



Caraterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de alta ductilidade

JOÃO PEDRO RAMOS MONTEIRO

Outubro de 2015

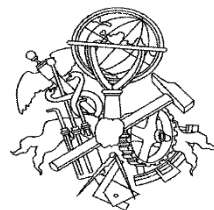
Caraterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de alta ductilidade

João Pedro Ramos Monteiro

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

Instituto Superior de Engenharia do Porto

Departamento de Engenharia Mecânica



16 de outubro de 2015

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

Candidato: João Pedro Ramos Monteiro, 1130166, 1130166@isep.ipp.pt

Orientação Científica: Raul Duarte Salgueiral Gomes Campilho, rds@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Eduardo André de Sousa Marques, eam@isep.ipp.pt

Coorientação Científica: Lucas Filipe Martins da Silva, lucas@fe.up.pt

Mestrado em Engenharia Mecânica

Departamento de Engenharia Mecânica

Instituto Superior de Engenharia do Porto



16 de outubro de 2015

Aos meus pais, avós, tia e irmãos.

Agradecimentos

Em primeiro lugar, quero prestar os meus maiores agradecimentos ao Professor Doutor Raúl Duarte Salgueiral Campilho, Orientador Científico, por toda a sua dedicação, ajuda, disponibilidade, partilha de saber e incentivo na elaboração desta dissertação, revelando-se fulcral para a conclusão da mesma,

Seguidamente, quero também agradecer ao Mestre Eduardo André de Sousa Marques e ao Professor Doutor Lucas Filipe Martins da Silva, Coorientadores Científicos, por toda a ajuda oferecida para a preparação e realização dos ensaios e ainda na supervisão do texto,

Aos meus pais, irmãos e avós, pela presença incondicional e por todo o apoio prestados durante o meu percurso académico, tendo sido fundamentais para o meu sucesso,

À minha tia, pela preocupação e dedicação demonstradas no acompanhamento prestado ao longo da realização da presente dissertação,

À Mariana Maio, por todo o carinho, apoio, paciência, compreensão e motivação, que me ajudou a ultrapassar dificuldades e momentos menos bons aquando da realização deste trabalho,

À Jane Budge pela valiosa contribuição na tradução do resumo desta dissertação,

Aos meus amigos Ana Vasco, André Pontes, Bruno Costa, Mário Barbosa, Tiago Bompastor e Vítor Lopes pelos diálogos construtivos, pela compreensão da minha frequente falta de disponibilidade para o convívio,

Por fim ao Engenheiro Sérgio Silva, pelo seu testemunho de amizade, confiança e gentileza ao autorizar e ao fornecer todos os recursos necessários ao fabrico dos pinos de fixação dos provetes TAST nas suas instalações,

A todos, reitero o meu sincero bem-haja.

Resumo

As juntas adesivas são uma alternativa viável para substituir ligações comuns como as mecânicas ou soldadas, devido a diversas vantagens como a possibilidade de união de materiais de natureza diferente, maior leveza, menores custos inerentes ao fabrico e ainda prevenção da corrosão galvânica que pode ocorrer nas ligações entre dois materiais metálicos diferentes. A resistência de uma junta depende, para um determinado tipo de solicitação imposta, da distribuição de tensões no interior da junta. Por outro lado, a geometria das juntas, as propriedades mecânicas dos adesivos e os componentes a ligar vão influenciar a distribuição de tensões. O carregamento nas camadas adesivas de uma junta poderá induzir tensões de tração, compressão, corte, arrancamento ou clivagem, ou ainda uma combinação de duas ou mais destas componentes.

O objetivo da presente dissertação é a caracterização completa de um adesivo estrutural de alta ductilidade recentemente lançado no mercado (SikaPower[®]-4720), para facilitar o projeto e otimização de juntas adesivas ligadas com o mesmo. São quatro os ensaios a realizar: ensaios à tração de provetes maciços (também denominados de *bulk*), ensaios ao corte com a geometria *Thick Adherend Shear Test*, ensaios *Double-Cantilever Beam* e ainda ensaios *End-Notched Flexure*. Com a realização dos ensaios referidos, são determinadas as propriedades essenciais à caracterização mecânica e de fratura do adesivo.

Os resultados obtidos para cada ensaio resultaram em propriedades medidas com elevada repetibilidade, da mesma maneira que se revelaram de acordo com os dados disponibilizados pelo fabricante, sempre que estes estavam disponíveis.

Palavras-Chave

Adesivo estrutural; Junta adesiva; Ductilidade; Tenacidade à fratura; *Bulk*; *Thick Adherend Shear Test*; *Double-Cantilever Beam*; *End-Notched Flexure*.

Abstract

Adhesive joints are a viable alternative to replace common connections such as mechanical or welded ones, due to several advantages such as the possibility of joining materials of different compositions, increased lightness, lower inherent production costs in addition to the prevention of galvanic corrosion that can occur in joining two different metallic materials. The strength of a joint depends on the stress distribution inside the joint, determined by the loading type. On the other hand, the geometry of the joint, the mechanical properties of the adhesives and the materials to join will influence the distribution of the tensions. The load in the adhesive layers of a joint can induce traction, compression, shear, peel or cleavage stresses, or even a combination of two or more of these constituents.

The objective of this dissertation is the complete characterization of a structural adhesive of high ductility, recently launched on the market (SikaPower[®]-4720), in order to facilitate the design and optimisation of adhesive joints with this adhesive. With this purpose, four tests methods should be performed: tensile testing on bulk specimens, shear testing with Thick Adherend Shear Test joints, Double-Cantilever Beam tests and End-Notched Flexure tests. With these tests, the essential mechanical and fracture properties of the adhesive have been estimated.

The results obtained for each test resulted in measured properties with high repeatability, in the same way as described with the available information given by the manufacturer, when it was made available.

Keywords

Structural adhesive; Adhesive joint; 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.....	1
1.3 ORGANIZAÇÃO DO RELATÓRIO	2
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	5
2.1 LIGAÇÕES ADESIVAS.....	5
2.1.1 <i>Caraterização das juntas adesivas</i>	6
2.1.2 <i>Esforços numa ligação adesiva</i>	9
2.1.2.1 Tração e Compressão	10
2.1.2.2 Corte.....	11
2.1.2.3 Clivagem e arrancamento.....	11
2.1.3 <i>Modos de rotura em juntas adesivas</i>	12
2.1.4 <i>Configurações possíveis de junta</i>	14
2.2 ADESIVOS ESTRUTURAIS.....	17
2.2.1 <i>Caraterização dos adesivos estruturais</i>	17
2.2.2 <i>Tipos de adesivos estruturais</i>	17
2.2.2.1 Adesivos acrílicos	19
2.2.2.2 Adesivos epóxidos.....	20
2.2.2.3 Adesivos fenólicos	22
2.2.2.4 Adesivos de poliimida.....	23
2.2.2.5 Adesivos de poliuretano	23
2.3 DETERMINAÇÃO DAS PROPRIEDADES DE ADESIVOS	24
2.3.1 <i>Caraterização das propriedades mecânicas à tração</i>	24
2.3.1.1 Tipos de ensaio.....	24
2.3.1.2 Ensaio de provetes maciços à tração	25
2.3.1.3 Procedimento de ensaio de provetes maciços.....	28
2.3.2 <i>Caraterização das propriedades mecânicas ao corte</i>	32
2.3.2.1 Tipos de ensaio.....	32

2.3.2.2	Ensaio Thick Adherend Shear Test	38
2.3.2.3	Procedimento de ensaio de provetes TAST	39
2.3.3	<i>Caraterização das propriedades de fratura à tração</i>	43
2.3.3.1	Tipos de ensaio	44
2.3.3.2	Ensaio Double-Cantilever Beam	46
2.3.3.3	Procedimento de ensaio de provetes DCB	48
2.3.3.4	Métodos de redução para G_{Ic}	50
2.3.3.4.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda	50
2.3.3.4.2	Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente	52
2.3.3.4.3	Métodos baseados no integral-J	53
2.3.4	<i>Caraterização das propriedades de fratura ao corte</i>	55
2.3.4.1	Tipos de ensaio	55
2.3.4.2	Ensaio End-Notched Flexure	57
2.3.4.3	Procedimento de ensaio de provetes ENF	59
2.3.4.4	Métodos de redução para G_{IIc}	60
2.3.4.4.1	Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda	60
2.3.4.4.2	Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente	62
2.3.4.4.3	Métodos baseados no integral-J	63
3	DESENVOLVIMENTO	65
3.1	CARATERIZAÇÃO DO ADESIVO ESCOLHIDO	65
3.2	ENSAIOS MECÂNICOS À TRAÇÃO	67
3.2.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	67
3.2.1.1	Provetes <i>bulk</i>	67
3.2.1.2	Preparação do molde	68
3.2.1.3	Aplicação do adesivo	70
3.2.1.4	Cura do adesivo	71
3.2.1.5	Remoção dos provetes do molde	71
3.2.2	<i>Realização dos ensaios à tração</i>	72
3.2.2.1	Preparação e condições do ensaio	72
3.2.2.2	Medição das deformações	74
3.2.3	<i>Resultados obtidos</i>	75
3.2.3.1	Curvas $P-\delta$ e $\sigma-\varepsilon$	75
3.2.3.2	Rotura dos provetes <i>bulk</i>	77
3.2.3.3	Propriedades mecânicas à tração	78
3.3	ENSAIOS MECÂNICOS AO CORTE	79
3.3.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	79
3.3.1.1	Provetes TAST	79
3.3.1.2	Preparação do <i>gabarit</i> e substratos	79
3.3.1.3	Colagem e cura dos provetes	82
3.3.1.4	Preparação para ensaio	83
3.3.2	<i>Realização dos ensaios ao corte</i>	83
3.3.2.1	Preparação e condições do ensaio	83
3.3.2.2	Medição das deformações	85

3.3.3	<i>Resultados obtidos</i>	85
3.3.3.1	Curvas $P-\delta$ e $\tau-\gamma$	85
3.3.3.2	Rotura dos provetes TAST.....	89
3.3.3.3	Propriedades mecânicas ao corte.....	90
3.4	ENSAIOS DE FRATURA À TRAÇÃO.....	90
3.4.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	90
3.4.1.1	Provetes DCB.....	90
3.4.1.2	Preparação dos provetes.....	91
3.4.1.3	Colagem e cura dos provetes.....	94
3.4.1.4	Preparação para ensaio.....	95
3.4.2	<i>Realização dos ensaios de fratura à tração</i>	97
3.4.2.1	Preparação e condições do ensaio.....	97
3.4.2.2	Parâmetros medidos durante o ensaio.....	98
3.4.3	<i>Resultados obtidos</i>	99
3.4.3.1	Curvas $P-\delta$ e R	99
3.4.3.2	Roturas dos provetes DCB.....	100
3.4.3.3	Propriedades de fratura à tração.....	101
3.5	ENSAIOS DE FRATURA AO CORTE.....	102
3.5.1	<i>Fabrico dos provetes</i>	102
3.5.1.1	Provetes ENF.....	102
3.5.1.2	Preparação dos provetes.....	103
3.5.1.3	Colagem e cura dos provetes.....	104
3.5.1.4	Preparação para ensaio.....	105
3.5.2	<i>Realização dos ensaios de fratura ao corte</i>	106
3.5.2.1	Preparação e condições do ensaio.....	106
3.5.2.2	Parâmetros medidos durante o ensaio.....	108
3.5.3	<i>Resultados obtidos</i>	108
3.5.3.1	Curvas $P-\delta$ e R	108
3.5.3.2	Roturas dos provetes ENF.....	110
3.5.3.3	Propriedades de fratura ao corte.....	111
3.6	DISCUSSÃO DOS RESULTADOS OBTIDOS.....	112
3.6.1	<i>Ensaio mecânicos à tração</i>	113
3.6.2	<i>Ensaio mecânicos ao corte</i>	115
3.6.3	<i>Ensaio de fratura à tração</i>	117
3.6.4	<i>Ensaio de fratura ao corte</i>	119
4	CONCLUSÕES	123
	REFERÊNCIAS	127
	ANEXO A. FICHA TÉCNICA DO ADESIVO SIKAPOWERS[®]-4720	131
	ANEXO B. FICHA TÉCNICA DO DESMOLDANTE LOCTITE[®] FREKOTE[®] 770-NC	135
	ANEXO C. FICHA TÉCNICA DA MÁQUINA DE ENSAIOS INSTRON[®] 3367	139

ANEXO D. FICHA TÉCNICA DO ADESIVO ARALDITE® 2015.143

Índice de Figuras

Figura 1 - Disciplinas envolvidas na "ciência" da adesão. Adaptado de [2].	6
Figura 2 - Algumas aplicações de ligações adesivas [5].	7
Figura 3 - Distribuição da tensão em juntas adesiva, rebitadas e soldadas.	8
Figura 4 - Estrutura <i>honeycomb</i> .	8
Figura 5 - Esforços de tração (a) e compressão (b).	10
Figura 6 - Distribuição de tensão de tração e compressão.	10
Figura 7 - Esforço de corte.	11
Figura 8 - Distribuição da tensão de corte.	11
Figura 9 - Esforços de arrancamento (a) e clivagem (b).	12
Figura 10 - Distribuição da tensão de clivagem e arrancamento.	12
Figura 11 - Modos de rotura em juntas adesivas.	13
Figura 12 - Alguns tipos de juntas adesivas usadas na engenharia.	14
Figura 13 - Junta de ressalto.	15
Figura 14 - Juntas topo a topo.	15
Figura 15 - Alguns exemplos de juntas para varões (a) e tubos (b).	16
Figura 16 - Alguns exemplos de juntas em T (a) e de canto (b).	16
Figura 17 - Efeito da temperatura na resistência de adesivos de epóxico e adesivos fenólicos modificados (substratos de alumínio). Adaptado de [4].	23
Figura 18 - Dimensões (em mm) a considerar para o ensaio em junta topo a topo cilíndrica. Adaptado de [7].	25
Figura 19 - Provetes de ensaio à tração de acordo com a EN ISO 527-2 (dimensões em mm) [2].	25
Figura 20 - Aprovisionamento de ar entre uma película adesiva e as superfícies do molde. Aprovisionamento inicial (a), deslocamento parcial (b) e posicionamento final (c). Adaptado de [16].	26
Figura 21 - Representação esquemática de um molde utilizado para fabrico de provetes <i>bulk</i> . Adaptado de [17].	27
Figura 22 - Moldação entre pratos segundo a norma NF T 76-142.	28
Figura 23 - Máquina de ensaios mecânicos Instron® 5960 (a). Fonte: www.instron.com e sistema de amarras para provetes <i>bulk</i> (b).	29
Figura 24 - Extensómetros: Mecânico (a). Fonte: www.instron.com e ótico (b). Fonte: www.hegeward-peschke.com .	30
Figura 25 - Curvas σ - ε obtidas no ensaio de tração do adesivo 3M® DP-8005 [1].	31
Figura 26 - Variáveis envolvidas no diagrama σ - ε [21].	31

Figura 27 - Métodos para determinação da σ_y . Adaptado de [17].	32
Figura 28 - Representação esquemática de uma JSS.	33
Figura 29 - Dimensões (em mm) de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 [2].	33
Figura 30 - Provetes Iosipescu: Maciço (a) e em junta (b). Layout de ensaio tipo Wyoming (c). Adaptado de [17].	34
Figura 31 - Proвете Arcan (dimensões em mm) (a) [2] e fixação NPL para ensaio Arcan (b) [17].	35
Figura 32 - Geometria e ensaio do provete <i>Napkin ring test</i> .	36
Figura 33 - Deslocamentos medidos na superfície dos cilindros. Adaptado de [2].	37
Figura 34 - Geometria de um provete TAST.	37
Figura 35 - Comparação entre alguns ensaios de corte. Adaptado de [17].	37
Figura 36 - Proвете TAST (dimensões em mm) segundo a norma ISO 11003-2. Adaptado de [17].	38
Figura 37 - Fixação para o ensaio TAST.	40
Figura 38 - Diferença entre provetes TAST fabricados com e sem lâminas.	40
Figura 39 - Curvas τ - γ de provetes TAST com adesivo 3M-DP 8005 [®] por extensometria resistiva. Adaptado de [1].	41
Figura 40 - Extensómetro com bobine LVDT.	42
Figura 41 - Medição dos deslocamentos no ensaio TAST. l = Distância entre pinos do transdutor (mm). Adaptado de [2].	43
Figura 42 - Modos de rotura em juntas adesivas.	43
Figura 43 - Proвете DCB de acordo com a norma ASTM D3433.	44
Figura 44 - Proвете TDCB de acordo com as normas ASTM (a) e ISO (b).	45
Figura 45 - Curvas G_{Ic} - a obtidas num ensaio TDCB (juntas de aderentes de alumínio e adesivo epóxico) com valores deduzidos pelas três técnicas [17].	46
Figura 46 - Propagação da fenda num provete DCB.	47
Figura 47 - Geometria de um provete DCB segundo a norma ASTM D3433.	47
Figura 48 - Provetes DCB com blocos de carregamento (a) e dobradiças (b).	48
Figura 49 - <i>Setup</i> ensaio DCB. Substratos com furos de carregamento (a) [1] e substratos com dobradiças (b) [20].	49
Figura 50 - Curva P - δ de um ensaio DCB (substratos de aço CK 45 e adesivo 3M [®] D-P8005) [1].	49
Figura 51 - Esquema de ensaio DCB.	50
Figura 52 - Fotografia captada durante um ensaio DCB (a) e pormenor da fotografia para avaliar a propagação da fenda (b).	50
Figura 53 - Determinação da correção Δ na equação (2.24).	51
Figura 54 - Representação esquemática da FPZ e do conceito de a_{eq} .	52
Figura 55 - Contorno arbitrário em torno da ponta da fenda.	54
Figura 56 - Representação esquemática da zona de fratura e relação gráfica t_n - δ_n .	55

Figura 57 - Representação esquemática de um ensaio ENF.....	56
Figura 58 - Representação esquemática de um ensaio 4ENF.....	57
Figura 59 - Representação esquemática de um ensaio ELS.....	57
Figura 60 - Propagação na fenda num provete ENF.	58
Figura 61 - Provete ENF.	59
Figura 62 - Representação esquemática de um ensaio ENF.....	59
Figura 63 - Curvas- <i>R</i> de um ensaio ENF pelos diferentes métodos [40].....	60
Figura 64 - Fotografia captada durante um ensaio ENF (a) e pormenor da fotografia para avaliar a propagação da fenda (b).	60
Figura 65 - Processo de obtenção de G_{IIc} e da lei coesiva ao corte através do método direto.....	63
Figura 66 - Cartucho do adesivo SikaPower [®] -4720. Fonte: http://prt.sika.com/pt	65
Figura 67 - Pistola para aplicação manual de adesivos.	65
Figura 68 - Aplicação do adesivo SikaPower [®] -4720 na indústria automóvel (a laranja). Fonte: http://prt.sika.com/pt	66
Figura 69 - Dimensões dos provetes <i>bulk</i> pela norma NF T 76-142 (em mm).	67
Figura 70 - Conjunto de placas do molde utilizado.....	68
Figura 71 - Aplicação do desmoldante.....	69
Figura 72 - Loctite [®] Frekote [®] 770-NC. Fonte: http://www.ellsworth.com	69
Figura 73 - Aspeto das placas após limpeza e aplicação do desmoldante.....	69
Figura 74 - Montagem do molde (placa inferior e intermédia).	70
Figura 75 - Aplicação manual do adesivo (a) e sua compactação com uma espátula (b).	70
Figura 76 - Finalização da aplicação do adesivo (a) e molde fechado (b).	71
Figura 77 - Provetes <i>bulk</i> com excessos.....	71
Figura 78 - Aspeto final dos provetes <i>bulk</i>	72
Figura 79 - Máquina de ensaios universal Instron [®] 3367. Fonte: http://www.instron.com	72
Figura 80 - <i>Setup</i> do ensaio de tração.	74
Figura 81 - Extensómetro Instron [®] utilizado no ensaio (a) e aplicação do extensómetro (b).	74
Figura 82 - Curvas <i>P-δ</i> obtidas no ensaio de tração do adesivo SikaPower [®] -4720.	75
Figura 83 - Curvas σ - ε obtidas no ensaio de tração do adesivo SikaPower [®] -4720.	76
Figura 84 - Curva σ - ε do provete 5 com tangente à zona elástica.....	76
Figura 85 - Curva σ - ε do provete 5 com reta paralela ao regime elástico para $\varepsilon = 0,2\%$	77
Figura 86 - Rotura dos provetes <i>bulk</i> . Rotura na zona do comprimento útil (a) e superfície de rotura (b).	78
Figura 87 - Dimensões dos Provetes TAST utilizados segundo a norma ISSO 11003-2 (em mm).	79
Figura 88 - Aplicação do desmoldante Loctite [®] Frekote [®] 770-NC nas superfícies do <i>gabarit</i>	80
Figura 89 - Preparação das lâminas de aço para provetes TAST. Aquecimento (a) e aplicação do desmoldante (b).	80

Figura 90 - Granalhadora utilizada (a) e conjunto de substratos posicionados para a granalhagem (b).	81
Figura 91 - Conjunto do <i>gabarit</i> e substratos TAST.....	81
Figura 92 - Processo de colagem dos provetes TAST.....	82
Figura 93 - Conjunto dos seis provetes após aplicação do adesivo.....	82
Figura 94 - Proвете TAST após colagem, remoção das lâminas de aço e do excesso de adesivo. ..	83
Figura 95 - Dimensões dos pinos de fixação utilizados (em mm).....	84
Figura 96 - <i>Setup</i> do ensaio TAST.	85
Figura 97 - Curvas $P-\delta$ obtidas no ensaio TAST do adesivo SikaPower [®] -4720.....	86
Figura 98 - Curvas $\tau-\gamma$ obtidas no ensaio TAST do adesivo SikaPower [®] -4720.	87
Figura 99 - Curva $\tau-\gamma$ do provete 4 com reta tangente à zona elástica.....	88
Figura 100 - Curva $\tau-\gamma$ do provete 4 com reta paralela ao regime elástico para $\gamma =0,2\%$	88
Figura 101 - Aspeto de rotura dos provetes TAST com adesivo SikaPower [®] -4720.....	89
Figura 102 - Aspeto de rotura do provete 4 com adesivo SikaPower [®] -4720.....	89
Figura 103 - Configuração dos provetes DCB utilizados.....	91
Figura 104 - Dimensões dos provetes DCB (em mm).	91
Figura 105 - Substratos DCB após abrasão.....	91
Figura 106 - Pormenor de fitas de aço com lâmina para garantir a espessura do adesivo desejada e simular a pré-fenda.....	92
Figura 107 - Pormenor de calço para garantir a espessura do adesivo desejada.	92
Figura 108 - Loctite [®] Super Cola 3. Fonte: http://www.loctitesupercola3.com	93
Figura 109 - Conjunto de fitas de aço e lâminas utilizado para fabrico dos provetes DCB.	93
Figura 110 - Substrato inferior com calços.	93
Figura 111 - Aplicação manual do adesivo (a) e substrato DCB após aplicação do adesivo (b).	94
Figura 112 - Proвете DCB com grampos.	94
Figura 113 - Proвете DCB com excessos de adesivo.....	95
Figura 114 - Abrasão dos excessos laterais do provete DCB.....	95
Figura 115 - Proвете DCB após aplicação da tinta corretora e escalas.	96
Figura 116 - Cartucho do adesivo Araldite [®] 2015. Fonte: http://www.filzring.de	96
Figura 117 - Provetes DCB após aplicação das dobradiças.	96
Figura 118 - <i>Setup</i> do ensaio DCB.....	97
Figura 119 - Registo fotográfico durante o ensaio DCB. Início (a) e momentos antes da rotura (b).	98
Figura 120 - Curvas $P-\delta$ obtidas no ensaio DCB do adesivo SikaPower [®] -4720.....	99
Figura 121 - Curvas- R obtidas pelo provete 5 no ensaio DCB do adesivo SikaPower [®] -4720.....	100
Figura 122 - Aspeto das superfícies de rotura dos provetes DCB. Substrato inferior (a) e substrato superior (b).	101

Figura 123 - Configuração dos provetes ENF utilizados.	102
Figura 124 - Dimensões dos provetes ENF (em mm).	102
Figura 125 - Aspeto das superfícies dos substratos ENF após abrasão e desengorduramento.	103
Figura 126 - Posição do calço de calibração com lâmina de pré-fenda.	103
Figura 127 - Substrato ENF após colagem dos calços apropriados.	104
Figura 128 - Aplicação do adesivo (a) e compressão do provete ENF com auxílio de grampos (b).	104
Figura 129 - Provetes ENF com grampos na zona dos calços durante o processo de cura.	104
Figura 130 - Provelte ENF com excessos de adesivo.....	105
Figura 131 - Provelte ENF após preparação para ensaio.	105
Figura 132 - Medição individual do valor de a_0	106
Figura 133 - <i>Setup</i> do ensaio ENF.	107
Figura 134 - Provelte com folhas de Teflon [®] para evitar atrito durante a realização do ensaio.....	107
Figura 135 - Registo fotográfico durante o ensaio ENF. Início (a) e momentos antes do fim (b).	108
Figura 136 - Curvas P - δ obtidas no ensaio ENF do adesivo SikaPower [®] -4720.	109
Figura 137 - Curvas- R obtidas pelo provete 7 no ensaio ENF do adesivo SikaPower [®] -4720.	110
Figura 138 - Propagação da fenda após ensaio.	111
Figura 139 - Comparação de σ_r para o adesivo SikaPower [®] -4720 no ensaio à tração.	113
Figura 140 - Comparação de ϵ_r para o adesivo SikaPower [®] -4720 no ensaio à tração.	114
Figura 141 - Comparação de E para o adesivo SikaPower [®] -4720 no ensaio à tração.....	114
Figura 142 - Comparação de τ_r para o adesivo SikaPower [®] -4720 no ensaio TAST.	116
Figura 143 - Valores de G_{Ic} obtidos pelos três metodos para os seis provetes DCB.....	118
Figura 144 - Valores médios e respetivos desvios padrão de G_{Ic} pelos diferentes métodos.	118
Figura 145 - Valores de G_{IIc} obtidos pelos quatro métodos para os sete provetes ENF.....	120
Figura 146 - Valores médios e respetivos desvios padrão de G_{IIc} pelos diferentes métodos.	121

