pré-fenda.



Figura 42 - Geometria do provete DCB segundo a norma ASTM D 3433 - 99 (dimensões em mm) [36]

O provete é solicitado em abertura, como ilustrado na Figura 43, originando um estado de clivagem do mesmo. Durante o ensaio é registada a carga P e o deslocamento δ para os correspondentes valores de a [40]. Note-se que h é a espessura dos substratos e t a espessura do adesivo.

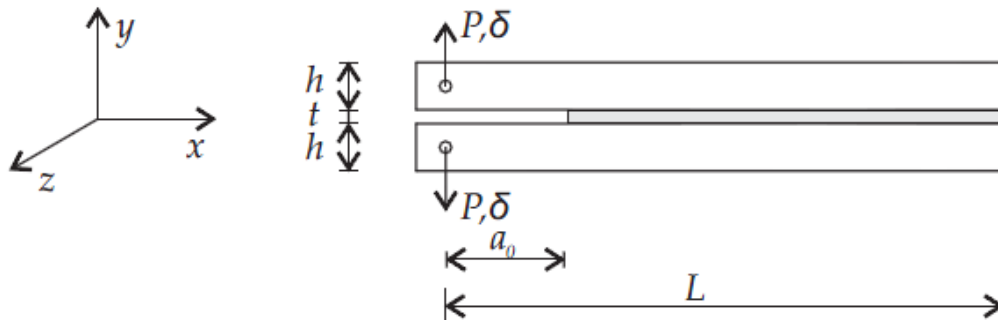


Figura 43 - Representação esquemática do provete DCB [35]

O ensaio termina quando ocorre a rotura do provete, esperando-se verificar uma rotura coesiva do mesmo.

Tapered Double Cantilever Beam (TDCB)

A mesma norma utilizada no ensaio DCB (ASTM D 3433 - 99), também sugere outra geometria de provetes para obter G_{Ic} , designada por TDCB. Este método foi desenvolvido para permitir a medição de G_{Ic} sem necessidade de monitorização de a durante o ensaio, embora atualmente já estejam disponíveis métodos para o ensaio DCB que evitem a medição de a . A espessura dos aderentes varia com o comprimento dos mesmos, para assegurar uma variação constante da taxa de flexibilidade em função do comprimento da fenda [41]. Os provetes são maquinados com duas secções de altura constante nas extremidades, e uma secção intermédia onde a altura varia com o comprimento de fenda $h = f(a)$, como demonstrado na Figura 44.

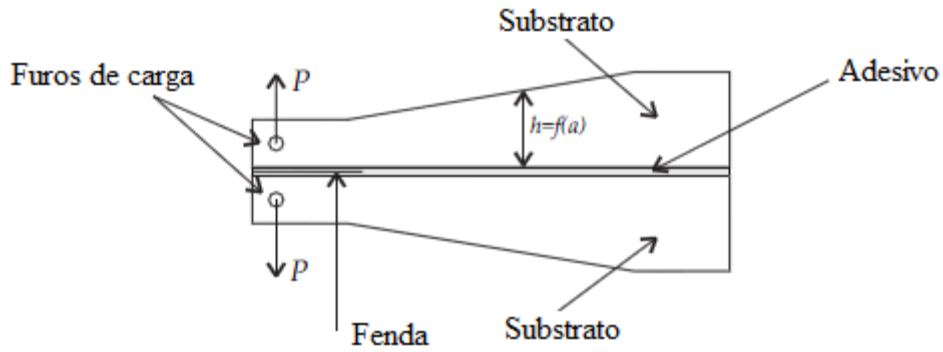


Figura 44 - Representação esquemática do provete TDCB [35]

Como vantagem do ensaio TDCB pode-se salientar que o aumento da espessura proporciona uma maior resistência à deformação plástica nos braços do provete, reduzindo as tensões de flexão aplicadas nos mesmos. O facto de se poder obter a taxa crítica de libertação de energia independentemente do comprimento de fenda, também pode ser tido como uma vantagem. No entanto, o fabrico dos provetes TDCB é mais dispendioso e complicado relativamente aos DCB, sobretudo para substratos de compósito [6, 34, 35].

2.3.3.2 Ensaios Double-Cantilever Beam

O ensaio DCB requer uma fenda inicial (Figura 43). Esta pode ser induzida através de orifícios circulares perfurados através da extremidade dos substratos, ou através da colocação de blocos metálicos ou dobradiças colados às extremidades de cada braço (Figura 45) [6].

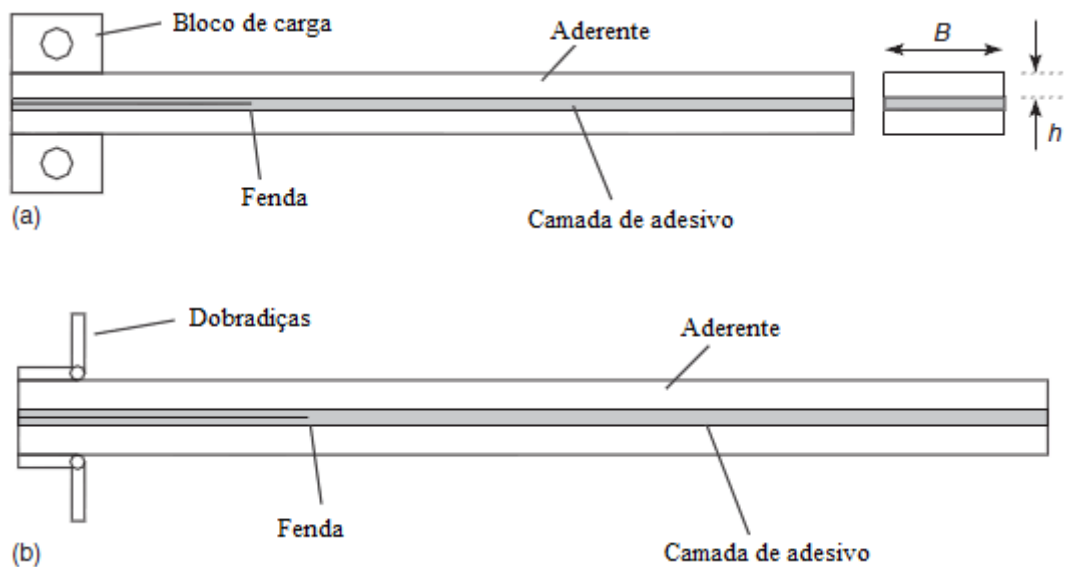


Figura 45 - DCB com blocos de carga (a) e dobradiças (b) [17]

O deslocamento das amarras da máquina de ensaio é realizado a uma velocidade constante, até ocorrer a rotura do provete (Figura 46a). Caso ocorra deformação plástica dos substratos, esta pode comprometer a determinação do valor de G_{Ic} , originando valores que podem ser desfasados da realidade [6].

A curva $P-\delta$ é registada durante o ensaio. Para as análises que necessitam da medição do valor de a , deve-se gravar imagens com um intervalo pré-estabelecido (por exemplo 5 s) que demonstrem a progressão da mesma. As imagens servirão para correlacionar o tempo decorrido desde o início de cada ensaio e o avanço da fenda em relação ao seu ponto inicial, com a curva $P-\delta$ (o tempo de ensaio de cada ponto da curva $P-\delta$ é definido com precisão pelo deslocamento absoluto e a velocidade de ensaio estabelecida) [33]. A Figura 46b apresenta uma imagem registada durante um ensaio, permitindo a medição do comprimento de fenda [33].

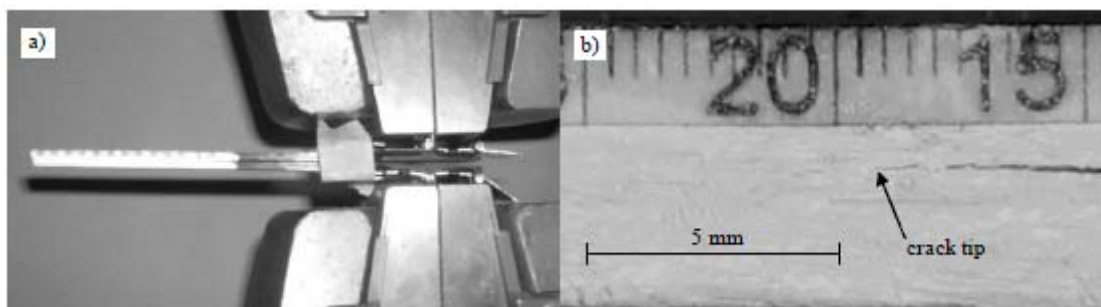


Figura 46 - *Setup* experimental (a) e demonstração da propagação da fenda (b) (DCB) [33]

Espera-se obter uma propagação coesiva, sendo este ponto essencial para a caracterização das propriedades em modo I.

2.3.3.3 Procedimentos de ensaio

Para a correta fabricação dos provetes para ensaio existem vários procedimentos a considerar, tais como uma preparação de superfície eficaz, através de uma granalhagem das superfícies a colar, e a posterior limpeza com o auxílio de um solvente volátil, a acetona. A rugosidade das superfícies dos substratos passará a ser uniforme, facilitando a molhagem do adesivo e permitindo obter uma junta mais resistente. De modo a se garantir uma espessura de adesivo constante, deve-se colocar calços calibrados em dois locais distintos do provete. Um tem a finalidade de garantir a espessura do adesivo e o outro, para além disto, simula um defeito inicial, designado por pré-fenda [40].

Na face lateral dos provetes, na zona do adesivo, deve ser aplicado um revestimento com tinta corretora, para uma melhor visualização da extremidade da fenda. Cola-se ainda uma escala por cima do adesivo, servindo de auxílio na medição da propagação da fenda em cada fase do ensaio [2]. Este valor pode ser medido com o auxílio de uma máquina fotográfica digital, registando imagens em intervalos constantes e reduzidos.

Deve-se dispor de um sistema de fixação à máquina auto-alinhante, de modo a garantir o correto alinhamento da solitação. A norma prevê ainda que a velocidade de solitação esteja geralmente compreendida entre 0,5 e 3 mm/min, estando a sua escolha dependente da geometria e das características dos materiais do provete [1].

É importante referir que no processo de cura é normalmente efetuada uma pressão com a ajuda de uma prensa hidráulica, por exemplo. Apesar da pressão não ser indicada pelos fabricantes no processo de cura, esta tem como finalidade o estabelecimento de contato substratos/calços, de forma a garantir a espessura pretendida, reduzindo a probabilidade de formação de bolhas e poros no adesivo [40].

2.3.3.4 Métodos para determinação do G_{Ic}

2.3.3.4.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Os métodos CCM (*Compliance Calibration Method*), DBT (*Direct Beam Theory*) e CBT (*Corrected Beam Theory*) são métodos que requerem a medição do comprimento de fenda.

O CCM é baseado na equação de Irwin-Kies e é dado por [42]:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}, \quad (12)$$

onde P [N] representa a carga aplicada, b [mm] a largura da amostra e C [mm/N] = δ/P a flexibilidade. Se forem utilizados polinómios cúbicos ($C = C_3a^3 + C_2a^2 + C_1a + C_0$), muito comuns em trabalhos realizados para ajustar as curvas da flexibilidade $C = f(a)$, leva a que [42]:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} (3C_3a^2 + 2C_2a + C_1). \quad (13)$$

Também se podem utilizar os teoremas das vigas. A teoria das vigas direta ou *Direct Beam Theory* (**DBT**), baseada na teoria das vigas elementar, origina [33]:

$$G_{Ic} = \frac{12a^2P^2}{b^2h^3E_x}, \quad (14)$$

onde h [mm] representa a altura de cada aderente e E_x [MPa] o módulo de Young dos aderentes na direção longitudinal. Usando o método **CBT**, o G_{Ic} é obtido através de [42]:

$$G_{Ic} = \frac{3P\delta}{2b(a+|\Delta|)}. \quad (15)$$

Esta correção contabiliza a rotação dos aderentes na extremidade na fenda, sendo Δ um fator de correção do comprimento de fenda que se determina a partir da regressão linear de $C^{1/3} = f(a)$. A regressão linear pode ser obtida através de ensaios experimentais de três provetes (Figura 47), com diferentes comprimentos iniciais de fendas [35].

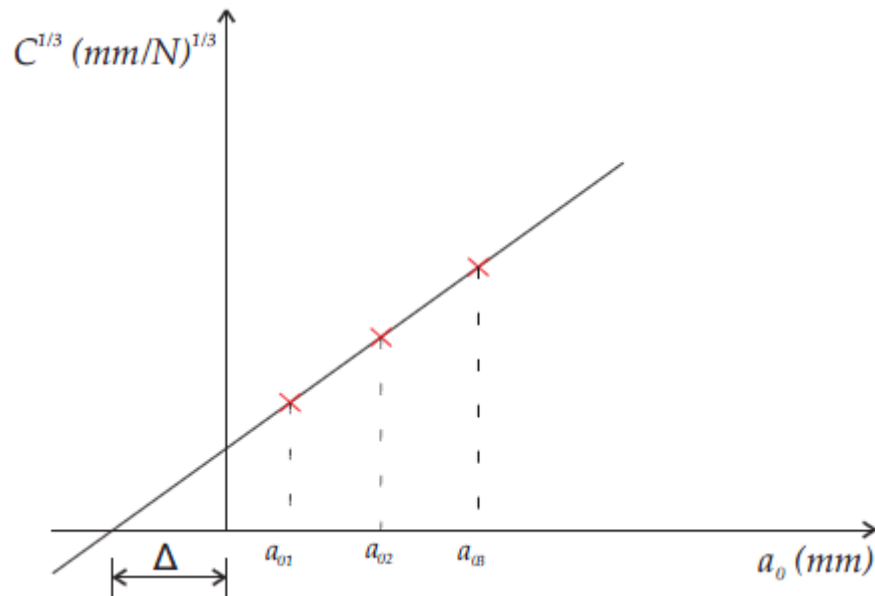


Figura 47 - Método de obtenção da correção do comprimento de fenda Δ [35]

Uma outra forma de contabilizar os efeitos de rotação dos aderentes na extremidade da fenda é pela utilização de um parâmetro Δ_I , e é dada por [35]:

$$\Delta_I = h \sqrt{\frac{E}{11G} \left[3 - 2 \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (16)$$

sendo

$$\Gamma = 1,18 \frac{E}{G}. \quad (17)$$

Este parâmetro Δ_l pode ser usado na Equação (15) em substituindo o parâmetro Δ .

2.3.3.4.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

No método *Compliance-Based Beam Method (CBBM)*, deve-se considerar um comprimento equivalente de fenda a_e , durante a propagação da fenda, para se obter o G_{lc} . Para adesivos com alguma ductilidade, é necessário considerar o efeito da Zona de Processo da Fratura (ZPF) ou *Fracture Process Zone (FPZ)*, como é mais conhecido na bibliografia. A FPZ corresponde a uma região de material danificado por processos inelásticos (microfissuração, microdeformação plástica, entre outros), localizada na extremidade da fenda (Figura 48).

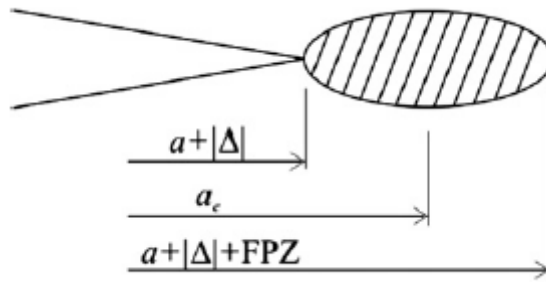


Figura 48 - Representação esquemática da FPZ e do conceito de fenda equivalente [42]

A FPZ torna-se maior quando se está na presença de adesivos dúcteis. O comprimento equivalente de fenda pode ser calculado utilizando $a_e = a + |\Delta| + \Delta_{aFPZ}$ como função da seguinte equação (*Teorema de Castigliano*), substituindo a por a_e [42]:

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8Pa^3}{Ebh^3} + \frac{12Pa}{5bhG}, \quad (18)$$

tendo em conta que

$$U = 2 \left[\int_0^a \frac{M_f^2}{2EI} dx + \int_0^a \int_{-h/2}^{h/2} \frac{\tau^2}{2G} b dz dx \right] \quad (19)$$

e

$$\tau = \frac{3}{2} \frac{V}{bh} \left(1 - \frac{y^2}{c^2}\right), \quad (20)$$

em que U [J] representa a energia de deformação devida à flexão e ao corte dos dois braços do provete, M_f [N.mm] representa o momento fletor e $I = bh^3/12$ [mm⁴] o momento estático de segunda ordem da viga. Os parâmetros c e V são, respetivamente, metade da espessura e a carga transversal em cada braço.

Um módulo de flexão equivalente E_f é considerado neste método e pode ser obtido através da Equação (18), usando uma flexibilidade inicial C_0 [42]:

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12(a_0 + |\Delta|)}{5bhG} \right)^{-1} \frac{8(a_0 + |\Delta|)}{bh^3}. \quad (21)$$

O G_{Ic} pode então ser obtido pela seguinte equação, tomando por base a Equação (12) [42]:

$$G_{Ic} = \frac{6P^2}{b^2h} \left(\frac{2a_e^2}{h^2 E_f} + \frac{1}{5G} \right). \quad (22)$$

2.3.3.4.3 Métodos baseados no Integral J

Quando os materiais deformam plasticamente, a análise pelo conceito da Mecânica da Fratura Linear Elástica ou como mencionado em bibliografia, *Linear Elastic Fracture Mechanics* (LEFM), torna-se inválida. O método de análise do Integral J torna-se útil para aplicação nestes casos [43].

O **Integral J** baseia-se no conceito de força energética e na teoria das vigas, sendo o cálculo de G_I dado pela seguinte expressão [43]:

$$G_I = 12 \frac{(P_u a)^2}{Eh^3} + P_u \theta_0 \quad (23)$$

ou

$$G_I = P_u \theta_p, \quad (24)$$

onde P_u [N] representa a carga aplicada por unidade de largura nas extremidades dos aderentes, Θ_0 [rad] a rotação relativa dos aderentes na ponta da fenda e Θ_p [rad] a rotação relativa dos aderentes na linha de carregamento.

Com este método, comparativamente aos anteriormente referidos, também é necessário medir a abertura da fenda e rotação dos aderentes na ponta da fenda durante o ensaio. O método também permite obter a lei coesiva do adesivo, o que é uma grande vantagem para efeitos de previsão de resistência por métodos avançados da mecânica do dano, como sejam os modelos de dano coesivos [43].

2.3.4 Caracterização das propriedades de fratura ao corte

Os ensaios de fratura em modo II (caracterização ao corte) de juntas coladas são mais complexos do que os ensaios em modo I e, até ao momento, ainda não existem ensaios normalizados para este modo. No entanto, existem ensaios baseados na caracterização da fratura interlaminar de materiais compósitos em modo II, que foram adaptados com o objetivo de estudar as juntas adesivas [35].

O desenvolvimento tardio de ensaios de fratura em modo II, reflete um maior ceticismo dentro da comunidade científica sobre a importância e singularidade da fratura em modo II. Apesar das questões que ainda existem em torno das origens, do verdadeiro significado e singularidade da fratura em modo II, existe claramente a necessidade de caracterizar como as juntas falharão quando sujeitas a uma carga de corte aplicada num conjunto, bem como determinar a resistência à fratura em modo II correspondente [6].

2.3.4.1 Métodos de ensaio

Existem vários ensaios que nos permitem determinar a tenacidade à fratura de juntas adesivas em modo II, sendo os mais relevantes o ENF, o *End-Loaded Split* (ELS) e o *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF).

***End-Notched Flexure* (ENF)**

O ensaio mais simples e maioritariamente utilizado para caracterização de juntas adesivas em modo II é o ENF. Os provetes consistem em dois braços de espessura constante colados entre si, sendo apoiados nas extremidades. É aplicada uma carga P a meio vão, estando o

provete sujeito a uma flexão em 3 pontos como demonstrado na Figura 49, o que causa um modo de corte no adesivo [35].

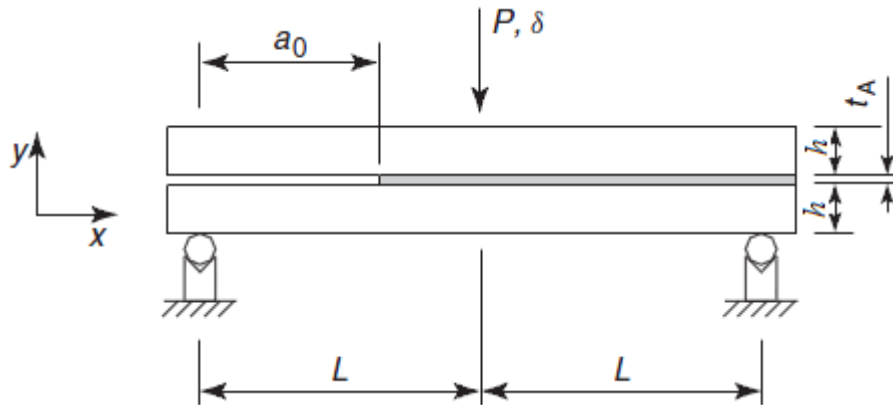


Figura 49 - Representação esquemática do ensaio ENF [17]

Four-Point End Notched Flexure (4ENF)

O ensaio de flexão em 4 pontos (4ENF) tem por base o ensaio ENF, mas torna-se mais sofisticado, através da introdução de um ponto adicional de carregamento. No entanto, são conhecidos alguns problemas de fricção na zona da pré-fenda, devido ao tipo de carregamento adotado [40]. A carga é igualmente aplicada a meio vão, tal como se verifica no ensaio ENF, mas esta não é aplicada diretamente sobre o provete, ficando a cargo de dois cilindros de carga distanciados equitativamente do ponto onde a força é aplicada (Figura 50).

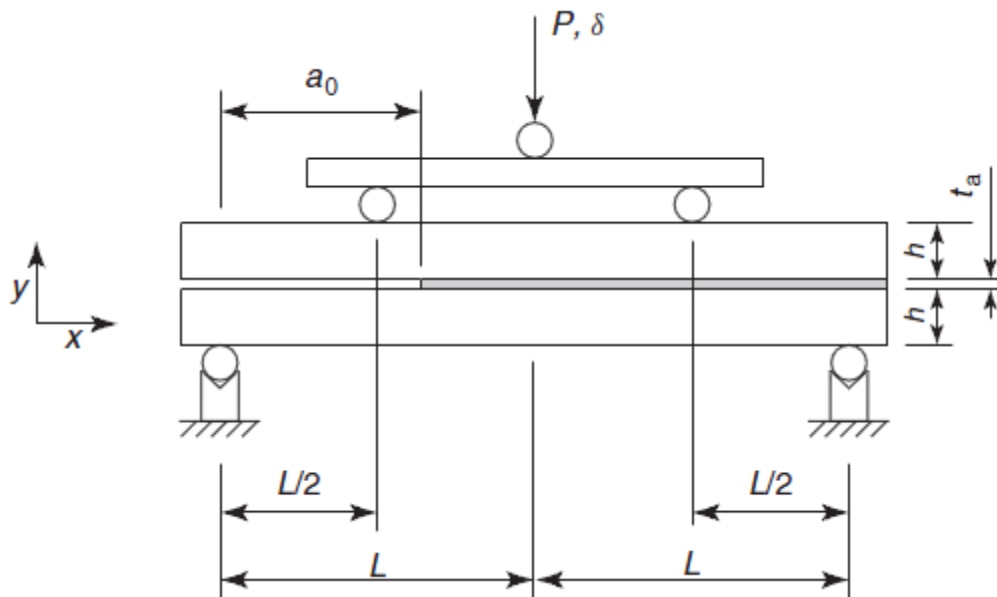


Figura 50 - Representação esquemática do ensaio 4ENF [17]

End-Loaded Split (ELS)

Este ensaio, contrariamente ao ENF e 4ENF, prevê a aplicação de uma força mediante um cilindro de carga na extremidade do provete, estando a outra extremidade fixada por dois grampos (Figura 51). Requer uma fixação mais elaborada, incluindo a medição de um fator de correção da mesma [35]. A Figura 52 demonstra o *setup* necessário para a realização deste ensaio.

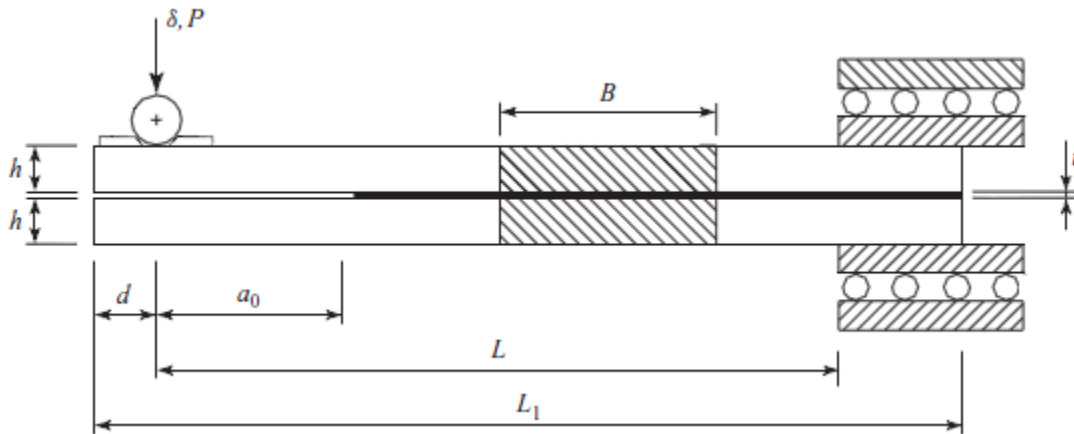


Figura 51 - Representação esquemática do ensaio ELS [17]

O ensaio ELS apresenta algumas dificuldades na obtenção correta do G_{IIc} , relacionadas com a existência de grandes deslocamentos e alguma sensibilidade às condições de aperto, onde o provete é impedido de se deslocar na vertical, mas livre para se mover na direção horizontal. Por outro lado, este tipo de ensaio é caracterizado por favorecer uma iniciação estável da fenda, razão para ter sido o método preferido pela ESIS - *European Structural Integrity Society* [40].



Figura 52 - *Setup* do ensaio ELS [17]

2.3.4.2 Ensaios End-Notched Flexure

Tal como no ensaio DCB, utilizado para caracterização à fratura em modo I, o ensaio ENF requer uma fenda inicial, e a carga, neste caso, é aplicada a meio vão do provete, não sendo necessários elementos de aplicação à máquina de ensaios (blocos de carga ou dobradiças), como se verifica para o ensaio DCB (Figura 53).