Índice de Tabelas

Tabela 1 - Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho. Adaptado de [3].	18
Tabela 2 - Algumas propriedades dos adesivos estruturais. Adaptado de [14].	18
Tabela 3 - Algumas propriedades do adesivo selecionado [56].	66
Tabela 4 - Dimensões dos provetes <i>bulk</i> .	73
Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do adesivo SikaPower®-4720.	78
Tabela 6 - Valores de w dos provetes TAST.	83
Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte do adesivo SikaPower®-4720.	90
Tabela 8 - Valores obtidos na medição de a_0 para os provetes DCB.	97
Tabela 9 - Valores de G_{Ic} pelos métodos CCM, CBT e CBBM.	101
Tabela 10 - Valores obtidos na medição de a_0 para os provetes ENF.	106
Tabela 11 - Valores de P_{max} , δ_{max} e de G_{IIc} obtidos nos ensaios ENF.	112
Tabela 12 - Comparação das propriedades mecânicas à tração.	115
Tabela 13 - Comparação das propriedades mecânicas ao corte.	117
Tabela 14 - Comparação das propriedades de fratura à tração.	119
Tabela 15 - Comparação das propriedades de fratura ao corte.	121

Nomenclatura

Caracteres Romanos

a – Distância entre eixo dos pinos que efetuam a aplicação da carga e a posição estacionária da fenda;
Comprimento de fenda

a_0 – Comprimento de fenda inicial

a_{eq} – Comprimento de fenda equivalente

b – Largura da junta adesiva ou do provete

C – Flexibilidade

c – Parâmetro de espessura do substrato

C_0 – Flexibilidade inicial

C_{0corr} – Flexibilidade inicial corrigida

$d_{adesivo}$ – Deslocamento do adesivo

$d_{substrato}$ – Deslocamento do substrato

$d_{transdutor}$ – Deslocamento do transdutor

E – Módulo de elasticidade ou de Young

E_f – Módulo de flexão equivalente

E_x – Módulo de elasticidade na direção longitudinal

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

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

$G_{substrato}$ – Módulo de corte do substrato

h – Distância entre extremidades dos dois entalhes

I – Momento estático

l – Comprimento de sobreposição

L – Comprimento do substrato ou distância do apoio ao ponto de carga

l_e – Comprimento-base do extensômetro

m – constante que define a relação entre a espessura do adesivo e a largura dos aderentes

M_f – Momento fletor

M_t – Momento torsor

P – Carga aplicada

P_{\max} – Carga máxima aplicada

P_u – Carga aplicada por unidade de largura nas extremidades dos aderentes

r – Raio

r_0 – Raio exterior

r_i – Raio interior

t – Espessura do substrato

t_{adesivo} – Espessura do adesivo

t_1 – Tensão normal de tração aplicada

T_{\max} – Carga máxima de início de propagação da fenda majorada em 150% ou vetor de tração normal

t_{\min} – Espessura mínima do substrato

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

$U; U_f$ – Energia de deformação

U_c – Energia de corte

V – Parâmetro de carga transversal do substrato

w – Espessura do adesivo

Caracteres Gregos

γ – Deformação de corte

Γ – Parâmetro dimensional utilizado em Δ_1 ou contorno arbitrário em torno da ponta da fenda utilizado no Integral J

γ_{\max} – Deformação de corte máxima

δ – Deslocamento

Δ_{aZPF} – Metade da extensão de FPZ à frente da fenda

δ_I – Abertura da fenda atual

Δ_I – Correção do comprimento de fenda para a contabilização da rotação dos aderentes

δ_{IC} – Abertura de rotura

$\Delta\sigma$ – Variação da tensão

$\Delta\varepsilon$ – Variação da deformação

ε – Deformação à tração

ε_{\max} – Deformação à tração máxima

θ_0 – Rotação dos aderentes na ponta da fenda

θ_0 – Rotação relativa dos aderentes na linha de carregamento

v_a – Deslocamento no adesivo

v_m – Deslocamento total

v_t – Deslocamento nos aderentes

σ_r – Tensão de rotura

σ_y – Tensão limite de elasticidade ou tensão de cedência à tração do metal do substrato

τ – Tensão de corte

τ_{\max} – Tensão de corte máxima

τ_r – Tensão de rotura ao corte

τ_y – Tensão limite elástico ao corte

ϕ – Ângulo de rotação

Abreviaturas

4ENF – *Four-Point End-Notched Flexure*

ASTM – *American Society for Testing and Materials*

CBBM – *Compliance-Based Beam Method*

CBT – *Corrected Beam Theory*

CCM – *Compliance Calibration Method*

CDCB – *Contoured Double-Cantilever Beam*

DBT – *Direct beam Theory*

DCB – *Double Cantilever Beam*

ECM – *Experimental Compliance Method*

ECT – *Edge-Crack Torsion*

ELS – *End-Loaded Slipt*

EN – *European Normalization*

ENF – *End-Notched Flexure*

FEUP – *Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto*

ISEP – *Instituto Superior de Engenharia do Porto*

ISO – *International Standard Organization*

JIS – *Japanese Industrial Standard*

JSD – *Junta de Sobreposição Dupla*

JSS – *Junta de Sobreposição Simples*

LVDT – *Linear Variable Differential Transformers*

MFLE – *Mecânica da Fratura Linear Elástica*

NF – *Norme Française*

NPL – *National Physical Laboratory*

PEAD – *Polietileno de alta densidade*

PEBD – *Polietileno de baixa densidade*

PVC – *Policloreto de vinilo*

SBT – *Simple Beam Theory*

TAST – *Thick Adherend Shear Test*

TDCB – *Tapered Double-Cantilever Beam*

ZPF – *Zona de Processo de Fratura*

1 Introdução

1.1 Contextualização

As juntas adesivas podem ser utilizadas como alternativa às comuns ligações mecânicas devido a diversas vantagens como a possibilidade de união de materiais diferentes, maior leveza, menores custos ligados ao fabrico e ainda prevenção da corrosão galvânica que sucede nas ligações entre dois materiais metálicos diferentes. A distribuição de tensões depende da geometria das juntas adesivas, dos materiais a unir e também das propriedades mecânicas do adesivo selecionado. O carregamento nas camadas adesivas de uma junta poderá induzir tensões de tração, compressão, clivagem, corte e arrancamento, sendo que estas duas últimas são as mais frequentes. É importante por isso estudar a configuração das juntas de modo a conceber a melhor alternativa para se obter maior resistência e duração das estruturas ligadas com adesivos. Existem muitos tipos de adesivos e classificações para os agrupar tais como a sua natureza, modo de apresentação e de aplicação, modo de endurecimento, custos, desempenho, etc. De facto a utilização crescente deste tipo de materiais origina uma elevada busca de novos adesivos para preencher os diversos requisitos e necessidades impostos. Para facilitar o projeto e otimização de juntas adesivas, fatores essenciais à sua viabilidade como técnica de ligação, é necessária a existência de técnicas de previsão que permitam reduzir os tempos de projeto. Neste âmbito, independentemente da técnica de previsão, é necessário o conhecimento das propriedades mecânicas e de fratura dos materiais, que devem ser determinadas por ensaios normalizados de elevada fiabilidade.

1.2 Objetivos

O principal objetivo da presente dissertação é a caracterização das propriedades mecânicas e de fratura do adesivo estrutural de alta ductilidade SikaPower[®]-4720, recentemente desenvolvido pela indústria, de modo a prever o comportamento de estruturas adesivas desenvolvidas com o mesmo. Por forma a caracterizar o adesivo selecionado, são realizados ensaios de tração, de corte e de tenacidade à fratura (em modo I e II). Após o ensaio de tração são determinadas as propriedades relativas ao módulo de Young, tensão limite elástico à tração, tensão de rotura à tração e ainda

deformação de rotura à tração. Do ensaio de corte são retirados o módulo de corte, tensão limite elástico ao corte, tensão de rotura ao corte e deformação ao corte. Os ensaios de tenacidade à fratura à tração e ao corte resultam na determinação da taxa limite de libertação de energia em modo I e modo II, respetivamente. Para a realização dos ensaios referidos, é necessário fabricar os corpos de prova adequados, começando pelos provetes maciços (*bulk*) para o de tração, as juntas adesivas *Thick Adherend Shear Test* para a obtenção das propriedades mecânicas ao corte e finalmente os provetes *Double-Cantilever Beam* e *End-Notched Flexure* para determinar as propriedades de fratura em modo I e em modo II, respetivamente. Considera-se ainda a utilização de métodos específicos para a determinação da tenacidade à fratura em modo I e em modo II, uns deles que requerem a medição do comprimento de fenda e outros baseados num comprimento de fenda equivalente.

1.3 Organização do relatório

Para a consecução dos objetivos a atingir, procurou-se organizar cuidadosamente a dissertação, dividindo-a num total de quatro capítulos que a seguir se descrevem.

O capítulo 1 apresenta-se a temática da dissertação relacionada com as ligações adesivas, contextualiza-se o trabalho efetuado, delineiam-se os objetivos a alcançar e ainda se detalham os principais assuntos abordados nos diferentes capítulos.

O capítulo 2 é dedicado à revisão bibliográfica, tendo sido subdividida em três conteúdos principais. Primeiramente, aborda-se as vantagens e desvantagens da utilização de ligações adesivas, indicando-se as diversas áreas de aplicação, demonstra-se os diferentes tipos de esforços a que estas possam estar sujeitas e consequentes modos de rotura e, por fim, passa-se a enumerar as possíveis configurações de juntas adesivas. Em segundo lugar, define-se a tipologia e a caracterização dos adesivos estruturais. Em terceiro lugar, descreve-se a caracterização das propriedades mecânicas (à tração e ao corte) e de fratura dos adesivos em modo I e modo II, decorrentes dos tipos de ensaios específicos, bem como dos procedimentos indicados.

O capítulo 3 dedica-se ao desenvolvimento do trabalho prático realizado. É apresentado o adesivo escolhido e é feita a sua caracterização. A investigação levada a cabo contempla quatro tipos de ensaios, dos quais dois são mecânicos, um à tração e outro ao corte, e os outros dois são de fratura também à tração e ao corte. Para estas tipologias descreve-se o fabrico dos provetes, a realização dos ensaios e a apresentação dos resultados obtidos seguida da sua discussão e comparação com outro adesivo da mesma família.

No capítulo 4 são apresentadas as principais conclusões obtidas a partir do desenvolvimento da dissertação, são sumariadas as propriedades do adesivo escolhido e deixam-se propostas para a realização de trabalhos futuros.

No final da dissertação é fornecida uma listagem de anexos relativos às fichas técnicas dos adesivos e desmoldante utilizados, das informações técnicas da máquina que serviu para os ensaios e a ficha técnica do material dos substratos.

2 Revisão Bibliográfica

2.1 Ligações adesivas

A ciência da ligação entre materiais da mesma natureza ou materiais diferentes tem sido bastante desenvolvida ao longo do tempo, existindo assim várias formas de unir materiais, cada uma delas com as suas vantagens e limitações. É assim importante estudar cada uma delas de modo a que a sua aplicação tenha máxima performance. O pré-requisito fundamental de uma ligação eficiente é a transmissão de carga entre dois componentes, mantendo a sua integridade estrutural sob condições a que está sujeita durante o seu tempo de vida. Existem diversos processos de ligação, tais como [1]:

- Ligações mecânicas, como por exemplo aparafusadas, rebitadas e brasagem;
- Ligações por soldadura por aquecimento direto (*laser*, infravermelhos, ferramenta quente, gás e resistência);
- Ligações por soldadura de explosão;
- Ligações por aquecimento induzido (indução, eletrofusão e dielétrico);
- Ligações por aquecimento gerado por fricção (ultrassons e vibração);
- Ligações por solventes;
- Ligações através de adesivos.

Um dos processos acima referidos mais interessante será a ligação por adesivos pois quando comparado com métodos tradicionais tais como a soldadura, aparafusagem, brasagem, rebitagem entre outras ligações, apresenta muitas vantagens (descritas em detalhe no capítulo 2.1.1).

A ciência e tecnologia das juntas adesivas é uma área verdadeiramente pluridisciplinar, que requer o domínio de conceitos fundamentais de uma série de disciplinas científicas. Na Figura 1 estão ilustradas as várias vertentes ou matérias que podem ser revelantes para a ciência da adesão. As ciências primárias de física, mecânica e química sobrepõem-se em certas áreas para formar as disciplinas de ciência das superfícies, materiais poliméricos e projeto da junta que são importantes na ciência da adesão. Estas disciplinas contêm ramos mais específicos como a reologia de polímeros e mecânica da fratura que são também muito revelantes. Cada uma destas matérias especializadas

contribui significativamente para a ciência da adesão e para a sua aplicação em produtos industriais. A sobreposição de todas estas disciplinas poderia ser referida como a ciência necessária para aplicar os adesivos com sucesso [2].

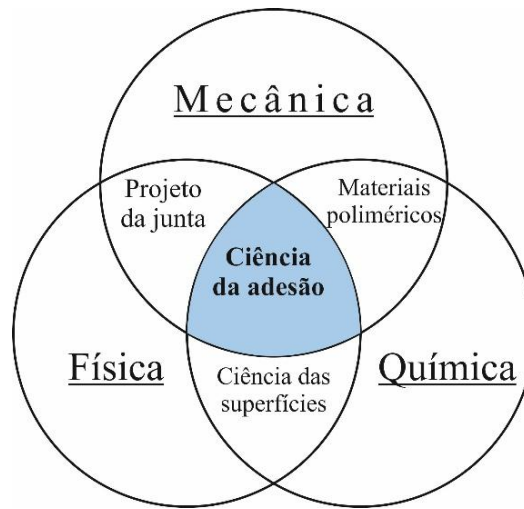


Figura 1 - Disciplinas envolvidas na "ciência" da adesão. Adaptado de [2].

2.1.1 Caracterização das juntas adesivas

As ligações adesivas consistem na junção de dois, ou mais elementos, geralmente conhecidos por substratos, através de um adesivo. São comuns em aplicações correntes como é o caso da indústria de embalagens, da madeira e mobiliário [3]. Outras áreas que estão a ter um elevado crescimento na utilização de adesivos são [4]:

- Indústria aeronáutica;
- Ramo automóvel;
- Indústria naval;
- Energias renováveis;
- Medicina;
- Construção civil;
- Desporto.

a) Ramo automóvel



b) Energias renováveis

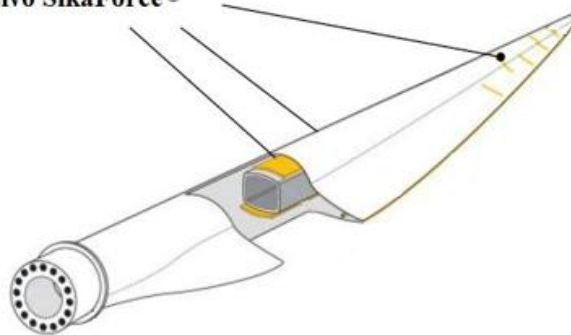
Adesivo SikaForce®

Figura 2 - Algumas aplicações de ligações adesivas [5].

As ligações adesivas são particularmente interessantes para ligar materiais avançados de alta resistência, como é o caso dos compósitos de matriz polimérica. Neste caso, as ligações rebitadas e aparafusadas são muito menos eficientes do que nos materiais metálicos, devido à baixa ductilidade e à fraca resistência ao esmagamento dos compósitos [6]. A justificação para o crescente uso das ligações adesivas reside no facto desta técnica ter as seguintes vantagens [7]:

- Distribuição mais uniforme das tensões ao longo da área colada, o que permite uma maior rigidez e transmissão de carga, possibilitando assim uma redução de peso e menor custo. A Figura 3 compara as distribuições de tensão teóricas numa junta rebitada, soldada e colada. A distribuição de tensão mais uniforme na junta colada permite também uma melhor resistência à fadiga;

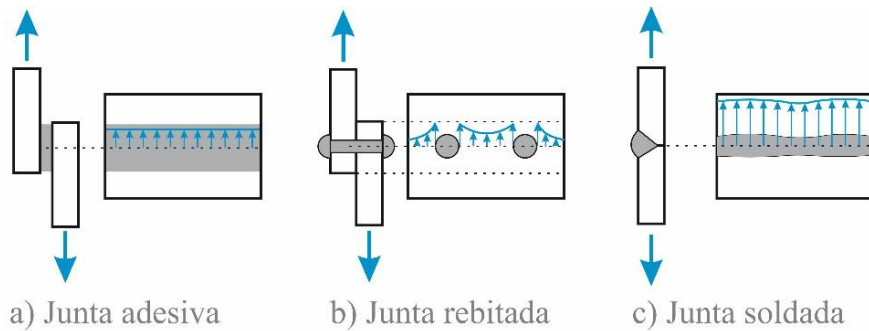


Figura 3 - Distribuição da tensão em juntas adesiva, rebitadas e soldadas.

- A natureza viscoelástica do adesivo promove o amortecimento de vibrações, o que permite que as tensões sejam parcialmente absorvidas, melhorando assim a resistência à fadiga dos próprios componentes ligados;
- É considerado o método mais conveniente e efetivo de ligar dois materiais, uma vez que pode ser automatizado, o que permite aumentar as cadências de produção e baixar custos. A mistura e a aplicação do adesivo podem ser realizadas por um *robot*;
- Possibilita o uso de novos conceitos e matérias - torna o projeto mais flexível. Um exemplo são as estruturas *honeycomb* onde o material do núcleo é colado a duas peles de metal ou compósito, resultando numa excelente rigidez específica (Figura 4);

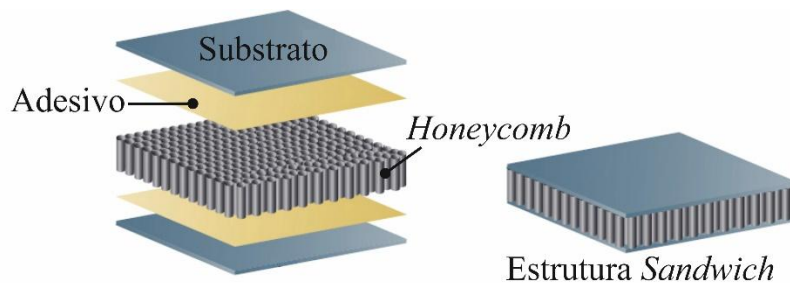


Figura 4 - Estrutura *honeycomb*.

- Capacidade de vedação e de isolamento térmico;
- Prevenção da corrosão galvânica ao evitar o contacto entre metais diferentes;
- Maior facilidade de adaptação à junção de superfícies irregulares;
- Possibilidade de obtenção de contornos suaves, o que é particularmente importante em termos aerodinâmicos e no aspeto estético;
- Obtenção de estruturas com contornos regulares porque evita furos (rebites ou parafusos) e marcas devidas à soldadura;
- Maior tolerância a diferentes dilatações térmicas;
- Maior tolerância dimensional;

- Redução de custos, uma vez que projetos envolvendo ligações com adesivos tendem a ser mais económicos;
- As propriedades dos materiais geralmente não são afetadas. Não há distorção do substrato porque, ao contrário da soldadura, as peças não são aquecidas.

No entanto, como em qualquer outro processo de ligação, existem as vantagens e limitações inerentes a este método e as ligações adesivas não são exceção. Como principais limitações na ligação com adesivos referem-se as seguintes [1-5]:

- É necessário um projeto da ligação que elimine ao máximo as forças de arrancamento (principal inimigo das ligações adesivas), clivagem e impacto. Quando um dos dois materiais não é rígido, a ligação pode estar sujeita a forças de arrancamento e quando os dois materiais são rígidos, a ligação pode estar sujeita a forças de clivagem (ver Figura 9);
- Evitar as tensões localizadas através da utilização de geometrias adequadas e que garantam uma distribuição uniforme de tensões. A melhor solução é conceber uma ligação em que o adesivo seja solicitado maioritariamente ao corte;
- Apresentam limitada resistência a condições extremas, tais como o calor, a humidade e as radiações ultravioleta devido à natureza polimérica do adesivo;
- A ligação não é normalmente realizada instantaneamente, o que leva à utilização de ferramentas de fixação para manter as peças em posição;
- Uma vez colados os materiais são de difícil desmontagem;
- Os ciclos de cura de alguns adesivos são longos e/ou requerem a aplicação de pressão e temperatura. É assim limitado o tamanho das peças, caso o processo exija o recurso a um forno ou autoclave;
- É necessária uma cuidada preparação das superfícies através de, por exemplo, abrasão mecânica, desgorduramento com solvente, ataques químicos ou primários, de modo a evitar roturas indesejáveis como é o exemplo da rotura adesiva (interfacial);
- O controlo de qualidade e segurança são mais difíceis, embora tenham sido desenvolvidas recentemente técnicas não destrutivas adequadas;
- Problemas de saúde associados à toxicidade (alguns adesivos são compostos por cianato) e de segurança inerentes à flamabilidade da maioria dos adesivos.

2.1.2 Esforços numa ligação adesiva

As forças aplicadas numa junta adesiva podem produzir diferentes componentes de tensão, sendo importante estudá-las de modo a aumentar a resistência da mesma. O carregamento nas juntas poderá ser dos seguintes modos: tração/compressão, corte, clivagem e arrancamento.

2.1.2.1 Tração e Compressão

Quando as forças são perpendiculares ao plano de colagem desenvolvem-se esforços de tração (Figura 5-a). Embora na Figura 6-a a distribuição das tensões normais seja uniforme, na prática o que ocorre é que as tensões não são uniformes devido a pequenos desalinhamentos nas cargas aplicadas, originando deste modo o aparecimento de tensões de arrancamento ou clivagem. Assim, projetam-se juntas com guias de modo a garantir um carregamento permanente axial [1].

As forças de compressão também se desenvolvem perpendicularmente ao plano de colagem mas tendem a comprimir um aderente contra o outro. Para que o adesivo esteja à compressão pura é necessário que as tensões sejam uniformes, ou seja, que as forças estejam alinhadas. Só vai existir rotura se as distribuições de tensões não forem uniformes, daí que uma junta que esteja somente à pura compressão quase que não necessita de adesivo.

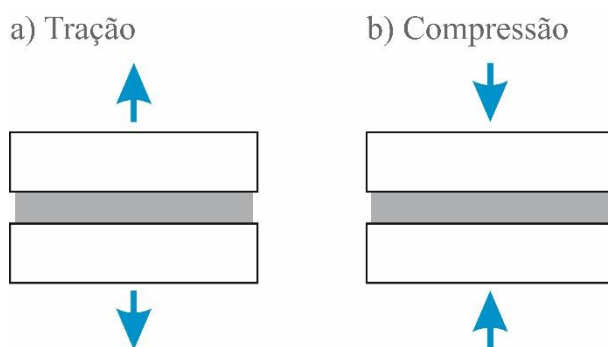


Figura 5 - Esforços de tração (a) e compressão (b).

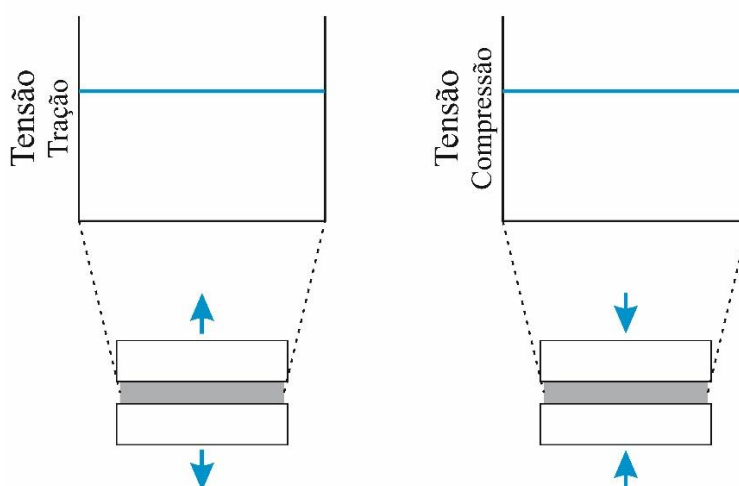


Figura 6 - Distribuição de tensão de tração e compressão.

2.1.2.2 Corte

Caso as forças sejam paralelas ao plano de colagem observa-se o aparecimento de tensões de corte. Na Figura 8 está representada a distribuição das tensões de corte numa junta de sobreposição simples. Existe uma maior concentração de tensões nas extremidades da junta do que na parte central. De facto, a tensão de corte no adesivo é máxima nas extremidades e mínima no meio da junta, comportamento este que se deve ao efeito de deformação diferencial de cada um dos aderentes ao longo do comprimento de sobreposição, uma vez que cada aderente se deforma longitudinalmente a uma taxa crescente desde a sua extremidade livre até à extremidade oposta da ligação [8, 9].

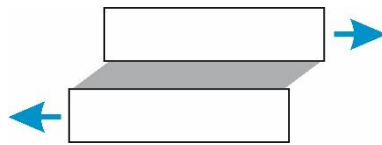


Figura 7 - Esforço de corte.

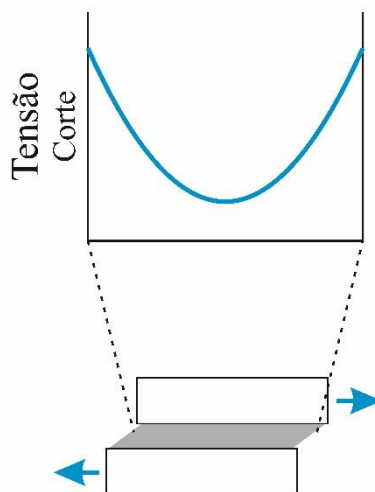


Figura 8 - Distribuição da tensão de corte.