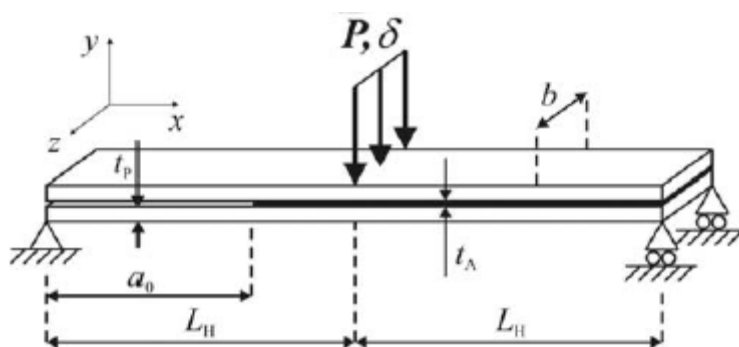


Figura 53 - Diagrama representativo do ensaio ENF [33]

O ensaio é realizado a velocidade constante até a fenda atingir a zona do cilindro de carregamento, pois a partir desta zona os resultados obtidos não são relevantes para a medição de G_{IIc} . Os substratos neste tipo de ensaio estão mais propícios a sofrerem deformação plástica, principalmente se o material dos mesmos for alumínio, devendo-se adequar ao adesivo utilizado. Deve existir uma correta relação entre a espessura e a rigidez, para evitar a plastificação dos substratos [17]. No entanto, caso ocorra uma deformação plástica dos substratos, esta pode comprometer a determinação do valor de G_{IIc} , originando valores que podem ser desfasados da realidade [6].

Também neste ensaio é registada a curva $P-\delta$. Para as análises com base no comprimento de fenda deve-se gravar imagens com intervalos de tempo constantes (por exemplo 5 s), que demonstrem a progressão da mesma. As imagens servirão para correlacionar o tempo decorrido desde o início de cada ensaio e o avanço da fenda em relação ao seu ponto inicial, com a curva $P-\delta$ (o tempo de ensaio de cada ponto da curva $P-\delta$ é definido com precisão pelo deslocamento absoluto e a taxa de carga estabelecida) [33]. De notar que, caso a flexibilidade do adesivo seja elevada, isto pode levar a dificuldades adicionais na medição de a . De facto, esta é uma das maiores dificuldades associadas a este tipo de ensaio, em que a fenda se propaga com os braços do provete encostados, o que dificulta bastante a correta medição de

a [1]. A Figura 54b apresenta uma imagem registada durante um ensaio, permitindo a medição do comprimento de fenda.

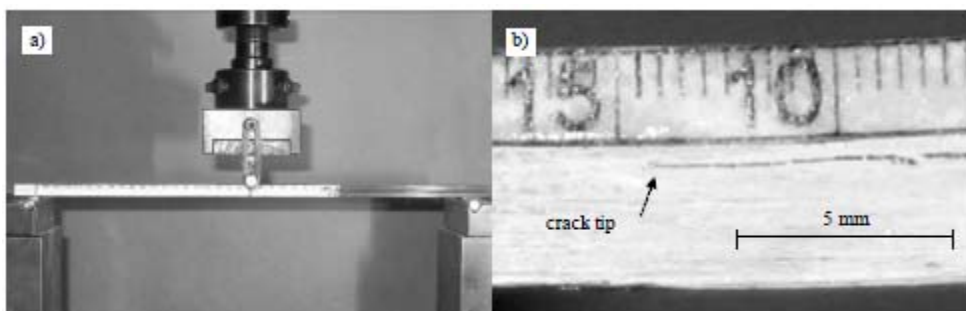


Figura 54 - *Setup* experimental (a) e demonstração da propagação da fenda (b) (ENF) [33]

Mais uma vez, espera-se obter uma propagação coesiva, sendo este ponto essencial para a caracterização das propriedades em modo II.

2.3.4.3 Procedimentos de ensaio

Uma preparação da superfície através de uma granalhagem e a posterior limpeza com o auxílio de acetona são procedimentos a serem considerados. A rugosidade das superfícies dos substratos passará a ser uniforme, facilitando a molhagem do adesivo e permitindo uma junta mais resistente. De modo a garantir uma espessura de adesivo constante, devem-se colocar calços calibrados em dois locais distintos do provete. Tal como verificado para o ensaio DCB, um tem a finalidade de garantir a espessura do adesivo e o outro, para além disto, simula um defeito inicial, designado por pré-fenda [40].

Tal como verificado para o ensaio DCB, deve ser aplicado um revestimento com tinta corretora na face lateral dos provetes, de forma a possibilitar a visualização da extremidade da fenda. Cola-se ainda uma escala por cima do adesivo, servindo de auxílio na medição da propagação da fenda em cada fase do ensaio [2]. Para se obter a correta visualização da propagação da fenda utiliza-se, normalmente, uma máquina fotográfica digital, registando a sua propagação em intervalos constantes e reduzidos.

Deve-se dispor de um suporte para apoiar provete sobre dois pontos e definir qual a distância entre os mesmos. Os dois pontos são anotados no próprio provete a uma distância equidistante do centro, bem como o ponto de aplicação de carga a meio vão. Este ponto é de

extrema importância para a correta realização do ensaio ENF, já que poderá comprometer a propagação da fenda, caso os paralelismos com a base não sejam assegurados.

Para o processo de cura, poder-se-á utilizar molas para realizar a pressão desejada com a finalidade de estabelecer o contacto entre substratos e calços de forma a garantir a espessura de adesivo pretendida. Para além disso, garantirá que o adesivo é aplicado em toda a área dos substratos e reduzirá a probabilidade de formação de bolhas no mesmo.

2.3.4.4 Métodos para determinação do G_{IIc}

2.3.4.4.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Para os ensaios de determinação do G_{IIc} utilizam-se métodos semelhantes aos que foram usados para determinar o G_{Ic} , embora com os ajustes necessários à modificação do carregamento e condições de apoio.

Começando pelo **CCM**, o G_{IIc} pode ser obtido por [44]:

$$G_{IIc} = \frac{P^2}{2b} \frac{dC}{da}. \quad (25)$$

Na generalidade dos trabalhos publicados usam-se polinómios cúbicos ($C = C_1a^2 + C_0$) para ajustar as curvas da flexibilidade $C = f(a)$, o que leva a [44]:

$$G_{IIc} = \frac{3P^2C_1a^2}{2b}. \quad (26)$$

No caso do ensaio ENF, o método **CBT** refere que [44]:

$$G_{IIc} = \frac{9(a + 0,42\Delta_l)^2 P^2}{16b^2 h^3 E}. \quad (27)$$

A determinação do parâmetro Δ_l já foi abordada no ponto 2.3.3.4.1.

2.3.4.4.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

Tendo em conta tudo o que foi referido acerca do comprimento de fenda equivalente no ponto 2.3.3.4.2 do presente trabalho, pode-se proceder ao cálculo do G_{IIc} pelo método

CBBM. No entanto, para o ensaio ENF existem aspetos de formulação diferentes, tendo em consideração a fixação e aplicação de carga do mesmo. Posto isto, utilizando a teoria das vigas, pode-se descrever a flexibilidade como [44]

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8Eb^3} + \frac{3L}{10Gbh} \quad (28)$$

O módulo de flexão considerado neste método pode ser calculado a partir da Equação (28), usando a flexibilidade inicial, C_0 , e a fenda inicial a_0 :

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8bh^3 C_{0corr}} \quad (29)$$

onde C_{0corr} é dado por

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10Gbh} \quad (30)$$

Combinando a Equação (28) com a Equação (29), e colocando a_e no lugar de a origina

$$a_e = a + \Delta_{aFPZ} = \left[\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} a_0^3 + \frac{2}{3} \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) L^3 \right]^{1/3} \quad (31)$$

onde C_{corr} é dado pela Equação (30), usando C no lugar de C_0 . O G_{IIc} pode então ser determinado usando a Equação (25), sendo dado por [44]

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 a_e^2}{16b^2 E_f h^3} \quad (32)$$

2.3.4.4.3 Métodos baseados no Integral J

Tal como no DCB, também é possível calcular o valor de G_{IIc} pelo método do Integral J, embora existam algumas diferenças de formulação.

Stigh et al. [45], em trabalho realizado baseado no pressuposto da existência de uma lei coesiva, concluíram que, para as camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas, refletindo as propriedades do adesivo, podendo o Integral J ser calculado ao longo de um caminho arbitrário que contorna a fenda. Para a fratura em modo II pelo ensaio ENF,

está disponível uma formulação de cálculo de G_{IIc} pelo método do Integral J [46]. O valor do **Integral J** é dado por

$$G_{II} = \frac{9}{16} \frac{(P_u a)^2}{E h^2} + \frac{3}{8} \frac{P_u v_0}{h} \quad (33)$$

onde P_u [N] representa a carga por unidade de largura, a [mm] o comprimento de fenda, h [mm] a espessura dos aderentes, E [MPa] o módulo de Young dos aderentes e v_0 [mm] o deslocamento de corte entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda.

Este método, tal como no ensaio DCB, também permite determinar a lei coesiva, neste caso em corte. Relativamente aos métodos anteriores, é necessária a medição adicional do valor de v_0 durante o ensaio.

3 Desenvolvimento

Neste capítulo são descritos os detalhes experimentais, designadamente os materiais, os métodos de produção dos provetes, bem como os ensaios e respetivo procedimento para obtenção das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo, conduzindo ao objetivo principal do trabalho que passa pela caracterização do mesmo.

3.1 Adesivo selecionado

Para a realização deste trabalho, quis-se selecionar um adesivo recente no mercado e que ainda carecesse de ser caracterizado, não havendo muita informação nem trabalhos realizados acerca do mesmo. Trata-se do adesivo SikaForce® - 7752 FRW L60 da marca *Sika*. Este adesivo, produzida na Alemanha, é constituído por dois componentes, a resina (componente A) e o endurecedor (componente B), sendo a sua relação de mistura em peso de 5 para 1, respetivamente (ver Figura 55).



Figura 55 - Componentes que constituem o adesivo SikaForce® - 7752 L60

Tabela 4 - Características técnicas do adesivo SikaForce® - 7752 L60 [47]

	Componente A (Resina) SikaForce® 7752 FRW L60	Componente B (Endurecedor) SikaForce® 7752 B
Base química	Polióis, preenchida	Derivados de isocianato, por preencher
Côr	Branco	Castanho, transparente
Côr da mistrura	Beje	
Mecanismo de cura	Poliadição	
Densidade (25 °C)	Cerca de 1,6 kg/dm ³	Cerca de 1,2 kg/dm ³
Relação de mistura Volume	100	27
Peso	100	20
Viscosidade (20 °C); P/P 30 min; 0,2 mm de intervalo	Cerca de 200 000 mPaS (estável)	Cerca de 200 mPaS
Viscosidade da mistura; P/P 30 min; 0,2 mm de intervalo	Cerca de 70 000 mPaS (estável)	
Temperatura de processamento	15 - 30 °C	
Tempo de manuseamento (20 °C) ¹⁾	Cerca de 60 min	
Dureza Shore ²⁾ (DIN 53505)	Cerca de 60	
Resistência à tração ²⁾⁴⁾ (ISO 527)	Cerca de 10 MPa	
Alongamento à rotura ²⁾⁴⁾ (ISO 527)	Cerca de 25%	
Resistência à tração de corte ²⁾³⁾ (DIN EN 1465)	Cerca de 10 MPa (dependendo do substrato)	
Resistência inicial (0,5 MPa)	Cerca de 5 h a 23 °C / 110 min a 40 °C / 35 min a 60 °C	
Resistência ao peel	Cerca de 120 N / 3 cm	
Prazo de validade, em embalagens fechadas	6 meses	12 meses

1) Aumento da viscosidade até 150 000 mPaS em reómetro

2) Testado a 23 °C; 50% de humidade relativa; cura: 48 h ambiente + 3 h 105 °C + 24 h ambiente

3) Substrato: AlCuMg₂ platina; espessura da camada de adesivo: 1,5 mm

4) Espessura da camada das amostras: 4 mm

Pertence ao grupo dos elastómeros e é um poliuretano, pelo que se espera uma elevada ductilidade, característica dos poliuretanos. Possui a grande vantagem de não ser necessária uma cura com incremento de temperatura, que pode ser realizada à temperatura ambiente.

A mistura deve ser realizada manualmente num recipiente com espátula, utilizando sempre a proporção de 1 g de endurecedor por cada 5 g de resina. Deve-se efetuar uma correta mistura até o adesivo se tornar homogêneo, sendo este o ponto em que se obtêm todas as propriedades características do mesmo.

As embalagens fornecidas continham 7,5 kg de resina e 1,5 kg de endurecedor (Figura 55), sendo as características técnicas, disponibilizadas pela *Sika*, as constantes na Tabela 4.

3.2 Ensaio à tração

3.2.1 Fabrico dos provetes

Os provetes maciços para a determinação das propriedades mecânicas à tração foram fabricados segundo a norma Francesa NF T 76-142, sendo as dimensões dos provetes demonstradas através da Figura 56.

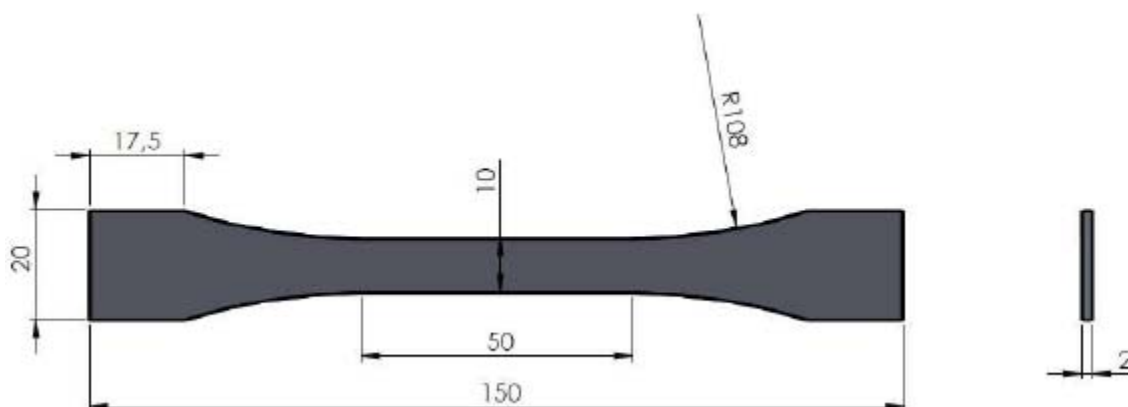


Figura 56 - Dimensões dos provetes maciços de adesivo pela norma NF T 76-142 (dimensões em mm)

Para se fabricar os provetes, recorreu-se ao molde desenvolvido por Pinto [21] e que é apresentado na Figura 57 e Figura 58.



Figura 57 - Placa inferior e superior do molde [21]

Para o fabrico da placa intermédia foi utilizado o corte laser como processo de fabrico, pois este processo garante a realização de arestas vivas interiores inerentes à geometria dos provetes [21]. Esta placa tem a vantagem de se poder fabricar até seis provetes numa única moldação, o que traz benefícios relativamente ao tempo de fabrico de uma determinada série de provetes (neste caso foram utilizadas as seis cavidades), existindo ainda a possibilidade de se realizar provetes de, por exemplo, dois adesivos diferentes numa só moldação (três de um adesivo e três de outro, por exemplo).



Figura 58 - Placa intermédia obtida por corte laser (seis cavidades) [21]

Pinto [21] também retificou as placas superior e inferior, antes e após cromagem dura, com o objetivo de endurecer a superfície e aumentar a resistência ao desgaste por abrasão, que vai ser limpa com espátulas cada vez que se acaba de produzir provetes. Para além disso, a retificação irá melhorar a qualidade superficial dos provetes e facilitar a sua desmoldação. Pode-se observar o acabamento superficial obtido através da Figura 59.

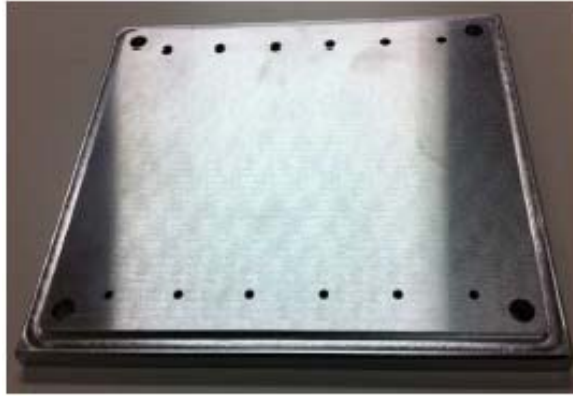


Figura 59 - Placa superior após cromagem dura e retificação [21]

3.2.1.1 Preparação do molde

Para se proceder a uma correta desmoldagem dos provetes após a cura do material, é necessário realizar alguns procedimentos essenciais que passam por uma preparação do molde. Com estes procedimentos espera-se evitar a danificação dos provetes aquando da sua extração e que o molde seja ou esteja contaminado durante a cura do adesivo.

Primeiramente utilizou-se papel embebido com acetona, como processo passivo químico, de forma a conseguir que todas as superfícies em contacto com o adesivo, inclusivamente os orifícios e contornos da placa intermédia estivessem devidamente desengorduradas (Figura 60). Com isto pretende-se não só remover as gorduras que poderão estar presentes nas placas resultantes do manuseamento das mesmas, mas também outros tipos de sujidades, como poeiras ou líquidos indesejados, facilitando a posterior aderência do desmoldante [1].



Figura 60 - Limpeza da placa intermédia com acetona

Após o desengorduramento das superfícies do molde, este foi colocado num forno a cerca de 80°C durante 15 min (Figura 61). Com este aquecimento o desmoldante irá aderir corretamente nas superfícies do molde, conforme a especificação na ficha técnica do mesmo. O desmoldante utilizado foi o Loctite Frekote® 770-NC [48].



Figura 61 - Aquecimento do molde em forno a 80°C

O molde foi retirado do forno e pouco tempo depois, ainda com as placas do molde quentes iniciou-se a aplicação do desmoldante em todas as superfícies que estarão em contacto com o adesivo (Figura 62). Teve-se especial cuidado na aplicação do mesmo nos orifícios que são utilizados para o enchimento do adesivo e nos contornos da placa intermédia, o que levou a que esta etapa fosse repetida três vezes, de forma a assegurar uma correta aplicação nestas zonas de difícil acesso, tornando o processo bastante moroso.



Figura 62 - Aplicação do desmoldante no molde

As placas constituintes do molde ficaram então preparadas para que o adesivo fosse aplicado (Figura 63).



Figura 63 - Preparação do molde finalizada

3.2.1.2 Aplicação do adesivo

Enquanto se esperava que o molde fosse aquecido no forno, preparou-se o adesivo realizando a mistura dos dois componentes. Previu-se que seria necessária uma quantidade generosa de mistura, pelo que se pesou, com o auxílio de uma balança digital, 100 g de componente A (num copo de plástico cujo peso foi anulado antes da pesagem do adesivo) (Figura 64a), sendo posteriormente adicionado 20 g de componente B (Figura 64b). Misturou-se então os dois componentes de forma a obter uma mistura homogénea que irá garantir todas as propriedades inerentes ao adesivo (Figura 64c).



Figura 64 - Preparação do adesivo: a) pesagem da resina, b) aplicação do endurecedor e c) mistura dos dois componentes

Entretanto, a placa intermédia foi colocada sobre a placa inferior do molde e fixada por intermédio de quatro parafusos de forma a evitar oscilações (Figura 65). Nesta fase, as peças constituintes do molde já tinham arrefecido até à temperatura ambiente.



Figura 65 - Molde preparado para aplicação do adesivo

Como o adesivo SikaForce[®] - 7752 FRW L60 é fornecido em bruto, a aplicação deste tem de ser processada por moldação em molde aberto com recurso a uma espátula (Figura 66a). Outros adesivos são fornecidos em bisnagas podendo ser realizada a sua aplicação por injeção do adesivo nos orifícios da placa superior do molde. É importante preencher com adesivo toda a cavidade do molde, excedendo os limites do mesmo (Figura 66b) de forma a garantir o completo enchimento da mesma e reduzir a probabilidade de defeitos internos que possam surgir.

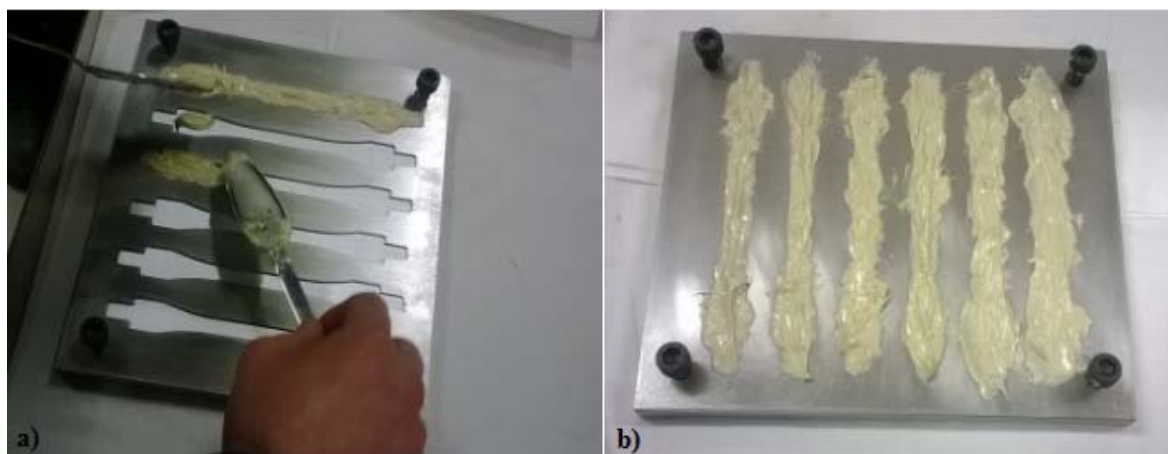


Figura 66 - a) Aplicação do adesivo por moldação em molde aberto e b) adesivo aplicado

Após conclusão da aplicação do adesivo e compactação do mesmo, colocou-se a placa superior (Figura 67a) e procedeu-se ao aperto do molde de forma que as bolhas de ar migrassem até à superfície, sendo expulsas pelos orifícios de respiro presentes na placa superior (Figura 67b). Foi colocada uma fita adesiva nos orifícios e realizados pequenos

furos na mesma (Figura 67a) de forma a evitar a saída brusca do adesivo assim que o molde fosse pressionado.

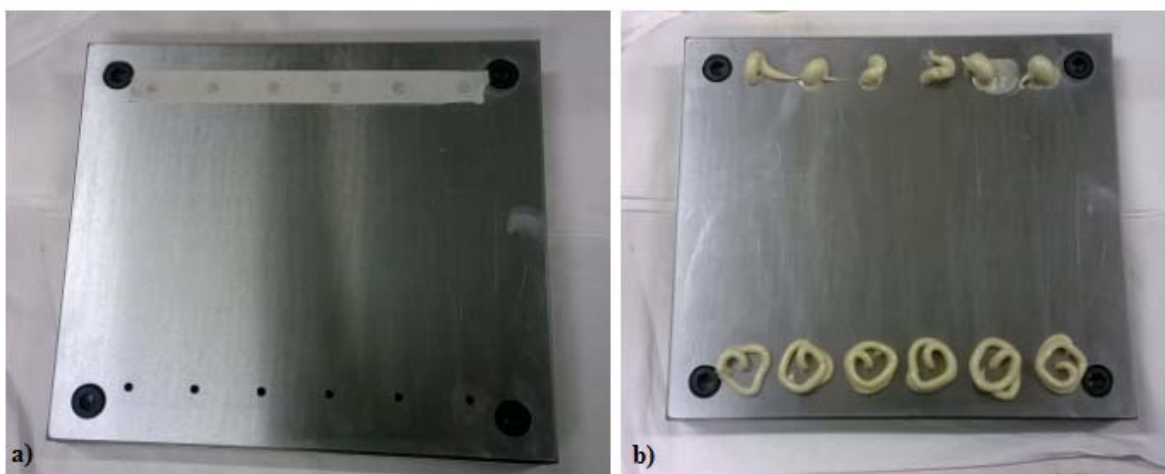


Figura 67 - Fecho do molde: a) Colocação da placa superior do molde e b) aperto do molde

Deixou-se curar o adesivo durante uma semana à temperatura ambiente e procedeu-se à abertura do molde. Desapertou-se o molde (Figura 68a), retirou-se a placa superior e verificou-se que os provetes de adesivo maciço apresentavam um bom acabamento a nível superficial, tendo as cavidades sido completamente preenchidas (Figura 68b).

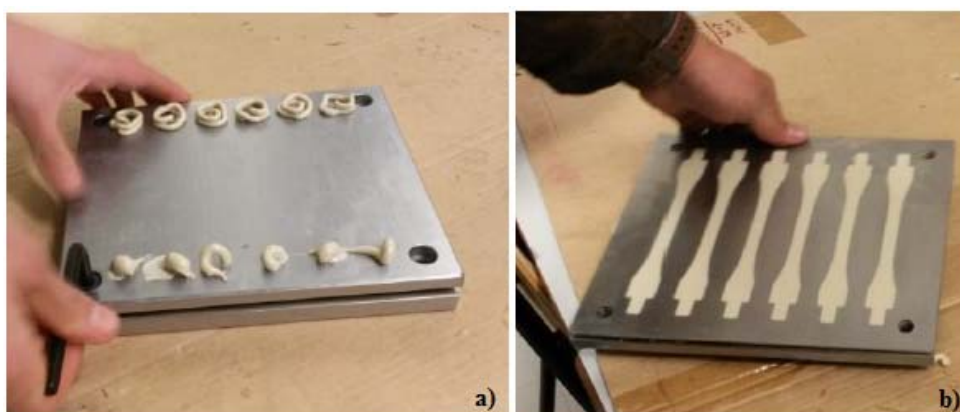


Figura 68 - Abertura do molde: a) desaperto do molde e b) aspeto dos provetes ainda no molde, antes da desmoldação

De seguida, retirou-se a placa intermédia e procedeu-se à extração dos provetes de adesivo (Figura 69). Eliminou-se algumas rebarbas e verificou-se que os provetes apresentavam elevada flexibilidade aquando do seu manuseamento. Mais tarde vir-se-ia a concluir que os provetes não tinham curado devidamente e que não se deveria ter começado a ensaiá-los no mesmo dia da abertura do molde.



Figura 69 - Extração dos provetes de adesivo

Para se comprovar a existência de poros ou vazios no interior dos provetes, recorreu-se ao auxílio de luz artificial de maneira a contrastar com a camada de adesivo que compunha cada provete (Figura 70).