2.1.2.3 Clivagem e arrancamento

Tanto as tensões de clivagem como as de arrancamento aparecem como as mais severas nas juntas coladas. Quando as forças na extremidade de uma junta rígida tendem a separar os substratos geram-se tensões de clivagem no adesivo. As tensões de arrancamento (Figura 9) são idênticas às de clivagem com a diferença de que um ou ambos os substratos são flexíveis, podendo assim deixar-se deformar plasticamente e levar à concentração das forças trativas numa zona muito mais localizada numa das extremidades da ligação [1].

Na Figura 10 é possível ver a distribuição típica das tensões para esforços de clivagem e arrancamento.

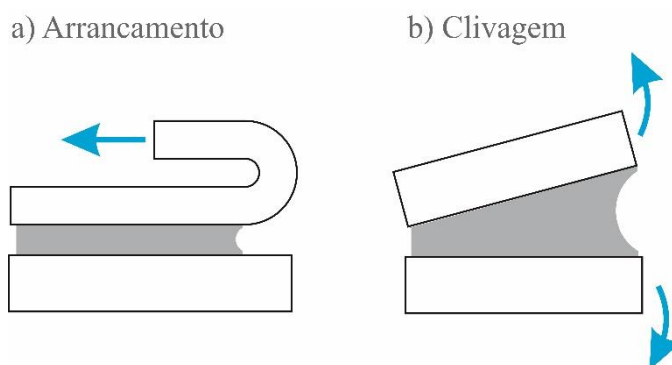


Figura 9 - Esforços de arrancamento (a) e clivagem (b).

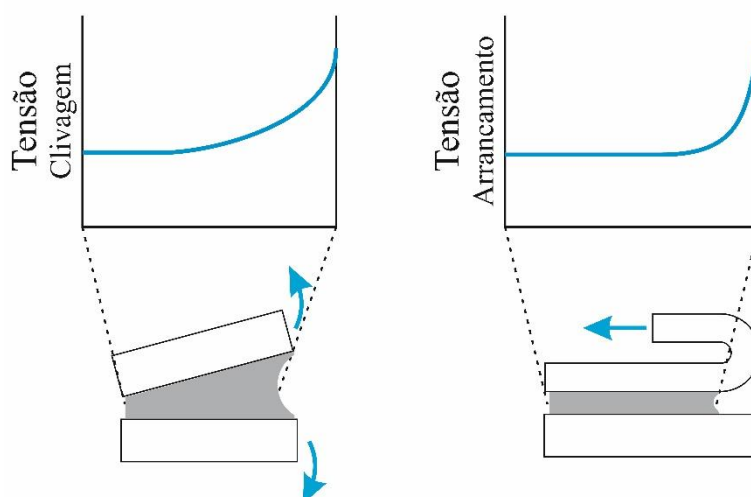


Figura 10 - Distribuição da tensão de clivagem e arrancamento.

As juntas sob este tipo de esforços possuem menos resistência do que as sujeitas a corte porque a tensão está localizada na extremidade da junta e está concentrada numa área muito menor. Os adesivos frágeis e rígidos são particularmente sensíveis às forças de arrancamento. Por outro lado, os adesivos mais dúcteis e flexíveis permitem uma distribuição de tensões menos concentrada e também uma maior resistência [2].

2.1.3 Modos de rotura em juntas adesivas

É importante assegurar que o adesivo não é a ligação mais fraca numa junta. Assim é importante estudar os modos de falha ou de rotura de uma ligação adesiva de modo a obter melhores propriedades. Existem quatro modos de rotura diferentes em juntas coladas (Figura 11) [2, 5]:

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

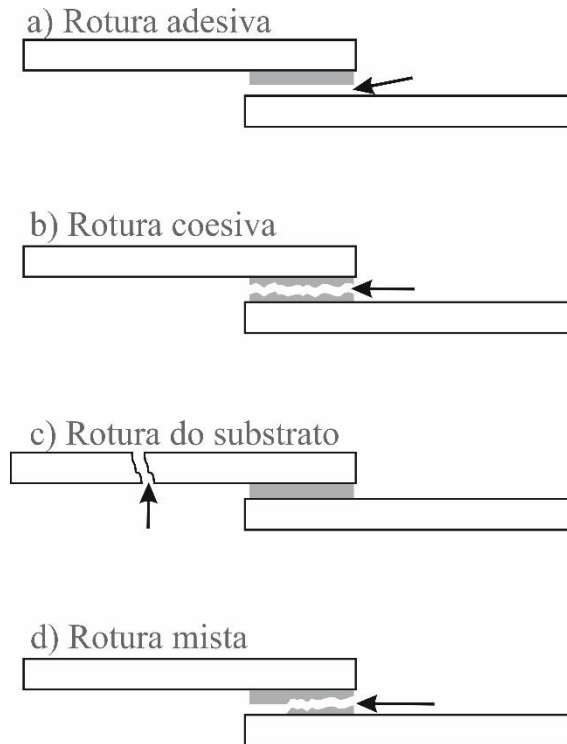


Figura 11 - Modos de rotura em juntas adesivas.

A falha por rotura adesiva ocorre na interface entre o adesivo e um dos aderentes. Depois de haver rotura verifica-se que uma das superfícies do substrato não apresenta qualquer resíduo de adesivo. Este tipo de rotura ocorre devido à má preparação das superfícies ou então à incompatibilidade entre o material dos substratos e do adesivo. A junta deve ser preparada e projetada de modo a que não haja este tipo de rotura [1, 2].

Ocorre rotura coesiva quando a ligação entre o adesivo e o substrato é mais forte do que a resistência interna do próprio adesivo. Neste tipo de falha ambas as superfícies dos substratos estão cobertas por adesivo [2].

A rotura de um dos substratos ocorre quando existe uma junta bem concebida, nomeadamente se a carga de rotura corresponder à resistência nominal do substrato [1].

Por vezes ocorre uma combinação de rotura adesiva e coesiva. Ocasionalmente este modo de rotura deve-se à limpeza ineficaz numa dada região das superfícies a ligar, ou mesmo do próprio adesivo [1].

2.1.4 Configurações possíveis de junta

O desempenho de um adesivo numa junta colada depende da configuração da mesma e do modo de carregamento. As juntas que originam distribuições de tensões mais uniformes são geralmente mais resistentes e duráveis do que aquelas que produzem concentrações de tensões. Por este motivo, as juntas são mais eficazes quando estão sujeitas ao corte e à compressão em vez de esforços de arrancamento e clivagem, já que as primeiras estão normalmente associadas a tensões mais uniformes [10].

Numa junta ideal o adesivo deve ser solicitado na direção segundo a qual resiste mais. Durante o fabrico da junta colada deve-se ter atenção que a sua configuração induza esforços segundo a direção que lhe seja mais favorável para a junta. Existem várias configurações possíveis para as juntas adesivas, em que algumas geometrias podem ser impraticáveis, de difícil realização ou até mesmo de custo elevado, conforme ilustrado na Figura 12. As mais utilizadas em engenharia, projeto e a nível prático são as seguintes [1, 2]:

- Juntas de sobreposição simples (JSS);
- Juntas de sobreposição dupla (JSD);
- Juntas com chanfro (*Scarf Joint*);
- Juntas em degraus.

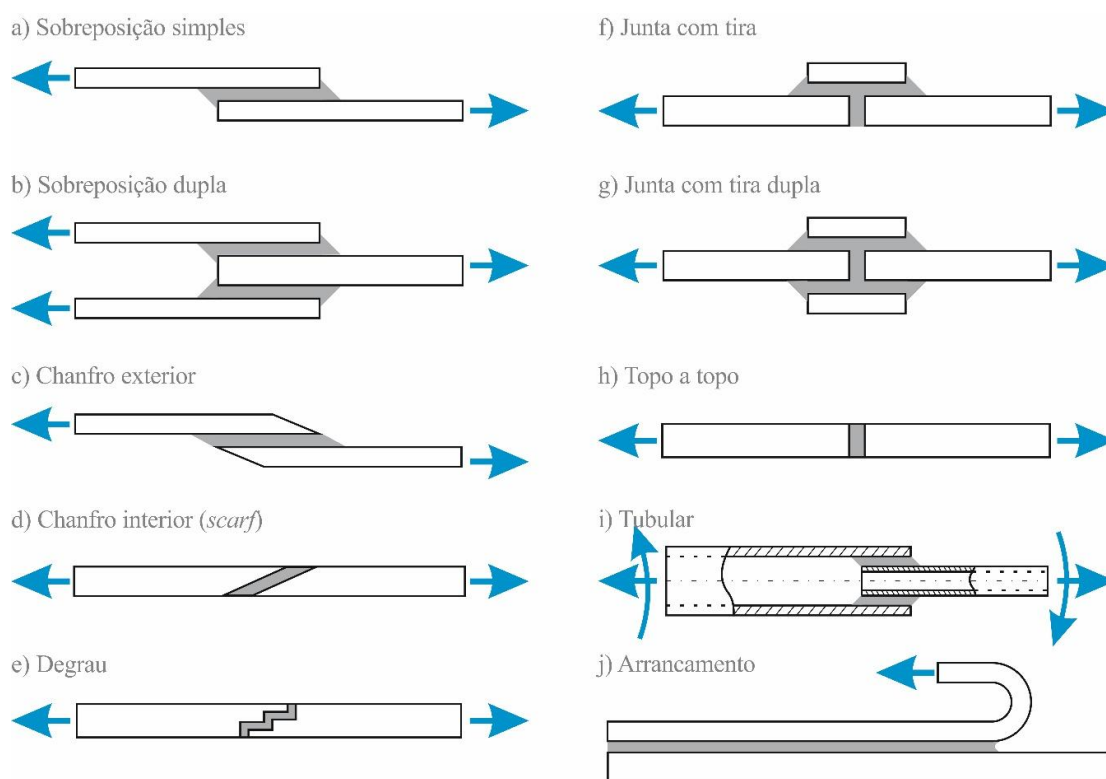


Figura 12 - Alguns tipos de juntas adesivas usadas na engenharia.

A JSS tem sido das mais utilizadas a nível experimental e teórico bem como na literatura, pois é de fácil fabrico. Contudo, a aplicação descentrada da carga vai provocar efeitos de flexão, que originam o aparecimento de tensões de arrancamento na extremidade da sobreposição [1]. De modo a minimizar este problema, recorrem-se a JSD. Este tipo de configuração tem uma construção mais balanceada que diminui drasticamente o momento-fletor. As juntas JSD, a junta com chanfro e as juntas em degrau também foram especialmente projetadas para reduzir as tensões de arrancamento [2].

Outra solução eficaz para garantir um alinhamento das forças numa JSS é a utilização de uma junta de ressalto (*joggle lap joint*), ilustrada na Figura 13. Todavia este tipo de configuração acrescenta alguma dificuldade no seu fabrico, em especial nos substratos frágeis ou de elevada resistência [2].



Figura 13 - Junta de ressalto.

As juntas com tira (*strap joint*), tal como na JSS, são sujeitas a esforços de arrancamento. A junta com duas tiras reduz o momento-fletor e é por isso preferível [2].

Existem também outras configurações possíveis como as juntas topo a topo, juntas cilíndricas, juntas de canto e ainda juntas em T.

As juntas topo a topo (*butt joint*), apesar de serem de fabrico simples, não resistem à flexão porque são induzidos esforços de clivagem no adesivo. Desta forma recorre-se a modificações da junta de modo a reduzir a clivagem. As mais utilizadas estão ilustradas na Figura 12, no entanto existem outros tipos que requerem maquinagem mas são mais eficientes (Figura 14).

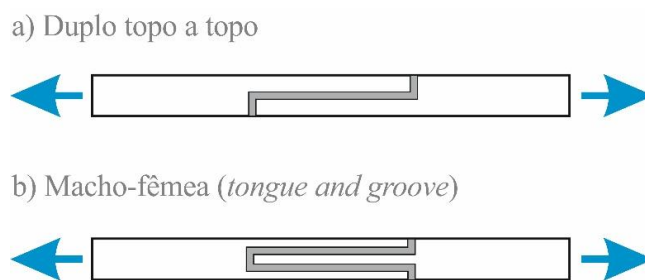


Figura 14 - Juntas topo a topo.

Utilizam-se juntas cilíndricas na colagem de tubos e varões, acrescentando assim maior vantagem em relação às de topo a topo porque consegue-se um aumento da área resistente e uma diminuição

do arrancamento [2]. Na Figura 15 estão representadas algumas configurações possíveis em juntas cilíndricas [4].

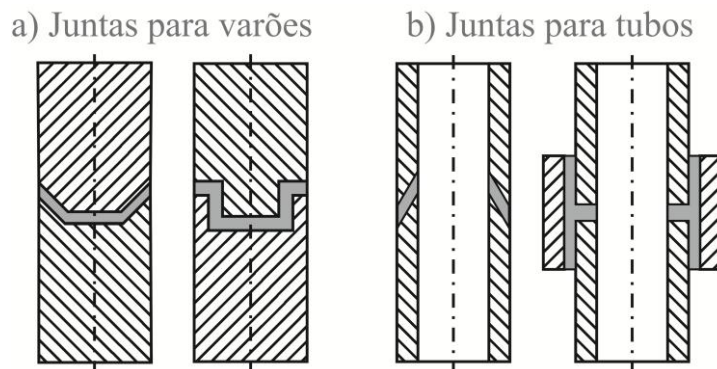


Figura 15 - Alguns exemplos de juntas para varões (a) e tubos (b).

As juntas em T (Figura 16-a) caracterizam-se pela orientação perpendicular dos substratos, embora também seja possível que o ângulo entre os dois aderentes seja diferente de 90° . O objetivo principal das soluções propostas é a minimização das forças de arrancamento e a maximização das solicitações de corte no adesivo [2].

As juntas de canto são semelhantes às juntas em T. São configuradas de modo a diminuir o arrancamento no adesivo. Na Figura 16-b estão alguns exemplos de juntas de canto [11].

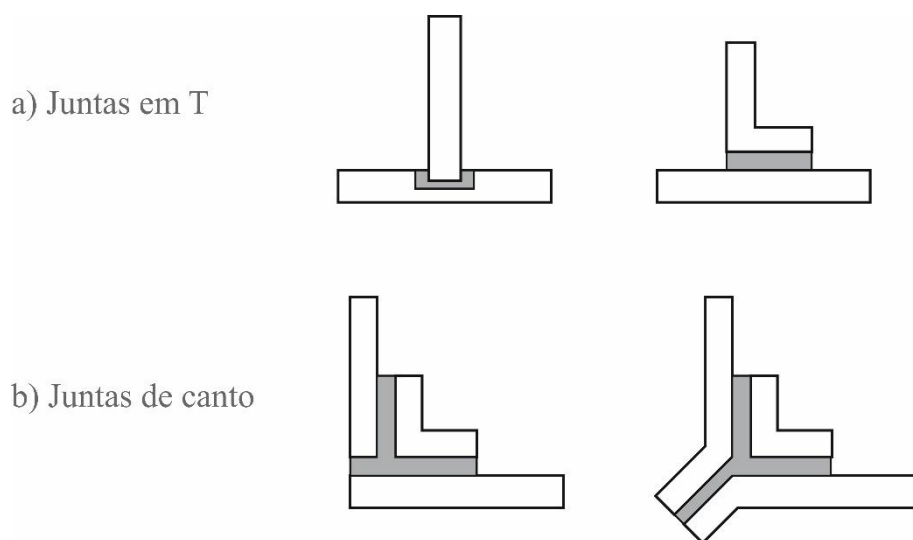


Figura 16 - Alguns exemplos de juntas em T (a) e de canto (b).

2.2 Adesivos estruturais

Existe uma vasta gama de critérios para agrupar os adesivos. Segundo alguns autores os adesivos podem ser classificados consoante o seu tipo de estrutura molecular, a sua natureza, composição química, modo de apresentação e de aplicação, modo de desempenho, entre outros [1].

Na ótica do utilizador o critério mais interessante a considerar será o baseado no desempenho do adesivo. Desta forma surgem assim dois grupos distintos: os adesivos estruturais e os adesivos não estruturais [1, 2]. Dos dois grupos existentes o que irá ser descrito é o grupo de adesivos estruturais.

2.2.1 Caraterização dos adesivos estruturais

O grupo de adesivos estruturais constitui materiais de elevada resistência coesiva com capacidade de unir outros materiais de elevada resistência, tais como polímeros, metais, compósitos, madeira, permitindo que a resistência da ligação adesiva ao corte exceda os 6,9 MPa à temperatura ambiente [12]. Consoante o tipo de aplicação, os adesivos estruturais necessitam de garantir uma boa ligação face ao ambiente onde estão inseridos, sendo capazes de transferir as forças aplicadas à junta em condições de serviço ou, alternativamente, como um material de provada fiabilidade em aplicações nas quais a ligação deve ser mantida, sem ocorrência de falha, mesmo quando sujeita a solicitações significativas por um longo período de tempo [1].

A maioria dos materiais utilizados nos adesivos estruturais são os termoendurecíveis. No entanto, alguns termoplásticos, como os cianoacrilatos e os anaeróbicos, também podem ser considerados estruturais [13].

2.2.2 Tipos de adesivos estruturais

Dentro do grupo de adesivos estruturais pode-se considerar as seguintes famílias: acrílicos, epóxidos, fenólicos, poliuretanos e poliimidas. Na Tabela 1 estão agrupadas essas famílias de adesivos estruturais. A Tabela 2 apresenta as propriedades de alguns desses adesivos estruturais [1].

Tabela 1 - Classificação dos adesivos segundo o seu desempenho. Adaptado de [3].

Acrílicos	Anaeróbicos Cianoacrilatos Acrílicos modificados
Epóxidos	Epóxido-fenólicos Epóxido-nitrilo Epóxido-poliamida Epóxido-polisulfitos Epóxido-poliuretano Epóxido-vinílico
Fenólicos	Fenólicos-cloropreno Fenólicos-nitrilo Fenólicos-vinílicos
Poliimida	
Poliuretano	

Tabela 2 - Algumas propriedades dos adesivos estruturais. Adaptado de [14].

Tipo	Apresentação	Temperatura máxima de utilização em contínuo [°C]	Resistência		
			Corte [MPa]	Arrancamento	Fluência
Acrílicos	Anaeróbicos	120 – 150	10 – 40	Boa	Média
	Cianoacrilatos	80	10 – 35	Mediocre	Má
Epóxidos	Epóxido-fenólicos	200 – 250	20	Boa	Mediocre
	Epóxido-nitrilo	100 – 120	10 – 46	Boa	Média
	Epóxido-poliamida	80	15 – 25	Mediocre	Boa
	Epóxido-polisulfitos	80	15 – 25	Mediocre	Boa
Fenólicos	Fenólicos-nitrilo	140 – 170	15 – 30	Média	Boa
	Fenólicos-vinílicos	100 – 130	17 – 35	Média	Boa
Poliimida	Filme	250 – 300	10 – 15	Boa	Má
Poliuretano	Líquido bicomponente	90	8 – 15	Média	Boa

2.2.2.1 Adesivos acrílicos

Dentro desta família de adesivos incluem-se os adesivos anaeróbicos (também denominados por diesters poliacrílicos), os cianoacrilatos e também os acrílicos modificados, também conhecidos por acrílicos reativos [3].

a. Anaeróbicos

Os adesivos anaeróbicos apresentam-se na indústria mecânica na ligação de peças estriadas e roscadas, fixação de rolamentos e, de uma forma geral, na ligação de peças de geometria cilíndrica [1]. São materiais monocomponentes e de estado líquido que podem ser curados à temperatura ambiente e o seu endurecimento é realizado através de uma reação de polimerização do tipo radical livre. São de fácil utilização e apresentam uma resistência mecânica muito variável, uma boa resistência a solventes e, de uma forma generalizada, a sua temperatura máxima de utilização é de aproximadamente 150°C [1]. Utilizam-se para ligar materiais de natureza diversa como o acetato, as poliofinas (Polietileno de baixa densidade – PEBD e Polietileno de alta densidade – PEAD), o policloreto de vinilo (PVC), a poliamida e o Teflon[®], por exemplo [3].

b. Cianoacrilatos

São adesivos instantâneos que se apresentam sob a forma de líquidos monocomponentes ou ainda na versão tixotrópica sem solventes, tendo uma cura rápida à temperatura ambiente. Também conhecidos por super colas, colas instantâneas e ainda por cola tudo, este tipo de adesivos tem uma cura influenciada tanto pela humidade relativa existente no meio onde estão inseridos como pelo pH e também pela espessura da junta colada. Uma vantagem destes adesivos será a excelente resistência à tração, embora tenham a desvantagem de serem frágeis, possuem custo elevado e também baixa resistência a esforços de arrancamento [3]. São adequados para produzir juntas coladas de materiais poliméricos.

c. Acrílicos modificados

Este tipo de adesivos, também denominados por acrílicos reativos, aparece de uma modificação dos já conhecidos acrílicos. Introduce-se na sua composição polimetilmetacrilato e borracha de nitrilo [1]. Apresentam elevada resistência à humidade, boa resistência a esforços de impacto e arrancamento. Têm baixa contração durante a cura e permitem ligações fortes mesmo quando as superfícies dos aderentes não estão bem limpas. Já nas desvantagens indicam-se a baixa resistência mecânica a altas temperaturas e elevada inflamabilidade.

2.2.2.2 Adesivos epóxicos

Os adesivos epóxicos entraram no comércio há cerca de sete décadas [2] sendo principalmente aplicados na aeronáutica e na indústria automóvel. É das famílias de adesivos mais versáteis, se não a mais versátil, porque possuem a qualidade de aderir bem a muitos substratos com exceção dos polímeros e dos elastômeros com reduzida energia de superfície, podendo ser facilmente modificados para atingir uma grande variedade de propriedades [1].

Possuem boa resistência química e mecânica, não produzem substâncias voláteis durante o seu processo de cura, têm baixa contração e, em juntas convenientemente projetadas, formam ligações extremamente fortes e duráveis com a maioria dos materiais possuindo elevada resistência à fluência [1]. Apresentam uma excelente resistência à tração e ao corte mas por outro lado uma fraca resistência ao arrancamento a não ser que sejam modificados com um polímero de maior tenacidade. Têm uma excelente resistência ao óleo, humidade e muitos solventes.

Estão disponíveis numa vasta variedade de formas que vão desde adesivos líquidos de baixa viscosidade até pastas sólidas ou filmes [1]. São comercializados sob a forma de monocomponente ou de vários componentes (geralmente dois – bicomponente)

Durante a colagem, estes adesivos não precisam de pressão, pelo que basta o simples posicionamento das peças a serem coladas. As propriedades dos adesivos epóxicos podem ser modificadas pela adição de outras resinas (poliamida, polisulfitos, fenólicos, entre outros) ou por um elastômero (poliuretano ou nitrilo) [1]. Destacam-se os seguintes epóxicos modificados.

a. Epóxido-fenólicos

Aparecem no comércio sob a forma de filmes ou líquidos que são curados sob pressão a temperaturas da ordem dos 170°C [1]. Como principais vantagens citam-se a boa resistência à tração e a esforços de corte e tem boa resistência à ação do meio circundante e à presença de água e hidrocarbonetos. Dentro das desvantagens estão tanto a baixa resistência ao arrancamento como ao impacto e ainda o custo relativamente elevado [2].

b. Epóxido-nitrilo

Comercializados sob a forma de filmes, os adesivos de epóxido-nitrilo têm grande utilização na construção e manutenção aeronáutica. A boa resistência ao arrancamento e as temperaturas de funcionamento entre os -55°C e 120°C aparecem como principais vantagens [3].

c. Epóxico-poliamida

O processo de cura destes adesivos dá-se lentamente à temperatura ambiente (de 12 a 16 horas). Também conhecidos por epóxico-nylons, estes adesivos são normalmente fornecidos sob a forma de filmes, reforçados, ou não por um tecido de fibras de vidro. As suas principais vantagens são a elevada resistência ao corte e ao arrancamento, as boas características a baixas temperaturas (na ordem dos -70°C [1]) e também a boa resistência à fadiga. Por terem a característica de excelente capacidade de formar *fillets – filleting* – os adesivos epóxico-poliamida são muitas vezes usados na indústria aeronáutica para formar juntas coladas de folhas de alumínio e estruturas ninho de abelha, vulgarmente conhecidas por *honeycomb*. Como desvantagens destacam-se a fraca resistência à humidade devido ao constituinte de *nylon* hidrófilo e também a limitação a uma temperatura de 80°C , tendo por outro lado fraca resistência à fluência [2, 3].

d. Epóxico-polisulfetos

São fornecidos numa pasta com pouca viscosidade de duas partes que cura à temperatura ambiente, originando desta maneira um sólido com propriedades idênticas às borrachas. Utilizam-se em aplicações que necessitam elevadas deformações, como por exemplo na colagem de betão em pisos de estradas e de aeroporto. Têm excelente flexibilidade e resistência química e também possuem boa aderência a muitos substratos. A sua temperatura máxima de utilização anda entre o intervalo 50 a 80°C dependendo da concentração das resinas de polisulfeto [2]. Até aos -100°C os epóxico-sulfetos têm boas propriedades e permanecem flexíveis até aos -65°C [2]. Outra vantagem é a superior resistência a óleo, gordura e solventes, ao ambiente exterior, ao envelhecimento, quando comparados à maioria dos elastómeros termoplásticos. Estes adesivos possuem boa resistência a esforços de arrancamento, especialmente a baixas temperaturas. A baixa resistência ao corte e a altas temperaturas são as principais limitações [1, 2].

e. Epóxico-poliuretano

Estes adesivos foram projetados de modo a se conseguir uma resistência ao arrancamento semelhante à dos epóxico-poliamida e a apresentarem também boa capacidade para resistir a impactos e vibrações. Outra vantagem é a boa resistência à fadiga [1].

f. Epóxico-vinílico

Nestes adesivos consegue-se obter melhor resistência ao impacto e ao arrancamento através da mistura de resinas de epóxico com polímeros de vinilo. A resistência a altas temperaturas vai variar com a adição das resinas de vinilo, isto é, diminui com o aumento de vinilo. São adesivos fornecidos

na forma de filmes ou soluções de solventes. Têm utilidade como adesivos laminados para metais em folha [2].