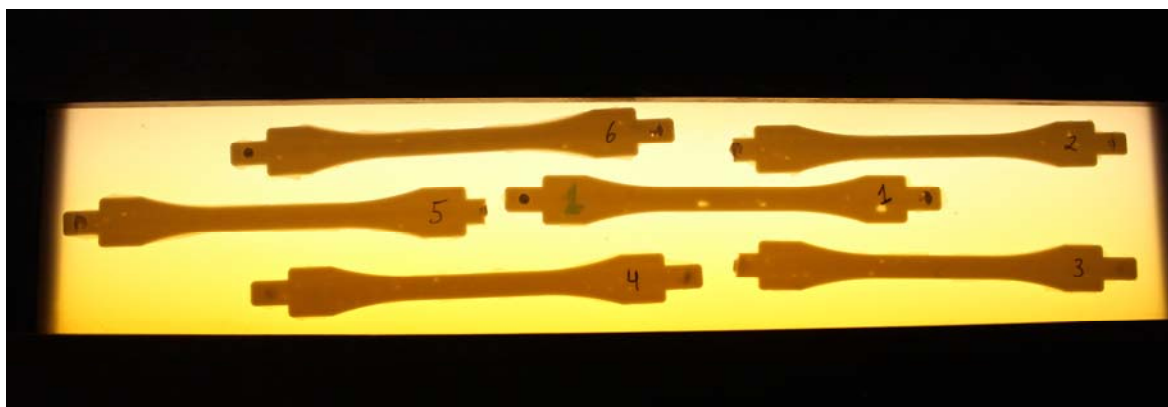


Figura 70 - Verificação da existência de vazios nos provetes de adesivo

Após inspeção, concluiu-se que o provete 1 seria aquele que provavelmente possuiria uma menor resistência à tração devido à existência de alguns vazios, sendo um deles de dimensão considerável na zona útil do provete, prevendo-se ser esta a zona de rotura do mesmo quando solicitado (Figura 71).

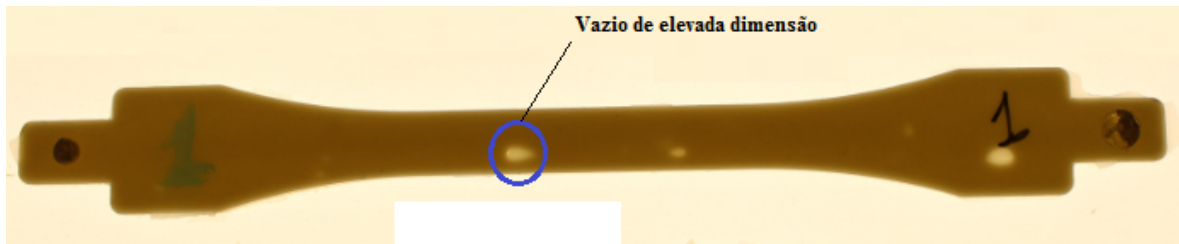


Figura 71 - Vazio de dimensão considerável no provete 1

3.2.2 Ensaios de tração

Os ensaios de tração de provetes de adesivo maciço foram realizados na máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 (Figura 72), existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos do ISEP, sendo esta auxiliada pelo *software* TRAPEZIUM X instalado num computador para controlo dos ensaios e registo de dados. Esta máquina está equipada com uma célula de carga de 100 kN, utilizada para a medição da força aplicada. A mesma máquina universal de ensaios foi utilizada para a realização dos restantes ensaios efetuados neste trabalho.



Figura 72 - Máquina universal de ensaios Shimadzu Autograph AG-X 100 e computador com *software* TRAPEZIUM X

Para se prender os provetes à máquina foram utilizadas amarras de cunha do mesmo fabricante do equipamento, garantindo a inexistência de escorregamentos durante o ensaio. Este é um ponto essencial que poderia vir a afetar a medição do deslocamento máximo

durante o ensaio. Utilizou-se um extensómetro mecânico de forma a medir as deformações longitudinais em cada provete, não tendo sido possível a utilização do extensómetro ótico devido a avaria no equipamento.

Relativamente aos provetes, estes foram devidamente identificados, conforme demonstrado na Figura 70, de forma a facilitar a sua identificação após conclusão dos ensaios e a controlar a espessura e largura da zona útil de cada provete, medidas com recurso a um paquímetro digital. Com isto pretendeu-se obter a área real da secção do provete previamente a cada ensaio.

Foram realizadas três medições de espessura e largura em cada provete, de forma a obter um resultado mais próximo da realidade. Os valores obtidos são demonstradas na Tabela 5.

Tabela 5 - Dimensões dos provetes *bulk* (medição no dia 12 de Março de 2014)

Provete	Largura [mm]		Espessura [mm]	
1	10,34	10,27	2,06	2,07
	10,09		2,07	
	10,39		2,07	
2	10,71	10,39	2,05	2,06
	10,11		2,06	
	10,34		2,07	
3	10,55	10,41	2,11	2,10
	10,23		2,10	
	10,45		2,10	
4	10,21	10,32	2,09	2,09
	10,38		2,09	
	10,36		2,08	
5	10,39	10,46	2,09	2,08
	10,28		2,08	
	10,70		2,08	
6	10,20	10,12	2,11	2,10
	10,08		2,10	
	10,09		2,09	

Como apenas se ensaiou o provete 1 e o provete 2 no dia que se registou as secções dos provetes, realizaram-se novas medições aquando a realização dos restantes ensaios (Tabela 6).

Tabela 6 - Dimensões dos provetes *bulk* (medição no dia 19 de Março de 2014)

Provete	Largura [mm]		Espessura [mm]	
3	10,37	10,27	2,09	2,09
	10,17		2,10	
	10,26		2,09	
4	10,21	10,29	2,08	2,10
	10,38		2,08	
	10,27		2,13	
5	10,24	10,21	2,09	2,08
	10,19		2,08	
	10,19		2,08	
6	10,30	10,24	2,09	2,09
	10,20		2,10	
	10,22		2,09	

Estas demonstram que o material, de uma forma geral contraiu, o que pode indicar que aquando das primeiras medições, o adesivo não tenha curado devidamente. De facto, os provetes 1 e 2 demonstraram uma flexibilidade exagerada durante o ensaio, conforme se pode verificar através da Figura 73. De notar a estabilidade dimensional dos provetes, o que mostra a adequabilidade do processo da fabrico do molde, que permitiu obter provetes com elevado rigor dimensional.

Figura 73 - Rotura do provete 1 quando sujeito ao ensaio de tração (*bulk*)

De referir que os dados do ensaio com o provete 1 não foram guardados devido a um erro nos ficheiros obtidos. De qualquer forma, a força máxima obtida para este provete foi bastante inferior à registada nos provetes considerados como válidos.

3.2.2.1 Condições de ensaio

Os ensaios de tração de provetes de adesivo maciço, bem como os restantes ensaios foram realizados à temperatura ambiente. Com isto, consegue-se uniformizar as condições de obtenção das diferentes propriedades do adesivo estudado.

O equipamento começou por ser calibrado de forma a se considerar um deslocamento de valor igual a zero no início de cada ensaio, considerando uma distância entre amarras de 115 mm.

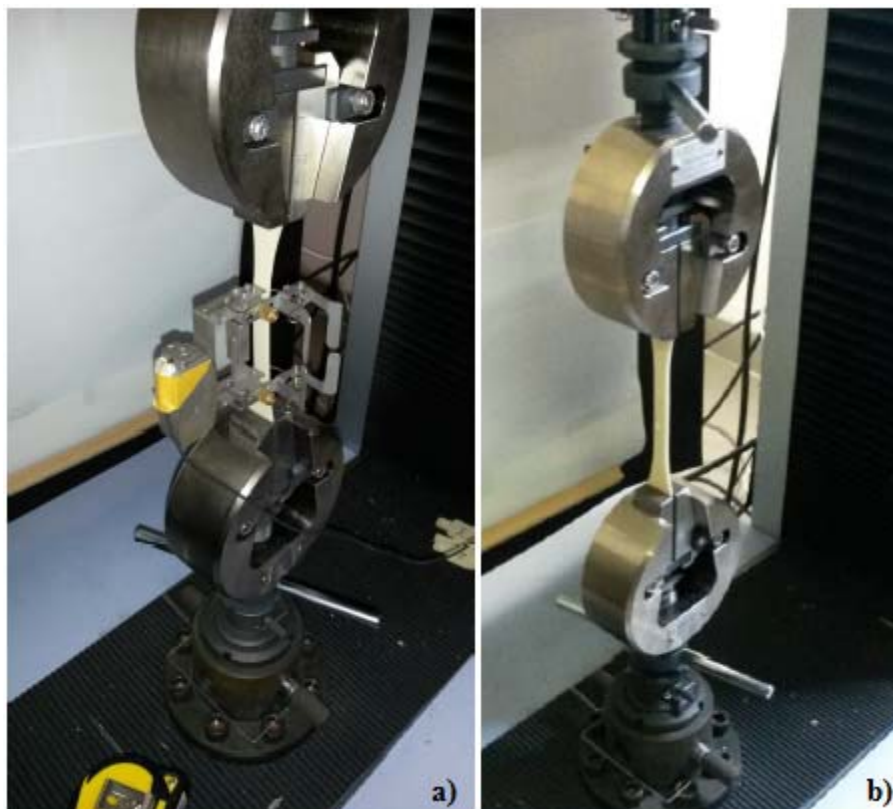


Figura 74 - *Setup* do ensaio de tração de provetes maciços: a) com extensómetro mecânico colocado e b) após remoção do extensómetro

Na realização do ensaio do provete 1 foram adotadas duas velocidades de ensaio, tendo sido a primeira de 1 mm/min, para a obtenção do valor de E , e a segunda (após remoção do extensómetro utilizado) de 4 mm/min, para a determinação das propriedades de resistência,

como a tensão de rotura, por exemplo. No caso dos restantes provetes, foi adotada uma velocidade constante de 2 mm/min. De notar que em todos os casos foi realizada uma pré-carga de 5 N, de forma que os provetes ficassem devidamente alinhados com o eixo da solicitação de carga.

Recorreu-se a um extensómetro mecânico (Figura 74a) como elemento auxiliar na determinação das deformações, tendo este sido retirado assim que atingido um alongamento de 1,5 mm (Figura 74b). Este tem um comprimento-base, l_e , de 50 mm e foi colocado na zona útil do provete. Para evitar que o extensómetro possa danificar o corpo de prova, deve-se colocá-lo com o maior cuidado possível, para evitar a deterioração decorrente da reduzida espessura dos provetes, o que comprometeria a validade dos resultados obtidos.

3.2.2.2 Medição das deformações

Como referido anteriormente, foi utilizado um extensómetro mecânico (Figura 75) para medição das deformações longitudinais nos corpos de prova, sendo este um extensómetro de contacto com um valor de l_e de 50 mm. Sendo este de contacto, torna-se imperativo retirá-lo até imediatamente antes de se atingir o limite elástico do provete, de forma a não danificar o corpo de prova nem tão pouco o próprio extensómetro.



Figura 75 - Extensómetro mecânico utilizado durante o ensaio de tração

Uma alternativa à utilização do extensómetro mecânico que elimina o contacto com o provete, com as vantagens daí provenientes, é a utilização de um extensómetro ótico. No entanto, à data da realização dos ensaios não se encontrava nenhum disponível para utilização no LEM (ISEP).

Os provetes foram solicitados até à ocorrência de rotura tendo sido verificados diferentes tipos de rotura consoante o dia dos ensaios. Nos ensaios dos dois primeiros provetes, verificou-se uma enorme flexibilidade dos corpos de prova (Figura 76a), enquanto os restantes demonstraram estar bastante mais rígidos (Figura 76b), devido ao maior tempo de cura a que foram sujeitos, já depois de efetuada a desmoldação.



Figura 76 - Rotura de provetes maciços: a) provete 1 (ensaiado no dia 12 de Março de 2014) e b) provete 3 (ensaiado no dia 19 de Março de 2014)

Posteriormente, executou-se todo o tratamento de dados, recorrendo a uma folha de cálculo Excel[®], por forma a calcular o módulo de elasticidade longitudinal, a tensão limite elástico, também designada por tensão de cedência, a tensão de rotura e a deformação de rotura ou alongamento máximo.

3.2.3 Análise de resultados

Para a determinação das propriedades mecânicas à tração, tomou-se como base a norma EN ISO 527-2 [27]. O valor de E é calculado selecionando no gráfico dois valores de tensão referentes à deformação de 0,05% e 0,25%. A Equação (2) foi utilizada para a determinação do referido módulo.

A tensão limite elástico foi obtida para uma deformação de 0,2%, traçando uma reta paralela à curva de proporcionalidade entre a tensão e a deformação. A interseção da reta com a curva

tensão-deformação origina a tensão limite de proporcionalidade 0,2 ($R_{p0,2}$) ou tensão limite elástico.

A tensão máxima foi admitida como tensão de rotura, sendo calculada através da razão entre a força máxima e a secção transversal inicial do provete, utilizando a Equação (34):

$$\sigma = \frac{P_{\max}}{A} \quad (34)$$

onde P_{\max} [N] corresponde à força máxima aplicada e A [mm²] a área da secção transversal inicial do provete. Foi retirada a deformação máxima registada durante os ensaios correspondente ao alongamento máximo do adesivo.

3.2.3.1 Curvas P - δ e σ - ε

Com os dados fornecidos pelo *software* TRAPEZIUM X, foi possível efetuar o tratamento de dados dos ensaios realizados, reproduzindo os mesmos em curvas P - δ (Figura 77) e curvas σ - ε (Figura 78). A remoção do extensómetro gerou uma pequena queda e conseqüente restituição quase imediata do valor de P em cada ensaio, tendo sido a mesma tratada de forma a se produzirem as curvas apresentadas.

O provete 1, como referido anteriormente, não foi tomado em conta devido a um erro na gravação dos ficheiros gerados pelo *software*. No entanto, como o provete 2 foi ensaiado no mesmo dia do primeiro e pareceu que a cura não estava devidamente realizada, gerando resultados bastante dispares dos restantes provetes, não tendo sido considerado na realização das curvas P - δ e σ - ε . Embora as suas propriedades mecânicas à tração tenham sido calculadas (Tabela 7), estas não foram contabilizadas no cálculo da média e desvio padrão das referidas propriedades. Este ensaio foi então considerado como inválido.

Da análise de ambas as curvas obtidas para os ensaios válidos, é de salientar a elevada repetibilidade dos resultados obtidos. Apenas os provetes 3 e 5 registaram uma variação digna de registo relativamente à zona elástica (proвете 3) e à ductilidade (proвете 5). O provete 3 registou uma menor resistência elástica devido ao menor declive das curvas obtidas, enquanto o provete 5 registou uma maior ductilidade, expressa numa maior deformação máxima auferida.

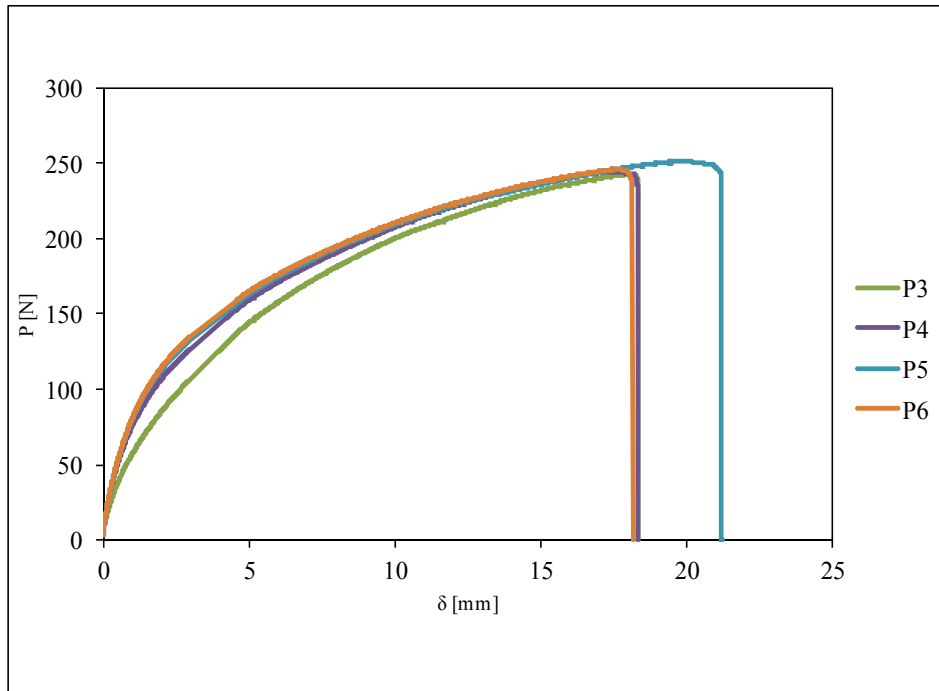


Figura 77 - Curvas P - δ dos provetes maciços

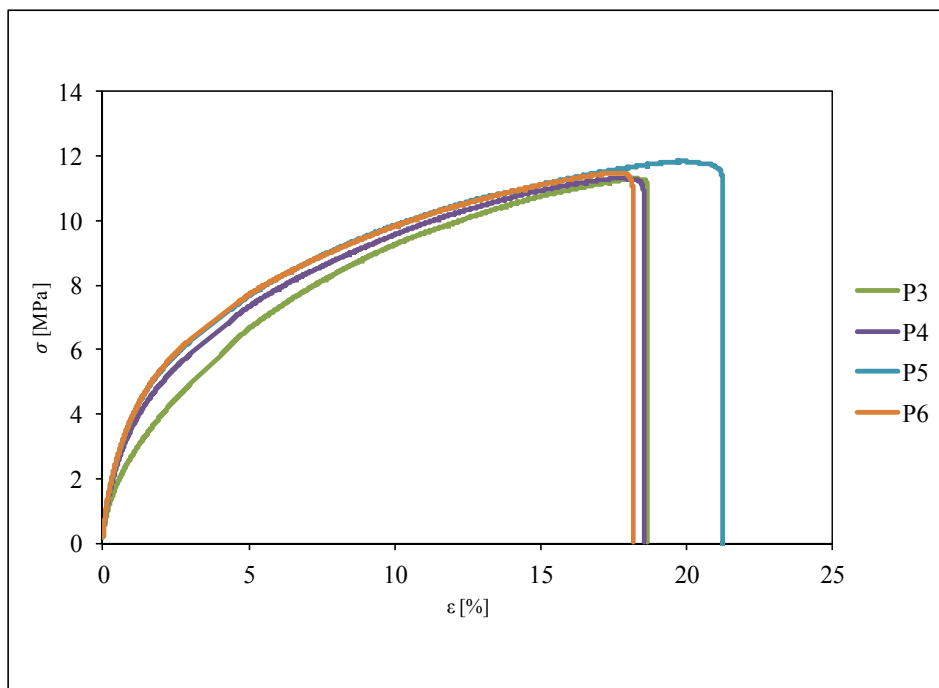


Figura 78 - Curvas σ - ε dos provetes maciços

A tensão limite elástico à tração foi calculada pela interseção da reta com declive paralelo à curva σ - ε , para uma deformação de 0,2%, como demonstrado na Figura 79 para o provete 5, como exemplo.

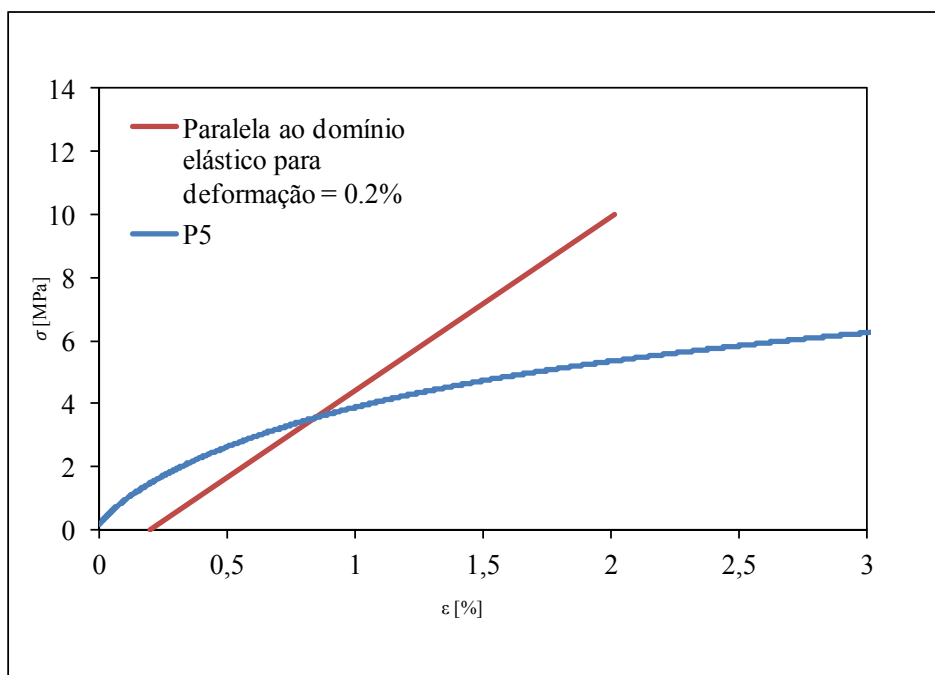


Figura 79 - Determinação da tensão limite elástico à tração a 0,2% (provetes 5)

Foram retiradas fotografias às roturas de cada provete ensaiado de forma a poderem auxiliar na compreensão dos resultados obtidos. Embora o provete 1 não tenha sido tratado, a rotura ocorreu conforme se previa, pela zona do maior vazio registado na zona útil do provete (Figura 80). Para além da possível cura ineficaz, este vazio foi a razão pela qual a força máxima verificada no dia do ensaio foi bastante inferior à dos restantes provetes, mesmo comparando com a força máxima registada pelo provete 2, provete este ensaiado no mesmo dia e nas mesmas condições, salvo a velocidade de ensaio adotada.

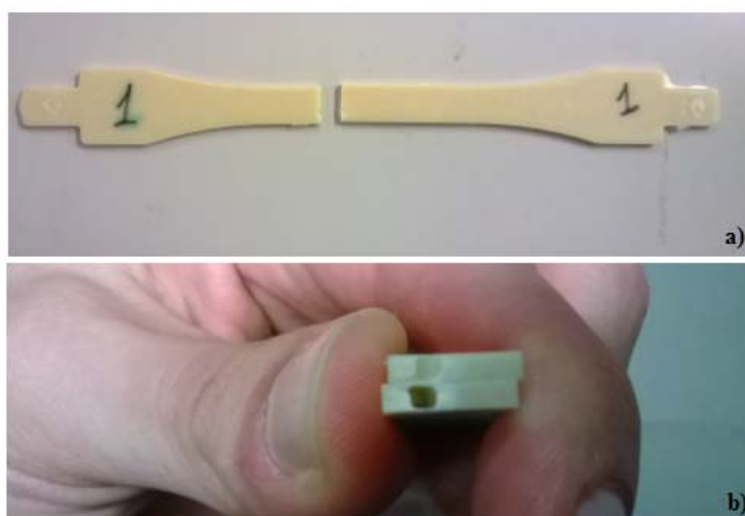


Figura 80 - Rotura dos provetes maciços (provetes 1): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura

O provete 2 registou uma superfície de rotura bastante melhor do que o provete 1 (Figura 81), embora estejam presentes alguns pequenos vazios.

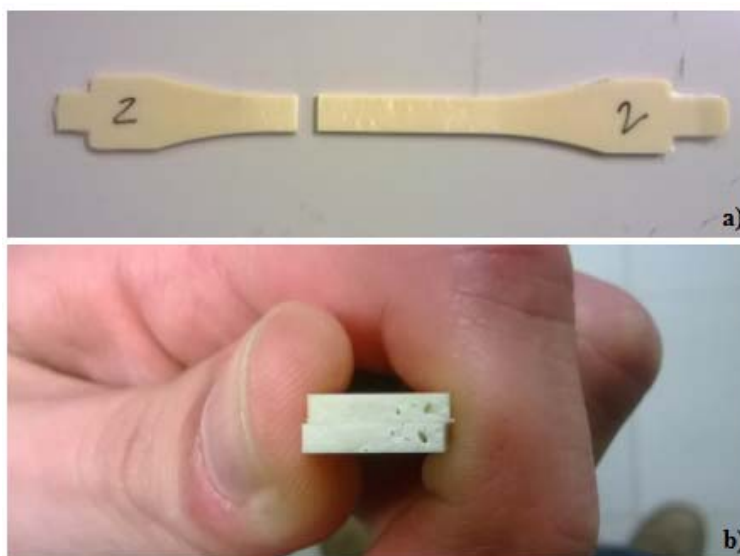


Figura 81 - Rotura dos provetes maciços (provetes 2): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura

Os provetes 3, 4, 5 e 6 (Figura 82, Figura 83, Figura 84 e Figura 85, respetivamente), apresentaram superfícies de rotura mais próximas do desejado, sendo pretendidas superfícies de rotura lisas e isentas de vazios e porosidades, pois estes defeitos provocam grandes variações nos resultados obtidos, podendo ser calculadas propriedades consideravelmente desfasadas das que verdadeiramente caracterizam o adesivo em causa.

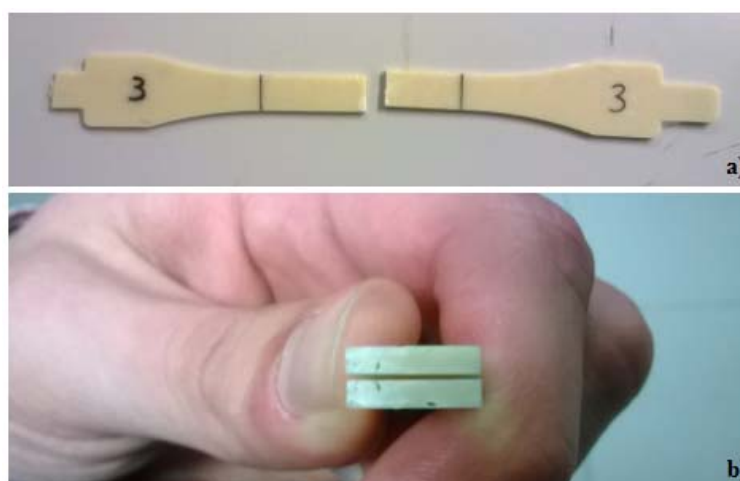


Figura 82 - Rotura dos provetes maciços (provetes 3): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura



Figura 83 - Rotura dos provetes maciços (provetes 4): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura

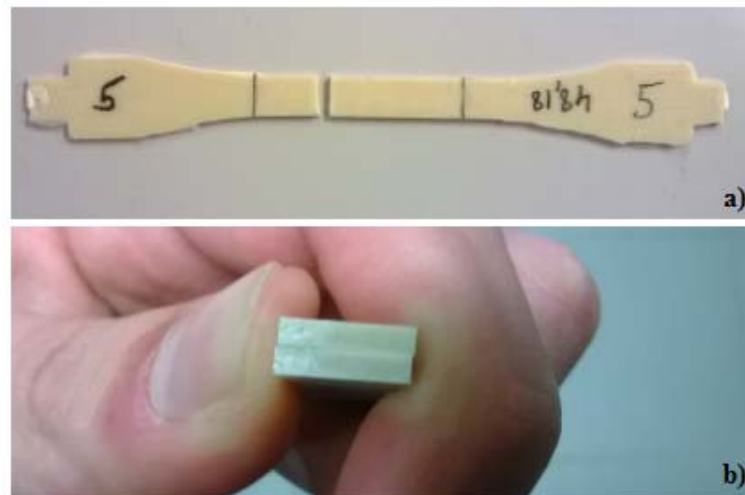


Figura 84 - Rotura dos provetes maciços (provetes 5): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura



Figura 85 - Rotura dos provetes maciços (provetes 6): a) rotura na zona útil do provete e b) análise da superfície de rotura

3.2.3.2 Propriedades mecânicas

Os dados obtidos através dos ensaios realizados e as propriedades mecânicas à tração determinadas para o adesivo SikaForce® 7752-L60 estão representados na Tabela 7.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas à tração

Provete	Força máxima [N]	Desl. máximo [mm]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	Tensão de rotura [MPa]	Along. máximo [%]	Tensão a 0,05% [MPa]	Tensão a 0,25% [MPa]	Módulo de Young [MPa]
2	155,71	53,95	1,10	7,28	48,67	0,28	0,39	53,25
3	242,59	18,37	2,56	11,30	18,70	0,54	1,27	362,94
4	244,48	18,36	3,28	11,31	18,58	0,60	1,62	508,62
5	251,39	21,22	3,53	11,84	21,26	0,61	1,71	551,94
6	245,86	18,16	3,60	11,49	18,19	0,65	1,75	551,76
Média	246,08	19,03	3,24	11,49	19,18	0,60	1,59	493,81
Desvio Padrão	3,79	1,47	0,48	0,25	1,40	0,045	0,22	89,60

Não é demais referir que os dados obtidos para o provete 2 não foram contabilizados para o cálculo da média e do desvio padrão, sendo o único que registou uma tensão de rotura inferior à dada na ficha do fabricante. O alongamento máximo também foi bastante superior, devido à elevada flexibilidade que apresentava.

No capítulo 3.6.1 é feita uma análise crítica e aprofunda dos valores obtidos para as propriedades mecânicas à tração.

3.3 Ensaio ao corte

3.3.1 Fabrico dos provetes

Para se realizar os ensaios ao corte utilizaram-se os provetes e ferramentas de acoplamento à máquina de ensaios desenvolvidos por Morais [29]. A geometria e dimensões dos provetes TAST fabricados estão de acordo com a norma ISO 11003-2, e encontram-se patentes na Figura 86.

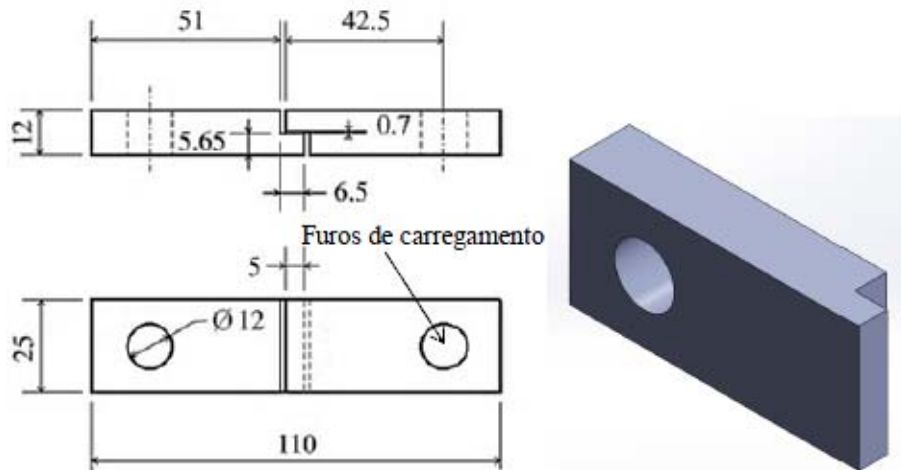


Figura 86 - Provete TAST desenvolvido por Morais. [29], segundo a norma ISO 11003-2 (dimensões em mm)

Foi utilizado o processo de maquinagem para o desenvolvimento de todas as peças necessárias ao ensaio TAST, tais como: os seis provetes TAST (cada um deles constituído por dois substratos idênticos), o *gabarit* para o alinhamento dos mesmos (Figura 87) e os dispositivos de ligação à máquina de ensaios e fixação do provete a ser ensaiado (Figura 88).



Figura 87 - *Gabarit* utilizado para o alinhamento de provetes [29]

O material utilizado para o fabrico dos provetes foi o aço DIN C45E, devido à sua elevada resistência mecânica, boa condutividade térmica e por ser um material que acarreta um custo reduzido. Este é um aço ao carbono com teores em carbono na ordem dos 0,45%, apresentando um valor de E na ordem dos 210 GPa e um valor de G de aproximadamente 80 GPa.

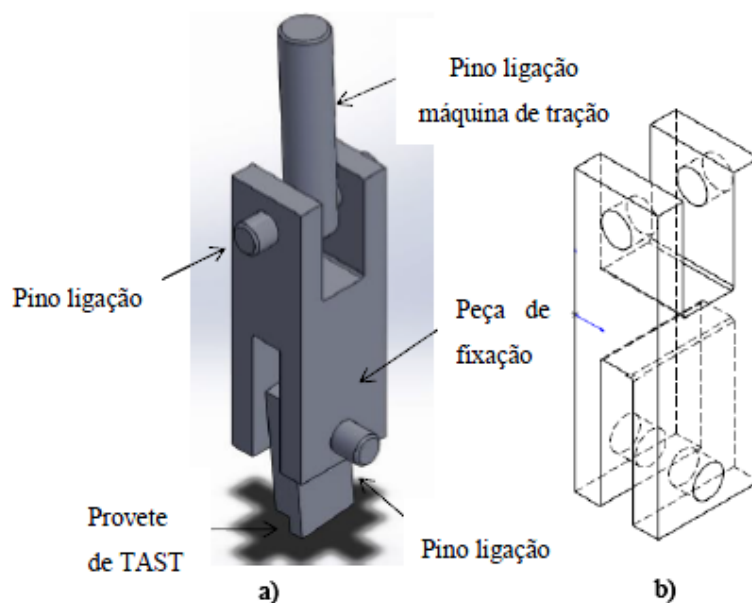


Figura 88 - a) Dispositivo para ensaiar os provetes e b) desenho do dispositivo [29]

3.3.1.1 Preparação do *gabarit* e provetes

Para se proceder ao processo de colagem dos substratos houve a necessidade de preparar as superfícies que estariam em contacto com o adesivo.

Tal como verificado nos ensaios com provetes de adesivo maciço, este processo tem em vista uma melhor ligação interfacial. É necessário remover todas as sujidades como poeiras, óleos ou óxidos que se possam encontrar nas superfícies do molde ou *gabarit*. Para isso efetuou-se uma limpeza manual com uma lixa (Figura 89), seguindo-se uma limpeza com papel embebido em acetona, de forma a desengordurar todas as superfícies.

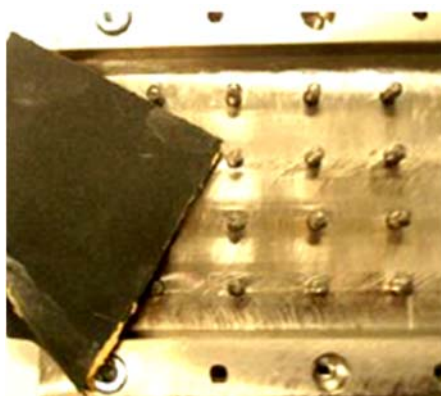


Figura 89 - Limpeza e desengorduramento do *gabarit* com o auxílio da lixa e da acetona

Utilizaram-se lâminas obtidas a partir de chapa de aço com 1 mm de espessura, sendo estas utilizados como calços para se garantir a mesma área de sobreposição em todos os provetes. Após a limpeza da superfície, colocou-se o *gabarit* e as lâminas num forno a cerca de 60°C, durante 20 min (Figura 90).



Figura 90 - Aquecimento do *gabarit* e das lâminas

Retiraram-se as peças constituintes do *gabarit* e as lâminas de aço do forno e iniciou-se a aplicação do desmoldante (Figura 91), tendo-se repetido esta operação três vezes de forma a garantir uma correta passagem por todas as superfícies que poderiam vir a estar em contacto com o adesivo. Também se torna muito importante a correta aplicação de desmoldante nas lâminas, facilitando a posterior remoção das mesmas quando o adesivo já estiver curado.



Figura 91 - Aplicação do desmoldante no *gabarit*

Deixou-se arrefecer as partes constituintes do *gabarit*, já preparadas, até à temperatura ambiente, estando prontas para o fabrico dos provetes TAST (Figura 92).



Figura 92 - *Gabarit* após preparação das superfícies

Entretanto, iniciou-se o processo de preparação dos substratos e recorreu-se à granalhagem das superfícies de ligação, como processo passivo mecânico, de forma a garantir uma boa adesão. Este processo visa que o adesivo seja o ponto mais fraco para assim se poder testar a resistência coesiva de adesivo, em vez da resistência da sua interface com os substratos. A rotura coesiva é aquela que se pretende obter não só no ensaio com provetes TAST, mas também em qualquer outro tipo de ensaio em junta colada.



Figura 93 - a) Granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S e b) pressão de granalhagem

Foi utilizada a granalhadora CIDBLAST, modelo RT6S, existente no Laboratório de Ensaios Mecânicos (LEM) do ISEP (Figura 93a). A pressão de granalhagem utilizada foi de 3 bar (Figura 93b), sendo constante em outras aplicações (provetes DCB e ENF).

Esta operação foi realizada a seco com óxido de alumínio, que é um produto abrasivo com elevado poder de limpeza, grande dureza e elevada tenacidade. O processo consiste na projeção do óxido de alumínio sobre a superfície dos substratos por intermédio de uma pistola. Seguidamente, o substrato é limpo com o auxílio de um jato de ar comprimido.

Após a granalhagem, as superfícies apresentavam uma rugosidade uniforme, permitindo uma boa molhagem. Limpou-se novamente os substratos com acetona de forma a ficarem limpos e desengordurados, prontos para a aplicação do adesivo (Figura 94).



Figura 94 - Substratos após processo de granalhagem

3.3.1.2 Colagem dos provetes

Os substratos foram colocados no *gabarit* (Figura 95a), bem como as lâminas de aço com espessura de 1,5 mm para regular o comprimento de sobreposição (Figura 95b). O *gabarit* garante o alinhamento preciso dos aderentes e as lâminas o controlo do comprimento da ligação em todos os provetes, tendo sido preparadas seis amostras para ensaio.

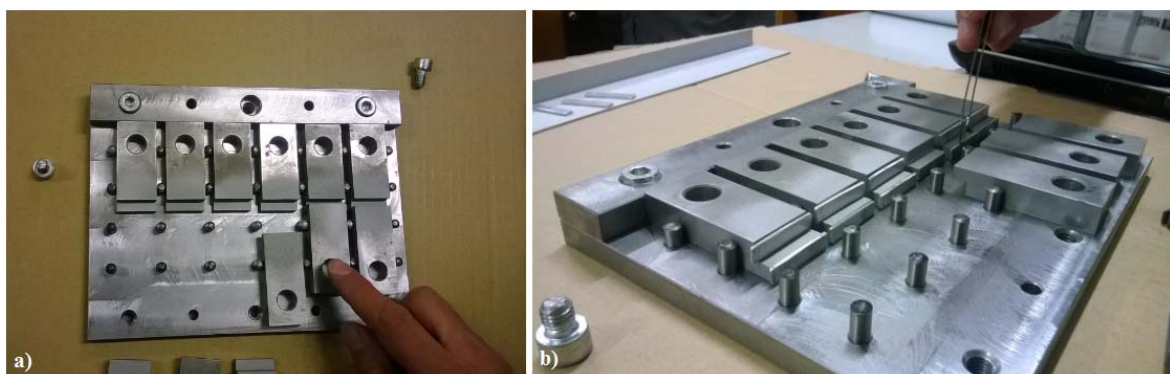


Figura 95 - Colocação dos aderentes no *gabarit*: a) alinhamento dos aderentes e b) colocação das lâminas de aço

Iniciou-se a aplicação do adesivo, com o mesmo rácio de mistura aplicado anteriormente e recomendado pelo fabricante, na superfície a ligar de um dos aderentes que compõem cada provete, sendo estes colados de seguida sobre o outro aderente já alinhado no *gabarit* (Figura 96a). Após a aplicação do adesivo nos seis provetes e posicionamento manual com aplicação de pressão sobre as juntas, procedeu-se ao aperto do *gabarit* através dos parafusos de fixação presentes nas réguas limitadoras de comprimento (Figura 96b).

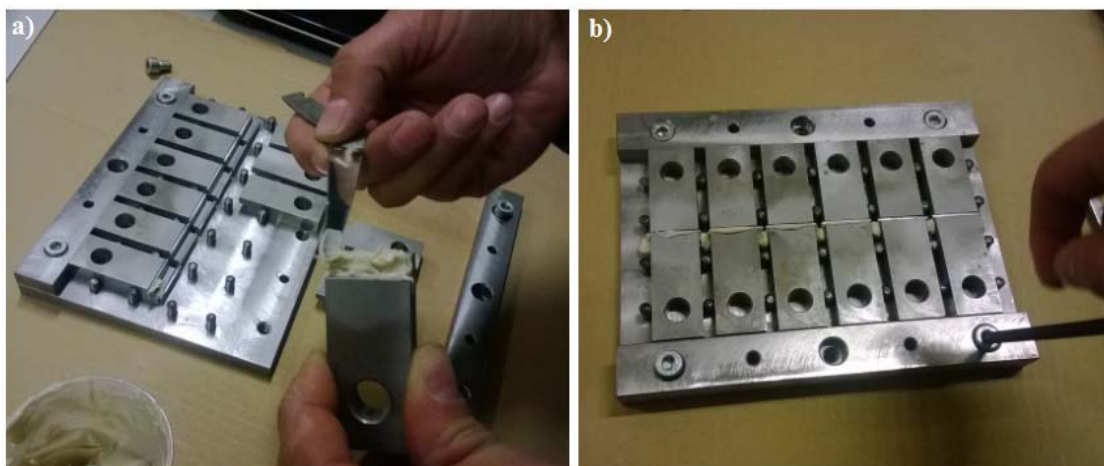


Figura 96 - Fabrico dos provetes TAST: a) aplicação do adesivo e b) aperto do molde

A cura do adesivo foi realizada durante uma semana à temperatura ambiente, tendo os provetes sido retirados do *gabarit* e as lâminas removidas cuidadosamente dos provetes para evitar a rotura da ligação. O excesso de adesivo foi retirado recorrendo-se a um alicate e a uma mó acionada por uma máquina de furar, existente nas oficinas mecânicas do Departamento de Engenharia Mecânica (DEM) do ISEP. A Figura 97 apresenta um provete TAST findado este procedimento.



Figura 97 - Provete após colagem, remoção das lâminas e do excesso de adesivo

3.3.2 Ensaio de tração

Os ensaios TAST, são na realidade ensaios de tração em que a junta adesiva se encontra num estado de corte. Os mesmos foram realizados na máquina universal de ensaios referida anteriormente. O ensaio começa por ser diferenciado nas ferramentas que são imperativas para prender os provetes TAST através de pinos de fixação e para fixar nas amarras da máquina de tração. A mesma célula de carga (100 kN) foi utilizada para a medição da força aplicada.

Para se realizar a medição das deformações longitudinais durante o ensaio, foi mais uma vez utilizado um extensómetro mecânico.

Os seis provetes foram devidamente identificados, de forma a facilitar a identificação dos mesmos após terminados os ensaios. Como estes foram maquinados, apresentam tolerâncias de fabrico bastante apertadas e as suas dimensões são então consideradas iguais, não tendo qualquer influência nos resultados obtidos. As camadas de adesivo nas juntas são iguais, sendo a área de colagem registada em todos os provetes de $25 \times 5 \text{ mm}^2$ e a espessura de adesivo constante de 0,7 mm.

3.3.2.1 Condições de ensaio

Começou-se por calibrar o equipamento, garantindo que os provetes estariam devidamente alinhados de forma a submeter a junta a um estado de corte o mais puro possível. Com isto pretende-se que a junta seja solicitada transversalmente, evitando qualquer esforço de carácter longitudinal ou momento fletor. Os provetes foram fixos às ferramentas por dois pinos de 12 mm de diâmetro e 60 mm de comprimento, com ajuste deslizante, que por sua vez acoplam às amarras da máquina de ensaios (Figura 98a).

Na realização dos ensaios foi adotada a velocidade de ensaio de 0,5 mm/min, sendo a velocidade recomendada pela norma ISO 11003-2 relativa a ensaios TAST [49].

Utilizou-se um extensómetro mecânico como elemento auxiliar na determinação das deformações baseado no método LVDT (Figura 98b), tendo sido retirado assim que registado um alongamento de 2,5 mm, de forma a evitar a danificação do mesmo. No ensaio TAST, o extensómetro mede não só o deslocamento do adesivo, mas também o deslocamento dos substratos (aço), uma vez que o comprimento-base do extensómetro (50

mm) é superior ao comprimento de sobreposição dos provetes (5 mm). Como tal, os restantes 45 mm são medidos como deslocamento do aço, sendo necessário corrigir posteriormente os deslocamentos e deformações de corte obtidas para cada ensaio, de forma a se considerar apenas o deslocamento do próprio adesivo [1].



Figura 98 - *Setup* do ensaio TAST: a) fixação do provete à máquina de ensaios e b) pormenor da instalação do extensómetro mecânico

3.3.2.2 Medição das deformações

Para a medição das deformações na junta adesiva foi utilizado mais uma vez o extensómetro mecânico. Neste caso, as deformações registadas resultam numa análise transversal ao adesivo ou própria junta. Numa junta colada os deslocamentos obtidos a cada instante pelo extensómetro terão de ser sujeitos a uma maior correção. Se fosse em maciço, havia a necessidade de correção ao escorregamento; em junta, para além deste facto, é necessário descontar a deformação dos aderentes.

Os provetes foram solicitados até à ocorrência de rotura (Figura 99) tendo-se obtido diferentes tipos e formas de rotura.

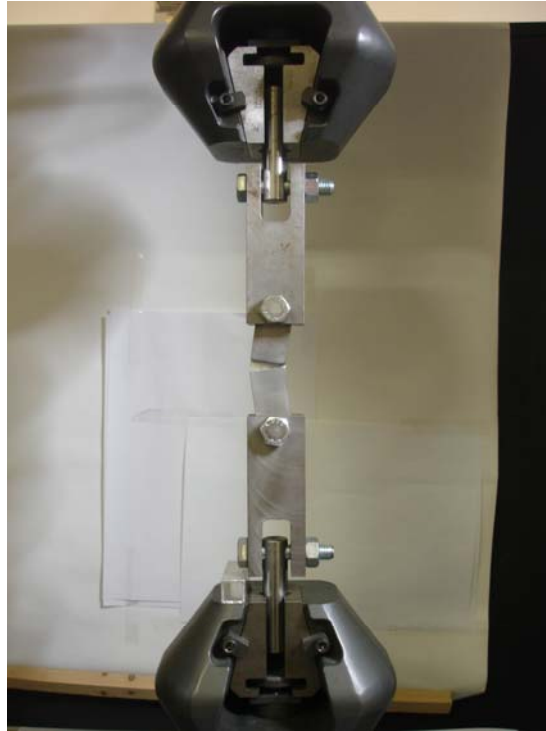


Figura 99 - Rotura de um provete TAST (provete 1)

Posteriormente, executou-se todo o tratamento de dados, recorrendo a uma folha de cálculo Excel[®], por forma a calcular o módulo de corte, a tensão limite elástico, a tensão de corte máxima, bem como a deformação de corte máxima.

3.3.3 Análise de resultados

Para a determinação das propriedades mecânicas ao corte, tomou-se como base a norma ISO 11003-2 [49]. A tensão de corte foi calculada utilizando a seguinte equação:

$$\tau = \frac{P}{l \times b}, \quad (35)$$

sendo P [N] a carga aplicada l [mm] o comprimento de ligação e b [mm] a largura de ligação.

Observou-se que nas curvas obtidas diretamente da máquina de ensaios, a zona inicial das mesmas apresentava uma flexibilidade superior, devido ao ajuste da máquina e ferramenta de suporte. Este comportamento foi corrigido pela substituição dessa zona inicial da curva, por uma zona linear com a mesma rigidez da zona linear subsequente que já não é afetada por estes efeitos. No âmbito desta correção, foi necessário efetuar uma translação de todos os pontos da curva para a esquerda, no sentido de garantir a rigidez linear constante.

Outra correção efetuada diz respeito à limitação do extensómetro na medição das deformações, já que este apenas as mediu até ao correspondente a 2,5 mm de extensão. Foi encontrada uma relação entre o deslocamento das amarras e a extensão do extensómetro que foi posteriormente aplicada aos restantes pontos do ensaio.

Posto isto, a expressão utilizada para o cálculo da deformação de corte (γ), é dada por:

$$\gamma = \frac{\delta}{t}, \quad (36)$$

onde δ [mm] corresponde ao deslocamento calculado e t [mm] à espessura da camada de adesivo. Posteriormente, o valor de G foi determinado na zona elástica de declive constante através da Equação (37):

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (37)$$

Os valores de τ e γ correspondem a um conjunto de pontos na região linear da curva τ - γ .

3.3.3.1 Curvas P - δ e τ - γ

Através dos dados fornecidos pelo *software*, foi possível efetuar o tratamento de dados dos ensaios realizados, reproduzindo os mesmos em curvas P - δ (Figura 100) e curvas σ - γ (Figura 101). Tal como no tratamento de dados para os provetes de adesivo maciço, a remoção do extensómetro gerou uma pequena queda e conseqüente restituição quase imediata do valor de P em cada ensaio, tendo sido a mesma tratada de forma a se produzirem as curvas que se obteriam se não fosse necessário interromper o ensaio para remoção do extensómetro.

Da análise de ambas as curvas obtidas, é de salientar a repetibilidade registada dos resultados obtidos em termos de comportamento elástico, tensão de rotura e ductilidade.

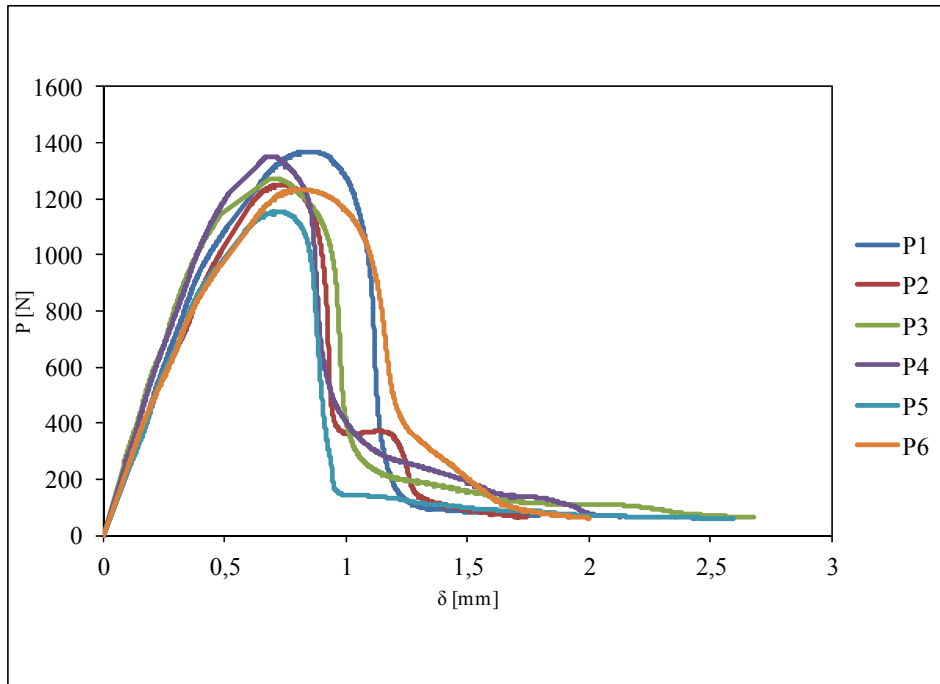


Figura 100 - Curvas P - δ dos provetes TAST

O maior desfasamento relativamente à resistência máxima registada é relativa ao provete 5, tendo apresentado a menor força máxima do conjunto de provetes testados.



Figura 101 - Curvas τ - γ dos provetes TAST

Embora, em termos de resistência, o provete referido anteriormente tenha demonstrado a maior discrepância de resistência, relativamente à deformação máxima de corte o mesmo não se verifica, tendo-se obtido o valor mais próximo da média. Neste caso, pela análise das curvas τ - γ (Figura 101), pode-se verificar que o provete 6 foi aquele que registou uma maior deformação de corte. Os valores da deformação máxima de corte foram retirados das curvas referidas na zona de queda abrupta da carga suportada pelo provete.

A tensão limite elástico ao corte foi calculada pela interseção da reta com o declive paralelo à curva τ - γ para uma deformação de 0,2%, como demonstrado na Figura 102 para o provete 4, como exemplo.