2.2.2.3 Adesivos fenólicos

São os primeiros adesivos estruturais a serem desenvolvidos para os materiais metálicos. Durante o seu processo de cura, que deverá ser realizado a altas temperaturas, existe libertação de água. Por este motivo os substratos devem ser porosos, ou então, deve-se impor uma elevada pressão de modo a evitar o aparecimento de vazios na colagem. Das vantagens destacam-se o baixo custo, a boa resistência mecânica e também boa resistência a temperaturas elevadas e aos agentes ambientais. A baixa resistência à corrosão por solventes, baixa resistência ao impacto e também a grande fragilidade aparecem como limitações. De modo a atenuar estas limitações têm-se desenvolvido adesivos que combinam a resina fenólica com uma resina vinílica, com nitrilo ou ainda cloropreno. Cada um é descrito a seguir [1].

a. Fenólicos-cloropreno

Tanto na apresentação comercial como na cura, estes adesivos são idênticos aos fenólicos com nitrilo. A sua temperatura de utilização pode chegar até aos -50°C e têm bastante sensibilidade aos agentes químicos [1].

b. Fenólicos-nitrilo

Apresentam-se em forma de filme ou então de líquido de um só componente. Quando comparados com os fenólicos-vinílicos apresentam características mecânicas ligeiramente inferiores mas por outro lado, têm melhor estabilidade térmica (podendo ser utilizados até temperaturas de 160°C de forma contínua). Têm uma ótima resistência à água, óleos e sais. Como principais desvantagens ditam-se a fraca resistência mecânica a baixas temperaturas e também a utilização de pressões e temperaturas elevadas para o processo de cura [1-3].

c. Fenólicos-vinílicos

Podem ser comercializados sob emulsões e filmes ou então sob a forma de dois componentes (líquido mais pó). A sua temperatura máxima de utilização anda na ordem dos 130°C e a resistência ao corte e ao arrancamento são elevadas. As propriedades plastificantes da fase vinílica garantem uma boa resistência à fadiga [1, 2].

Na Figura 17 está representada a variação da resistência ao corte com a temperatura de adesivos de epóxido e adesivos fenólicos.

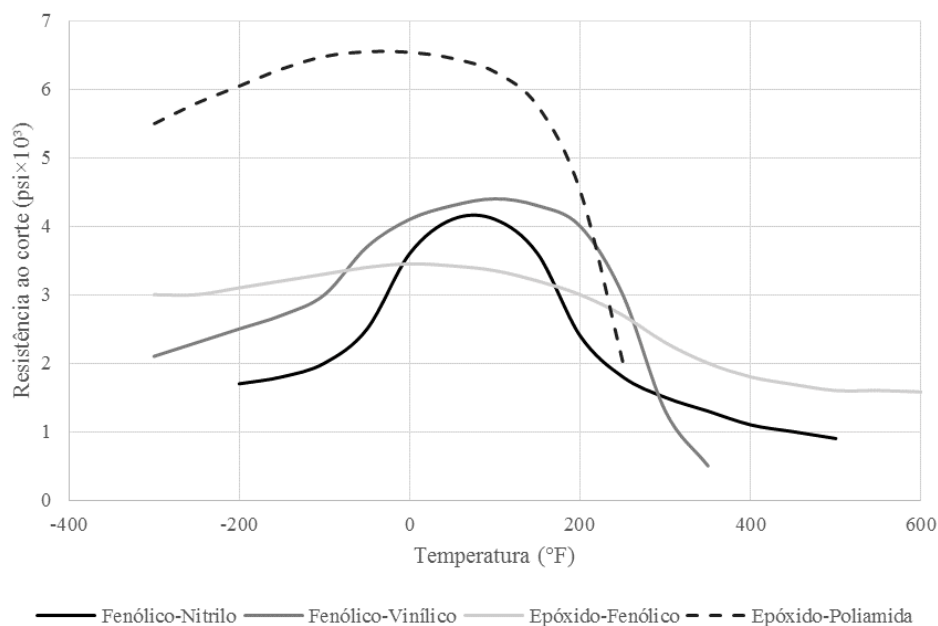


Figura 17 - Efeito da temperatura na resistência de adesivos de epóxido e adesivos fenólicos modificados (substratos de alumínio). Adaptado de [4].

2.2.2.4 Adesivos de poliimida

São comercializados sob a forma de filmes ou líquidos, sendo especialmente aplicados a temperaturas de serviço bastante elevadas (superior aos 200°C). Apesar de possuírem grande dureza, são relativamente frágeis, têm pouca tenacidade e resistem mal a vibrações. Outra limitação é a necessidade de longos tempos de curas com ciclos de pressão e temperatura elevada, sendo por isso o modo de emprego complexo [1].

2.2.2.5 Adesivos de poliuretano

Os adesivos de poliuretano resultam de reação de um polioliol (ou poliéster-polioliol) com um isocianato e apresentam-se geralmente sob a forma de dois componentes e a cura processa-se lentamente à temperatura ambiente [8]. A distância entre os substratos limita-se até aos 25 mm [1]. Em termos de vantagens enumeram-se a boa flexibilidade, bom comportamento a baixas temperaturas, boa resistência a esforços de arrancamento, a choques e vibrações à abrasão e também boa tenacidade. Estes adesivos podem apresentar uma resistência de rotura ao corte da ordem dos 20 MPa, possibilitando a utilização em aplicações estruturais [1]. As principais desvantagens são a elevada sensibilidade às proporções da mistura, a toxicidade do isocianato e a baixa resistência à temperatura ambiente [2].

2.3 Determinação das propriedades de adesivos

2.3.1 Caracterização das propriedades mecânicas à tração

2.3.1.1 Tipos de ensaio

O ensaio de tração é um dos ensaios destrutivos mais utilizados para obter dados de projeto sobre a resistência do adesivo, e ainda como ensaio de controlo da qualidade da junta colada. Desta forma utiliza-se o ensaio de tração em adesivos para determinar inúmeras propriedades como o módulo de elasticidade longitudinal (declive da curva no domínio elástico), e a tensão correspondente à transição elasto-plástica – tensão de cedência, tensão de rotura e a deformação de rotura, através da análise da curva tensão-deformação (Figura 25) fornecida pela máquina e seu *software* [2, 15]. Para cálculo das referidas tensões divide-se a força no instante desejado pela área inicial transversal da zona útil do provete.

A determinação das propriedades de um adesivo à tração pode ser efetuada de duas maneiras distintas: por provetes maciços (*bulk*) ou em juntas topo a topo (*butt-joint*).

Os ensaios em provetes maciços são de fácil realização. No entanto, a espessura utilizada deve ser a mínima possível de modo a representar a camada fina presente em juntas coladas [7]. Este tipo de ensaio será descrito com maior pormenor no capítulo 2.3.1.2.

O outro método para a determinação das propriedades à tração de uma junta colada é o ensaio em juntas topo a topo, também conhecido como *butt-joint*. Os ensaios realizados neste tipo de juntas serão os mais próximos da realidade, embora existam algumas dificuldades inerentes a este método de obtenção de propriedades. Ao contrário do ensaio em provetes *bulk*, este ensaio utiliza substratos de secção circular (Figura 18) em aço ligados por uma camada de adesivo. Neste tipo de ensaio são obtidas informações relativas ao módulo de elasticidade, módulo de rigidez e coeficiente de Poisson [2]. As tensões são calculadas dividindo a força aplicada pela área colada [2]. Como limitações tem-se a dificuldade de obtenção de propriedades mecânicas em tração, devido a questões relacionadas com a precisão do fabrico dos provetes e alinhamento destes durante o ensaio. De facto, os desalinhamentos, mesmo que pequenos, vão conduzir à existência de esforços espúrios de flexão, reduzindo assim as propriedades de resistência da junta colada. A distribuição de tensões em juntas topo a topo não é uniforme. Tal resulta do efeito de Poisson, pela constrição provocada na camada de adesivo pelos substratos quando existe uma diferença sensível de rigidez entre eles ou ainda por desalinhamento [2].

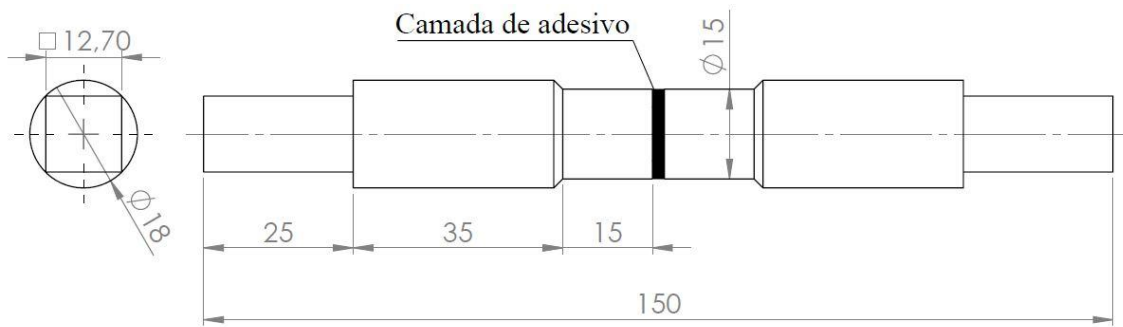


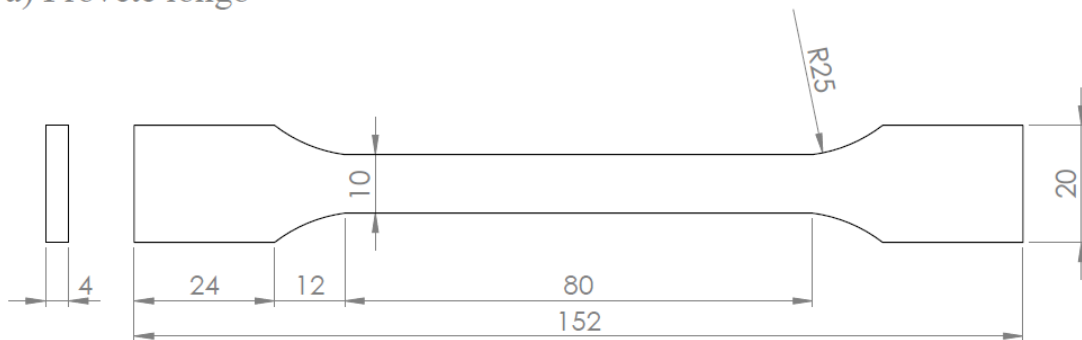
Figura 18 - Dimensões (em mm) a considerar para o ensaio em junta topo a topo cilíndrica.

Adaptado de [7].

2.3.1.2 Ensaio de provetes maciços à tração

O ensaio consiste em solicitar de forma contínua e crescente um provete com dimensões previstas pela norma EN ISO 527-3 (Figura 19) com uma força trativa uniaxial (direção longitudinal do provete), efetuando-se ao mesmo tempo o registo da força e do alongamento sofrido na secção do provete. Na medição das deformações são utilizados transdutores diretamente aplicados no provete ou então por meio ótico de medição sem contacto [2]. Os resultados obtidos apresentam-se tipicamente sob a forma de curva de tensão vs. deformação.

a) Provede longo



b) Provede reduzido

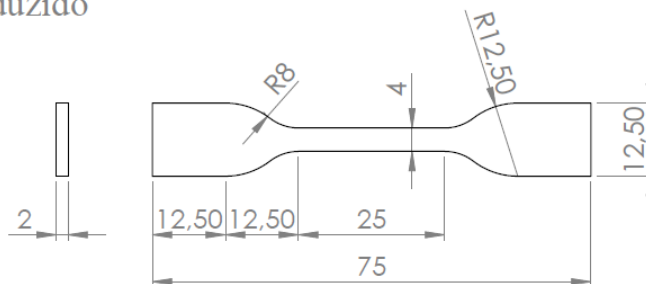


Figura 19 - Provetes de ensaio à tração de acordo com a EN ISO 527-2 (dimensões em mm) [2].

Para o ensaio de tração pode-se recorrer a dois tipos de provetes: o provete longo (Figura 19-a) ou o provete reduzido (Figura 19-b). A opção é definida pela rigidez do adesivo, isto é, como em adesivos mais rígidos as deformações são menores, o provete de maiores dimensões adequa-se melhor [2].

A maior dificuldade neste tipo de ensaio é obter um provete isento de porosidades ou vazios durante o fabrico dos mesmos. Estes tipos de defeitos estão relacionados com a entrada de ar entre o filme de adesivo e a base do molde. Durante o processo de cura, estas bolhas vão-se progredir como demonstra a Figura 20 [16].

De modo a diminuir os defeitos descritos anteriormente e conhecidos por “bolhas de ar” existem algumas técnicas como a “técnica de libertação de vácuo”, em que a temperatura é elevada até um ponto em que o adesivo se torna mais fluído, e as bolhas fluem para fora da sobreposição, ou ainda a “técnica de aplicação de pressão hidrostática” que comprime o ar existente até volumes insignificantes, fazendo com que este se dissolva no adesivo [16].

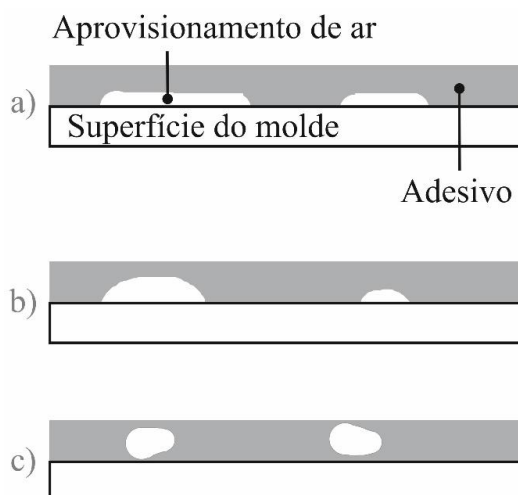


Figura 20 - Aprovisionamento de ar entre uma película adesiva e as superfícies do molde. Aprovisionamento inicial (a), deslocamento parcial (b) e posicionamento final (c). Adaptado de [16].

Existem duas formas diferentes para fabricar os provetes *bulk*: através da injeção do adesivo num molde (moldação) ou por pressão entre pratos. O método por injeção é utilizado em adesivos que se apresentam numa forma relativamente líquida. Quando o adesivo é demasiado viscoso, a injeção do mesmo torna-se difícil ou até impossível, pelo que se opta pela pressão entre pratos [16]. O fabrico de provetes por injeção poderá ser efetuado de duas maneiras distintas: através da injeção em molde fechado ou em molde aberto. Enquanto no molde fechado a aplicação do adesivo é feita por intermédio de uma pistola, no molde aberto a injeção é feita manualmente e, após esta estar terminada, o molde é fechado.

O molde utilizado para o processo de injeção (Figura 21) é geralmente metálico e constituído por três partes distintas: 1- placa inferior (suporta o conjunto), 2- placa intermédia (garante a geometria e a espessura do provete) e 3- placa superior (responsável pelo fecho e fixação do molde). O número de provetes obtidos pode variar consoante o formato e o número de cavidades do molde. A placa superior também é utilizada para a injeção do adesivo (pelo furo apropriado) e a libertação do ar acumulado no interior do molde é efetuada através do furo de menor diâmetro [17].

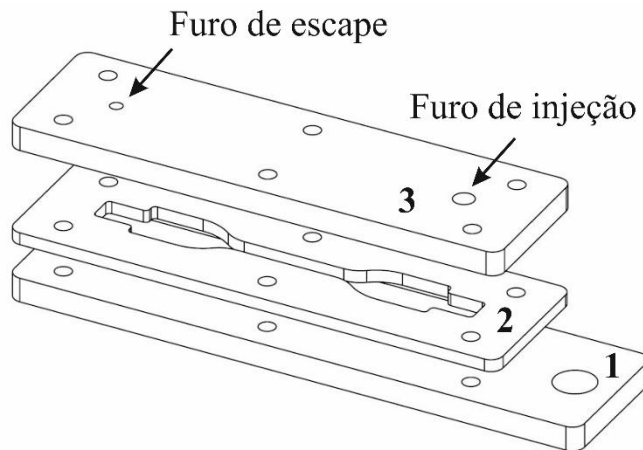


Figura 21 - Representação esquemática de um molde utilizado para fabrico de provetes *bulk*.

Adaptado de [17].

Na utilização do molde aberto a placa intermédia é colocada sobre a placa inferior e o adesivo aplicado na cavidade, sendo posteriormente usada a placa superior para remover o adesivo excedentário.

Caso o adesivo seja relativamente duro e rígido, o método mais indicado para o fabrico dos provetes é a pressão entre pratos, como demonstrado na Figura 22. Segundo a norma NF T 76-142, utiliza-se um molde que consiste em duas placas separadas por uma moldura de silicone. Esta última está circundada por uma moldura de suporte constituída por quatro barras fixadas por parafusos. Para obter melhores resultados é necessário aplicar desmoldante em todas as superfícies e também utilizar uma quantidade de adesivo superior ao volume da cavidade do molde (5% de volume), de forma a garantir o seu completo enchimento assim que aplicada a pressão de cerca de 2 MPa [17].

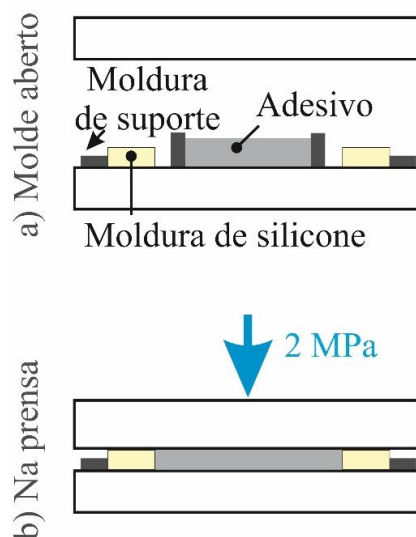


Figura 22 - Moldação entre pratos segundo a norma NF T 76-142.

Após a cura do adesivo em moldação fechada obtém-se uma placa retangular maciça que posteriormente deve-se ser maquinada de forma a obter o provete com as medidas da Figura 19.

Independentemente do método, um fator a ter em conta para obter melhores resultados no fabrico dos provetes é a aplicação de um desmoldante em todas as superfícies, de modo a facilitar a remoção dos provetes do molde, sem que ocorra adesão ou rotura [18].

2.3.1.3 Procedimento de ensaio de provetes maciços

Sempre que se procede a um ensaio mecânico em adesivos ou qualquer outro material deve-se respeitar a norma correspondente ao tipo de ensaio em questão. Estas definem todas as condições necessárias para o sucesso dos ensaios, tais como os procedimentos dos ensaios, geometria dos provetes, preparação das amostras, velocidade de ensaio, tratamentos superficiais (quando aplicável), entre outros. Diversas normas são apresentadas para a caracterização de um adesivo à tração, tais como a ASTM D897 e a EN ISO 527-2 [1].

A temperatura e a humidade relativa têm forte influência no resultado e nas características mecânicas dos provetes. Este fator torna-se mais relevante nos adesivos cuja temperatura de transição vítrea esteja próxima da temperatura a que o ensaio é realizado. Assim, os ensaios devem ser realizados em condições de temperatura e humidade relativa típicas de laboratórios (25°C e 50%, respetivamente) [19].

Utiliza-se uma máquina universal de ensaios mecânicos (Figura 23-a), devendo-se garantir que os provetes são presos através de amarras (devidamente apertadas, de maneira a que seja assegurado o

não escorregamento) e também evitar o seu desalinhamento (Figura 23-b). Além da fixação, as amarras também têm a função de garantir que a rotura ocorra na zona útil do corpo de prova [20]. O correto alinhamento é importante pois evita a rotação das amarras e por conseguinte esforços transversais e de flexão.

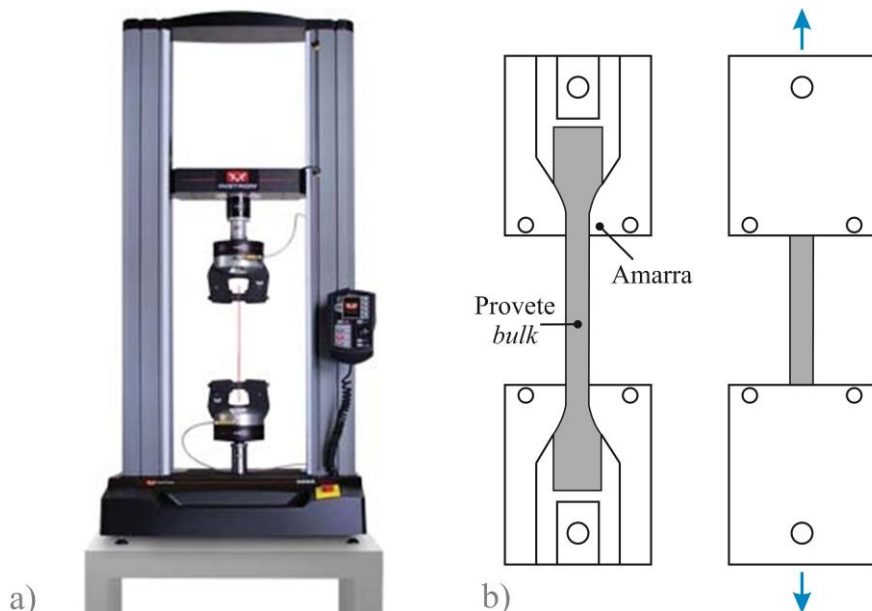


Figura 23 - Máquina de ensaios mecânicos Instron® 5960 (a). Fonte: www.instron.com e sistema de amarras para provetes *bulk* (b).

Para obter medições corretas das tensões limite são necessário equipamentos de medição extremamente precisos, nomeadamente a célula de carga, responsável pela medição da força aplicada a cada instante de tempo. Assim, para uma maior precisão de resultados, recomenda-se que a carga máxima da célula de carga seja superior em apenas uma ordem de grandeza relativamente à força de rotura registada [4]. Quando testados provetes com medidas idênticas às da Figura 19, deve-se utilizar uma célula de carga de 5 kN de capacidade para adesivos com elevada resistência. Já no caso de adesivos com baixa resistência é suficiente utilizar uma de 1 kN [17].

De forma a avaliar as deformações longitudinais é recomendado o uso de um extensómetro (especialmente para adesivos dúcteis e flexíveis) [19]. Este equipamento destina-se à medição de pequenas variações de comprimento no decurso do ensaio de tração. À medida que o provete se alonga, o comprimento de base do extensómetro é incrementado, enviando para a placa de aquisição de dados o valor registado entre os braços em cada momento do ensaio [21].

Quanto mais dúctil e flexível for o adesivo, mais importante será a utilização de um extensómetro, dado que o deslocamento no regime elástico será superior, o que compromete a medição do módulo de elasticidade. Existem dois tipos de extensómetros capazes de medir o deslocamento no regime

elástico: os extensômetros mecânicos e os óticos (Figura 24). As técnicas de medição ótica são preferenciais uma vez que, como não existe contacto com o provete, não se regista qualquer alteração das propriedades medidas do adesivo devido ao acoplamento do extensómetro. Outro benefício da utilização de um extensómetro ótico é a possibilidade de realizar medições até à rotura do corpo de prova, contrariamente ao que acontece com o uso do extensómetro mecânico. Devido ao curso limitado do extensómetro mecânico, pode ser necessário interromper o ensaio de forma a poder retirá-lo do provete antes que ocorra a rotura [4, 7].



Figura 24 - Extensómetros: Mecânico (a). Fonte: www.instron.com e ótico (b). Fonte: www.hegewald-peschke.com

Outro fator importante para os resultados obtidos é a velocidade de ensaio. Esta pode variar de 1 a 100 mm min⁻¹, sendo a primeira utilizada para se retirar o módulo de elasticidade [19, 22].

Finalizando o ensaio, procede-se à determinação das propriedades mecânicas baseadas na curva tensão-deformação (σ - ϵ) (idêntica à da Figura 25): tensão de limite elástico (σ_y), tensão de rotura à tração (σ_r) e a deformação à tração (ϵ_r). Existem métodos diferentes para a obtenção do módulo de elasticidade (E), um dos quais está descrito na norma EN ISO 527-2. Por este método, calcula-se E no intervalo de 0,05% e 0,25% de ϵ dentro do regime elástico, selecionando dois pontos na curva obtida. A intersecção das deformações na curva do gráfico corresponde a dois valores de σ , que serão também utilizados no cálculo de E (em MPa), baseando-se na seguinte equação:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\epsilon} \quad (2.1)$$

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

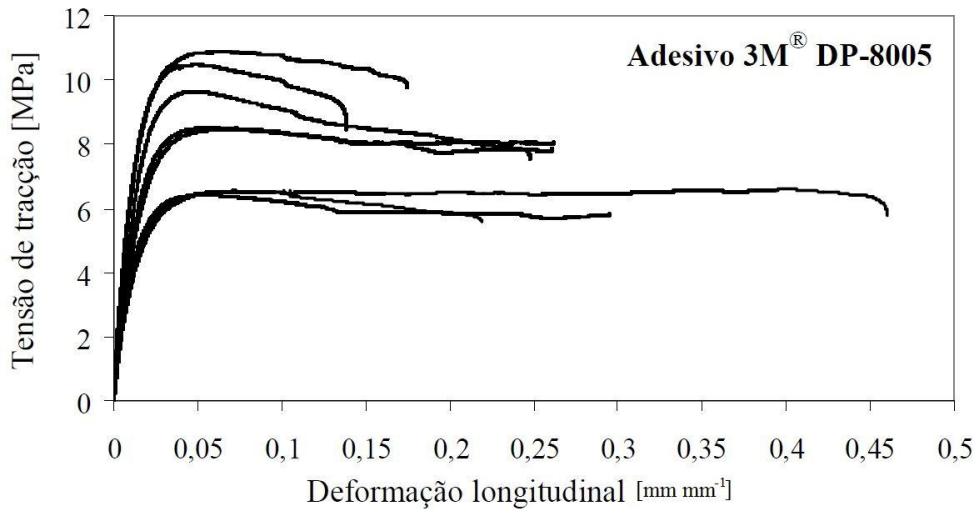


Figura 25 - Curvas σ - ϵ obtidas no ensaio de tração do adesivo 3M[®] DP-8005 [1].