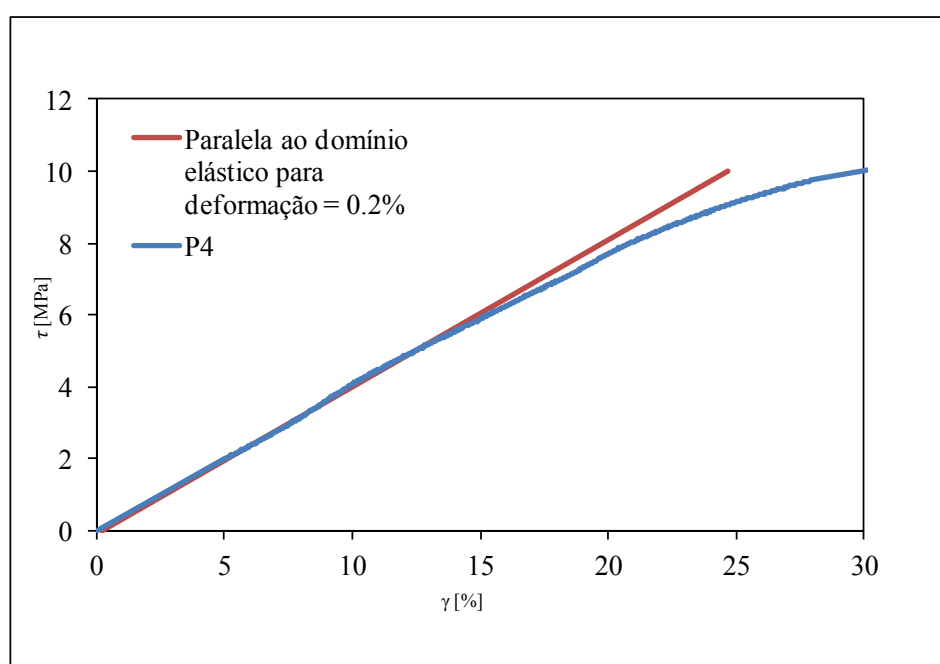


Figura 102 - Determinação da tensão limite elástico ao corte a 0,2% (provete 4)

São apresentadas as superfícies de rotura dos provetes ensaiados (Figura 103), de forma a poder auxiliar na compreensão dos resultados obtidos. Verificou-se que as roturas foram em todos os casos coesivas, o que comprova uma boa preparação de superfície na zona colada.

Uma análise mais detalhada às superfícies de rotura dos provetes 2 e 5 comprova que as roturas foram coesivas, sendo estas próximas da interface dos substratos com o adesivo. Embora as roturas tenham sido todas coesivas, as propagações das mesmas não são iguais, podendo originar valores de resistência e deformação díspares. A forma e direção da propagação da rotura origina comportamentos elásticos diferentes, podendo neste caso originar diferentes valores de G .



Figura 103 - Rotura dos provetes TAST

3.3.3.2 Propriedades mecânicas

Os dados obtidos através dos ensaios realizados e as propriedades mecânicas ao corte determinadas para o adesivo SikaForce® 7752-L60 estão representados na Tabela 8.

Tabela 8 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte

Provete	Força máxima [N]	Tensão limite elástico a 0,2% [MPa]	τ_{\max} [MPa]	G [MPa]	γ [%]	Tipos de rotura
1	1369,21	7,27	10,95	192,89	51,68	Coesiva
2	1250,38	5,29	10,00	185,03	50,13	Coesiva*
3	1271,41	4,80	10,17	172,47	57,81	Coesiva
4	1351,64	5,00	10,81	166,13	48,97	Coesiva
5	1153,41	4,79	9,23	207,94	54,17	Coesiva*
6	1233,13	3,84	9,87	202,94	66,15	Coesiva
Média	1271,53	5,16	10,17	187,75	54,82	-
Desvio Padrão	79,79	1,14	0,64	16,35	6,39	-

* Rotura próxima da interface

Analisando os valores de desvio padrão, os dados refletem uma elevada repetibilidade, onde os parâmetros que resultam num maior desvio padrão, em termos percentuais, são a tensão limite elástico ao corte e a deformação de corte. A dispersão dos valores da tensão limite

elástico ao corte pode ter sido causada por oscilações na região linear na curva τ - γ . As diferentes deformações de corte poderão estar relacionadas com uma pequena variação na espessura do adesivo obtida no processo de fabrico.

No capítulo 3.6.2 é feita uma análise crítica e aprofundada dos valores obtidos para as propriedades mecânicas ao corte.

3.4 Ensaio Double-Cantilever Beam

3.4.1 Fabrico dos provetes

Para a determinação da tenacidade à fratura em modo I fabricaram-se seis provetes DCB conforme ilustrado na Figura 104. O material dos substratos utilizados foi o alumínio AISI 6082-T651, tendo sido considerado para efeitos de cálculo, o módulo de elasticidade longitudinal característico do alumínio em geral (70 GPa).

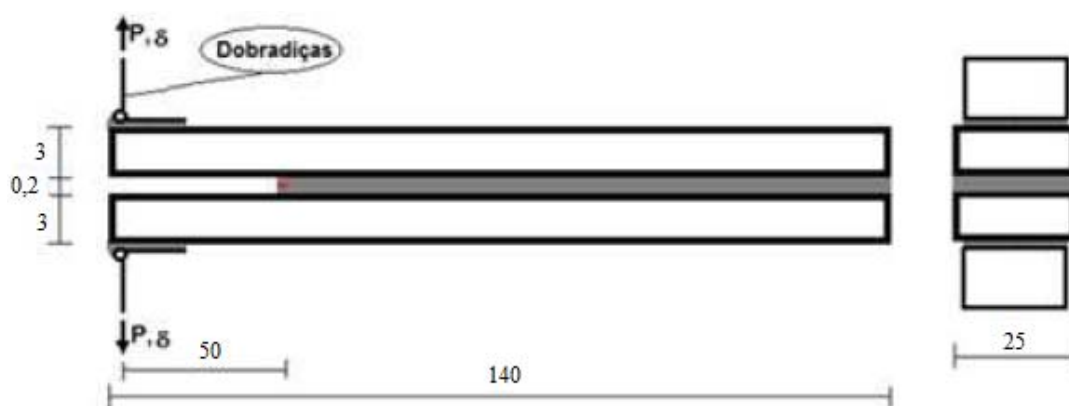


Figura 104 - Representação esquemática dos provetes DCB utilizados (dimensões em mm) [50]

Devido à reduzida espessura dos substratos, optou-se pela utilização de dobradiças em aço coladas na extremidade não colada dos provetes, como forma de elemento onde a solicitação viria a ser aplicada.

3.4.1.1 Preparação dos provetes

De forma a garantir a espessura de adesivo constante ($t = 0,2$ mm) e a existência da pré-fenda inicial, foi necessária a utilização de calços calibrados em dois locais distintos do provete.

Para a realização dos calços utilizaram-se fitas de aço calibradas. Consoante o local em que estas são aplicadas, têm funções distintas. Foram utilizadas fitas de aço com 0,2 mm de espessura na extremidade dos provetes (uma por cada provete) que têm como função garantir o valor especificado de t , enquanto as fitas de aço de 0,05 mm colocadas na pré-fenda (duas por cada provete), foram coladas a uma lâmina de barbear com 0,1 mm de espessura (uma fita em cada lado) para formar um calço com dupla função: garantir a espessura do adesivo e simular um defeito inicial (Figura 105).

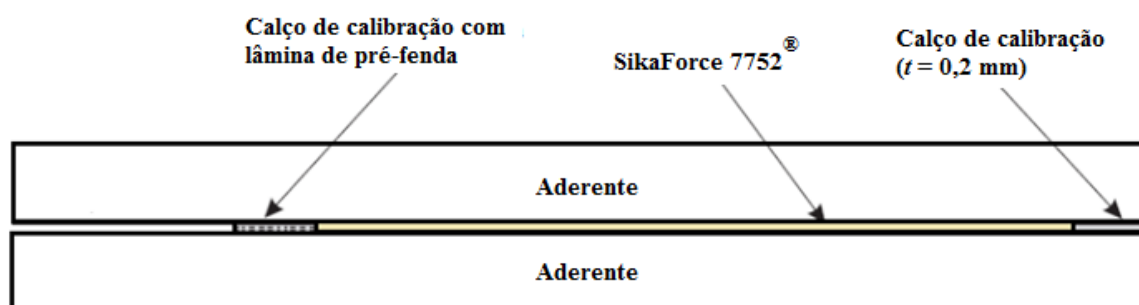


Figura 105 - Localização dos calços calibrados

O dano inicial é então simulado pela pré-fenda, garantindo que a zona cortante da lâmina de barbear se encontre fora das fitas.

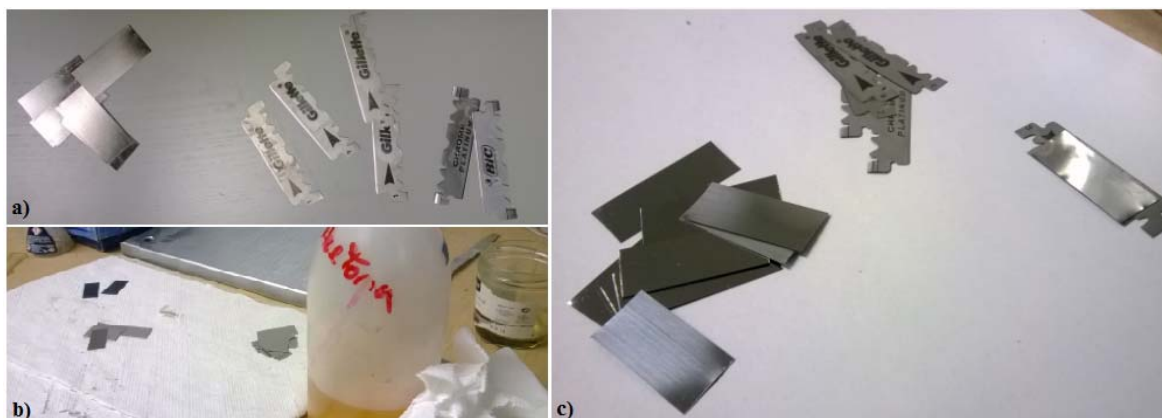


Figura 106 - Fabrico dos calços: a) lâminas e fitas de aço, b) limpeza com acetona e c) calços para criar a pré-fenda inicial

Para a preparação dos calços, começou-se por limpar e desengordurar devidamente as lâminas e fitas de aço, recorrendo novamente a papel embebido em acetona (Figura 106a e Figura 106b). Para se fabricar o calço que servirá para criar a pré-fenda inicial (Figura 106c) utilizou-se um adesivo cianoacrilato (Figura 107) para colar as duas fitas de aço de 0,05 mm à respetiva lâmina de barbear, aplicando pequenas gotas.



Figura 107 - Adesivo cianoacrilato (Loctite SuperCola 3[®])

Após o fabrico dos calços realizou-se o desengorduramento das superfícies. Foram depois colocados num forno a 80°C durante 10 min (Figura 108), sendo posteriormente aplicado desmoldante em ambas as faces de forma a facilitar a remoção destes quando os ensaios terminassem.



Figura 108 - Colocação dos calços no forno

A preparação da superfície dos substratos foi idêntica à utilizada no fabrico dos provetes TAST. Efetuou-se a limpeza e desengorduramento de todas as superfícies de cada substrato com papel embebido em acetona. Seguidamente recorreu-se à granalhagem, como processo passivo mecânico (Figura 109), de todas as superfícies dos substratos para evitar o empenamento decorrente da criação de tensões internas em conjunto com a espessura

reduzida dos substratos. A área de colagem é significativamente superior à utilizada no fabrico de provetes TAST.

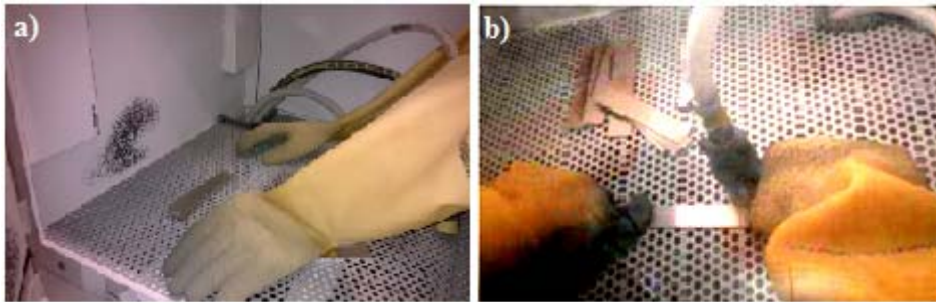


Figura 109 - Granalhagem dos substratos: a) substratos dentro da granalhadora e b) substratos a serem granalhados

Finalizado o processo de granalhagem, os substratos apresentavam uma superfície com rugosidade uniforme, o que é um bom indicador para a ocorrência de uma boa molhagem, resultando numa junta mais resistente. Efetuou-se novamente uma limpeza dos substratos com acetona, garantindo a não existência de impurezas nas superfícies a colar (Figura 110).

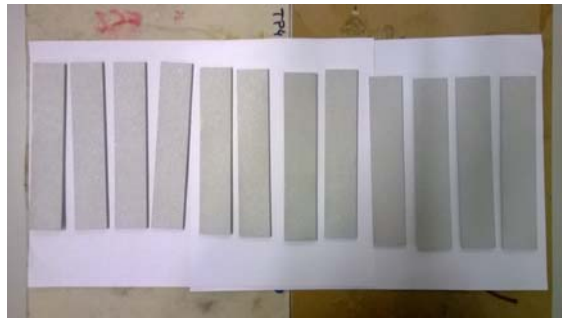


Figura 110 - Substratos para provetes DCB granalhados e desengordurados

Recorreu-se à SuperCola 3[®] como meio de colagem dos calços em apenas um dos substratos que irão compor um provete, para evitar o seu desposicionamento durante a aplicação do adesivo e fecho dos provetes. Para facilitar e garantir o correto posicionamento dos calços com lâmina que criará a pré-fenda inicial, bem como garantir uma localização uniforme da mesma, realizou-se em todos os substratos uma marcação, com caneta de acetato, a 55 mm de uma das extremidades. Colocaram-se seis substratos ao longo de uma régua de madeira e os calços foram então colados no substrato inferior do provete, conforme ilustrado na Figura 111.

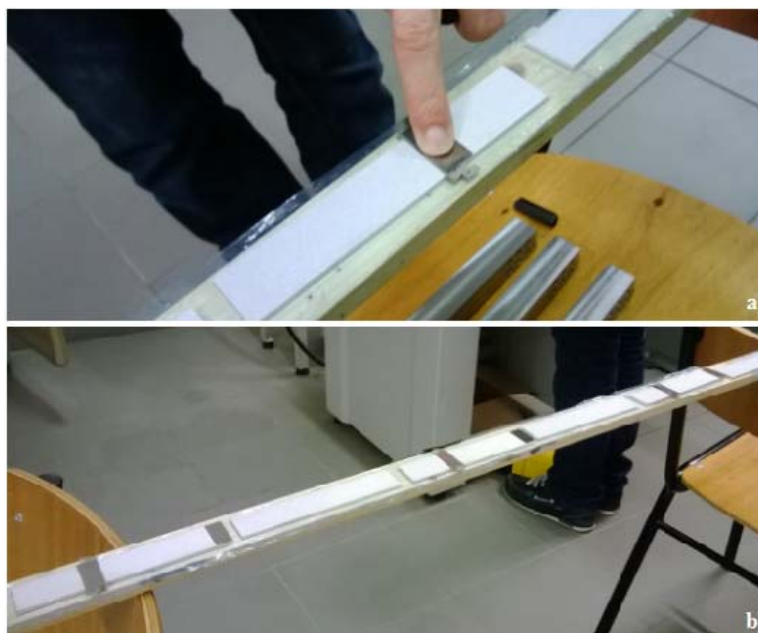


Figura 111 - Colagem dos calços: a) aplicação do calço com lâmina que criará a pré-fenda inicial e b) substratos inferiores com os calços colados

3.4.1.2 Colagem dos provetes

Assim que todos os calços calibrados estivessem colocados poder-se-ia iniciar a aplicação do adesivo na área desejada, com recurso a uma espátula (Figura 112). Foram colocadas folhas de Teflon[®] entre os substratos e a régua de madeira, de forma a evitar que o excesso de adesivo pudesse escorrer e colar os substratos à madeira, comprometendo a correta realização da junta.



Figura 112 - Aplicação do adesivo no substrato inferior (provetes DCB)

Foi depositada quantidade suficiente de adesivo para que este fosse expelido pelas faces laterais do provete aquando da colocação do substrato superior, garantindo que toda a área

de colagem fosse preenchida. Colocou-se o substrato superior e exerceu-se pressão na zona da localização dos calços de forma que todo o adesivo em excesso pudesse ser expelido, garantido a espessura uniforme de 0,2 mm da camada de adesivo. Nesta fase, é de extrema importância garantir que os substratos estão devidamente alinhados, que o adesivo não se sobrepõe aos calços colados na extremidade do provete, o que comprometeria a espessura de adesivo desejada, e que o adesivo esteja presente por cima e por baixo da lâmina de barbear, para que a pré-fenda seja criada. Se estes pontos não forem garantidos, pode-se comprometer os resultados dos ensaios DCB.

Após o perfeito alinhamento dos substratos, estes foram comprimidos por aplicação de grampos na zona dos calços e deixados a curar à temperatura ambiente durante uma semana.



Figura 113 - Provetes DCB com pinças para aplicação de pressão durante a cura

3.4.1.3 Preparação dos provetes para ensaio

Uma semana após o fabrico dos provetes DCB, o processo de cura estava concluído e iniciou-se o processo de preparação dos provetes para os ensaios. Recorrendo a um torno de bancada e a um alicate, retiraram-se os calços dos provetes. De seguida removeu-se o excesso de adesivo das partes laterais dos provetes com o auxílio de um alicate, removendo a maior parte do adesivo, sendo posteriormente utilizada uma furadora equipada com uma mó (Figura 114), que se encarregaria de remover totalmente o excesso de adesivo, obtendo-se uma superfície lisa na qual o adesivo ficaria à face dos aderentes.



Figura 114 - Remoção do excesso de adesivo de um provete DCB com uma mó

Entretanto, cortaram-se dobradiças suficientes para os seis provetes (doze dobradiças - duas por cada provete) a partir de uma dobradiça de piano de 1 m de comprimento, utilizando um torno para prender a dobradiça de piano e um serrote para cortar dobradiças (Figura 115a) com um comprimento de aproximadamente 25 mm.

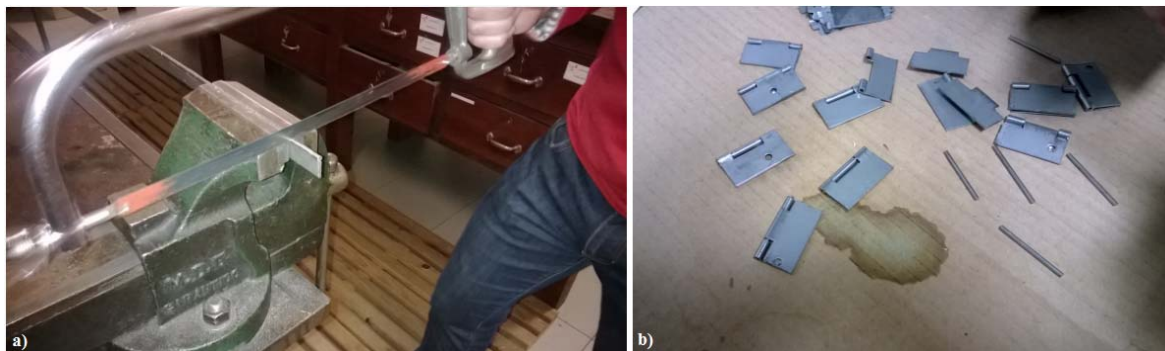


Figura 115 - Obtenção de dobradiças: a) corte com um serrote e b) dobradiças cortadas



Figura 116 - Provetes com dobradiças coladas

Preparou-se uma pequena quantidade de adesivo para se colar as dobradiças à extremidade com fenda dos provetes, onde estes viriam a ser solicitados (Figura 116). As dobradiças foram desmontadas de forma a apenas se colar uma das faces das mesmas (Figura 115b).

Deixou-se curar durante uma semana e pintou-se uma das faces laterais de cada provete com tinta corretora com o intuito de melhorar a visualização da propagação da fenda ao longo da junta durante os ensaios. Propagou-se manualmente a fenda com uma ferramenta para evitar por completo algum efeito de arredondamento da fenda que pode persistir mesmo com a utilização da lâmina. Efetuou-se a medição individual dos valores de a_0 , com auxílio de uma lupa de alta resolução, para posterior utilização nas fórmulas de cálculo. Após a pintura da face lateral e propagação manual da fenda, colaram-se as escalas em cada substrato conforme demonstrado na Figura 117. As escalas foram alinhadas tendo em consideração a zona de início da fenda, fazendo coincidir a marca colocada referente aos 10 mm das escalas, aspeto considerado para medição do comprimento da fenda durante o ensaio (o comprimento de fenda num dado instante do ensaio é dado pelo valor medido pela escala somando a distância do ponto de aplicação da carga ao 0 da escala). Os provetes ficaram preparados para se poder realizar os ensaios (Figura 118).

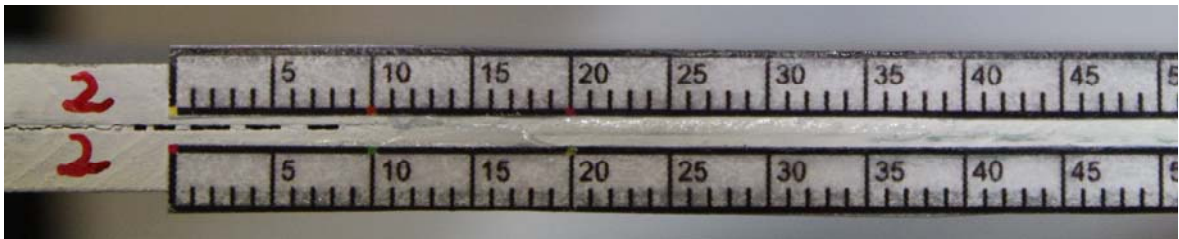


Figura 117 - Escalas coladas num provete DCB



Figura 118 - Provetes preparados para ensaio

3.4.2 Ensaio realizados

Para caracterizar as propriedades de fratura, também se recorreu à máquina de ensaios já referida anteriormente, embora os tipos de ensaio sejam de natureza completamente diferente dos até agora abordados, uma vez que é necessária uma maior perícia e cuidado na realização do *setup*. No caso dos ensaios de fratura com provetes solicitados em modo I, utilizou-se o ensaio DCB.

Previamente ao procedimento de ensaio, mediu-se o comprimento da pré-fenda inicial, a_0 , de cada provete, registando-se os valores que são apresentados na Tabela 9.

Tabela 9 - Pré-fenda medida nos provetes DCB

Provete	Pré-fenda a_0 [mm]
1	51,8
2	47,6
3	50,4
4	48,0
5	48,4
6	50,0

3.4.2.1 Condições de ensaio

Começou-se por fixar os provetes pelas dobradiças por intermédio das amarras da máquina de ensaios. Utilizou-se um método de correlação de imagem para auxiliar na medição de G_{Ic} . A máquina fotográfica digital da marca Canon®, com resolução de 18 MPixel, foi posicionada de modo a abranger a face lateral dos provetes desde o início da escala até um comprimento de fenda de aproximadamente 50 mm (Figura 119), prevendo a subida destes durante o ensaio, devido à aplicação da força na amarra basculante (superior). Por isto, descentrou-se os provetes para baixo na máquina fotográfica. Durante os ensaios foram tiradas fotografias com intervalo de 5 segundos até o comprimento de fenda ser de aproximadamente 40 mm (Figura 120). De referir que houve um cuidado especial em garantir que a máquina fotográfica estava paralela ao provete e que a distância entre estes era suficiente para fotografar a zona de interesse do provete durante o ensaio, tendo o cuidado de realizar a melhor focagem possível de forma a facilitar a visualização da propagação da fenda.

Figura 119 - *Setup* do ensaio DCB

Figura 120 - Último registo fotográfico de um ensaio (até cerca de 40 mm de escala)

Este procedimento é utilizado para se conseguir determinar o valor de G_{Ic} utilizando os métodos que requerem a medição do comprimento de fenda, permitindo correlacionar os dados de P e δ com o comprimento de fenda, a . Esta correlação é feita conhecendo o instante de tempo correspondente a cada imagem e a velocidade de ensaios dos provetes.

Na realização dos ensaios foi adotada uma velocidade de ensaio de 3 mm/min devido à garantia de um ensaio quase-estático e ter o número pretendido de pontos para aplicação dos métodos convencionais.

3.4.2.2 Parâmetros medidos durante o ensaio

O ensaio em provetes DCB permite medir o valor da força exercida e do deslocamento no provete, bem como o comprimento de fenda. Tal como referido anteriormente, foi utilizada uma máquina fotográfica digital para medição do comprimento de fenda, cujo valor pode ser facilmente correlacionado com a informação obtida pela máquina de ensaios. A máquina

permitirá visualizar a propagação da fenda, podendo concluir se a mesma terá sido ou não instável.

Os provetes foram solicitados até à ocorrência de rotura, de forma a analisar o tipo de rotura, que indicará se a propagação da fenda ocorreu sempre pelo interior da camada adesiva. Neste tipo de ensaio, espera-se obter roturas coesivas de forma a que o valor de G_{Ic} não seja afetado, permitindo obter uma curva R o mais linear possível.

3.4.3 Análise de resultados

Na determinação das propriedades de fratura à tração, foram utilizados os métodos que requerem a medição do comprimento de fenda, CCM e CBT, e o método baseado no comprimento de fenda equivalente, CBBM. As equações utilizadas para a determinação do parâmetro G_{Ic} já foram explicadas e estão expressas nos capítulos 2.3.3.4.1 e 2.3.3.4.2.

3.4.3.1 Curvas P - δ e R

O *software* utilizado gerou os valores de força e deslocamento registados durante os ensaios, traduzindo-se nas curvas P - δ demonstradas na Figura 121. Estas apresentam um comportamento inicial com elevada repetibilidade, sendo apenas a força máxima atingida pelo provete P6 ligeiramente inferior à dos restantes provetes e gerando um patamar de força máxima apenas verificado para o provete em questão. Este comportamento poderá dever-se a uma zona de cura deficiente do adesivo, já que a seguir a curva tende a seguir o comportamento das restantes. Esta torna-se maior quando se está na presença de adesivos dúcteis, o que é o caso do adesivo analisado. Inicialmente, à medida que a carga aplicada aumenta, a energia armazenada no provete aumenta até que esta iguale a energia necessária para iniciar a propagação da fenda. Cada pico de carga subsequente corresponde à carga crítica que provoca a progressão da fenda. Assim que a fenda inicia a sua progressão, verifica-se um relaxamento da carga aplicada que corresponde à progressão da fenda a um valor de G_{Ic} constante. O comportamento durante a propagação do dano foi bastante idêntico entre todos os provetes.

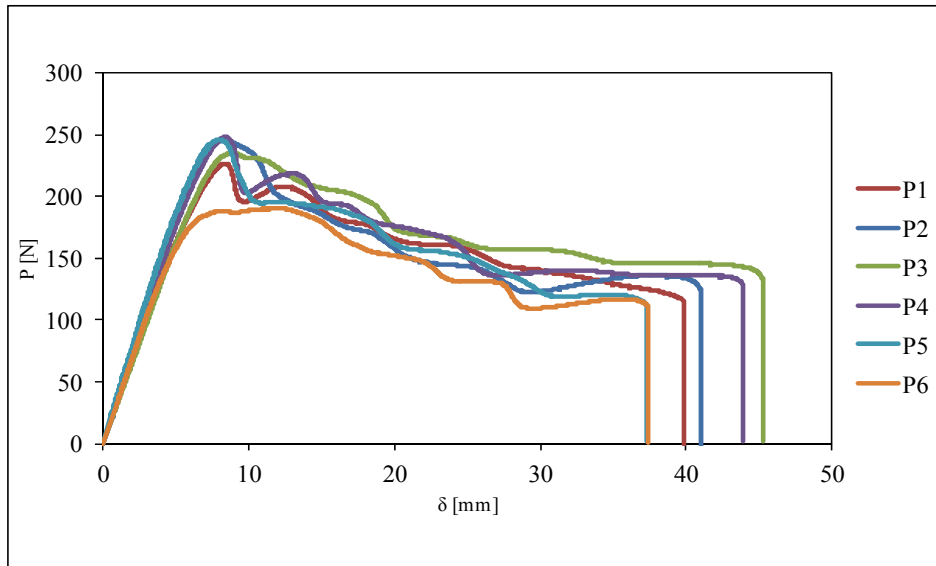


Figura 121 - Curvas P - δ obtidas pelo ensaio DCB

Na Figura 122 apresentam-se as curvas R obtidas para o provete P2, considerado representativo da globalidade dos provetes testados. Pela análise dos métodos CBBM, CCM e CBT. Estas curvas relacionam a evolução de G_I com a ou a_{eq} para uma amostra testada.

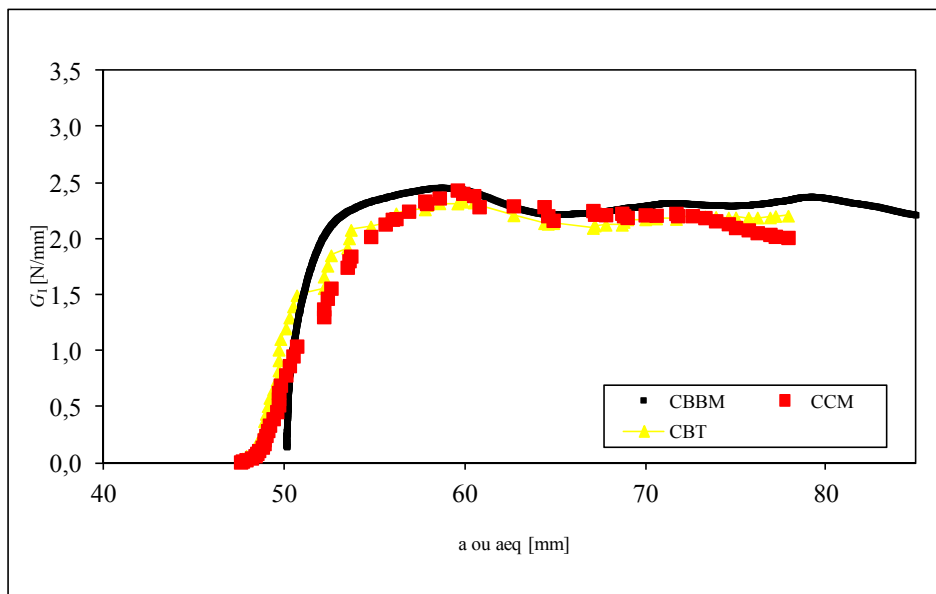


Figura 122 - Curvas R obtidas pelo ensaio DCB para o provete P2 através dos métodos CBBM, CCM e CBT

As curvas obtidas pelos diferentes métodos não apresentam grandes discrepâncias, obtendo uma correspondência assinalável.

Como seria de esperar, existe um valor inicial de a_{eq} diferente entre os métodos utilizados, uma vez que o método CBBM inclui o efeito da FPZ, enquanto nos restantes métodos apenas se trata do comprimento real da fenda, a . No entanto, era esperada uma subida abrupta inicial de G_{Ic} pela análise dos métodos CCM e CBT, tal como verificado pela curva CBBM. Tanto o método CCM como o CBT necessitam da medição do comprimento de fenda, o que torna a análise do processo menos expedita. Essa análise pode induzir ainda mais erros pelo método CCM, visto serem utilizados polinómios cúbicos, já referidos no capítulo 2.3.3.4.1, utilizando uma regressão linear como ajuste das curvas da flexibilidade $C = f(a)$ [42].

Após os ensaios, registaram-se as roturas dos seis provetes utilizados. Analisando as roturas apresentadas na Figura 123, verificaram-se roturas coesivas, embora a rotura do provete P6 tenha ocorrido próximo da interface.

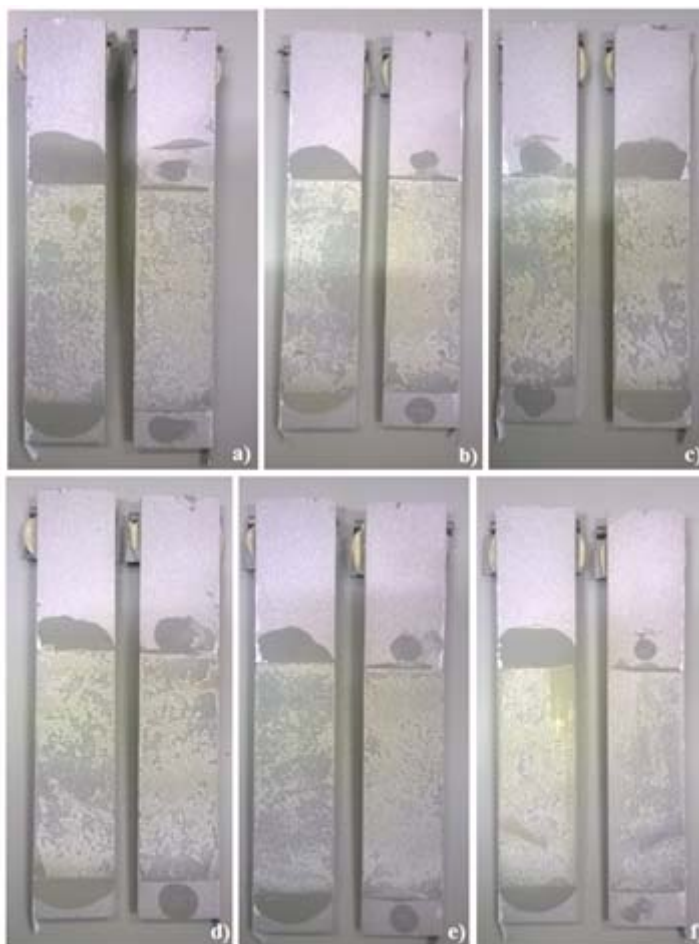


Figura 123 - Aspeto das superfícies de rotura dos provetes DCB: a) provete P1, b) provete P2, c) provete P3, d) provete P4, e) provete P5 e f) provete P6

No entanto, a propagação da fenda não ocorreu sempre pela zona intermédia da camada adesiva nos ensaios realizados, mas o facto de não terem ocorrido roturas adesivas em qualquer provete, é uma garantia da progressão da fenda pelo interior do adesivo, sendo uma condição para que o valor de G_{Ic} seja válido.

3.4.3.2 Propriedades de tenacidade à tração

Os valores obtidos de G_{Ic} pelos diferentes métodos são demonstrados na Tabela 10, sendo possível verificar uma elevada proximidade dos valores obtidos pelos três métodos. Como se pode confirmar pela Figura 122, a tendência das curvas R pelos três métodos é bastante semelhante.

Tabela 10 - Valores de G_{Ic} obtidos pelo método CCM, CBT e CBBM

Provete	G_{Ic} [N/mm]		
	CCM	CBT	CBBM
1	2,25	2,27	2,29
2	2,19	2,18	2,30
3	2,62	2,49	2,57
4	2,43	2,42	2,55
5	2,39	2,33	2,34
6	1,88	2,05	2,12
Média	2,29	2,29	2,36
Desvio Padrão	0,25	0,16	0,17

Verifica-se uma elevada repetibilidade nos valores obtidos, apesar da tenacidade à fratura em modo I do provete P6 ter sido inferior à dos restantes provetes. Isto deve-se ao facto da rotura ter ocorrido próximo da interface entre o adesivo e a superfície de um dos substratos. Os valores obtidos pelo método baseado no comprimento de fenda equivalente, CBBM, foram superiores aos registados pelos restantes métodos, que requerem a medição do comprimento de fenda. Este é o método mais expedito e que induz menos erros na determinação de G_{Ic} , uma vez que contabiliza a já referida FPZ e não é afetado por eventuais erros de medição de a . Os valores médios de G_{Ic} pelos métodos CCM e CBT foram bastante próximos.

Será realizada uma análise crítica de resultados mais detalhada no capítulo 3.6.3.

3.5 Ensaio End-Notched Flexure

3.5.1 Fabrico dos provetes

Devido à inexistência de substratos preparados para o fabrico dos provetes para o ensaio ENF, houve a necessidade de os fabricar a partir de tiras compridas de Al 6082.T651 com 25 mm de largura. Recorreu-se à guilhotina da marca Adira, existente nas Oficinas Mecânicas no DEM (ISEP), para se cortar substratos com dimensões de $230 \times 26 \times 3 \text{ mm}^3$ (comprimento \times largura \times espessura) (Figura 124).



Figura 124 - Corte de substratos para provetes ENF na guilhotina mecânica

Na realização dos ensaios ENF foram utilizados oito provetes, devido à própria natureza dos ensaios ENF, mais propensos a problemas de propagação instável de fenda ou dificuldades de visualização da mesma ao longo do ensaio.

3.5.1.1 Preparação dos provetes

Na preparação dos provetes, foram utilizadas as mesmas técnicas de preparação de superfície dos substratos já mencionadas para os substratos DCB, obtendo-se mais uma vez uma superfície com rugosidade uniforme (Figura 125), condição essencial para a ocorrência de uma molhagem eficaz.

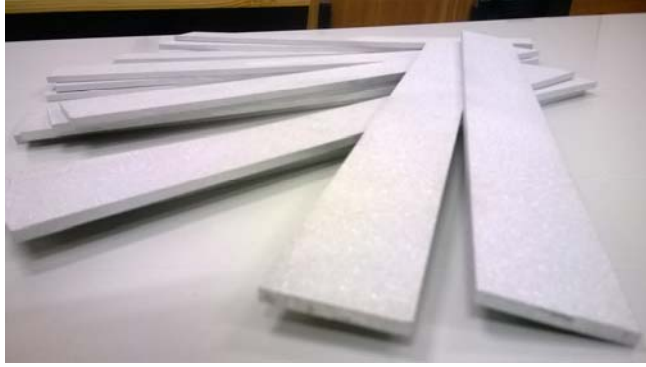


Figura 125 - Substratos ENF após granalhagem

Foram colados calços idênticos aos utilizados no fabrico dos provetes DCB. A única diferença foi a distância entre o calço para criação da pré-fenda e o extremo do substrato, neste caso de 65 mm.

3.5.1.2 Colagem dos provetes

Após a colagem dos calços no substrato inferior, preparou-se a quantidade necessária de adesivo e aplicou-se o mesmo na área de colagem desejada. Realizou-se pressão na zona dos calços, garantindo a espessura de adesivo desejada. Posteriormente, os provetes foram comprimidos por grampos na zona dos calços e alinhados no comprimento e largura, deixando o adesivo curar durante uma semana à temperatura ambiente (Figura 126).



Figura 126 - Provetes ENF com pinças para aplicação de pressão durante a cura

3.5.1.3 Preparação dos provetes para ensaio

Na semana seguinte, com o auxílio do torno e de um alicate, retiraram-se os calços dos provetes e, posteriormente, o adesivo em excesso foi removido utilizando uma mó para garantir que as superfícies laterais ficassem completamente lisas.



Figura 127 - Remoção dos calços

Aplicou-se a tinta corretora numa das faces laterais e colaram-se as escalas conforme efetuado para os provetes DCB. Tal como aconteceu nos provetes DCB, a fenda foi propagada manualmente e, com o auxílio de lupa com elevada resolução, registaram-se os valores de a_0 para se utilizar posteriormente nas fórmulas de cálculo.



Figura 128 - Marcação do centro do provete

Para a realização do ensaio ENF existe a necessidade da marcação de dois pontos nos provetes para facilitar e proceder a uma correta colocação dos mesmos na mesa de apoio. Os pontos marcados são o centro a 115 mm de cada extremidade do provete (Figura 128), local onde será aplicado o carregamento a meio vão, e um ponto distante da extremidade, neste caso 15 mm (Figura 129), onde o provete apoiará sobre a referida mesa. O provete é apoiado

em dois pontos, sendo que o outro ponto de apoio dista a mesma distância deste, mas da outra extremidade do provete.



Figura 129 - Marcação de um dos pontos de apoio sobre a mesa

3.5.2 Ensaios realizados

Para a caracterização das propriedades à fratura em modo II recorreu-se ao ensaio ENF. Para a realização deste ensaio foi necessário realizar adaptações na máquina universal de ensaios de forma a estar preparada para a realização do mesmo. Essas alterações são abordadas no capítulo 3.5.2.1.

Tal como verificado para o ensaio DCB, antes de se começar a ensaiar os provetes, mediu-se o comprimento da pré-fenda inicial, a_0 , de cada provete, registando-se os valores que são indicados na Tabela 11.

Tabela 11 - Pré-fenda medida nos provetes ENF

Provete	Pré-fenda a_0 [mm]
1	49,92
2	60,13
3	58,02
4	58,84
5	53,31
6	51,49
7	54,53
8	55,97

3.5.2.1 Condições de ensaio

Para os ensaios ENF, o *setup* experimental é modificado para uma configuração diferente das analisadas até agora (Figura 130a). Enquanto nos ensaios de provetes de adesivo maciço, provetes com configuração TAST e DCB, a máquina de ensaios submeteu os provetes a um estado de tração (embora no caso dos provetes TAST ocorra corte e no DCB clivagem), nos ensaios ENF, a configuração teve que ser tal que permitisse o ensaio de viga simplesmente apoiada com carga pontual a meio vão. Para isso utilizou-se um dispositivo de flexão constituído por dois rolos que definem a distância entre apoios, que neste caso foi de 200 mm. A carga foi então aplicada por intermédio de um dispositivo semi-esférico como demonstra a Figura 130b.

A mesma máquina fotográfica utilizada nos ensaios DCB foi usada como elemento auxiliar para a determinação do valor de G_{IIc} , pelos métodos que requerem a medição do comprimento de fenda. Durante os ensaios foram tiradas fotografias com intervalo de 5 segundos até a fenda ultrapassar o ponto de aplicação de carga. De referir que houve um cuidado especial em garantir que a máquina fotográfica estava paralela ao provete e que a distância entre estes era suficiente para fotografar a zona de interesse do provete durante o ensaio, tendo o cuidado de realizar a melhor focagem possível de forma a facilitar a visualização da propagação da fenda.

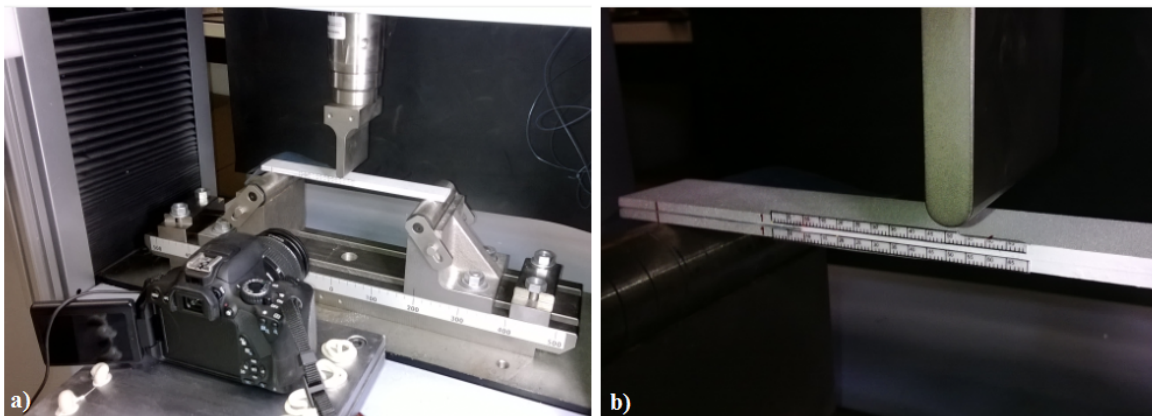


Figura 130 - Ensaio ENF: a) *setup* do ensaio e b) pormenor do dispositivo de carga

Na pré-fenda dos provetes ENF foram inseridas duas folhas de Teflon[®] (Figura 131), de forma a que o escorregamento relativo dos braços dos provetes existente durante o ensaio ocorresse sem atrito [51, 52].



Figura 131 - Folhas de Teflon®

Na realização dos ensaios ENF utilizou-se uma velocidade de ensaio de 2 mm/min devido à garantia de um ensaio quási-estático e ter o número pretendido de pontos para aplicação dos métodos convencionais.

3.5.2.2 Parâmetros medidos durante o ensaio

Este tipo de ensaio não prevê a separação dos aderentes, sendo apenas relevante a análise do ensaio até a fenda atingir o local da aplicação da carga localizada a meio vão do provete. Na zona da aplicação de carga, a fenda tende a progredir mais lentamente devido às forças de compressão que são geradas nesse ponto, que dificultam a progressão da fenda e aumentam artificialmente o valor medido de G_{IIc} . Assim, a partir do momento em que a FPZ na vizinhança da fenda é afetada por este efeito de compressão (que pode acontecer muito antes da fenda atingir o punção de carregamento, dependendo da ductilidade do adesivo), o valor medido deixa de ser relevante.

O ensaio em provetes ENF permite medir o valor da força exercida no provete a cada instante, o deslocamento do ponto central do provete (zona de aplicação de carga) e o comprimento de fenda. Tal como para os ensaios DCB, foi utilizada uma máquina fotográfica digital como meio de correlação dos parâmetros medidos durante o ensaio. Esta permitirá visualizar a propagação da fenda, podendo-se concluir se a mesma terá sido ou não instável.

3.5.3 Análise de resultados

Na caracterização das propriedades de fratura ao corte, foi utilizado apenas o método baseado no comprimento de fenda equivalente, CBBM. Utilizou-se a correlação de imagem

de forma a medir o comprimento de fenda, que por sua vez viria a auxiliar no cálculo do valor de G_{IIc} pelos métodos que requerem o comprimento da mesma, mas a visualização da propagação da fenda não foi possível, dado que o corretor começou a estalar antes de sequer a pré-fenda ter começado a progredir. Isto impossibilitou a determinação da taxa crítica de libertação de energia em modo II pelos métodos CCM e CBT que serviriam para comparar o resultado destes com o método CBBM. Este desfasamento entre o comprimento de fenda real e medido pela rotura do corretor foi provocado pela elevada ductilidade deste adesivo ao corte.

A equação utilizada para a determinação do parâmetro G_{IIc} pelo método CBBM, já foi discutida e está expressa no capítulo 2.3.4.4.2.

3.5.3.1 Curvas P - δ e R

O *software* utilizado gerou os valores de força e deslocamento registados durante os ensaios, traduzindo-se nas curvas P - δ demonstradas na Figura 132. A repetibilidade verificada é bastante elevada, tendo-se atingido forças máximas muito semelhantes. Depois de atingida a força máxima, a curva tende a decrescer de forma acentuada, sendo esta a zona de determinação do G_{IIc} .

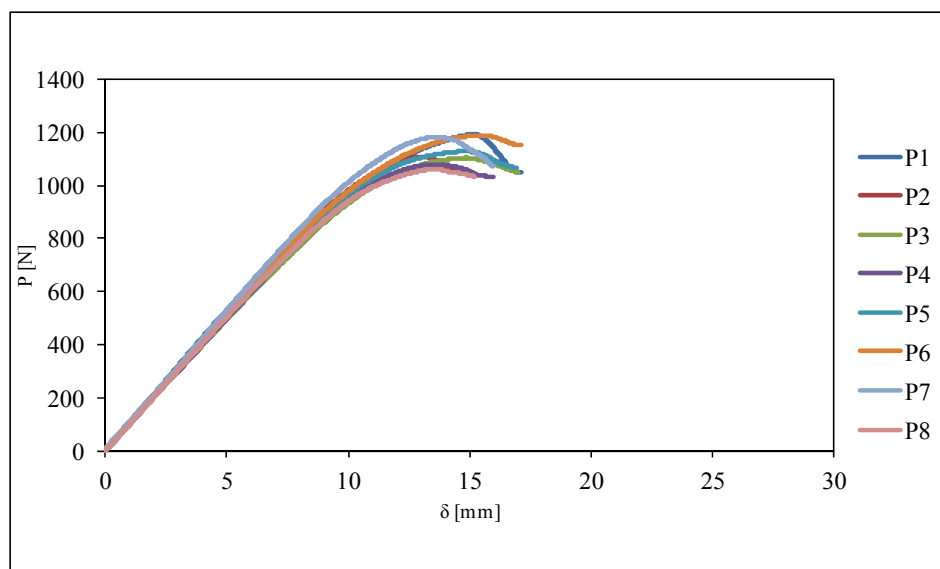


Figura 132 - Curvas P - δ obtidas pelo ensaio ENF

Na Figura 133 apresenta-se a curva R obtida para o provete P1 pela análise do método CBBM, considerado como representativo dos resultados obtidos pelos oito provetes. Como

referido anteriormente, este foi o único método tratado, uma vez que não se conseguiu analisar a propagação da fenda através da correlação de imagem, devido ao facto do corretor ter começado a estalar muito antes da progressão da fenda ter iniciado. A curva R relaciona a evolução de G_{II} com a_{eq} para uma amostra testada.

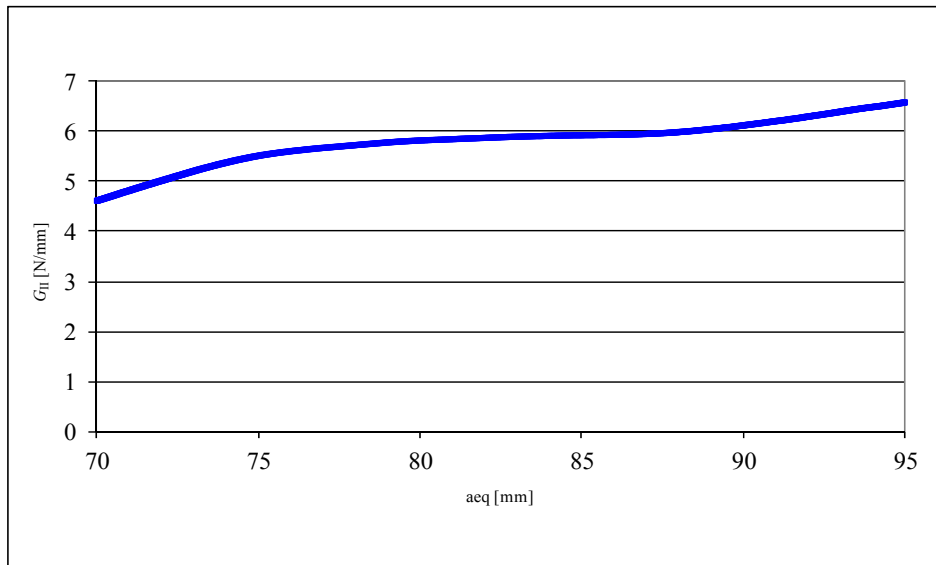


Figura 133 - Curva R obtida pelo ensaio ENF para o provete P1 através do método CBBM

A tenacidade à fratura em modo II é obtida imediatamente após ser atingida a força máxima, que no caso da curva R, se pode observar no momento em que a curva começa a definir um patamar, situado entre um comprimento de fenda equivalente de cerca de 76 e 87 mm (Figura 133). O momento em que G_{II} começa a subir corresponde à aproximação da FPZ ao cilindro de carregamento. Não é possível mostrar as superfícies de rotura mas, por inspeção visual, confirma-se terem sido coesivas.

3.5.3.2 Propriedades de tenacidade ao corte

Os valores obtidos de G_{IIc} pelo método CBBM são apresentados na Tabela 12, tendo-se obtido um valor reduzido de desvio padrão.

A repetibilidade dos ensaios foi elevada, sendo que a zona do patamar para a determinação do G_{IIc} ocorreu aproximadamente no mesmo intervalo de a_{eq} para os vários ensaios. Esta análise foi facilitada correlacionando o deslocamento que ocorre à força máxima aplicada com o comprimento de fenda equivalente registado para esse instante.

Tabela 12 - Valores de G_{IIc} obtidos pelo método CBBM

Provete	G_{IIc} [N/mm]
	CBBM
1	5,72
2	4,77
3	5,61
4	4,93
5	5,80
6	6,09
7	5,36
8	5,02
Média	5,41
Desvio Padrão	0,47

3.6 Análise crítica dos resultados obtidos

Neste ponto ir-se-á realizar uma análise crítica e aprofundada dos resultados obtidos para as diferentes propriedades, podendo existir uma comparação entre estas, no caso de tal se revelar pertinente. Serão realizadas comparações objetivas entre os parâmetros fornecidos pelo fabricante e os parâmetros obtidos neste trabalho. Como este é um adesivo lançado recentemente no mercado, ainda não há dados disponíveis relativamente às suas propriedades, pelo que apenas se fará a comparação com os únicos parâmetros disponibilizados na ficha do fabricante. Os parâmetros a serem comparados são a tensão de rotura à tração, tensão de corte máxima e alongamento à rotura.

São também comparadas as suas propriedades com as propriedades obtidas para um outro adesivo da família dos poliuretanos, grandemente referido na literatura, tentando, sempre que possível, que esta comparação retrate condições de processamento e ensaio o mais próximas possíveis das utilizadas neste trabalho. Este adesivo será do mesmo fabricante que o caracterizado neste trabalho, sendo denominado por SikaForce® 7888-L10.

3.6.1 Ensaio à tração

As amostras foram ensaiadas nas mesmas condições de temperatura, utilizando os mesmos equipamentos de fabrico e ensaio, sendo apenas diferenciado o provete 2 relativamente ao tempo de cura. Esta única variável provocou um comportamento do material completamente

díspar dos restantes provetes, obtendo-se valores de resistência bastante inferiores aos registados pelos outros provetes e fabricante. De facto, como o processo de cura poderá não ter sido concluído, o corpo de prova demonstrou uma flexibilidade bastante superior à registada pelo fabricante. O valor de alongamento máximo registado foi quase o dobro (48,67%) do fornecido na ficha do fabricante (25%). Por deduzir que o processo de cura não estaria devidamente finalizado, o ensaio a este provete foi considerado como inválido.