Outro método consiste em ajustar uma reta tangente à zona elástica do adesivo, iniciada na origem da curva σ - ϵ como demonstrado na Figura 26 [17]. Nos adesivos o cálculo para a obtenção de σ_y não é tão linear, uma vez que os polímeros caracterizam-se por não apresentar patamares de cedência na transição elasto-plástica. No caso de adesivos rígidos como os epóxicos (E de 3 a 5 GPa), deve-se considerar que σ_y é aproximadamente igual a σ_r . Quando se está perante adesivos flexíveis (E à volta dos 0,1 GPa), deve-se interseccionar uma reta tangente à zona elástica do adesivo como uma reta tangente à zona plástica do mesmo (ver Figura 27) [17, 19].

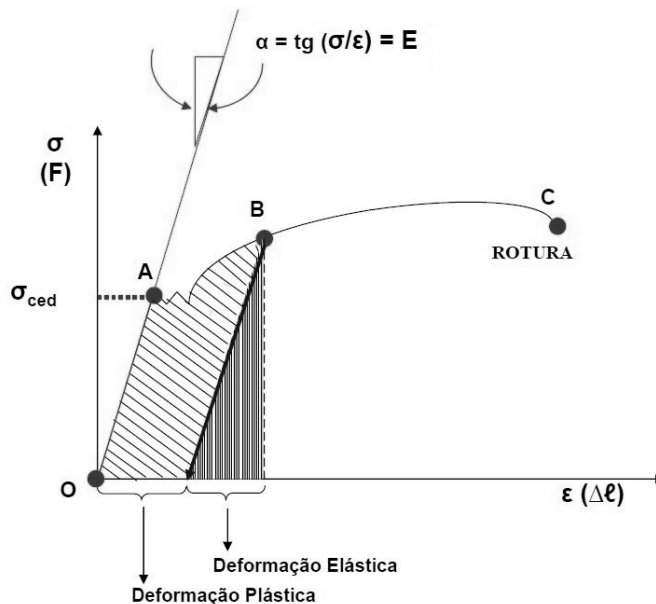


Figura 26 - Variáveis envolvidas no diagrama σ - ϵ [21].

Por fim existe ainda um método em que se determina o valor da “tensão limite de proporcionalidade n ” considerando um número n correspondente a uma deformação escolhida arbitrariamente e, traçando uma reta paralela à reta de proporcionalidade entre σ e ϵ , obtém-se o valor de “tensão limite de proporcionalidade n ”. Por norma utiliza-se o valor de 0,2% correspondente a uma deformação plástica de 0,002 por unidade de comprimento, como representado na Figura 27 [17, 20, 23].

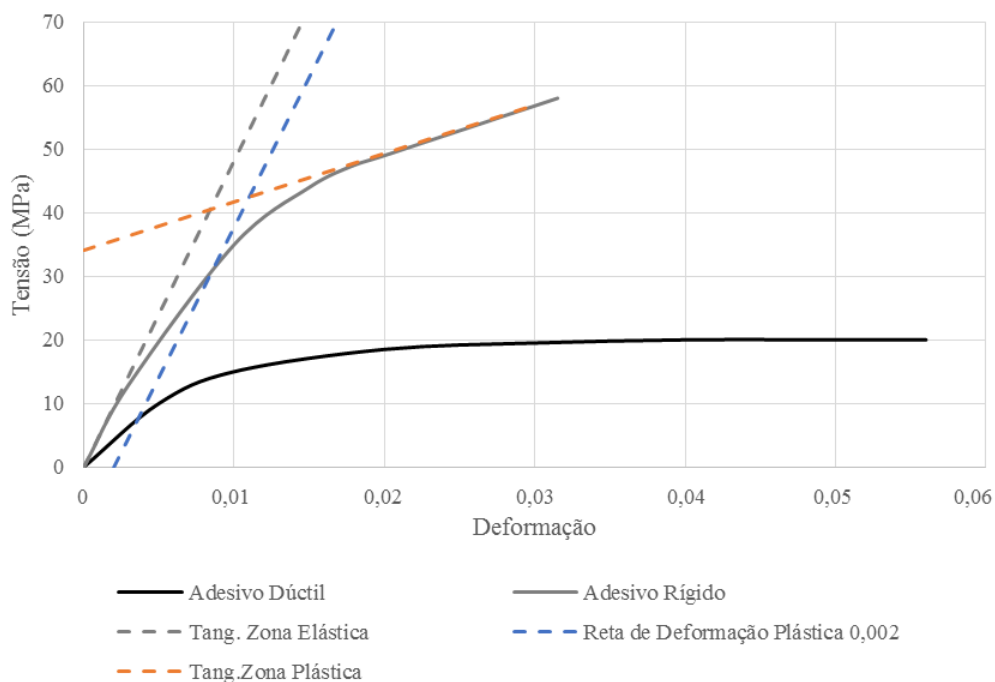


Figura 27 - Métodos para determinação da σ_y . Adaptado de [17].

2.3.2 Caracterização das propriedades mecânicas ao corte

2.3.2.1 Tipos de ensaio

Geralmente projetam-se as juntas adesivas de modo a que estejam essencialmente solicitadas ao corte porque as juntas oferecem melhores características mecânicas a este tipo de esforços. Desta forma o estudo do comportamento dos adesivos a esforços de corte é de grande importância. Dentro da caracterização das propriedades ao corte podem ser realizados ensaios com o adesivo em estado maciço ou ainda como camada fina em juntas adesivas. Existem assim alguns ensaios diferentes para determinar as propriedades ao corte de ligações adesivas, cada um com o objetivo de tentar produzir um estado puro de tensões de corte na junta adesiva [2, 4, 19, 24]:

- Ensaio em junta de sobreposição simples (JSS);
- Ensaio Iosipescu (*V-Notched beam shear method*);

- Ensaio Arcan (*Notched plate shear method*);
- Ensaio de torção em juntas topo a topo (*Napkin-ring test*);
- Ensaio TAST (*Thick Adherend Shear Test*).

O ensaio para a determinação das propriedades ao corte numa JSS é dos métodos listados acima mais comuns porque é um método simples, de baixo custo, as juntas são de fácil fabrico e pode ser realizado em máquinas universais de ensaios mecânicos. Este ensaio é regulamentado pelas normas ASTM D1002, ISO 4587 ou outras equivalentes. Neste ensaio os substratos estão sujeitos a uma solicitação trativa enquanto a camada de adesivo está sujeita a esforços de corte. Além dos esforços mencionados anteriormente, a junta também vai estar sob solicitação de esforços de arrancamento, resultado do desalinhamento as forças de tração. De modo a diminuir o aparecimento de esforços de arrancamento e regular a espessura colocam-se calços nos locais de amarração (Figura 28). A norma ASTM D1002 refere a geometria dos provetes a preparar como ilustrado na Figura 29. A tensão média de corte (τ) é determinada pela seguinte fórmula:

$$\tau = \frac{P}{l \times b} \quad (2.2)$$

sendo P a carga aplicada, l o comprimento de sobreposição e b a largura da junta.

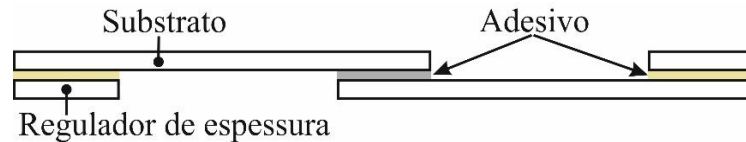


Figura 28 - Representação esquemática de uma JSS.

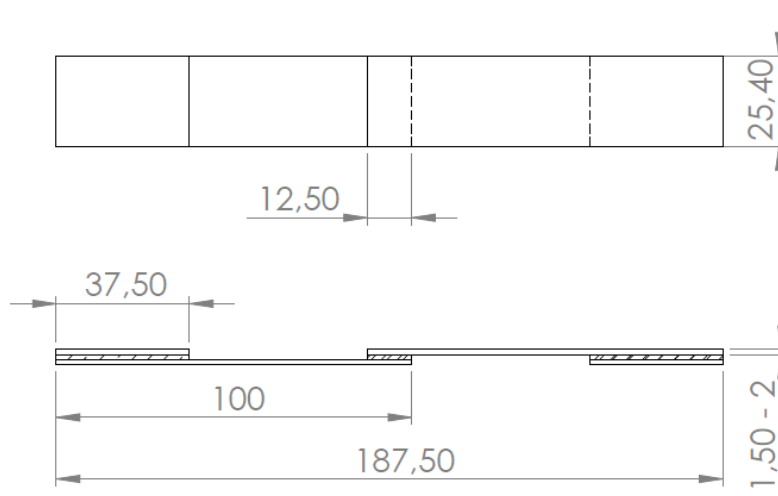


Figura 29 - Dimensões (em mm) de uma JSS segundo a norma ASTM D1002 [2].

O ensaio Iosipescu ou da literatura inglesa *V-notched beam test* (adotado pela norma ASTM D5379) foi inicialmente proposto para teste de metais e juntas soldadas em condições de carregamento de corte puro, embora tenha sido recentemente usado para caracterização de materiais compósitos [17]. Este método também pode ser aplicado em adesivos no estado maciço (Figura 30-a) ou em juntas (Figura 30-b). Em ambas as configurações adesivas existem dois entalhes simétricos no centro do provete. A secção central do provete está sujeita a um esforço de corte, uma vez que os momentos fletores provenientes dos dois lados se anulam [2]. Nesta zona devem ser colados extensómetros a 45° e a -45° com o eixo do provete de forma a medir as respectivas deformações [2]. O provete é carregado à compressão em quatro pontos diferentes, como demonstrado na Figura 30-c. Este ensaio oferece vantagens como provetes de fácil fabrico e possibilidade de obtenção do módulo de corte e da resistência ao corte. Sendo t a espessura do provete e h a distância entre extremidades dos dois entalhes, τ é dado por [2]:

$$\tau = \frac{P}{t \times h} \quad (2.3)$$

e o módulo de corte, G , por:

$$G = \frac{P}{t \times h \times (\varepsilon_{45} - \varepsilon_{-45})}, \quad (2.4)$$

onde ε_{45} e ε_{-45} correspondem à deformação determinada pelos extensómetros a 45° e -45° , respetivamente.

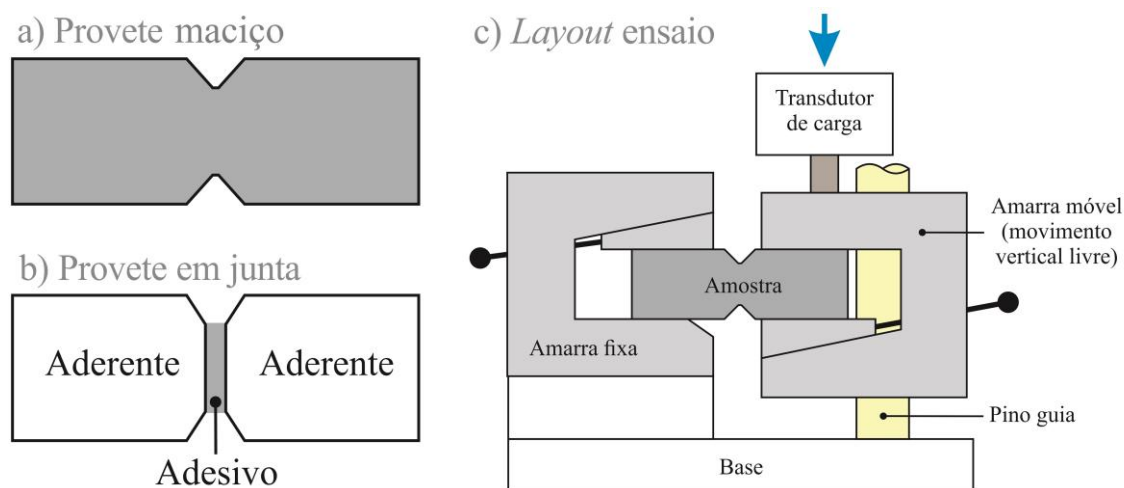


Figura 30 - Provetes Iosipescu: Maciço (a) e em junta (b). Layout de ensaio tipo Wyoming (c).

Adaptado de [17].

No ensaio Arcan, também conhecido por *Notched plate shear method*, utilizam-se provetes com a configuração semelhante a uma borboleta, sendo um teste particularmente indicado para espessuras pequenas [25]. Quando comparado com o ensaio Iosipescu, o Arcan possui melhores características pois apresenta bom desempenho em todos os tipos de adesivos, incluindo os mais dúcteis [1]. O provete Arcan (Figura 31-a) possui dois entalhes simétricos a 90° e um raio de concordância de 1,5 mm para minimizar a concentração de tensões [2]. Existem vários dispositivos para a montagem dos provetes, sendo um deles a fixação tipo *National Physical Laboratory (NPL)* [26], ilustrada na Figura 31-b, que requer a existência de dois furos em cada metade do provete. Como no ensaio Iosipescu, na zona central do provete Arcan devem ser colados extensômetros orientados a 45° e a -45° com o eixo do provete de forma a obter as deformações de corte (γ). O cálculo de G e de τ é realizado com expressões idênticas às equações (2.3) e (2.4), respectivamente [2].

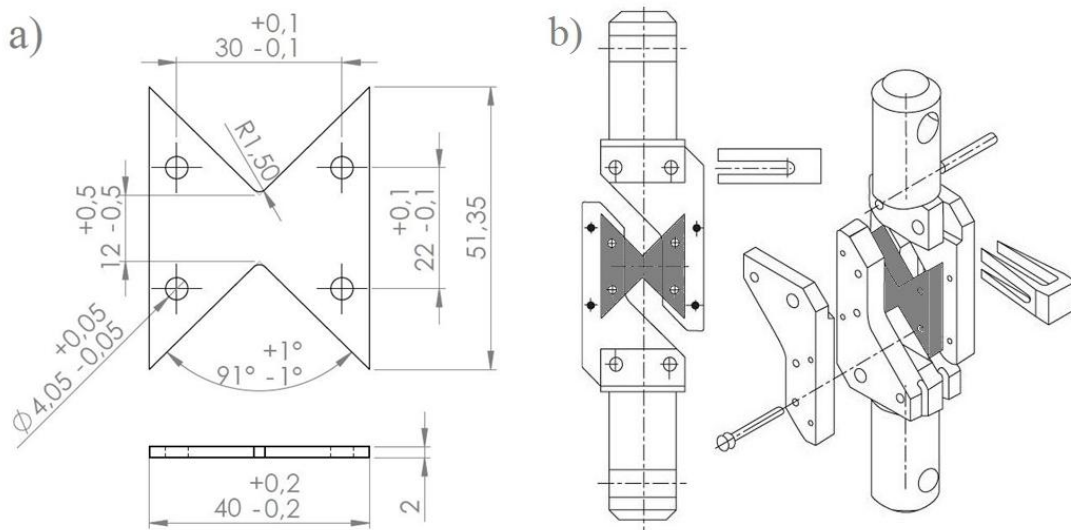


Figura 31 - Provette Arcan (dimensões em mm) (a) [2] e fixação NPL para ensaio Arcan (b) [17].

No ensaio *Napking ring test* (ilustrado na Figura 32) são aplicados momentos torsores de valor igual mas sentido oposto, sendo que é no raio exterior do cilindro que vai ocorrer a maior deformação do adesivo [17]. Utiliza-se este ensaio quando as deformações são baixas. É um ensaio realizado em juntas topo a topo entre dois cilindros de paredes de espessura fina de modo a reduzir a variação das tensões de corte ao longo do adesivo [2]. Para que se obtenha um estado de tensão de corte puro é necessário que os dois cilindros estejam perfeitamente alinhados. A maior dificuldade nos ensaios de adesivos de baixa espessura é a medição dos pequenos deslocamentos que terá de ser efetuada com elevada precisão [17]. Considerando M_t o momento torsor aplicado no provete, r_i e r_o os raios interior e exterior dos substratos e w a espessura da camada adesiva, τ a uma dada distância r do eixo em que é aplicado M_t é calculada pela seguinte equação [2]:

$$\tau = \frac{2M_t \times r}{\pi \times (r_o^4 - r_i^4)} \quad (2.5)$$

e o módulo de corte G :

$$G = \frac{2t}{\pi \times (r_o^4 - r_i^4)} \times \left(\frac{M_t}{\phi} \right), \quad (2.6)$$

em que ϕ representa o ângulo de rotação medido. Em alternativa, G é dado por:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}, \quad (2.7)$$

em que γ é calculado pela razão:

$$\gamma = \frac{v_m - v_t}{w}. \quad (2.8)$$

v_m é o deslocamento total medido no provete (igual ao deslocamento no adesivo, v_a , mais o deslocamento nos aderentes, v_t , como ilustra a Figura 33).

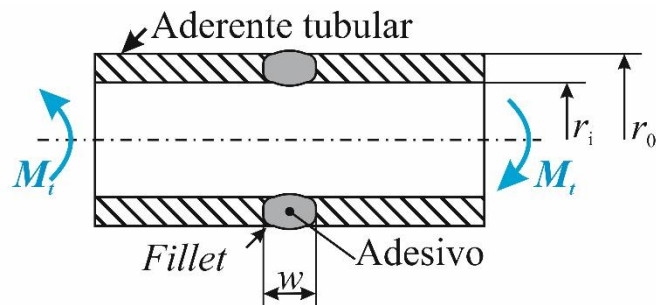


Figura 32 - Geometria e ensaio do provete *Napkin ring test*.

Das metodologias para a obtenção de propriedades ao corte enumeradas anteriormente, o ensaio TAST é dos mais utilizados. Neste ensaio utiliza-se uma pequena camada de adesivo numa junta formada por dois substratos de aço (ver Figura 34). Este ensaio irá ser explicado com mais detalhe na secção seguinte.

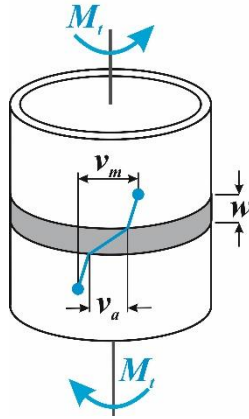


Figura 33 - Deslocamentos medidos na superfície dos cilindros. Adaptado de [2].

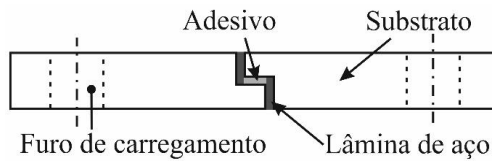


Figura 34 - Geometria de um provete TAST.

Na Figura 35 é possível comparar as curvas τ - γ de um adesivo “Huntsman AV119” [17] em várias metodologias de ensaios ao corte.

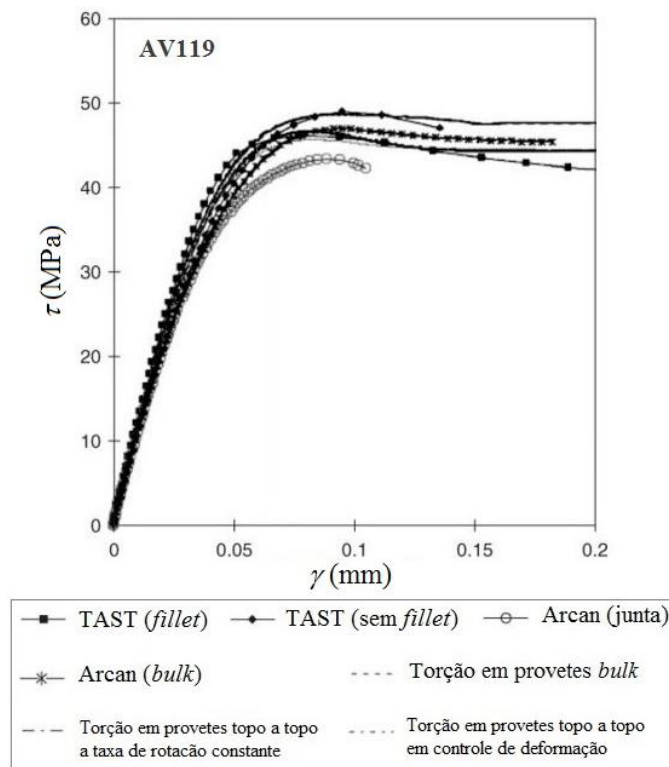


Figura 35 - Comparação entre alguns ensaios de corte. Adaptado de [17].

2.3.2.2 Ensaio Thick Adherend Shear Test

Como referido anteriormente, o ensaio TAST é dos ensaios mais utilizados para a obtenção das propriedades do adesivo ao corte. Este ensaio é realizado numa máquina universal de ensaios mecânicos (com montagem apropriada) e com a junta de dimensões da Figura 36. Os substratos são de aço devido à sua elevada rigidez, contribuindo assim para um estado de tensão no adesivo praticamente de corte puro [1]. Para contribuir para esta condição, também a geometria do provete é essencial, pois quanto menor for o comprimento da ligação e maior a espessura dos substratos, menor é a probabilidade de arrancamento nas extremidades da junta [1].

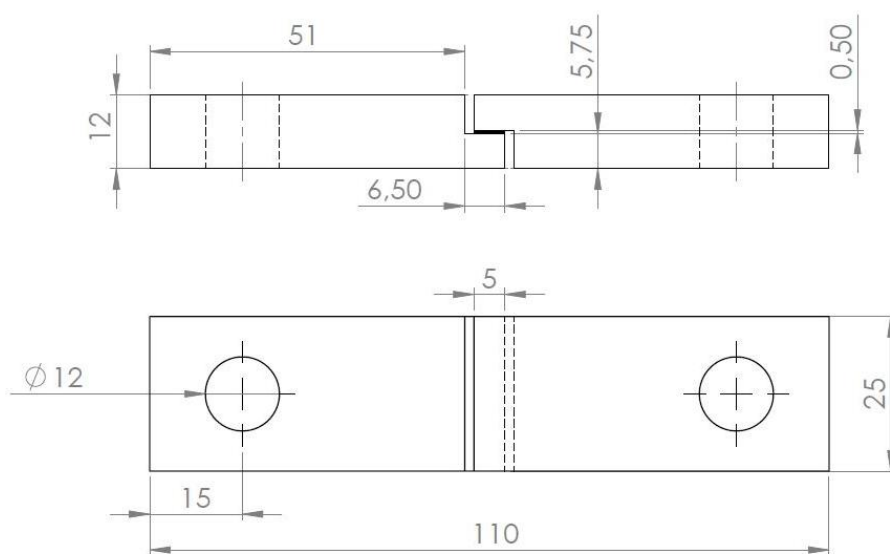


Figura 36 - Provete TAST (dimensões em mm) segundo a norma ISO 11003-2. Adaptado de [17].

A deformação da junta adesiva pode ser medida com um extensómetro baseado num LVDT (*Linear Variable Differential Transformers*) com parte móvel dentro de uma moldura rígida unido por molas (Figura 40) ou então através de um sistema ótico. A determinação da deformação de corte real do adesivo requer correções analíticas das deformações medidas pelo extensómetro, tendo em conta as deformações do substrato. Um destes métodos baseia-se na teoria da elasticidade para descontar as deformações de corte dos substratos. A extensometria ótica baseada na correlação de imagem é uma solução que permite evitar danos de contacto e pode ser utilizada até à rotura da junta [27]. O deslocamento relativo dos aderentes é medido usando um transdutor situado na zona central das amostras. A força e o deslocamento são medidos a partir do início da implementação da carga até à rotura da ligação. As tensões de corte são calculadas a partir de dimensões da zona colada [27].

Com o ensaio TAST conseguem-se as seguintes vantagens: o estado de tensões é relativamente uniforme ao longo da ligação adesiva, baixo custo e simplicidade, reutilização dos substratos

metálicos, possibilidade da determinação do módulo de corte e da tensão de corte e adequabilidade para ensaios em diferentes condições ambientais. Apesar de ser das técnicas mais simples e mais fiáveis a utilizar para a obtenção das propriedades ao corte do adesivo, existem algumas limitações inerentes a este tipo de teste, tais como: necessidade de extensómetros complexos/dispêndiosos e também a concentração de tensão nos bordos da ligação [2, 28].

As principais propriedades obtidas neste ensaio são [24]:

- A tensão de corte em função da curva de tensão de corte até a rotura do adesivo (τ_r);
- O módulo de corte do adesivo (G);
- Outras propriedades podem ser obtidas a partir da curva de τ - γ , tal como o módulo secante e a deformação de máxima de corte (γ_r).

No caso de um material ser isotrópico, poderá ser feita ainda uma relação entre as propriedades obtidas à tração em provetes *bulk* com as propriedades obtidas ao corte pelo ensaio TAST. Assim, a relação entre E e G é dada por [19]:

$$G = \frac{E}{2 \times (1 + \nu)}, \quad (2.9)$$

onde ν é o coeficiente de Poisson do material (neste caso do adesivo). Se as propriedades E e G forem determinadas através dos dois ensaios referidos anteriormente, os valores de ν para a maior parte dos adesivos existentes são intervalados entre os 0,3 e os 0,5 [19].

2.3.2.3 Procedimento de ensaio de provetes TAST

Os procedimentos e provetes do ensaio TAST estão devidamente descritos nas normas ISO 11003-2 e ASTM D695. Um dos aspetos mais importantes a ter em conta é o *setup* de forma a obter resultados isentos de esforços não desejados. Poderão ser utilizadas ferramentas de fixação como amarras ou *gabarits*, desde que sejam adaptáveis a uma máquina de ensaios. A Figura 37 ilustra um exemplo de fixação. São necessárias peças de fixação com medidas rigorosas adaptáveis ao provete TAST e pinos de ligação de modo a acoplar o conjunto. Este tipo de fixação permite eliminar, teoricamente, os momentos fletores induzidos no provete.