Os provetes 3, 4, 5 e 6 passaram por um processo de cura à temperatura ambiente de mais uma semana relativamente ao provete 2. Apresentavam uma maior rigidez, tendo de uma forma geral sofrido uma ligeira contração do material, medida desde o dia de remoção do molde até ao dia de ensaio. Os resultados destes ensaios foram de encontro ao verificado na ficha do fabricante, tendo sido obtido um valor médio da tensão de rotura de $11,49 \pm 0,25$ MPa, superior ao reclamado pelo fabricante, que se situa na ordem dos 10 MPa. O desvio padrão obtido foi extremamente reduzido (2,17%), o que demonstra a elevada repetibilidade dos ensaios com provetes de adesivo maciço à tração (Figura 134). O provete 5 registou um valor de tensão de rotura superior devido à quase inexistência de porosidades (Figura 84).

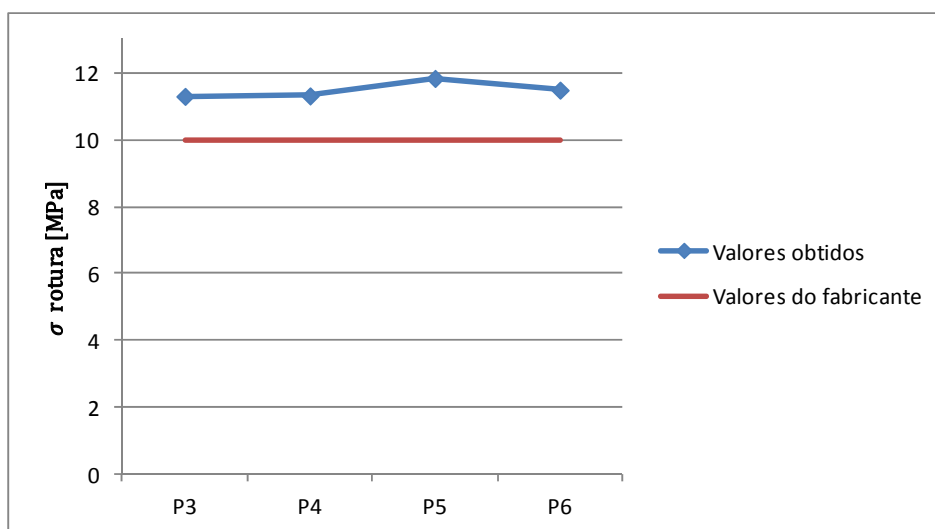


Figura 134 - Tensão de rotura dos provetes maciços P3, P4, P5, e P6

Relativamente ao alongamento à rotura, o valor obtido foi inferior ao expresso na ficha do fabricante, sendo de 19,18%, enquanto o fabricante expressa um alongamento máximo de 25%. Uma causa possível para tal ter acontecido, prende-se com o facto de o adesivo ter estado sujeito a um tempo de cura elevado (duas semanas). Poder-se-ia ter feito uma análise da dureza da superfície, com o auxílio de um durómetro, de forma a verificar se a cura estava

devidamente realizada. Para além disso, as pequenas porosidades também poderão ter originado um alongamento à rotura inferior ao esperado.

No caso do valor de E , não é possível realizar uma comparação com o valor obtido pelo fabricante, devido à sua ausência na ficha do mesmo. O valor obtido foi de $493,81 \pm 89,60$ MPa, traduzindo-se num desvio percentual de 18,14%. O valor calculado para o provete P3 é consideravelmente inferior aos obtidos para os restantes provetes testados nas mesmas condições de cura. Isto deve-se ao reduzido declive apresentado pela curva $P-\delta$ no regime elástico, sendo este inferior ao registado pelos restantes provetes. Este resultado poderá dever-se à existência de pequenos vazios que podem ser visualizados na zona onde ocorreu a rotura do provete (Figura 78). Caso se despreze este valor, o valor obtido para o E é $537,44 \pm 24,96$ MPa, o que resulta num desvio percentual de apenas 4,64%.

Também se determinou a zona de transição elasto-plástica deste adesivo, através da propriedade mecânica designada por "tensão de limite elástico", vulgarmente conhecida por "tensão de cedência" do material. Obteve-se um valor de $3,24 \pm 0,48$ MPa, sendo que para valores de tensão superiores a este, o adesivo inicia o seu processo de deformação plástica, não podendo recuperar a sua forma inicial.

A Tabela 13 compara as propriedades mecânicas à tração obtidas para o adesivo Sikaforce® 7752-L60 com as obtidas por Pinto [21] e Neto [22] para um adesivo da mesma família, o SikaForce® 7888-L10.

Tabela 13 - Comparação das propriedades mecânicas à tração

Propriedades	Módulo de Young, E [MPa]	Tensão limite elástico, σ_y [MPa]	Tensão de rotura à tração, σ_r [MPa]	Deformação de rotura à tração, ε [%]
SikaForce® 7752-L60	$493,81 \pm 89,60$	$3,24 \pm 0,48$	$11,49 \pm 0,25$	$19,18 \pm 1,40$
SikaForce® 7888-L10⁽¹⁾	1790 ± 110	$17,97 \pm 4,26$	$24,44 \pm 1,38$	45,05
SikaForce® 7888-L10⁽²⁾	1890 ± 250	$13,2 \pm 4,83$	$28,6 \pm 2,0$	$43 \pm 0,6$

(1) Resultados obtidos por Pinto [21]

(2) Resultados obtidos por Neto [22]

Pela comparação dos valores obtidos verifica-se que o adesivo SikaForce® 7752-L60 possui uma resistência e ductilidade inferiores ao adesivo SikaForce® 7888-L10. No entanto, é

necessário tomar em consideração as velocidades de ensaio utilizadas para obtenção das referidas propriedades. Para a determinação das propriedades foi utilizada uma velocidade de ensaio de 2 mm/min, enquanto Pinto [21] e Neto [22] utilizaram uma velocidade de ensaio de 1 mm/min, não sendo esta diferença suficiente para justificar qualquer divergência, devido ao facto de se tratarem ambas de condições quase estáticas de ensaio. No entanto, para o fabrico dos provetes por Pinto [21], foram utilizados os mesmos meios disponíveis também utilizados neste trabalho.

Uma grande vantagem do adesivo SikaForce® 7752-L60 relativamente ao adesivo SikaForce® 7888-L10, é o seu elevado tempo de manuseamento. Este pode ser aplicado durante 60 min, enquanto o tempo de aplicação do SikaForce® 7888-L10 é de apenas 10 min. Isto poderá comprometer a escolha do adesivo quando se pretende ligar juntas com uma área de ligação considerável, em que o tempo de aplicação do adesivo possa ser um fator eliminatório.

3.6.2 Ensaio ao corte

Os ensaios ao corte são de rápida execução, devido ao reduzido comprimento de sobreposição, pelo que as amostras foram todas ensaiadas no mesmo dia, com condições de ensaio semelhantes.

Os provetes passaram por um processo de cura à temperatura ambiente de uma semana, tendo os resultados destes ensaios ido de encontro ao verificado na ficha do fabricante. O valor obtido para a tensão de rotura ao corte ($10,17 \pm 0,64$ MPa) foi ligeiramente superior ao reclamado pelo fabricante, que se situa na ordem dos 10 MPa. O desvio padrão percentual obtido (6,28%) demonstra uma elevada repetibilidade dos ensaios com provetes TAST (Figura 135). O provete 1 registou um valor de tensão de rotura ao corte ligeiramente superior, o que poderá estar relacionado com uma aparente rotura totalmente coesiva (Figura 103).

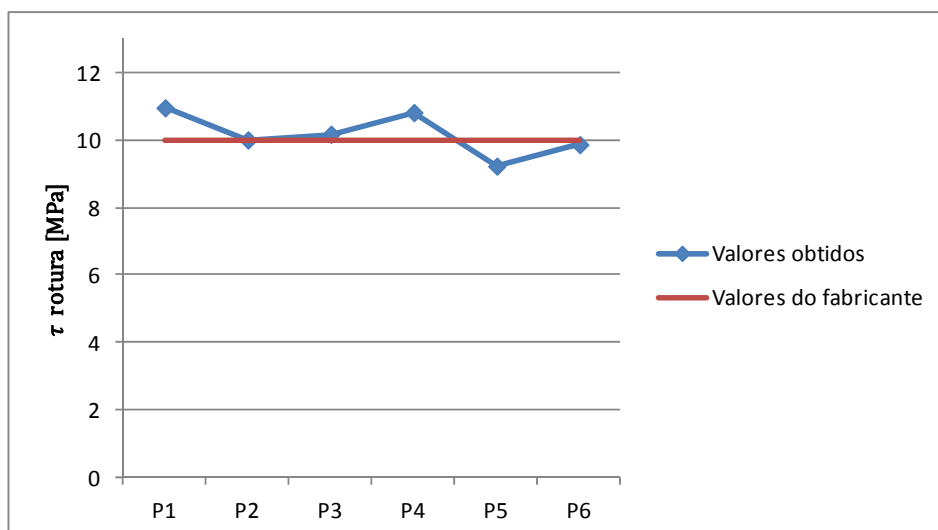


Figura 135 - Tensão de rotura ao corte dos provetes P1 a P6

Relativamente aos valores obtidos para a deformação de corte, houve uma pequena discrepância que poderá estar relacionada com uma ligeira variação na espessura do adesivo no processo de fabrico, ao longo da camada adesiva. O valor médio obtido, 54,82%, é representativo de uma elevada ductilidade [53].

O módulo de corte não é um parâmetro fornecido pelo fabricante, pelo que não se poderá ter como base de comparação com este. Os valores obtidos revelam uma elevada repetibilidade, expressa num desvio padrão de apenas 8,71%, tendo-se obtido um valor de G de $187,75 \pm 16,35$ MPa. Como o adesivo é um material isotrópico, este parâmetro poderá ser correlacionado com o valor de E , obtido nos ensaios com provetes de adesivo maciço, através da Equação (1). Substituindo os valores calculados, obteve-se um valor de ν igual a 0,32, estando de acordo com os valores referidos na bibliografia (superior a 0,3 e inferior a 0,5) quando as propriedades são obtidas através dos dois ensaios utilizados [6].

Também se determinou a zona de transição elasto-plástica, mas desta vez ao corte, através da tensão limite elástico. Obteve-se um valor de $5,16 \pm 1,14$ MPa, sendo que para valores de tensão superiores a este, o adesivo sofrerá deformações permanentes.

As superfícies de rotura revelaram uma boa preparação da superfície na zona colada, uma vez que as roturas foram em todos os casos coesivas, embora algumas próximas da interface (provetes 2 e 5). A propagação da rotura nestes provetes poderá indiciar uma zona menos resistente do adesivo, originada pela presença de porosidades. O comportamento elástico do

adesivo foi diferente em todos os provetes, mas, no entanto, tal como dito anteriormente, não se verificaram variações nos valores obtidos de G dignos de registo.

A Tabela 14 compara as propriedades mecânicas ao corte obtidas para o adesivo Sikaforce® 7752-L60 com as obtidas por Morais [29] para o adesivo SikaForce® 7888-L10.

Tabela 14 - Comparação das propriedades mecânicas ao corte

Propriedades	Módulo de corte, G [MPa]	Tensão limite elástico, τ_y [MPa]	Tensão de rotura ao corte, τ_r [MPa]	Deformação de rotura ao corte, γ [%]
SikaForce® 7752-L60	187,75±16,35	5,16±1,14	10,17±0,64	54,82±6,39
SikaForce® 7888-L10⁽¹⁾	257,96±52,00	-	11,37±0,94	58,7±14,6

(1) Resultados obtidos por Morais [29]

Para a comparação dos valores obtidos para cada adesivo é importante referir que foram utilizados os mesmos substratos, peças de fixação à máquina de ensaio, velocidades de ensaio e tempos de cura idênticos (uma semana, embora dois dos cinco provetes ensaiados por Morais [29] tenham sido submetidos a um processo de cura de apenas 72h).

Como seria se esperar, pela comparação dos valores obtidos verifica-se que o adesivo SikaForce® 7752-L60 possui uma resistência e ductilidade inferiores ao adesivo SikaForce® 7888-L10. No entanto, esperava-se uma maior diferença relativamente à tensão de rotura ao corte, dado que o fabricante anuncia uma resistência de cerca de 20 MPa para o adesivo SikaForce® 7888-L10. A diferença de resultados obtidos por Morais [29] deveu-se à insuficiente aplicação de desmoldante nas lâminas, o que dificultou a remoção das mesmas, e do facto da maioria das roturas terem sido parcialmente adesivas. Apesar disto, é de enaltecer o reduzido desvio padrão dos resultados obtidos para ambos os adesivos, relativamente à tensão de rotura ao corte.

Pode-se então concluir que a relação E/G do adesivo SikaForce® 7752-L60 é de 2,63, enquanto para o adesivo SikaForce® 7888-L10, pelos resultados obtidos por Pinto [21], Neto [22] e Morais [29], foi obtida uma relação de 7,13.

3.6.3 Ensaio Double-Cantilever Beam

De uma forma geral, constata-se que todas as curvas $P-\delta$ (Figura 121) apresentam o mesmo comportamento, confirmando a elevada repetibilidade dos ensaios DCB. Apenas o provete 6 não atingiu o mesmo patamar de rigidez inicial, tendo obtido o valor de força máxima mais distante dos restantes provetes. No entanto a propagação da fenda teve um comportamento idêntico aos restantes, embora num patamar $P-\delta$ inferior aos verificados para os restantes provetes, pela razão referida anteriormente.

Nas curvas $P-\delta$ estão apresentadas três fases distintas. Na primeira fase, verifica-se um comportamento força/deslocamento linear, pertencente ao domínio elástico onde as deformações ainda não são permanentes sendo, por isso, ainda reversíveis. Na segunda fase, observa-se uma perda de linearidade um pouco antes de $P_{\text{máx}}$, zona onde se inicia a formação da FPZ. Nesta fase, o adesivo já entrou num processo irreversível, não recuperando a sua forma e propriedades iniciais. A terceira fase faz referência ao valor de G_{Ic} e propagação da fenda. Na vizinhança de $P_{\text{máx}}$, a energia armazenada do provete atinge o seu valor crítico, G_{Ic} , correspondente ao início de propagação da fenda. A partir deste momento verifica-se um regime de propagação estável da fenda, caracterizado por uma diminuição progressiva da carga com o aumento do deslocamento. No final, constata-se ainda uma quebra abrupta da curva $P-\delta$, representativa da rotura total do provete.

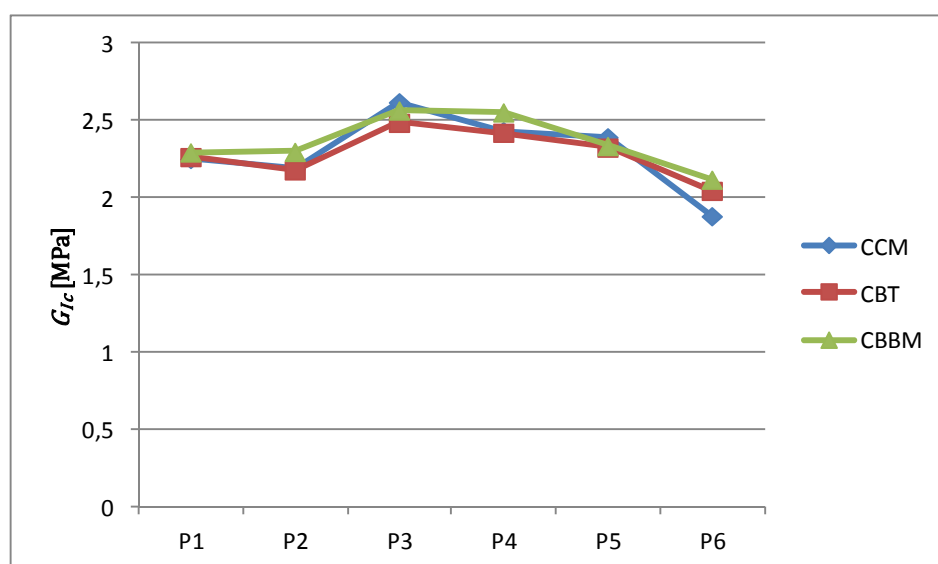


Figura 136 - Valores de G_{Ic} de todos os provetes pelos vários métodos

Pela análise da Figura 122, constata-se que não ocorreram grandes discrepâncias nas curvas R dos diferentes métodos de determinação de G_{Ic} . Seria, no entanto, de esperar um aumento abrupto de G_I na fase inicial pela utilização dos métodos CCM e CBT. O mesmo poderá não ter ocorrido devido à análise menos expedita do comprimento da fenda. Esta subida abrupta deveria ter ocorrido antes do verificado para o processo CBBM, já que este último inclui o efeito da FPZ.

A partir dos valores de G_{Ic} obtidos da análise pelos diferentes métodos para o adesivo SikaForce® 7752-L60, foi traçado o gráfico da Figura 136, de forma a auxiliar na análise da variabilidade dos resultados.

Pela análise da Figura 136 verifica-se uma tendência constante entre os valores obtidos pelos diferentes métodos, sendo o provete 1 aquele que regista uma maior concordância de G_{Ic} . Em termos de discrepâncias, o provete 6 foi aquele que registou um menor valor de tenacidade à fratura em modo I, sendo este o resultado mais distante da maioria dos provetes.

Analisando a Figura 137 verifica-se um valor médio muito semelhante entre os diferentes métodos, sendo o CBBM aquele que regista um maior valor de G_{Ic} . Este é o método mais expedito e que induz menos erros na determinação de G_{Ic} , uma vez que contabiliza a já referida FPZ e não é afetado por eventuais erros de medição de a . Tanto o método CCM como o CBT necessitam da medição do comprimento de fenda, o que torna a análise do processo menos expedita. Essa análise pode induzir ainda mais erros pelo método CCM, visto serem utilizados polinómios cúbicos, já referidos no capítulo 2.3.3.4.1, utilizando uma regressão linear como ajuste das curvas da flexibilidade $C = f(a)$ [42]. No entanto, os valores médios de G_{Ic} obtidos pelos métodos CCM, CBT e CBBM foram idênticos, o que pode indicar um correto ajuste dos polinómios referidos. Os valores de desvio padrão foram reduzidos, registando uma variabilidade percentual para os métodos CCM, CBT e CBBM de 10,91%, 6,99% e 7,20%, respetivamente.

A Figura 123 explica o facto do valor de G_{Ic} obtido pelos diferentes métodos, para o provete 6, ter sido inferior aos restantes, verificando-se uma rotura parcialmente adesiva. Todas as roturas foram coesivas, sendo um fator fundamental para que se possa determinar um valor de G_{Ic} fidedigno para um determinado adesivo.

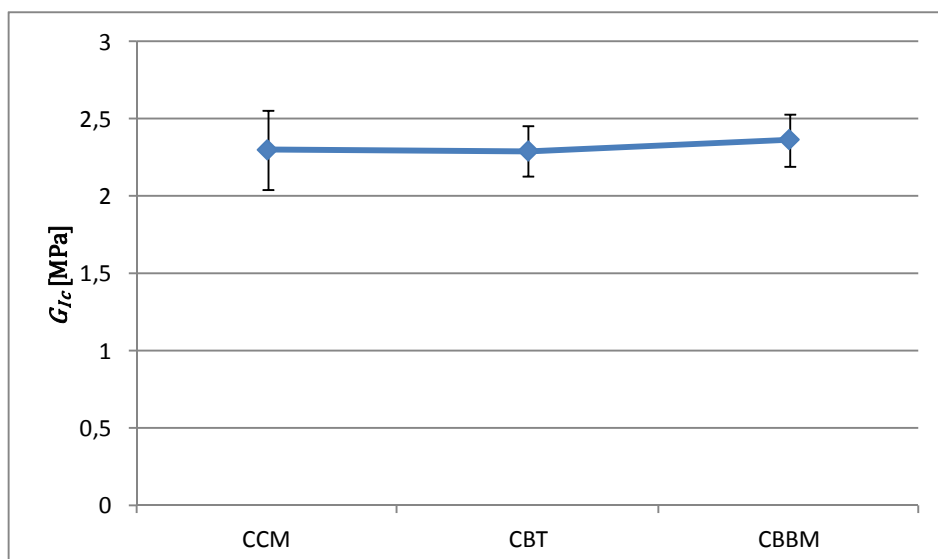


Figura 137 - Média e desvio padrão de G_{Ic} pelos diferentes métodos

A Tabela 15 compara as propriedades de fratura à tração obtidas para o adesivo Sikaforce[®] 7752-L60 com as obtidas por Campilho et al. [43, 54] e Constante [50] para o adesivo SikaForce[®] 7888-L10.

Tabela 15 - Comparação das propriedades de fratura à tração

G_{Ic} [N/mm]	Resultados	Resultados ⁽¹⁾	Resultados ⁽²⁾	Resultados ⁽³⁾
SikaForce[®] 7752-L60	2,36±0,17	-	-	-
SikaForce[®] 7888-L10	-	1,18±0,22	1,08±0,23	1,49±0,24

(1) Resultados obtidos por Campilho et al. [43]

(2) Resultados obtidos por Campilho et al. [54]

(3) Resultados obtidos por Constante [50]

Pela comparação dos valores obtidos verifica-se que o adesivo SikaForce[®] 7752-L60 possui um maior G_{Ic} relativamente ao adesivo SikaForce[®] 7888-L10. Para melhor compreensão dos valores obtidos, torna-se necessário referir quais as espessuras de adesivo e substratos utilizadas por cada autor nos trabalhos referidos. Campilho et al. [43] utilizou provetes com 1 mm de espessura de adesivo e 5 mm de espessura de cada um dos substratos, enquanto Campilho et al. [54] e Constante [50] utilizaram provetes com 1 mm de espessura de adesivo e 3 mm de espessura de cada um dos substratos. Campilho et al. [54] estudaram a influência da espessura dos substratos utilizados, chegando à conclusão que o valor de G_{Ic} é tanto maior quanto maior for a espessura dos substratos, mantendo inalterada a espessura da camada adesiva utilizada. No entanto, Constante [50] obteve um valor médio de G_{Ic} superior aos restantes autores para o adesivo SikaForce[®] 7888-L10.

Pela análise de resultados das propriedades mecânicas, concluiu-se que o adesivo SikaForce® 7888-L10 é mais resistente e dúctil que o adesivo SikaForce® 7752-L60. Relativamente aos valores obtidos para as propriedades de fratura à tração, o G_{Ic} médio do adesivo SikaForce® 7752-L60 foi superior ao do SikaForce® 7888-L10, sendo estes de $2,36\pm 0,17$ N/mm e $1,25\pm 0,21$ N/mm, respetivamente, concluindo-se que o primeiro oferece maior resistência ao início da propagação da fenda em modo I.

3.6.4 Ensaio End-Notched Flexure

Relativamente aos ensaios ENF, constata-se que todas as curvas $P-\delta$ (Figura 132) apresentam o mesmo comportamento, confirmando a elevada repetibilidade dos ensaios. Atingiram-se forças máximas bastante semelhantes, correspondentes a um deslocamento máximo do cilindro de carregamento entre 13 e 15 mm.

Nas curvas $P-\delta$ estão apresentadas as três fases distintas já referidas no capítulo 3.6.3. No final, apenas não se constata uma quebra abrupta da curva $P-\delta$, visto não ter ocorrido a rotura total do provete. No entanto, mesmo não sendo possível mostrar as superfícies de rotura, por inspeção visual constata-se terem sido coesivas, sendo este um fator fundamental para que se possa determinar um valor de G_{Ic} fidedigno.

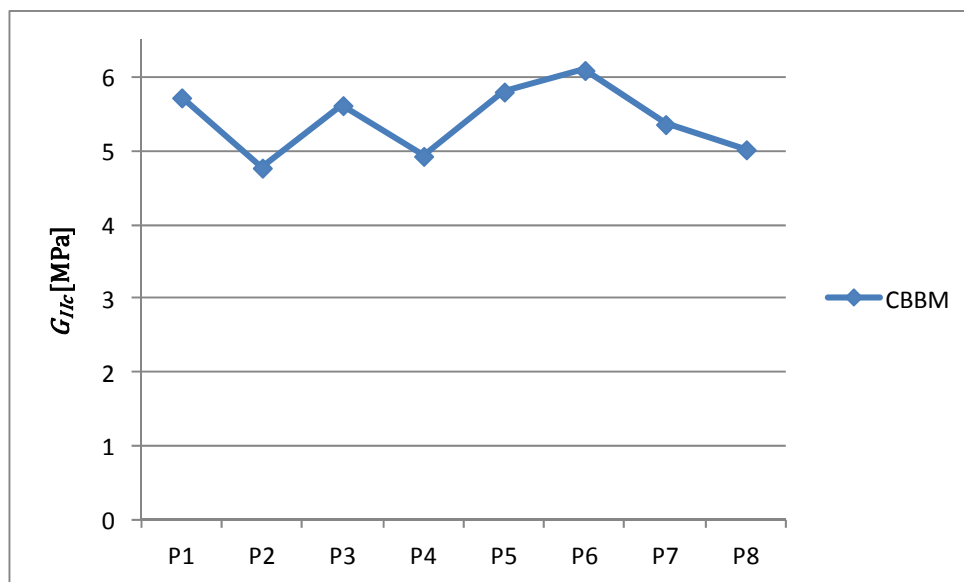


Figura 138 - Gráfico representativo dos valores de G_{Ic} de todos os provetes pelo método CBBM

Tal como referido e justificado no capítulo 3.5.3, apenas se utilizou o método CBBM para a determinação de G_{Ic} . Analisando a Figura 133, constata-se a existência de um patamar

relativamente bem definido, referente à zona em que o G_{IIc} é determinado. O momento em que G_{II} começa a subir condiz com a aproximação da FPZ ao cilindro de carregamento. A partir dos valores de G_{IIc} obtidos da análise pelo método CBBM para o adesivo SikaForce® 7752-L60 foi traçado o gráfico da Figura 138, de forma a auxiliar na análise da variabilidade dos resultados.

Pela análise da Figura 138 verifica-se que não houve discrepâncias assinaláveis, pelo que os ensaios seguiram uma tendência, sendo o provete 7 aquele que regista uma maior concordância com o valor médio de G_{IIc} . O maior valor foi obtido pelo provete 6. Analisando a Tabela 12, verifica-se uma discrepância de valores bastante diminuta, traduzida num desvio padrão percentual de apenas 8,69%.

A Tabela 16 compara as propriedades de fratura ao corte obtidas para o adesivo Sikaforce® 7752-L60 com as obtidas por Neto [22] para o adesivo SikaForce® 7888-L10.