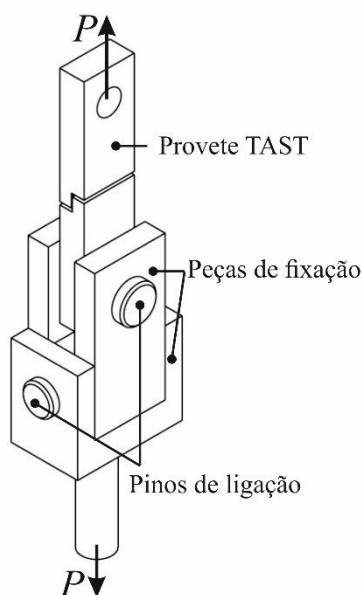


Figura 37 - Fixação para o ensaio TAST.

Tal como no ensaio à tração, o ensaio TAST consiste em solicitar de forma contínua e crescente com força trativa uniaxial (direção longitudinal do provete). Posteriormente obtém-se através do *software* da máquina a curva τ - γ (Figura 39). Desta forma é importante garantir que a camada adesiva está sujeita a esforços de corte e não de tração. Para tal, durante o fabrico dos provetes é importante garantir que o adesivo apenas se restringe a uma dada área dos substratos. Para isso utilizam-se lâminas de aço, como ilustrado na Figura 38.

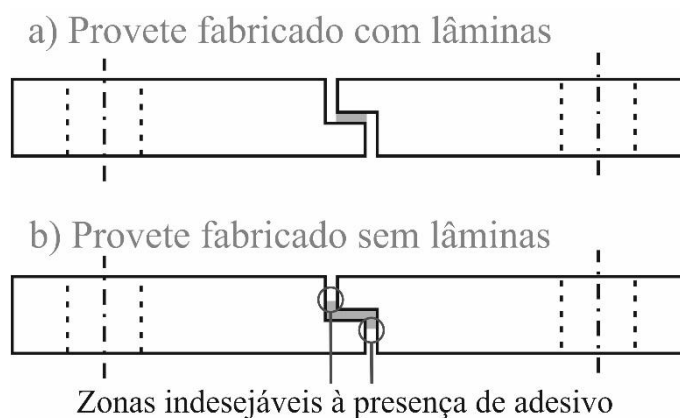


Figura 38 - Diferença entre provetes TAST fabricados com e sem lâminas.

A velocidade de ensaio indicada na norma ISO 11003-2 é de $0,5 \text{ mm min}^{-1}$. No entanto, a taxa de deslocamento das amarras constante irá incutir uma aceleração da taxa de deformação, o que poderá influenciar as propriedades do adesivo. Esta característica é comum aos ensaios que utilizam juntas adesivas como corpo de prova, ao contrário do que se verifica em ensaios de provetes maciços, onde

a taxa de deformação é mais constante para uma dada taxa de deslocamento das amarras [17]. De forma a se obter uma velocidade de deformação constante no adesivo, a velocidade das amarras pode eventualmente ser controlada com recurso a medições do deslocamento do adesivo [19].

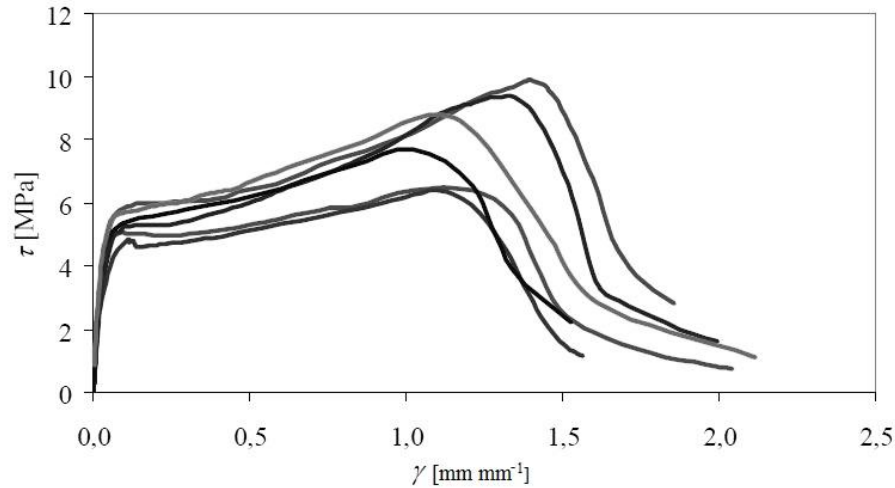


Figura 39 - Curvas τ - γ de provetes TAST com adesivo 3M-DP 8005[®] por extensometria resistiva. Adaptado de [1].

Admitindo que os aderentes possuem grande rigidez, a junta adesiva sofre uma deformação de tal forma reduzida que são necessárias correções analíticas, a fim de poder determinar a deformação de corte real do adesivo. Assim é importante o uso de um extensómetro para a obtenção dos valores do deslocamento longitudinal do provete [2, 20]. Como referido anteriormente, o ensaio pode ser caracterizado pela extensometria baseada em LVDT, com parte móvel dentro de uma moldura rígida unida por molas. O provete deverá ter três furos (representados por “1” na Figura 40) na zona central para o posicionamento do transdutor, como ilustra a Figura 40 [1, 2]. O movimento relativo realizado é função do deslocamento entre os dois pinos colocados nos furos de carregamento de cada substrato. Este método obriga a correções posteriores dos dados para a determinação das deformações. Uma maneira de superar este problema consiste em utilizar um método de medição que avalie apenas a deformação do adesivo e que simultaneamente seja de fácil colocação. A utilização de extensometria ótica baseada na correlação de imagem é uma boa solução para ultrapassar os problemas referidos [1].

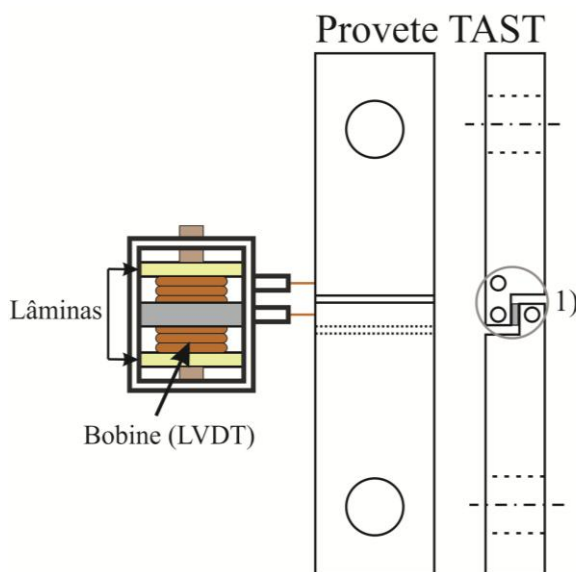


Figura 40 - Extensômetro com bobine LVDT.

No caso de existirem desalinhamentos dos substratos, estes introduzem deformações provenientes da flexão dos aderentes, o que provoca erros grosseiros nas medições. Desta forma, é aconselhável a utilização de dois extensômetros, ligados em faces opostas do provete. Neste caso, qualquer flexão da amostra será evidente a partir das leituras de deslocamentos divergentes. Segundo a norma ISO 11003-2, a correção deve ser efetuada considerando a deformação de corte num provete compensador (também conhecido por *dummy*), constituído apenas pelo material do aderente. Estudos já realizados demonstram que a distribuição da tensão de corte no provete não é uniforme. Assim sendo, a correção por este processo não é totalmente fiável [19]. Segundo um estudo de Vaughn [29] a correção pode ser conseguida assumindo que os substratos apenas apresentam corte puro. Um extensômetro resistivo atravessará a espessura do provete e, por sua vez, a zona de ligação. Assim, pode-se isolar o deslocamento do adesivo no ensaio TAST (d_{adesivo}). Nestas condições, de acordo com a Figura 41, verifica-se que [2, 17]:

$$d_{\text{adesivo}} = d_{\text{transdutor}} - 2d_{\text{substrato}} \quad (2.10)$$

$$2d_{\text{substrato}} = \frac{2t_{\text{substrato}} \times P}{G_{\text{substrato}} \times l \times b} \quad (2.11)$$

$$2t_{\text{substrato}} = 3,8 - t_{\text{adesivo}}, \quad (2.12)$$

Resultados obtidos pelo Método de 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 toma a distribuição da tensão de corte [2].

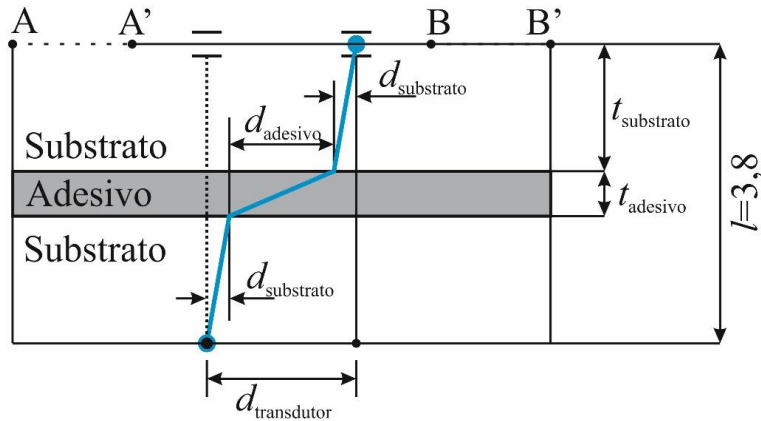


Figura 41 - Medição dos deslocamentos no ensaio TAST. l = Distância entre pinos do transdutor (mm). Adaptado de [2].

2.3.3 Caracterização das propriedades de fratura à tração

No âmbito 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 [30]. Segundo Irwin, Kies e Westergaard [31], o crescimento da fenda pode desenvolver-se sob três modos distintos, como mostra a Figura 42.

O modo I representa o modo de tração (abertura), enquanto os modos II e III são os modos de corte. Em muitos casos, mais propriamente em estruturas, a carga aplicada cria uma combinação de modos no crescimento da fenda, o que implica a utilização de critérios de modo misto para simular a propagação do dano [32, 33].

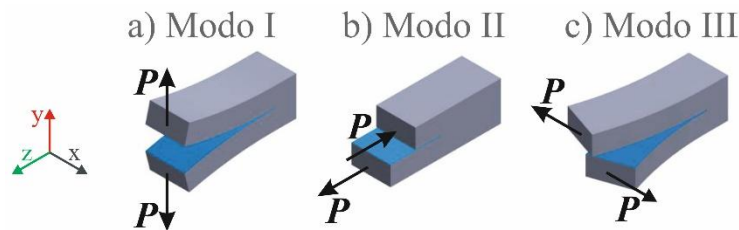


Figura 42 - Modos de rotura em juntas adesivas.

A maioria dos trabalhos já realizados sobre caracterização à fratura em modo puro I utiliza o ensaio *Double-Cantilever Beam* (DCB) [34-39]. Para os restantes modos de sollicitação existem outros métodos de ensaio. Em modo puro II o ensaio mais difundido é o *End-Notched Flexure* (ENF). Já em modo puro III, o teste *Edge-Crack Torsion* (ECT) é uma das opções disponíveis [40, 41].

2.3.3.1 Tipos de ensaio

Diversos autores abordaram recentemente o tema da determinação da taxa crítica de libertação de energia em modo puro I (G_{Ic}) de camadas finas de adesivo em juntas coladas. Como referido anteriormente, a caracterização à fratura em modo puro I utiliza o ensaio DCB [34-39]. O ensaio é realizado com recurso a provetes constituídos por duas vigas de igual comprimento e espessura constante, sendo o adesivo colocado ente os mesmos promovendo a sua adesão, como demonstrado na Figura 43 [20].

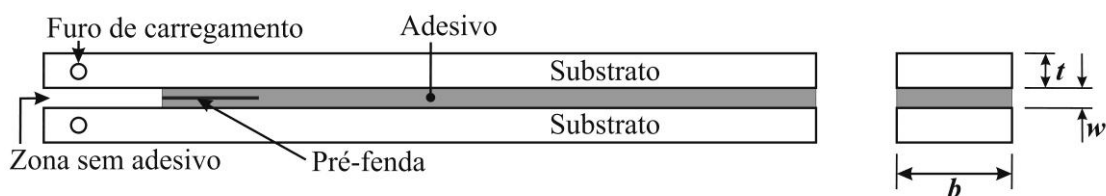


Figura 43 - Provette DCB de acordo com a norma ASTM D3433.

Também intrínseco a este modo de sollicitação está disponível o ensaio *Tapered Double-Cantilever Beam* (TDCB) ou *Contoured Double-Cantilever Beam* (CDCB). Ambos os ensaios referidos utilizam aderentes de materiais metálicos, compósitos ou outros com rigidez suficiente, como por exemplo a madeira [17]. Os provetes DCB são simples de elaborar e geralmente são a primeira escolha para caracterizar as propriedades de fratura à tração dos adesivos.

Os provetes TDCB são mais complexos e de custo mais elevado mas têm a vantagem de apresentar uma variação da espessura que promove uma evolução linear da flexibilidade com comprimento de fenda, o que possibilita a derivação de expressões para calcular a taxa crítica de libertação, G_{Ic} , que não dependem do comprimento de fenda [2, 17]. A maior desvantagem associada a este ensaio está relacionada com o fabrico dos provetes, que é mais complicado relativamente aos DCB, sobretudo para substratos de materiais compósitos [2]. A norma ASTM D3433-99 prevê a geometria ilustrada na Figura 44-a [2].

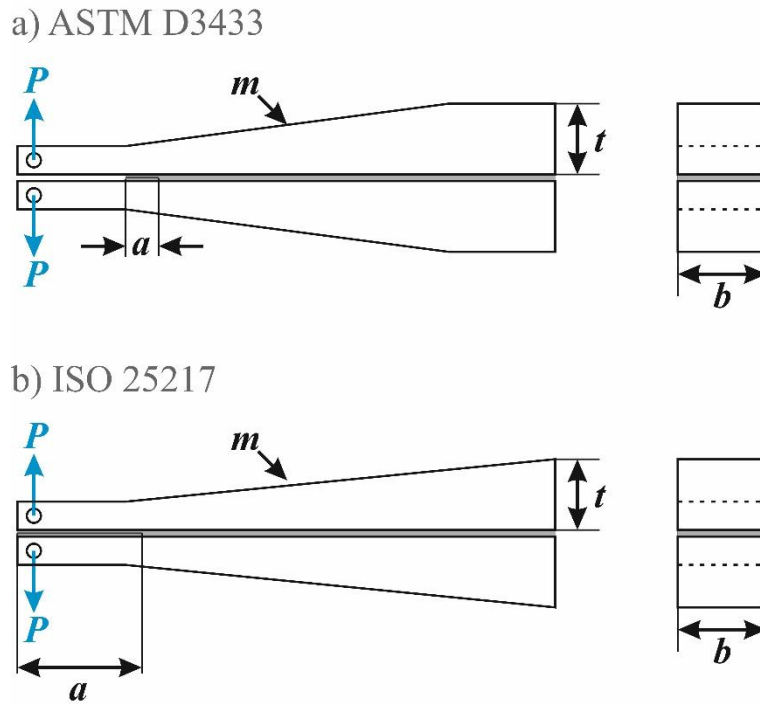


Figura 44 - Provete TDCB de acordo com as normas ASTM (a) e ISO (b).

Neste caso, G_{Ic} é dado por [2, 17]:

$$G_{Ic} = \frac{4P^2 \times m}{E \times b^2}, \text{com} \quad (2.13)$$

$$m = \frac{3a^2}{t^3} + t^{-1}, \quad (2.14)$$

sendo m uma constante que define a relação entre t e o comprimento de fenda a [2, 17, 19].

Em alternativa existe uma configuração possível dada pela norma ISO 25217 ilustrada na Figura 44-b. Neste tipo de geometria os valores de G_{Ic} podem ser determinados de três modos diferentes: pelo método SBT (*Simple Beam Theory*) – equação (2.15), CBT (*Corrected Beam Theory*) – equação (2.16) e ainda pelo ECM (*Experimental Compliance Method*) – equação (2.17) [17].

$$G_{Ic} = \frac{4P^2 \times m}{E \times b^2} \quad (2.15)$$

$$G_{Ic} = \frac{4P^2 \times m}{E \times b^2} \times \left[1 + 0,43 \times \left(\frac{3}{m \times a} \right)^{\frac{1}{3}} \right] \quad (2.16)$$

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} \times \frac{dC}{da} \quad (2.17)$$

A Figura 45 apresenta as curvas $G_{Ic}-a$ obtidas durante o ensaio TDCB com recurso a juntas de aderentes de alumínio e adesivo epóxico. É notável a semelhança de resultados obtidos entre CBT e ECM. Por outro lado, os valores segundo o método SBT são distintos e inferiores aos outros dois métodos, considerados mais eficazes [17].

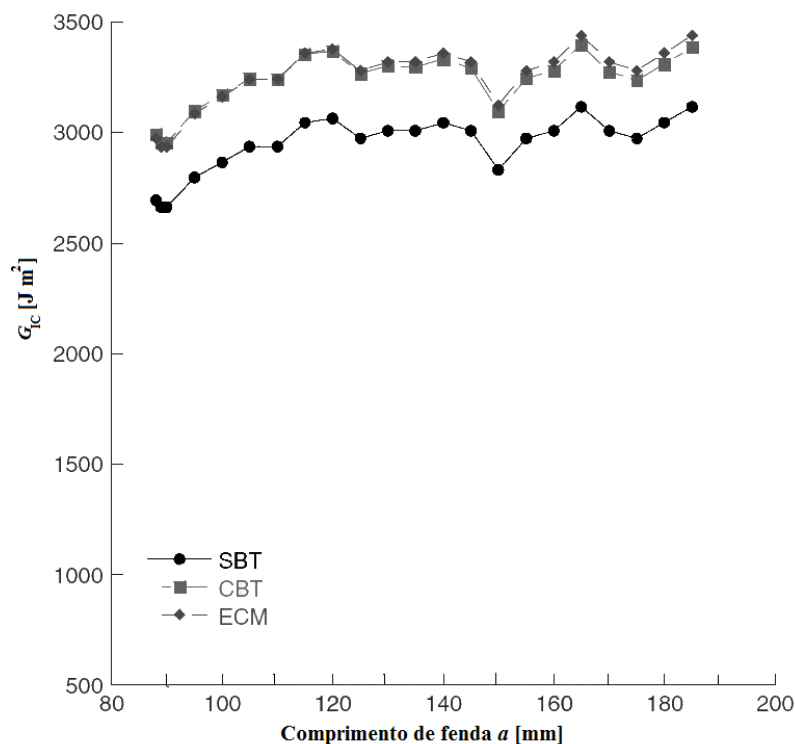


Figura 45 - Curvas $G_{Ic}-a$ obtidas num ensaio TDCB (juntas de aderentes de alumínio e adesivo epóxico) com valores deduzidos pelas três técnicas [17].

2.3.3.2 Ensaio Double-Cantilever Beam

Como referido anteriormente, o ensaio DCB é universalmente aceite para a caracterização da fratura em modo I [42]. As principais vantagens deste ensaio incluem a sua simplicidade e a possibilidade de obter G_{Ic} matematicamente usando a Teoria das Vigas [43]. Por outro lado, para medir G_{Ic} de forma rigorosa, alguns aspetos devem ser considerados. Um problema associado a este ensaio é a possibilidade de propagação instável da fenda, o que vai dificultar a medição do seu comprimento durante o ensaio [1, 35, 36]. Dependendo do adesivo utilizado e mesmo utilizando técnicas de ampliação e camadas de vernizes frágeis para facilitar a visualização (ver Figura 46), a ponta da fenda pode não ser claramente visível. Estes aspetos podem induzir erros significativos para cálculos posteriores [1].



Figura 46 - Propagação da fenda num provete DCB.

Segundo as diretrizes da norma ASTM D3433, os provetes utilizados no ensaio DCB (Figura 47) são constituídos por dois substratos de igual comprimento (L), t e b constantes. O adesivo vai unir os dois substratos, sendo considerado o comprimento de fenda inicial a_0 desde a zona onde é aplicada a solicitação até à extremidade da pré fenda presente no adesivo [42]. A norma ISO 25217 prevê a utilização de outros provetes com configuração diferente na zona de carregamento (Figura 48) [17].

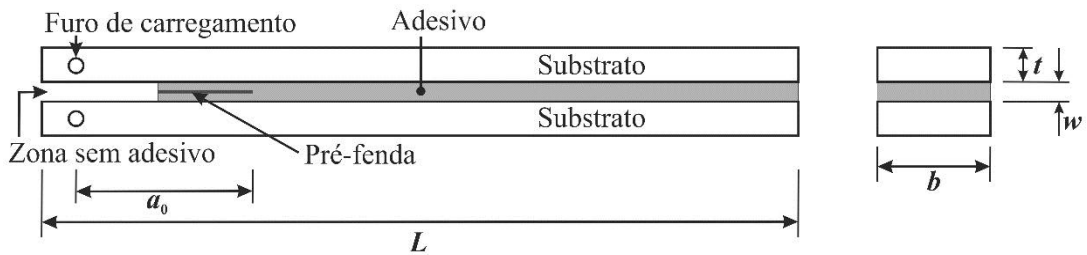


Figura 47 - Geometria de um provete DCB segundo a norma ASTM D3433.

A norma americana ASTM D3433 prevê o cálculo de G_{Ic} (em $N\ mm^{-1}$) pela seguinte expressão [17]:

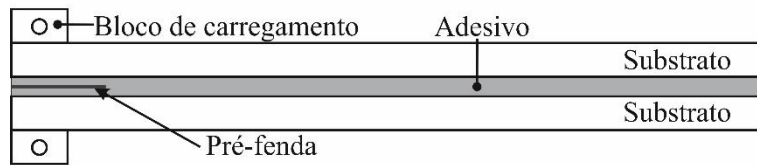
$$G_{Ic} = \frac{(4P_{max}^2) \times (3a^2 + t^2)}{E \times b^2 \times t^3}, \quad (2.18)$$

onde:

P_{max} = Carga para início de propagação da fenda ou carga máxima;

a = Distância entre eixo dos pinos que efetuam a aplicação da carga e a posição estacionária da fenda.

a) DCB com blocos de carregamento



b) DCB com dobradiças

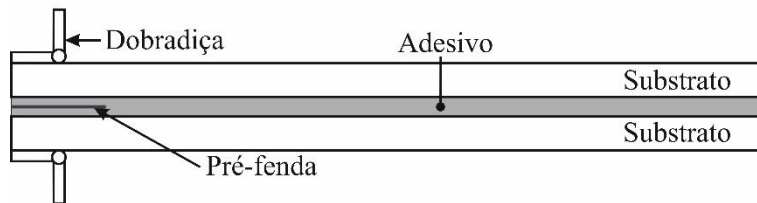


Figura 48 - Provetes DCB com blocos de carregamento (a) e dobradiças (b).

Como os substratos são metálicos, uniformes e simétricos, para que não ocorra plastificação durante o ensaio e também para que os resultados não sejam influenciados, a norma ASTM D3433 define que a espessura mínima t_{\min} é dada pela equação:

$$t_{\min} = \sqrt{\frac{6T_{\max} \times a}{b \times \sigma_y}}, \quad (2.19)$$

sendo T_{\max} a carga máxima de início da propagação da fenda majorada em 150%.

2.3.3.3 Procedimento de ensaio de provetes DCB

O ensaio DCB pode ser realizado numa máquina de ensaios universal desde que tenha amarras ou *gabarits* adequados, como ilustra a Figura 49. Os valores típicos de carga máxima durante o ensaio variam dos 100 aos 5000 N [17]. O deslocamento das amarras da máquina de ensaio é realizado a uma velocidade constante entre os 0,1 e 5 mm min⁻¹ até ocorrer rotura do provete [17, 19]. Os substratos poderão sofrer deformação plástica, pelo que os valores de G_{Ic} irão ser comprometidos e posteriormente originar valores não representativos de G_{Ic} do adesivo [19].

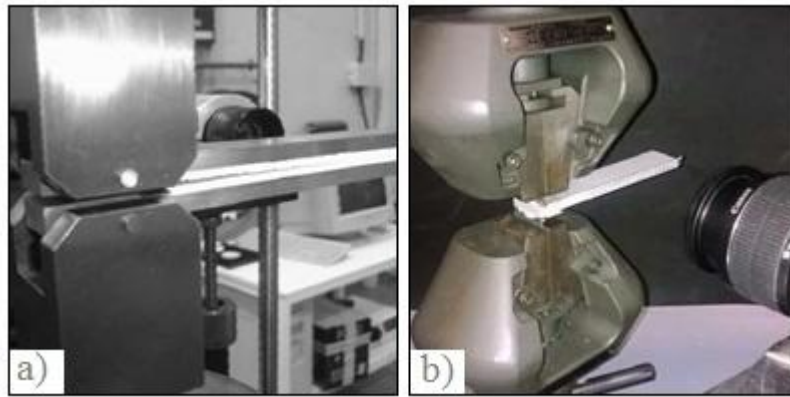


Figura 49 - *Setup* ensaio DCB. Substratos com furos de carregamento (a) [1] e substratos com dobradiças (b) [20].

Durante o ensaio é registada P e o deslocamento δ (resultando assim uma curva do tipo da Figura 50), sendo também medido a . Para as análises que necessitam da medição do valor de a , deve-se gravar imagens com um intervalo pré-estabelecido (5 s por exemplo) que demonstrem a progressão da mesma [19, 32].

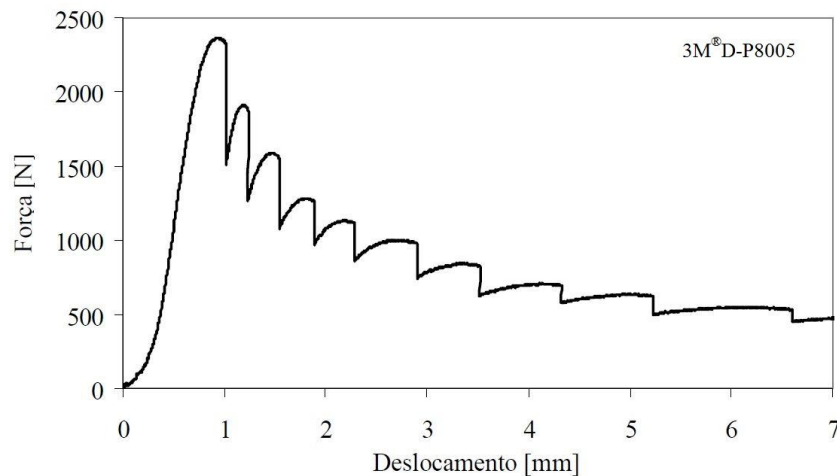


Figura 50 - Curva P - δ de um ensaio DCB (substratos de aço CK 45 e adesivo 3M®D-P8005) [1].

Como referido anteriormente, é necessário revestir a face lateral do provete com uma camada frágil de verniz, como por exemplo uma película de tinta corretora para melhor visualização da extremidade da fenda. É ainda colada uma escala milimétrica nos aderentes para auxiliar à medição da posição da fenda em cada fase do ensaio [1]. As imagens obtidas do ensaio 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 - δ (o tempo de ensaio de cada ponto da curva é definido com precisão pelo deslocamento absoluto e a velocidade de ensaio estabelecida) [32]. A Figura 52 apresenta uma imagem captada durante o ensaio, permitindo a medição de a .

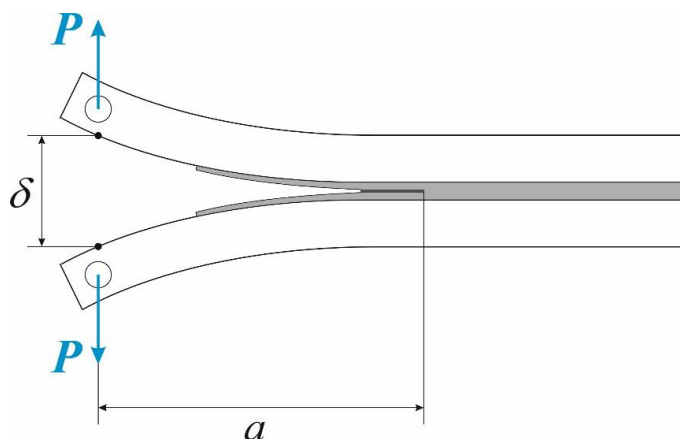


Figura 51 - Esquema de ensaio DCB.

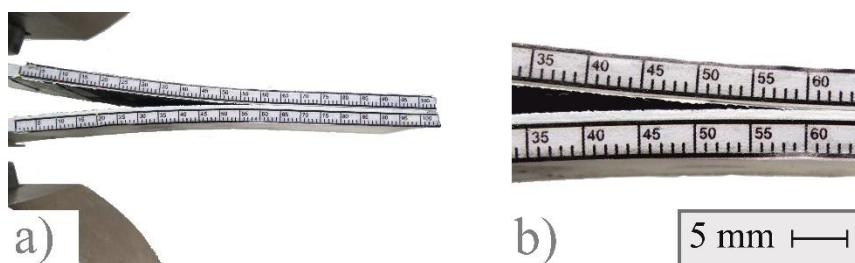


Figura 52 - Fotografia captada durante um ensaio DCB (a) e pormenor da fotografia para avaliar a propagação da fenda (b).

2.3.3.4 Métodos de redução para G_{Ic}

2.3.3.4.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

De modo a determinar o valor de G_{Ic} existem vários métodos possíveis que necessitam a medição do comprimento de fenda dos quais se destacam: o CCM (*Compliance Calibration Method*), DBT (*Direct Beam Theory*) e ainda o CBT.

Do ensaio DCB são retiradas grandezas básicas como P , a e ainda δ dos pontos de aplicação da carga. A partir dessas grandezas, pelo método CCM determina-se a taxa de libertação de energia recorrendo à equação de Irwin-Kies [42, 44]:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} \times \frac{dC}{da}, \quad (2.20)$$

onde a flexibilidade C é a razão entre δ e P . Podem ser utilizados polinómios de terceiro grau para ajustar as curvas da flexibilidade $C = f(a)$ [42]:

$$C = C_3 a^3 + C_2 a^2 + C_1 a + C_0. \quad (2.21)$$

No caso de se recorrer à equação (2.21), G_{Ic} é dado por [42]:

$$G_{Ic} = \frac{P^2}{2b} \times (3C_3 a^2 + 2C_2 a + C_1). \quad (2.22)$$

Em alternativa pode-se utilizar a Teoria das Vigas direta ou DBT que, baseada na teoria das vigas elementar, origina [32]:

$$G_{Ic} = \frac{12a^2 \times P^2}{b^2 \times t^3 \times E_x}, \quad (2.23)$$

em que E_x representa o módulo de elasticidade dos aderentes na direção longitudinal.

Existe ainda o método CBT no qual G_{Ic} é obtido através da equação [42]:

$$G_{Ic} = \frac{3P \times \delta}{2b \times (a + |\Delta|)}. \quad (2.24)$$

Δ é um fator de correção que contabiliza a rotação dos aderentes na extremidade da fenda, que se determina a partir da regressão linear $C^{1/3} = f(a)$. A regressão linear pode ser obtida através de ensaios experimentais de três provetes (Figura 53), com valores de a_0 distintos [33, 44].

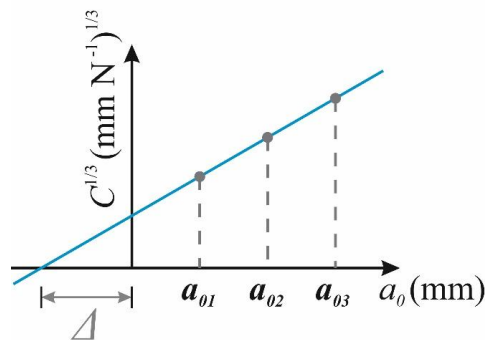


Figura 53 - Determinação da correção Δ na equação (2.24).

Uma alternativa a contabilizar os efeitos de rotação dos aderentes na extremidade da fenda passa pela utilização de um parâmetro Δ_1 dado por [33]:

$$\Delta_1 = t \times \sqrt{\frac{E}{11G} \times \left[3 - 2 \times \left(\frac{\Gamma}{1+\Gamma} \right)^2 \right]}, \quad (2.25)$$

em que:

$$\Gamma = 1,18 \times \frac{E}{G}. \quad (2.26)$$

O parâmetro Δ_1 pode ser usado na equação (2.24) substituindo o parâmetro Δ [44].

2.3.3.4.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

No método CBBM (*Compliance-Based Beam Method*), deve-se considerar um comprimento de fenda equivalente a_{eq} , durante a propagação da fenda de modo a se obter o G_{Ic} . Em adesivos com alguma ductilidade é necessário considerar o efeito da Zona de Processo da Fratura (ZPF). A ZPF é a região do material danificado por processos inelásticos, tais como a microfissuração, microdeformação plástica, entre outros, e localiza-se na extremidade da fenda, como demonstrado na Figura 54 [20, 42].

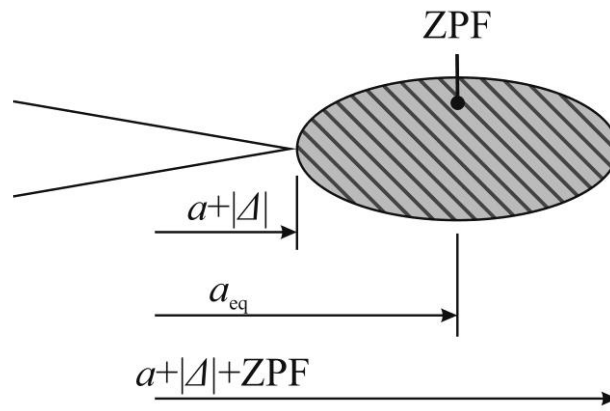


Figura 54 - Representação esquemática da FPZ e do conceito de a_{eq} .

A ZPF torna-se maior em adesivos dúcteis. O valor de a_{eq} pode ser obtido utilizando a equação (2.27) como função da equação (2.28) (*Teorema de Castigliano*), substituindo a por a_{eq} [42].

$$a_{eq} = a + |\Delta| + \Delta_{aZPF} \quad (2.27)$$

$$\delta = \frac{\partial U}{\partial P} = \frac{8P \times a^3}{E \times b \times t^3} + \frac{12P \times a}{5b \times t \times G}. \quad (2.28)$$

Assume-se que:

$$U = 2 \times \left[\int_0^a \frac{M_f}{2E \times I} dx + \int_0^a \int_{-\frac{t}{2}}^{\frac{t}{2}} \frac{\tau^2}{2G} \times b dz dx \right], \quad (2.29)$$

e ainda que:

$$\tau = \frac{3}{2} \times \frac{V}{b \times t} \times \left(1 - \frac{y^2}{c^2} \right), \quad (2.30)$$

onde U representa a energia de deformação devido à flexão e ao corte dos dois braços do provete. Os parâmetros c e V são, respetivamente, metade da espessura e a carga transversal em cada braço e finalmente I é o momento estático de segunda ordem da viga, dado por [20, 42]:

$$I = \frac{b \times t^3}{12}. \quad (2.31)$$

Neste método considera-se ainda um módulo de flexão equivalente E_f que pode ser obtido através da equação (2.28), usando uma flexibilidade inicial C_0 [42]:

$$E_f = \left(C_0 - \frac{12 \times (a_0 + |\Delta|)}{5b \times t \times G} \right)^{-1} \times \frac{8 \times (a_0 + |\Delta|)}{b \times t^3} \quad (2.32)$$

G_{lc} é obtido pela seguinte equação, tomando por base a equação (2.20) [42]:

$$G_{lc} = \frac{6P^2}{b^2 \times t} \times \left(\frac{2a_e^2}{t^2 \times E_f} + \frac{1}{5G} \right). \quad (2.33)$$

2.3.3.4.3 Métodos baseados no integral-J

No caso de os materiais se deformarem plasticamente, a análise efetuada pelo conceito da Mecânica da Fratura Linear Elástica (MFLE) não é válida. Nestes casos utiliza-se o método do Integral J [45].

Face às dificuldades surgidas na caracterização da zona deformada em torno da extremidade de uma fenda, e como não se conseguia formular um parâmetro que definisse completamente esta situação, Rice no ano de 1968 [46] introduziu o integral J para investigação da propagação de fendas em materiais dúcteis. Trata-se de um integral de linha em torno da ponta da fenda, invariante para qualquer percurso utilizado desde que se inicie na face inferior e termine na face superior da fenda, como ilustrado na Figura 55 [44].

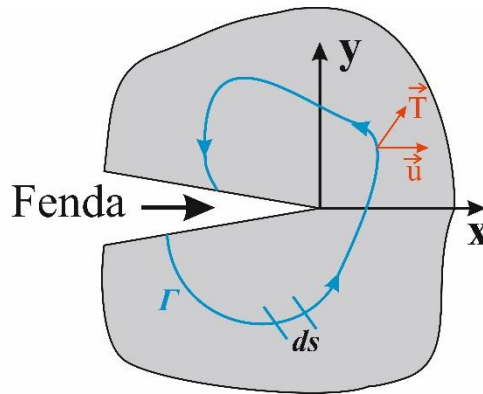


Figura 55 - Contorno arbitrário em torno da ponta da fenda.

Rice, considerando o princípio de conservação de energia, demonstrou que o integral J se define pela seguinte expressão [46]:

$$J = \int_{\Gamma} \left[W dy - T \frac{du}{dx} ds \right], \quad (2.34)$$

assumindo W como a densidade da energia de deformação, T o vetor de tração normal atuando no sentido exterior ao contorno, u o vetor de deslocamento, ds o incremento de comprimento ao longo do contorno e finalmente Γ o contorno escolhido em torno da ponta da fenda, com início na face inferior e fim na face superior da fenda.

Tendo como pressuposto a existência de uma lei coesiva para camadas do adesivo, a lei coesiva é independente das partes ligadas, refletindo as propriedades do adesivo, podendo o integral J ser calculado ao longo dum caminho arbitrário que contorna a fenda [47]. Em trabalho realizado com base na equação (2.34) definida por Rice [46], Ji et al. [48] chegaram à seguinte expressão para determinar o valor de G_{Ic} :

$$G_{Ic} = \int_0^{\delta_n^f} t_n(\delta_n) d\delta_n. \quad (2.35)$$

Considerando δ_n e δ_n^f como a abertura da fenda atual e de rotura, respetivamente, medidas em a_0 , e ainda t_n como a tensão normal de tração aplicada.

Aplicado ao ensaio DCB, o Integral J é baseado no conceito do balanço energético e na Teoria das Vigas, e G_I é calculado pela seguinte expressão [45]:

$$G_I = 12 \times \frac{(P_u \times a)^2}{E \times t^3} + P_u \times \theta_0 \quad (2.36)$$

ou

$$G_I = P_u \times \theta_p, \quad (2.37)$$

onde P_u representa a carga aplicada por unidade de largura nas extremidades dos aderentes, θ_0 a rotação relativa dos aderentes na ponta da fenda e θ_p a rotação relativa dos aderentes na linha de carregamento [20]. Desta forma, o procedimento do ensaio consiste em medir os valores de P_u , a , δ_n e θ_0 . Respeitante ao cálculo de G_{Ic} , tem-se em conta o valor de patamar da curva G_I - δ_n [44].

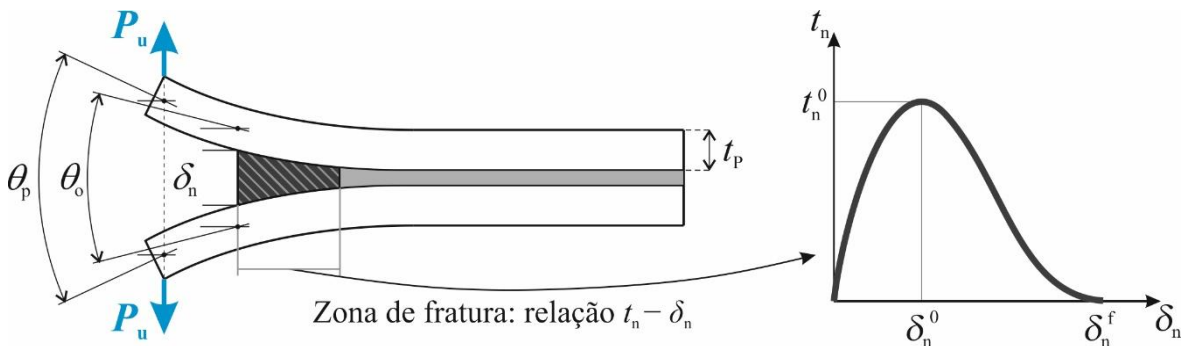


Figura 56 - Representação esquemática da zona de fratura e relação gráfica t_n - δ_n .

Ainda de referir que este método 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 coesivo [45].

2.3.4 Caraterização das propriedades de fratura ao corte

2.3.4.1 Tipos de ensaio

No contexto de caraterização à fratura em modo puro II para obtenção da determinação da taxa crítica de libertação de energia (G_{IIc}) destacam-se os ensaios ENF, *Four-Point End-Notched Flexure* (4ENF)

e *End-Loaded Split* (ELS) [2, 17]. A norma JIS K 7086 consiste na caracterização à fratura de adesivos em modo II, apesar de não ser consensual [49]. Grande parte das normas e artigos existentes relativos a este tema baseia-se em ensaios geralmente utilizados para a caracterização da fratura interlaminar em materiais compósitos [50]. Trata-se de um modo deslizante ou de corte, onde as superfícies da fenda se deslocam uma sobre a outra no sentido perpendicular à frente da fenda.

Dos três tipos de ensaios referidos, o ENF é o mais utilizado, devido à sua simplicidade, para a caracterização de materiais à fratura em modo II. Em adesivos o provete (Figura 57) é constituído por dois braços de t constante colados entre si por um adesivo selecionado, sendo apoiado nas extremidades. A junta encontra-se assim apoiada em dois pontos e é submetida a um deslocamento vertical a meio vão, estando por isso sujeita a uma flexão em três pontos, o que causa um modo de corte no adesivo [33]. No capítulo seguinte procede-se a uma análise mais detalhada deste ensaio.

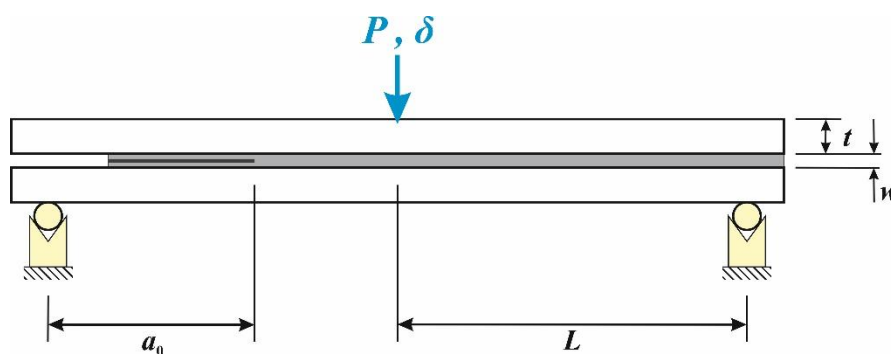


Figura 57 - Representação esquemática de um ensaio ENF.

O ensaio 4ENF tem por base o provete ENF, mas acaba por ter um equipamento mais sofisticado, através da adição de um ponto adicional de carregamento, tornando-se assim num ensaio de flexão em quatro pontos. Igualmente ao método ENF, o provete é constituído por dois substratos de igual comprimento e t constante colados entre si pelo adesivo de espessura w e dotado de uma pré-fenda. Existem alguns problemas de fricção na região da pré-fenda relacionados ao tipo de carregamento adotado [50]. Tal como no ensaio ENF, P é igualmente aplicada a meio vão, mas não diretamente sobre o provete, ficando a distribuição equitativa de esforços a cargo de dois cilindros de carga afastados da mesma distância do ponto onde a força é aplicada (Figura 58).

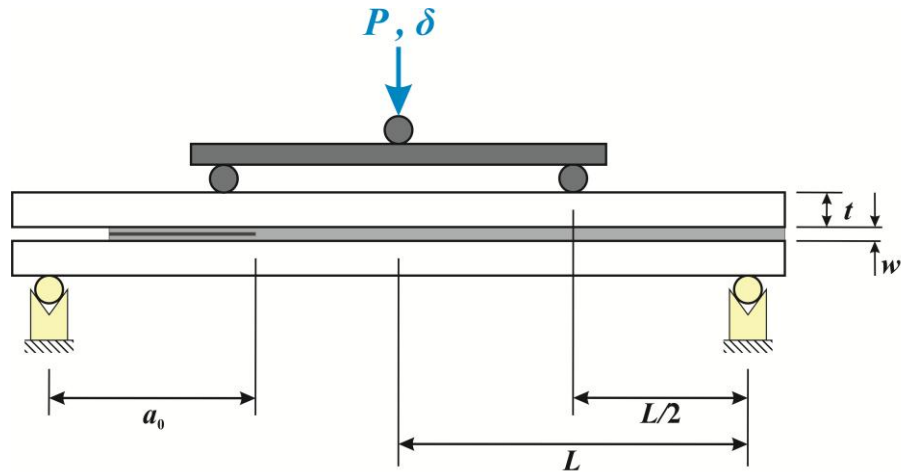


Figura 58 - Representação esquemática de um ensaio 4ENF.

Contrariamente aos ensaios ENF e 4ENF, o ensaio ELS consiste na sollicitação mediante um cilindro de carga na extremidade do provete, estando a outra extremidade encastrada. Requer por isso uma fixação mais elaborada, como ilustrado na Figura 59 [33].

Verifica-se que o provete é impedido de se deslocar na vertical, mas livre para se mover na horizontal. Como desvantagens dita-se a existência de grandes deslocamentos e a grande sensibilidade às condições de aperto do provete induzem algumas dificuldades na obtenção de valores corretos de G_{IIc} . Por outro lado, este método tem a vantagem de favorecer uma iniciação estável da fenda [2, 17, 50].

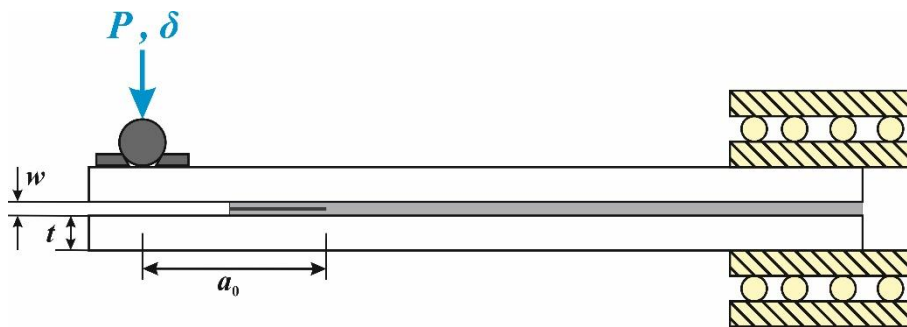


Figura 59 - Representação esquemática de um ensaio ELS.

2.3.4.2 Ensaio End-Notched Flexure

O ensaio ENF tem algumas semelhanças com o DCB, tais como requerer a existência de uma pré-fenda na camada adesiva e o problema associado à propagação instável da fenda. Neste ensaio aplica-se um deslocamento a meio vão do provete, resultando assim um modo de corte no adesivo. O corpo de prova apenas se encontra apoiado nas suas extremidades e, como tal, está isento de elementos de

ligação à máquina de ensaios como blocos de carga, furos de carregamento ou dobradiças como se verificava no ensaio DCB, sendo por isso, mais simples de fabricar [2, 20, 51].

Os aderentes neste tipo de ensaio atingem facilmente o regime plástico, devendo-se adequar o tipo de material utilizado ao adesivo selecionado. Deve então existir uma correta relação entre a espessura e a rigidez, para evitar a plastificação dos substratos [17], já que esta pode comprometer a determinação do valor de G_{IIc} , originando assim valores não correspondentes à realidade [19]. Dado que a fenda cresce sem abertura, irá existir a dificuldade de visualização clara da ponta da mesma, fator esse significativo para a obtenção de valores corretos, já que as técnicas de redução de dados clássicos geralmente necessitam da medição de a durante o ensaio [52]. Outra dificuldade inerente a este ensaio é a propagação instável da fenda. De modo que a propagação da fenda seja estável este ensaio requer a existência da seguinte relação entre L e a_0 para materiais compósitos [53]:

$$\frac{a_0}{L} > 0,7. \quad (2.38)$$

De notar que, caso a flexibilidade e/ou ductilidade do adesivo seja elevada, podem ocorrer problemas na medição da fenda durante o ensaio [2]. De facto, pode ocorrer um desfasamento entre a posição da extremidade da fenda e o estalar da tinta corretora, devido ao estalar da camada de tinta corretora antes da propagação real da fenda, o que faz com que o valor medido de a não corresponda à realidade. Com o tipo de solitação aplicada, a fenda propaga-se sem separação dos substratos. Tal como no ensaio DCB, neste método também são utilizadas técnicas de ampliação, camadas de vernizes frágeis e escalas milimétricas para facilitar a visualização da propagação da fenda. A Figura 60 apresenta uma imagem registada durante um ensaio, permitindo a medição de a .

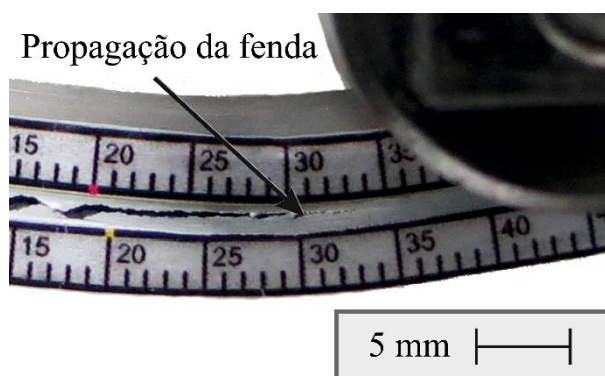


Figura 60 - Propagação na fenda num provete ENF.

Os provetes ENF são constituídos por dois substratos de igual L e t , e b constante. O adesivo de uma dada espessura é responsável pela adesão dos dois substratos. Considera-se ainda a existência de uma pré-fenda (ver Figura 61).



Figura 61 - Provete ENF.

2.3.4.3 Procedimento de ensaio de provetes ENF

Os provetes ENF podem ser testados em qualquer máquina de ensaios universal eletromecânica ou hidráulica que permita o registo da curva $P-\delta$. Neste ensaio é aplicado um deslocamento a taxa constante a meio vão do provete através de um cilindro de carga. Tanto o cilindro de carga como os de apoio do provete devem permitir uma rotação livre de modo a evitar os efeitos de fricção de contacto durante o ensaio [17]. Deve-se dispor de um suporte para apoiar o 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 último é de extrema importância para a correta realização do ensaio ENF, podendo comprometer a propagação da fenda, caso os paralelismos com a base não sejam assegurados.

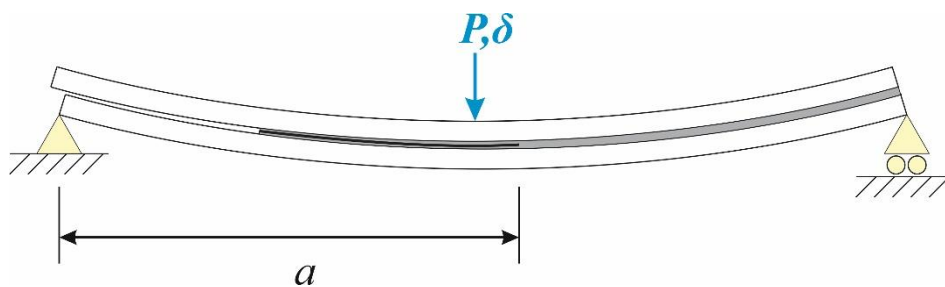


Figura 62 - Representação esquemática de um ensaio ENF.