Tabela 16 - Comparação das propriedades de fratura ao corte

G_{IIc} [N/mm]	Resultados	Resultados ⁽¹⁾
SikaForce 7752-L60	5,41±0,47	-
SikaForce 7888-L10	-	8,72±1,22

(1) Resultados obtidos por Neto [22]

Os resultados obtidos foram apenas comparados com o trabalho de Neto [22], devido à carência de trabalhos realizados para a obtenção de G_{IIc} do adesivo SikaForce® 7888-L10. No entanto, foram utilizadas espessuras de camada adesiva e de substratos diferentes. Neto [22] também utilizou substratos de material diferente (aço) ao usado neste trabalho, bem como uma velocidade de ensaio de 0,5 mm/min, recordando que no presente trabalho se utilizou 2 mm/min. De referir que foi utilizado o mesmo método (CBBM) para a determinação de G_{IIc} .

Pela comparação dos valores obtidos verifica-se que o adesivo SikaForce® 7752-L60 possui um menor G_{IIc} relativamente ao adesivo SikaForce® 7888-L10, registando-se o valor de 5,41±0,47 N/mm para o primeiro e 8,72±1,22 N/mm para o segundo. Pode-se então concluir que o adesivo SikaForce® 7752-L60 oferece uma menor resistência ao início da propagação da fenda em modo II.

Estando as propriedades de fratura à tração e ao corte determinadas, pode-se então concluir que a relação G_{IIC}/G_{IC} do adesivo SikaForce® 7752-L60 é de 2,29, enquanto para o adesivo SikaForce® 7888-L10, pelos resultados obtidos por Campilho et al. [43, 54], Constante [50] e Neto [22], foi obtida uma relação de 6,98.

A determinação das propriedades dos adesivos é muito importante para a previsão do comportamento da uma junta, tendo elevada influência na resistência da mesma. Todavia, um adesivo mais forte não se traduz obrigatoriamente numa resistência de junta superior. De facto, um adesivo resistente mas frágil adquire uma tensão elevada localmente nos cantos da junta, mas, no entanto, não permite a redistribuição do esforço para o interior da mesma, resultando numa tensão de rotura média ao corte muito reduzida. Inversamente, os adesivos com elevada ductilidade e baixo módulo (caso do adesivo caracterizado neste trabalho, bem como o adesivo tomado como elemento de comparação) possuem geralmente uma resistência inferior. Contudo, estes são capazes de distribuir as tensões de forma uniforme ao longo da junta, tornando as juntas muito mais resistentes (tensão de corte média superior) do que utilizando adesivos mais resistentes mas frágeis [55].

Os adesivos frágeis são mais sensíveis à propagação da fenda do que os adesivos dúcteis, refletindo-se numa menor resistência. A flexibilidade elevada de um adesivo dúctil permite que a junta acomode mais facilmente o movimento dos aderentes durante o carregamento, sendo a tensão distribuída por uma maior área [56]. Esta distribuição de tensões mais uniforme e uma maior capacidade de amortecimento de energia, permitem que os adesivos dúcteis tenham uma maior resistência à fadiga em juntas coladas [9].

O adesivo caracterizado neste trabalho possui elevada ductilidade e uma maior capacidade para suportar esforços de clivagem e de arrancamento comparativamente a adesivos mais rígidos como por exemplo o adesivo Araldite® 2015 ou ainda o Araldite® AV138, este último mais rígido que o primeiro (demonstrado no trabalho realizado por Constante [50]).

4 Conclusões

Este trabalho teve como objetivo principal a caracterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural recentemente lançado no mercado e que carecesse de ser caracterizado. A escolha recaiu sobre o adesivo SikaForce® - 7752 FRW L60. Sendo um poliuretano estrutural, seria de esperar uma elevada ductilidade aliada a uma resistência significativa. Foram fabricados provetes de adesivo maciço e em junta, sendo posteriormente realizados ensaios, de forma a estudar aprofundadamente o adesivo em causa. Efetuaram-se ensaios, numa máquina de ensaios universal, com provetes de adesivo maciço para determinação das propriedades mecânicas à tração, provetes TAST para determinação das propriedades mecânicas ao corte, provetes DCB para determinação das propriedades de fratura à tração e provetes ENF para determinação das propriedades de fratura ao corte.

Através dos ensaios à tração de provetes maciços determinou-se o módulo de Young, a tensão limite elástico à tração, também conhecida por tensão de cedência, a tensão de rotura e a deformação de rotura ou alongamento máximo. Os valores obtidos para estas propriedades mecânicas à tração foram, respetivamente, $493,81 \pm 89,60$ MPa; $3,24 \pm 0,48$ MPa; $11,49 \pm 0,25$ MPa; e $19,18 \pm 0,25\%$. Os únicos parâmetros possíveis de comparar com a ficha do fabricante são a tensão de rotura (10 MPa) e a deformação de rotura à tração (25%), tendo-se obtido para estes dois parâmetros um desvio padrão percentual de 2,17 e 7,30%, respetivamente.

Com os ensaios de provetes TAST foi possível determinar o módulo de corte, a tensão limite elástico ao corte, a tensão de corte máxima ou tensão de rotura ao corte, bem como a deformação de corte máxima. Os valores obtidos para as propriedades mecânicas ao corte foram, respetivamente, $187,75 \pm 16,35$ MPa; $5,16 \pm 1,14$ MPa; $10,17 \pm 0,64$ MPa; e $54,82 \pm 6,39\%$. O único parâmetro possível de comparar com a ficha do fabricante é a tensão

de rotura (10 MPa), tendo-se obtido, para estes parâmetros, um desvio padrão percentual de 6,28%.

Recorreu-se à Equação (1), válida para materiais isotrópicos, permitindo correlacionar os valores obtidos de G com E , por forma a se poder determinar ν . A bibliografia [6] afirma que o valor de ν deverá estar compreendido entre 0,3 e 0,5, sendo que a maioria dos adesivos possui um valor de ν em torno de 0,3. O valor obtido para o adesivo estudado no presente trabalho foi de 0,32.

Para a análise de fratura em modo I, recorreu-se a ensaios DCB de forma a determinar G_{Ic} através de métodos que requerem a medição do comprimento de fenda (CCM e CBT), bem como métodos baseados no comprimento de fenda equivalente (CBBM). Os valores obtidos para G_{Ic} foram $2,29 \pm 0,25$ N/mm (CCM); $2,29 \pm 0,16$ N/mm (CBT); e $2,36 \pm 0,17$ N/mm (CBBM), registando uma variabilidade percentual de 10,91%, 6,99% e 7,20%, respetivamente. Verificou-se uma proximidade assinalável dos valores obtidos de G_{Ic} pelos diferentes métodos.

Relativamente à análise de fratura em modo II, realizaram-se ensaios ENF de forma a determinar o G_{IIc} através de métodos baseados no comprimento de fenda equivalente (CBBM). Inicialmente estava previsto a determinação de G_{IIc} pelos métodos CCM e CBT, mas tal não foi possível devido à impossibilidade de uma correta visualização da propagação da fenda por correlação de imagem, devido à quebra prematura do corretor utilizado nas faces laterais dos provetes. Obteve-se um valor de G_{IIc} de $5,41 \pm 0,47$ N/mm (CBBM), correspondendo a um desvio padrão percentual de 8,69%.

Numa análise crítica dos resultados efetuou-se uma comparação e enquadramento com um outro adesivo da mesma família, estando este já caracterizado e estudado por diversos autores.

De uma forma geral, a elevada repetibilidade dos ensaios ficou patenteada nos reduzidos valores de desvio padrão obtidos no cálculo das diversas propriedades do adesivo. O adesivo SikaForce® 7752- L60 é um adesivo estrutural ($\tau_{máx} = 10,17$ MPa ≥ 7 MPa) que permite conjugar boa resistência mecânica com elevada ductilidade, possuindo ainda um tempo de manuseamento ou aplicação elevado, o que pode ser um ponto fundamental quando se pretende ligar juntas com uma área de ligação considerável.

Este adesivo poderá ser utilizado na indústria automóvel em aplicações que requeiram alguma resistência com elevada flexibilidade, sendo ideal para junção peças de elevado tamanho.

Como trabalhos futuros sugere-se:

- O estudo comparativo das propriedades mecânicas e de fratura a diferentes temperaturas;
- Realização de outros ensaios para determinação das mesmas propriedades, como por exemplo tração em juntas topo a topo, ensaios Arcan, TDCB e ELS;
- Ensaio de fratura em modo misto e determinação das propriedades, por exemplo, pelo Integral J;
- Comparação das mesmas propriedades obtidas entre ensaios em junta e ensaios com provetes em bruto;
- Estudo do adesivo à fadiga em aplicações reais do adesivo;
- Realizar análise numérica de ensaios recorrendo ao *software* ABAQUS® para verificação da capacidade de previsão.

Referências Documentais

- [1] L. F. M. d. Silva, A. G. d. Magalhães e M. F. S. F. d. Moura, *Juntas Adesivas Estruturais*, Porto: Publindústria, 2007.
- [2] A. M. G. Pinto, “Ligações adesivas entre materiais poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos,” *Dissertação de Doutoramento: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Porto, 2007.
- [3] D. Araújo, “Ciência Hoje On-line,” Instituto Ciência Hoje, 1 Abril 2013. [Online]. Available: <http://www.cienciahoje.uol.com.br>. [Acedido em 9 Fevereiro 2014].
- [4] T. Faneco e J. Dias, “Processos de ligação - adesivos. Introdução. Vantagens e desvantagens. Definições.” *Trabalho da disciplina de Processos de Ligação: Instituto Superior de Engenharia do Porto*, Porto, 2013.
- [5] “ASTM D 5573 – 99, Standard Practice for Classifying Failure Modes in Fiber Joints”.
- [6] L. F. M. d. Silva, A. Öchsne e R. D. Adams, *Handbook of Adhesion Technology*, Verlag Berlin Heidelberg: Springer, 2011.
- [7] B. Ferreira e J. Torres, “Classificação geral dos adesivos e processos de selecção”, *Trabalho da disciplina de Processos de Ligação: Instituto Superior de Engenharia do Porto*, Porto, 2013.
- [8] C. Costa, A. Costa, M. Teixeira, S. Pereira e C. Mota, “Projecto PESC N°4: Caracterização Mecânica de Adesivos Estruturais,” *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Porto, 2004/2005.
- [9] M. E. Petrie, *Handbook of Adhesives and Sealants*, USA: McGraw-Hill, 2000.
- [10] R. Silva, “Projecto PESC,” *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*, Porto.
- [11] J. G. Quini, “Adesivos estruturais uretânicos aplicados a combinações de compósitos, plásticos e metais,” *Tese de Doutoramento: Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares*, São Paulo, 2011.
- [12] J. Shields, *Adhesives Handbook*, 2nd ed. London, U.K.: Butterworth & Co, 1976.
- [13] R. D. Adams, J. Comyn e W. W. C., *Structural adhesive Joints in Engineering*, London: Chapman & Hall, second edition, 1997.
- [14] M. D. Banea e L. F. M. d. Silva, “Adhesively bonded joints in composite materials - an overview,” *Proc. IMechE, Part L: Journal of Materials: Design and Applications*, vol. 223 no.1, pp. 1-18, 2009.

- [15] M. D. Banea, L. F. M. Silva e R. D. S. G. Campilho, “Moulds design for adhesive bulk and joint specimens manufacturing,” *Assembly Automation*, vol. 32 Iss: 3, pp. 284-292, 2012.
- [16] T. Faneco e P. Correia, “Ensaio Tração - Provete de Alumínio,” Trabalho da disciplina de Caracterização de Materiais: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2012.
- [17] L. F. d. Silva, D. A. Dillard, B. R. K. Blackman e R. D. Adams, *Testing Adhesive Joints: Best Practices*, Weinheim: Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA, First Edition, 2012.
- [18] K. Ikegami, T. Fujii, H. Kawagoe, H. Kyogoku, K. Motoie, K. Nohno, T. Sugibayashi e F. Yoshida, “Bechmark tests on adhesive strenghts in butt, single and double lap joints and double-cantilever beams,” *International Journal of Adhesion and Ashesives*, vol. 16, pp. 219-226, 1996.
- [19] L. F. M. d. Silva, R. D. Adams e M. Gibbs, “Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives,” *International Journal of Adhesion & Adhesives*, vol. 24, pp. 69-83, 2003.
- [20] J. A. García, C. A., L. M. García B. e M. A. Jiménez, “Characterization and material model definition of toughened adhesives for finite element analysis,” *International Jouranl of Adhesion & Adhesives*, vol. 31, pp. 182-192, 2011.
- [21] S. D. M. Pinto, “Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis,” Dissertação de Mestrado: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.
- [22] J. A. B. Neto, “Estudo Paramétrico de juntas Adesivas em Material Compósito,” Dissertação de Mestrado: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [23] “Extensometers for Tensile Testing of Plastics and Rubbers,” Intertek Plastics Technology Laboratories.
- [24] B. Boughton e M. Gower, *Measurement good practice guide No.47 npreparation and testing of adhesive joints*, Teddington, 2011.
- [25] G. Dean e B. Duncan, *Measurement good practice guide. A Guide preparation and testing of bulk specimens of adhesives*, Teddington: NPL Materials Centre, 1998.
- [26] L. F. M. d. Silva, T. S. S. Rodrigues, M. A. V. Figueiredo, M. F. S. F. d. Moura e J. A. G. Chousal, “Effect of adhesive type and thinckness on the lap shear strenght,” *The Journal of Adhesion*, vol. 82, pp. 1091-1115, 2006.
- [27] “EN ISO 527-2, Plastics. Determination of tensile properties,” 1996.
- [28] V. Chiaverini, *Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas Vol.1*, São Paulo: McGraw-Hill, 2ª edição.
- [29] J. F. A. Morais, “Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST),” Dissertação de Mestrado: Instituto superior de Engenharia do Porto, Porto, 2013.

- [30] N. G. Berry e M. R. J. d'Almeida, "Efeito da Presença de Defeitos no Comportamento Mecânico de Juntas Coladas Carbono-Epoxi," *Polímeros: Ciência e Tecnologia*, vol. 10(3), pp. 138-148, 2000.
- [31] K.-S. Kim, J.-S. Yoo, Y.-M. Yi e C.-G. Kim, "Failure mode and strength of uni-directional composite single lap bonded joints with different bonding methods," *Composite Structures*, vol. 72(4), pp. 477-485, 2006.
- [32] R. J. C. Carbas, "Estudo paramétrico de juntas adesivas pelo método de Taguchi," Dissertação de Mestrado: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2008.
- [33] R. D. S. G. Campilho, "Repair of Composite and Wood Structures," Doctoral thesis: Faculty of Engineering of Porto University, Oporto, 2009.
- [34] R. F. G. Cardoso, "Desenvolvimento de um dispositivo para a determinação da tenacidade de adesivos em modo misto," Dissertação de Mestrado: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2011.
- [35] F. J. P. Chaves, "Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints," Dissertação de Doutoramento: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [36] "ASTM D 3433 - 99: Annual book of ASTM standard, West Conshohocken".
- [37] "ISO 25217:2009".
- [38] J. J. Benbow e F. C. Roesler, "Experiments on Controlled Fractures Proceedings of the Physical Society," *Section B, 70 (2)*, pp. 201-211, 1957.
- [39] J. J. Gilman e B. L. Averbach, "Cleavage, Ductility and Tenacity in Crystals," Messachussetts Inst. of Technology, New York, 1959.
- [40] V. H. C. Esteves, "Determinação da Tenacidade de um Adesivo em Solicitações de modo misto (I + II)," Dissertação de Mestrado: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2010.
- [41] C. M. S. Canto, "Strength and fracture energy of adhesives for the automotive industry," Dissertação de Doutoramento: Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto, Porto, 2013.
- [42] 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*, vol. 68, pp. 2224 - 2230, 2008.
- [43] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, D. J. S. Gonçalves, J. F. M. G. d. Silva, M. D. Banea e L. F. M. d. Silva, "Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites," *Composites: Part B*, vol. 50, pp. 120-126, 2013.
- [44] M. F. S. F. d. Moura, R. D. S. G. Campilho e J. P. M. Gonçalves, "Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints," *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 1589-1595, 2009.

- [45] U. Stigh, K. S. Alfredsson, T. Anderson, A. Biel e T. S. K. Calberger, “Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers,” *International Journal of Fracture*, vol. 165, pp. 149 - 162, 2010.
- [46] Y. Zhu, K. M. Liechti e K. Ravi-Chandar, “Direct extraction of rate-dependent traction-separation laws for polyurea/steel interfaces,” *International Journal of Solids and Structures*, vol. 46, pp. 31 - 51, 2009.
- [47] “Ficha técnica do adesivo SikaForce 7752 L60 da marca Sika”.
- [48] “Ficha técnica do desmoldante Frekote 770-NC da marca Loctite”.
- [49] “ISO 11003-2, Adhesives - Determination of Shear Behaviour; Part 2: Thick-adherend shear test method,” 2005.
- [50] C. J. Constante, “Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais,” Dissertação de Mestrado: Instituto Superior de Engenharia do Porto, Porto, 2014.
- [51] M. A. L. Silva, J. J. L. Morais, d. Moura, M. F. S. F. e J. L. Lousada, “Mode II Wood Fracture Characterization Using the ELS Test,” *Engineering Fracture Mechanics*, vol. 74(14), p. 2133–2147, 2007.
- [52] J. M. Hodgkinson, “Mechanical Testing of Advanced Fibre Composites,” CRC Press, Cambridge: Woodhead, Boca Raton, FL, 2000.
- [53] L. F. M. Silva, R. A. M. d. Silva, J. A. G. Chousal e A. M. G. Pinto, “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.
- [54] R. D. S. G. Campilho, D. C. Moura, M. D. Banea e L.-. F. M. 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.
- [55] M. J. Troughton, Handbook of plastics joining: a practical guide - 2nd ed., United States of America: William Andrew Inc., 2008.
- [56] H. Corporation, Design Guide for Bonding Plastics, Vol 6. s.l., Henkel Corporation - Engineering Adhesives, 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 SikaForce[®] 7752-L60

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

Trocknen 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 erfolgversprechenden 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



Anexo C. Adesivo SikaForce[®] 7888-L10

SikaForce®-7888 L10 (VP)

Adhesivo altamente estructural de rápido curado para ensamblaje

Datos Técnicos:

	Componente A (Resina)	Componente B (Endurecedor)
Base química	Polioles, con cargas	Derivados de isocianato, sin cargas
Mecanismo de reacción	Poliadición	
Contenido en sólidos	100 %	100 %
Color	Negro	Amarillento
Color de la mezcla	Negro	
Densidad (25°C) (CQP 553-1)	1,66 g/cm ³ aprox.	1,18 g/cm ³ aprox.
Viscosidad (25°C) (CQP 538-1)	18.000 mPas prox	18.000 mPas aprox.
Viscosidad de la mezcla (CQP 536-1)	65.000 mPas, aprox	
Relación de mezcla	en peso 100	70
	en volumen 100	100
Tixotropía	Buena	
Vida de la mezcla 25°C ¹⁾ (CQP 536-1)	10 min. aprox	
Desarrollo de la resistencia y velocidad de curado	Aún no determinado	
Rango de temperatura de aplicación	15-35°C	
Dureza Shore-D (DIN 53505 / CQP 537-1) ²⁾	70 aprox.	
Alargamiento a rotura (ISO 527/CQP545-1) ²⁾⁴⁾	40% aprox.	
Resistencia a tracción (ISO 527/CQP 545-1) ²⁾⁴⁾	20 Mpa aprox.	
Resistencia a cortadura (DIN EN 1465 /CQP 546-1) ²⁾³⁾	20 Mpa aprox. (depende del sustrato)	
Temperatura de transición vítrea (CQP 509-1)	40° C aprox	
Vida del producto (en envase original cerrado por debajo de 25°C) ²⁾	6 meses	

¹⁾ Tiempo para incremento de viscosidad a 150.000 mPas en reómetro

²⁾ Temperatura de ensayo: 23°C, 50% humedad relativa; condiciones de curado: 48 hrs. RT + 3 hrs. 105°C + 24 hrs. RT

⁴⁾ Sustrato: AlCuMg₂ platinada; espesor de capa: 1,5 mm

⁵⁾ Espesor de capa en el ensayo: 4 mm

Descripción

SikaForce®-7888 L10 (VP) es un adhesivo base poliuretano bicomponente altamente estructural de montaje que cura por reacción química para convertirse en un polímero duradero.

Los dos componentes se aplican mediante cartucho por medio de una pistola neumática y un mezclador estático, también mediante el adecuado equipo de mezclado y medida.

SikaForce®-7888 L10 (VP) se fabrica de acuerdo con el sistema de calidad ISO 9001/14001 y con un programa de Seguridad Responsable.

Ventajas

- Corta rotura de hilo.
- Buena tixotropía.
- Adecuado tiempo de trabajo a pesar de su rápido curado.

- Rápido desarrollo de la resistencia, curado a temperatura ambiente.
- Muy alta resistencia.
- Elevada elongación (buena resistencia al impacto).
- Resistencia a los esfuerzos dinámicos.
- Buena adhesión sobre una amplia variedad de sustratos.
- No conductor.
- Resistente al envejecimiento.
- Libre de solventes y PVC



Áreas de aplicación

SikaForce®-7888 L10 (VP) es apto para uniones estructurales que vayan a estar expuestas a esfuerzos dinámicos y donde la necesidad de un rápido desarrollo de la resistencia y curado sea de vital importancia. SikaForce®-7888 L10 (VP) es ideal para el pegado y ensamblado de piezas de elevado tamaño.

Apto para materiales como plásticos y metales, particularmente aluminio (incluido anodizado), acero (incluido fosfatados, cromados, y zincados) imprimaciones de metales y pinturas (sistema 2C), SMC y otros materiales GRP, madera y materiales cerámicos. Observar las indicaciones del fabricante antes de usar sobre plásticos transparentes, que son susceptibles de sufrir rotura por stress.

Mecanismo de curado

El curado del SikaForce®-7888 L10 (VP) tiene lugar por la reacción química entre los dos componentes.

El proceso de curado se acelera a medida que aumenta la temperatura y a la inversa, es decir, al disminuir la temperatura se prolonga el proceso de curado.

Resistencia química

SikaForce®-7888 L10 (VP) es resistente a la hidrólisis (excelente resistencia). Como la resistencia ante los agentes químicos depende enormemente del sustrato, de la concentración del agente químico, duración de la exposición y la temperatura son muy recomendables ensayos relativos al proyecto en concreto. Esto mismo es válido para la resistencia a la temperatura.

Si el adhesivo no está expuesto a sustancias químicas el adhesivo resiste permanentemente temperaturas por encima de los 100°C, resistiendo picos de temperatura por encima de este valor durante breves espacios de tiempo.

En caso de que la junta vaya a estar expuesta a agentes químicos recomendamos realizar ensayos previos.

Método de aplicación

Preparación de la superficie

El área de pegado debe estar limpia, seca y libre de grasa, aceite y polvo.

Si necesita asesoramiento sobre aplicaciones específicas pongase en contacto con el Departamento Técnico de sika Industry.

Aplicación

Cartuchos de 2-C:

Pistola tanto manual como neumática.

Usar mezclador estático Sulzer Quadro 8,7z. Antes de la aplicación sobre el material es absolutamente necesario aplicar al menos un cordón de 30 cm. Para alcanzar la mejor calidad de la mezcla.

Hobbock: SikaForce®-7888 L10 (VP) puede ser aplicado directamente desde hobbocks mediante la utilización de un equipo de bombeo tanto neumático como hidráulico utilizando mezcladores tanto estáticos como dinámicos.

No aplicar a temperaturas inferiores a 15° ni superiores a 30°C. La temperatura óptima de aplicación se sitúa entre los 15° y 30°C.

Si necesita asesoramiento acerca del adecuado sistema de bombeo por favor póngase en contacto con el Departamento de Ingeniería de Sika Industry.

Limpieza

SikaForce®-7888 L10 (VP) no curado puede ser eliminado de las herramientas e instrumentos con Sika® Remove-208, isopropanol, acetona, etc. Una vez curado, los restos sólo pueden eliminarse mecánicamente. Las manos y piel expuesta al producto se deben limpiar con toallita Sika Hand® Cleaner o un limpiador industrial y agua. No utilizar solventes.

Condiciones de almacenamiento

La resina y el endurecedor son sensibles a la humedad. Por lo tanto tienen que ser almacenados en los envases bien cerrados. Después de su uso cerrar inmediatamente.

La resina debe ser almacenada entre 5° y 30° C. Debe ser agitada antes de su uso.

El endurecedor debe almacenarse entre 15° y 30° C.

Durante la aplicación ambos componentes pueden estar expuestos a temperaturas por debajo de 0°C

como máximo durante 3 días. No usar si está cristalizado o los componentes no se han mezclado homogéneamente.

Más información

Existe a su disposición:

- Hojas de Seguridad e higiene

Tipos de envase

Componente A (Resina)	Hobbock 25 kg
Componente B (Endurecedor)	Hobbock 20 kg
Cartucho 2C + mezclador estático Sulzer 8,7 z	600 ml (componente A+B)

Importante

Para información y consejo sobre la manipulación, almacenaje y manejo de productos químicos usados debe remitirse a la actual Hoja de Seguridad del producto la cual contiene datos de seguridad físicos, ecológicos y toxicológicos.

Notas legales

Esta información y, en particular, las recomendaciones relativas a la aplicación y uso final del producto, están dadas de buena fe, basadas en el conocimiento actual y la experiencia de Sika de los productos cuando son correctamente almacenados, manejados y aplicados, en situaciones normales, de acuerdo con las recomendaciones de Sika. En la práctica, las posibles diferencias en los materiales, soportes y condiciones reales en el lugar de aplicación son tales, que no se puede deducir de la información del presente documento, ni de cualquier otra recomendación escrita, ni de consejo alguno ofrecido, ninguna garantía en términos de comercialización o idoneidad para propósitos particulares, ni obligación alguna fuera de cualquier relación legal que pudiera existir. El usuario de los productos debe realizar pruebas para comprobar su idoneidad de acuerdo con el uso que se le quiere dar. Sika se reserva el derecho de cambiar las propiedades de los productos. Los derechos de propiedad de terceras partes deben ser respetados. Todos los pedidos se aceptan de acuerdo a los términos de nuestras vigentes Condiciones Generales de Venta y Suministro. Los usuarios deben de conocer y utilizar la versión última y actualizada de las Hojas de Datos de Producto local, copia de las cuales se mandarán a quién las solicite, o también se puede conseguir en la página "www.sika.es".



Sika, S.A.U.
C/ Aragoneses, 17
28108 Alcobendas (Madrid)
Tel. 91 657 23 75
Fax 91 661 69 80