A velocidade de ensaio deve ser adaptada à taxa de deformação de corte desejada para o adesivo, e deverá ser suficientemente pequena para permitir uma monotorização contínua da fenda. Visto que a propagação da fenda ocorre a um valor constante de G_{IIc} é sugerido que se construa a curva- R (relação de G_{II} com a) para a avaliação do valor de G_{IIc} [17]. A Figura 63 apresenta resultados experimentais de curvas- R para um dado ensaio de ENF de juntas adesivas.

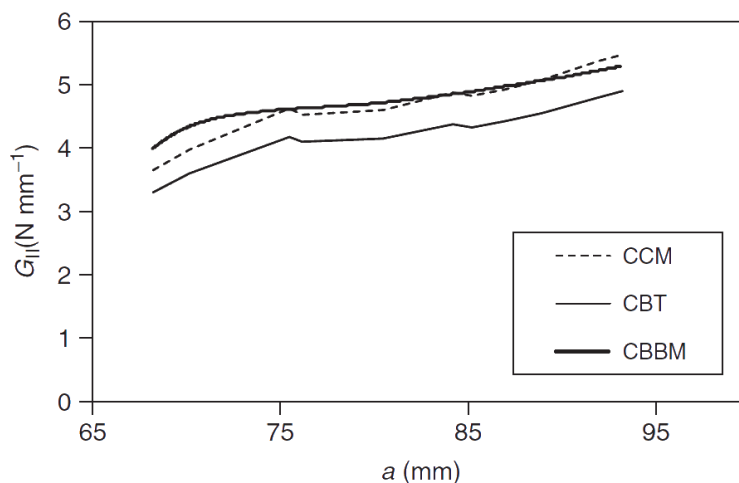


Figura 63 - Curvas- R de um ensaio ENF pelos diferentes métodos [40].

Também neste ensaio, para efeitos de análise de a , devem-se gravar imagens com intervalos constantes e reduzidos (por exemplo 5s), que demonstrem a progressão da fenda. As imagens obtidas servirão para correlacionar o tempo decorrido desde o início de cada ensaio e o avanço da fenda em relação ao seu ponto inicial. A Figura 64-a ilustra uma imagem captada durante o ensaio, permitindo a medição de a através da ampliação da zona de interesse (Figura 64-b).

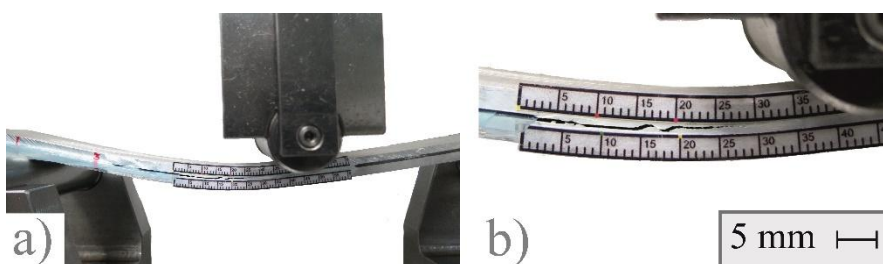


Figura 64 - Fotografia captada durante um ensaio ENF (a) e pormenor da fotografia para avaliar a propagação da fenda (b).

2.3.4.4 Métodos de redução para G_{IIc}

2.3.4.4.1 Métodos que requerem a medição do comprimento de fenda

Para os ensaios de determinação de G_{IIc} utilizam-se métodos semelhantes aos que foram abordados anteriormente para G_{Ic} , embora com os ajustes necessários à modificação do carregamento e condições de apoio [20]. Assim, existem variados métodos de redução para medição de G_{IIc} que podem ser aplicados a juntas adesivas. Os métodos CCM, CBT e DBT dependem da medição da fenda durante a sua propagação. Enquanto os métodos CCM e DBT costumam ser bastante precisos, o CBT por vezes subestima G_{IIc} [31].

Estes métodos dependem da medição de a durante a realização do ensaio. Assim nem sempre se obtém a precisão necessária na monitorização da fenda durante o ensaio [31].

Pelo método CCM, G_{IIC} é avaliado através da equação (2.20) [42, 44]. Na generalidade dos trabalhos publicados usa-se o seguinte polinómio cúbico para ajustar as curvas da flexibilidade $C=f(a)$ [20]

$$C = C_1 a^2 + C_0, \quad (2.39)$$

o que leva a [40]

$$G_{IIC} = \frac{3P^2 \times C_1 a^2}{2b}. \quad (2.40)$$

De modo a fazer uma descrição mais detalhada dos métodos habitualmente utilizados no tratamento de dados do ensaio ENF vai-se igualmente abordar a Teoria das Vigas, inicialmente sem correções (DBT). Assume-se que os dois braços do provete na zona da fenda atuam como duas vigas independentes, cada uma delas suportando metade da carga aplicada. Desta forma, o momento estático de segunda ordem da secção de cada uma das vigas é um oitavo observada para o provete. A variação das tensões de corte ao longo da espessura de cada braço do provete é dada pela equação (2.30). Adicionando as componentes de flexão da energia de deformação U_f e a de corte U_c e aplicando o teorema de Castigliano, o deslocamento no ponto de aplicação da carga é dado pela expressão [2]:

$$\delta = \frac{dU}{dP} = \frac{P \times (3a^3 + 2L^3)}{12E \times I} + \frac{3P \times L}{10G \times b \times t}. \quad (2.41)$$

Com recurso à equação (2.20), G_{IIC} é dado por [2]:

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 \times a^2}{16b^2 \times E \times t^3}. \quad (2.42)$$

No caso do ensaio ENF, o método CBT refere que [40]

$$G_{IIC} = \frac{9P^2 \times (a + |\Delta_{II}|)^2}{4b^2 \times t^3 \times E_1}, \quad (2.43)$$

onde E_1 representa o módulo de elasticidade longitudinal e Δ_{II} a correção da fenda responsável por efeitos de rotação e corte ($\Delta_{II} = 0,49 \times \Delta_I$). A determinação de Δ_I já foi abordada através da equação (2.25) no capítulo 2.3.3.4.1.

2.3.4.4.2 Métodos baseados no comprimento de fenda equivalente

Assumindo o que foi referido no capítulo 2.3.3.4.2, pode-se proceder ao cálculo de G_{IIc} pelo método CBBM. No entanto, para o ensaio ENF existem aspetos de formulação diferentes, tendo em consideração o tipo de fixação e aplicação de carga. Assim, utilizando a Teoria das Vigas, pode-se descrever a flexibilidade como [40]

$$C = \frac{3a^3 + 2L^3}{8E \times b \times t^3} + \frac{3L}{10G \times b \times t}. \quad (2.44)$$

Como E_f desempenha um papel fulcral da curva $P-\delta$, este pode ser calculado a partir da equação (2.44) usando C_0 e a_0 [20]

$$E_f = \frac{3a_0^3 + 2L^3}{8b \times t^3 \times C_{0corr}}, \quad (2.45)$$

onde C_{0corr} é a flexibilidade inicial corrigida e é dada por [20]

$$C_{0corr} = C_0 - \frac{3L}{10G \times b \times t}. \quad (2.46)$$

Combinando a equação (2.44) com a (2.45) e substituindo a por a_{eq} vem

$$a_{eq} = a + \Delta_{aZPF} = \left[\left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} \times a_0^3 \right) + \left(\frac{2}{3} \times \left(\frac{C_{corr}}{C_{0corr}} - 1 \right) \times L^3 \right) \right]^{1/3}, \quad (2.47)$$

onde C_{corr} é dado pela equação (2.46) substituindo C por C_0 . G_{IIc} pode então ser determinado a partir da equação (2.20), resultando em [40]

$$G_{IIc} = \frac{9P^2 \times a_{eq}^2}{16b^2 \times E_f \times t^3}. \quad (2.48)$$

Seguindo esta metodologia, a curva R em modo II é obtida em função de a_{eq} , G_{IIc} é obtido a partir do seu patamar. Somente os dados de deslocamento de carga obtidos durante o ensaio experimental são relevantes para este método. Assim, é superado o problema associado com a monitorização de a , uma vez que a fenda é um parâmetro calculado em vez de medido. Na verdade, os adesivos dúcteis são caracterizados por uma ZPF extensa, que deve ser contabilizada, dado que a sua presença afeta o comportamento da fratura [31].

O método proposto evita assim a medição de a . A partir dos dados de P e δ adquiridos no ensaio experimental, pode-se traçar diretamente a curva $-R$, em função de a_{eq} . A parte ascendente inicial da curva $-R$ corresponde ao desenvolvimento de ZPF à frente da ponta de a_0 . Quando a ZPF está completamente desenvolvida, a fenda começa a propagar, a fim de definir um patamar evidente na curva $-R$. Este patamar define o valor de G_{IIc} [31].

2.3.4.4.3 Métodos baseados no integral- J

Como acontece no ensaio DCB, também é possível calcular o valor de G_{IIc} pelo método do integral- J , embora existam algumas diferenças de formulação inerentes ao método ENF. O valor do integral- J é dado por [54]

$$G_{II} = \frac{9 \times (P_u \times a)^2}{16E \times t^2} + \frac{3P_u \times \delta_s}{8t}, \quad (2.49)$$

sendo δ_s o deslocamento de corte entre os aderentes superior e inferior na extremidade da fenda. Esta expressão permite traçar a curva $G_{II}-\delta_s$, que apresenta inicialmente uma evolução crescente de G_{II} . É atingido um valor constante de G_{II} quando a fenda inicia a propagação, valor este que corresponde ao valor medido de G_{IIc} (Figura 65). Relativamente aos métodos anteriores, é necessária a medição adicional do valor de δ_s durante o ensaio [20].

Este método, tal como no DCB, permite determinar a lei coesiva, neste caso em corte, através da diferenciação da curva de G_{II} em função de δ_s , (Figura 65) [55].

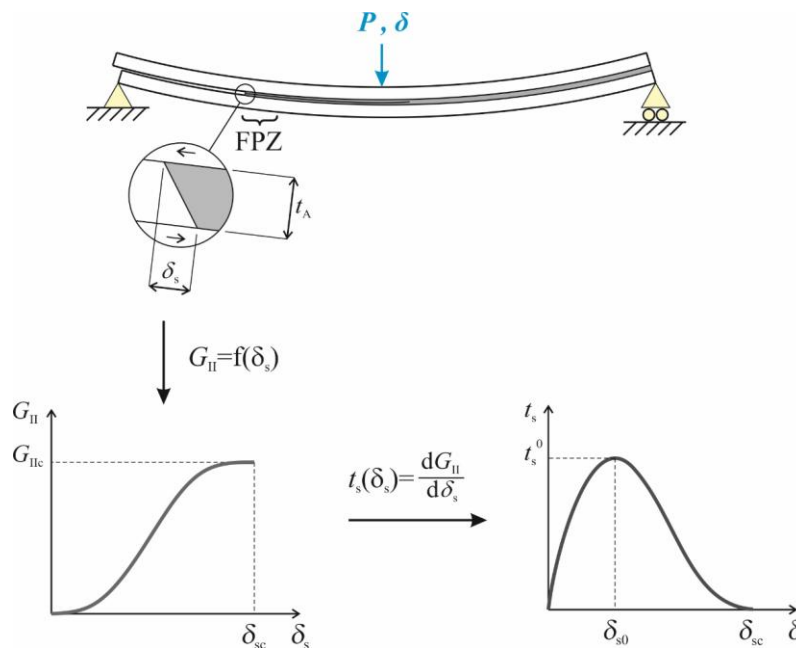


Figura 65 - Processo de obtenção de G_{IIc} e da lei coesiva ao corte através do método direto.

3 Desenvolvimento

3.1 Caracterização do adesivo escolhido

O adesivo utilizado foi o SikaPower[®]-4720 (Figura 66), selecionado por ser relativamente novo no mercado. Produzido de acordo com as normas ISO 9001/14001, trata-se de um adesivo epóxico bicomponente (epóxico e amina) de elevada resistência e excelentes propriedades de adesão a uma grande variedade de substratos. Cura à temperatura ambiente (pode ser acelerada a uma temperatura máxima de 85°C). Após 24 h e à temperatura ambiente o adesivo atinge 80% da resistência e resistência máxima ao fim de 48h. A mistura dos dois componentes é efetuada numa razão mássica de 2:1 num bico misturador próprio. É disponibilizado em cartuchos de 195 ml e aplicado manualmente através de uma pistola adequada (Figura 67). Este adesivo contém esferas de vidro de modo a garantir uma espessura de colagem uniforme (cerca de 0,20 mm). O SikaPower[®]-4720 é utilizado na indústria automóvel e adequa-se à colagem de painéis com exposição a tensões dinâmicas, tais como painéis e quartelas de porta, painéis de carroceria traseira, tejadilhos e assemblagem de chapas metálicas (ver aplicação a laranja na Figura 68) [56].



Figura 66 - Cartucho do adesivo SikaPower[®]-4720. Fonte: <http://prt.sika.com/pt>



Figura 67 - Pistola para aplicação manual de adesivos.

Os principais benefícios do adesivo selecionado são:

- Excelente aderência a uma grande variedade de substratos sem primário;
- Longo *open-time* (cerca de 60 min);
- Cura rápida;
- Possibilita a combinação com soldadura por pontos (enquanto fresco);
- Propriedades de aplicação superiores (não escorre nem pinga).



Figura 68 - Aplicação do adesivo SikaPower®-4720 na indústria automóvel (a laranja). Fonte: <http://prt.sika.com/pt>.

A Tabela 3 apresenta algumas propriedades indicadas pelo fabricante. Em anexo encontra-se a ficha técnica deste adesivo.

Tabela 3 - Algumas propriedades do adesivo selecionado [56].

Resistência à tração	24 MPa
Resistência ao corte por tração	14 MPa
Módulo de Young	1900 MPa
Alongamento à rotura	3%
Dureza Shore D	80

3.2 Ensaio mecânicos à tração

3.2.1 Fabrico dos provetes

Neste capítulo irão ser descritos todos os métodos efetuados para o fabrico dos provetes *bulk*. Aborda-se as dimensões e geometria utilizadas, a preparação do molde, aplicação do adesivo e, posteriormente, a cura e remoção dos provetes do molde. Serão explicados todos os cuidados a ter em todas as etapas referidas.

3.2.1.1 Provetes *bulk*

Para a determinação das propriedades à tração do adesivo selecionado, optou-se pelo provete do tipo longo. Esta configuração é adequada para adesivos mais rígidos, onde a deformação é menor, pelo que provetes de maiores dimensões se adaptam melhor nestes casos. A outra opção disponível seria a de provetes reduzidos utilizados para adesivos mais dúcteis. Os provetes *bulk* foram fabricados como previsto na norma NF T 76-142 com as dimensões indicadas na Figura 69.

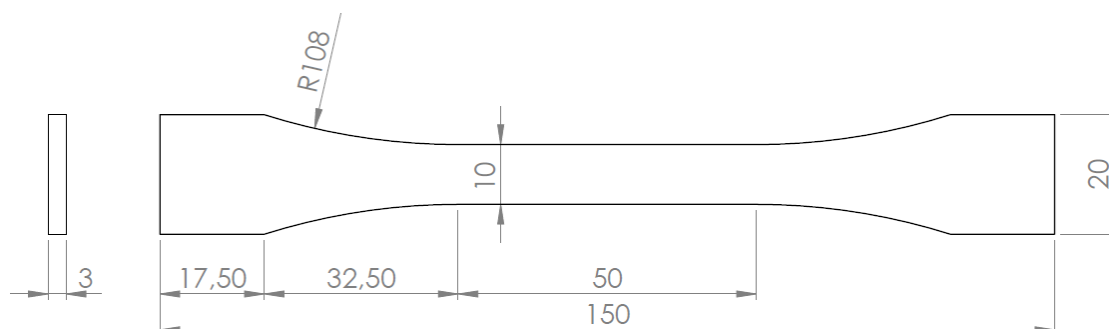


Figura 69 - Dimensões dos provetes *bulk* pela norma NF T 76-142 (em mm).

Para o fabrico dos provetes, recorreu-se ao molde existente no laboratório de Ligações Adesivas da Faculdade de Engenharia da Universidade do Porto (FEUP). Trata-se de um molde para produção de provetes por injeção (moldação fechada) e é apresentado na Figura 70. O molde é constituído por três partes distintas semelhantes às referidas no capítulo 2.3.1.2. A placa intermédia é formada por três cavidades, o que possibilita a produção de três provetes de cada vez. Esta característica acarreta benefícios no que diz respeito ao tempo de produção. Foram efetuadas duas moldações de forma a se obter seis provetes *bulk*.

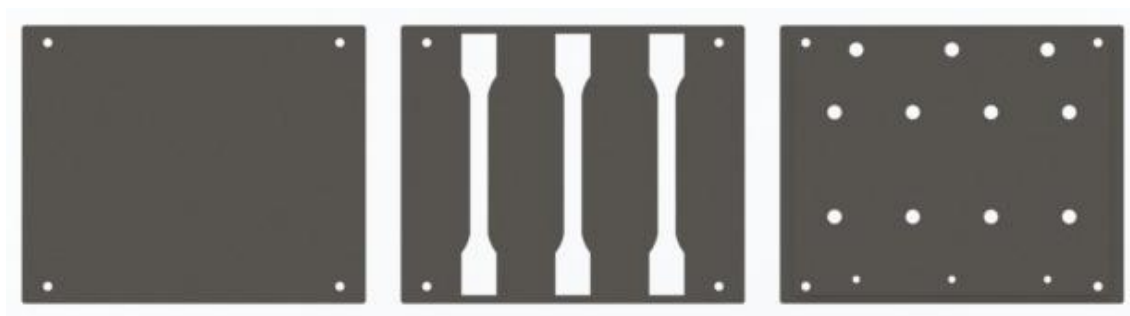


Figura 70 - Conjunto de placas do molde utilizado.

3.2.1.2 Preparação do molde

A preparação das superfícies do molde é das etapas mais importantes para a obtenção de provetes com melhores características e acabamentos. Assim é necessário proceder a alguns cuidados antes da aplicação do adesivo. A qualidade dos provetes aumenta significativamente quando depósitos soltos tais como produtos de corrosão, pintura pouco aderente e outros contaminantes são removidos da superfície do molde. Para se proceder a uma posterior desmoldagem dos provetes após a cura do adesivo, também é necessário ter em conta alguns procedimentos. Com estes cuidados espera-se evitar a danificação dos provetes durante a sua extração e que o molde seja ou esteja contaminado durante o processo de cura do adesivo.

Primeiramente, procedeu-se à abrasão, por intermédio de uma lixa de fina granulação, dos contornos das cavidades da placa intermédia (processo passivo mecânico). Este método foi muito efetivo para a remoção de camadas existentes de outros adesivos presentes nas arestas e faces de difícil acesso.

Posteriormente, seguiu-se a limpeza das três placas com acetona (processo passivo químico) de modo a que todas as superfícies em contacto com o adesivo, bem como orifícios e contornos da placa intermédia, estivessem isentos de gorduras e outros contaminantes. Aumenta-se assim a aderência posterior do desmoldante. Nesta etapa realizaram-se três passagens em cada face, orifícios e contornos de cada placa.

O molde, convenientemente limpo, foi aquecido a uma temperatura de 40 °C durante 10 min na estufa disponível no laboratório. Este aquecimento permite uma boa adesão do desmoldante e acelera a sua reação de cura.

Após o aquecimento do conjunto do molde, iniciou-se a aplicação do desmoldante em todas as faces que estarão em contacto com o adesivo (Figura 71). Teve-se especial atenção aos orifícios de injeção e escape da placa superior bem como aos contornos das cavidades da placa intermédia, tornando este processo mais moroso. Esta etapa foi repetida três vezes em cada face de forma a assegurar uma

correta aplicação em todas as zonas necessárias. O desmoldante é o agente responsável para que não haja adesão entre o adesivo e suas superfícies de contacto com o molde e posteriormente para garantir a fácil extração dos provetes. Utilizou-se o desmoldante Loctite® Frekote® 770-NC (Figura 72), especialmente designado para desmoldagem de adesivos epóxicos [57]. A ficha técnica encontra-se em anexo para consulta.



Figura 71 - Aplicação do desmoldante.



Figura 72 - Loctite® Frekote® 770-NC. Fonte: <http://www.ellsworth.com>.

Concluída esta etapa, as placas constituintes do molde ficaram preparadas para a aplicação do adesivo (Figura 73).

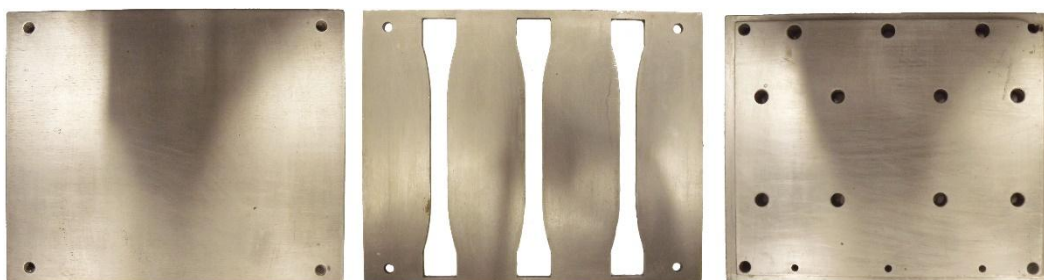


Figura 73 - Aspeto das placas após limpeza e aplicação do desmoldante.

3.2.1.3 Aplicação do adesivo

Como o adesivo SikaPower®-4720 é fornecido em cartuchos bi-componente de 195 ml, a aplicação foi processada por intermédio de uma pistola adequada (Figura 67). A mistura dos dois componentes do adesivo foi conseguida por um bico de mistura. É importante garantir que esta é bem efetuada até se obter uma mistura homogénea. De seguida, a placa intermédia foi colocada sobre a placa inferior do molde e fixa com ajuda de quatro cavilhas plásticas (Teflon®) de forma a evitar que ocorram oscilações e que o adesivo agarre, como demonstrado na Figura 74.



Figura 74 - Montagem do molde (placa inferior e intermédia).

O adesivo foi aplicado em cordões transversais contíguos em sentidos alternados, até o enchimento de cada cavidade interior da placa intermédia se encontrar completo (Figura 75-a). Este método reduz o aprovisionamento de bolhas de ar no provete. Após a aplicação do adesivo, procedeu-se à compactação do mesmo através de uma espátula, reduzindo assim a probabilidade do aparecimento de defeitos (Figura 75-b). Concluída a aplicação do adesivo e sua compactação, colocou-se a tampa do molde e aplicou-se uma ligeira pressão manual de forma a que as bolhas de ar migrassem até à superfície, sendo expulsas pelos orifícios de escape (Figura 76).

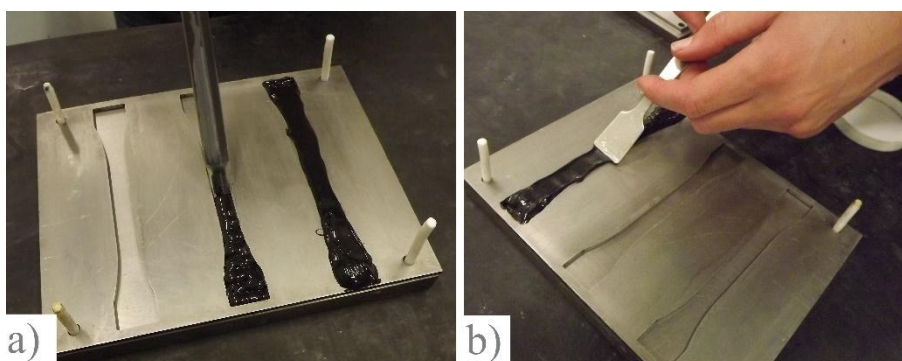


Figura 75 - Aplicação manual do adesivo (a) e sua compactação com uma espátula (b).

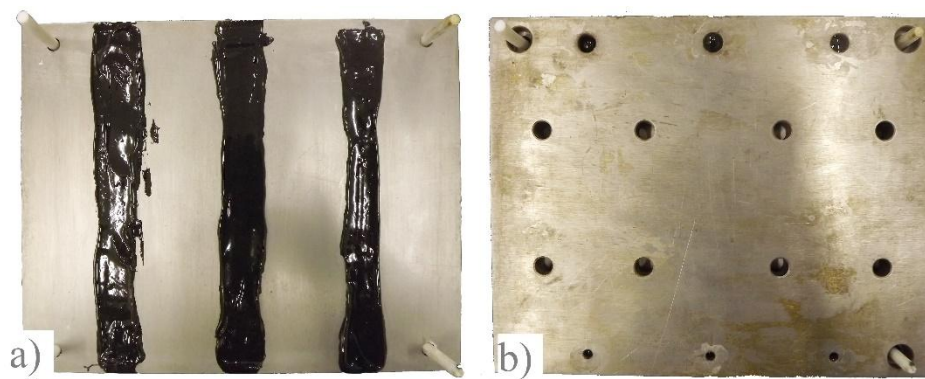


Figura 76 - Finalização da aplicação do adesivo (a) e molde fechado (b).

Concluídas as etapas de aplicação do adesivo, seguiu-se a cura do mesmo, descrita no capítulo 3.2.1.4.

3.2.1.4 Cura do adesivo

Após a colocação da tampa superior do molde, deixou-se curar o adesivo durante uma semana à temperatura ambiente (a cura ocorre por reação química entre os dois componentes do adesivo). De forma a garantir melhores resultados, colocaram-se pesos em cima do molde (quatro pesos de aproximadamente 10 kg cada).

3.2.1.5 Remoção dos provetes do molde

Nesta etapa removeram-se os pesos de cima do molde e de seguida a placa superior do conjunto. Verificou-se que os provetes *bulk* aparentavam um bom acabamento superficial. Prosseguiu-se à extração da placa intermédia, bem como dos provetes de suas cavidades. Os provetes aparentavam o aspeto da Figura 77, sendo, por isso, necessário eliminar as rebarbas das arestas e os gitos de injeção com a ajuda de uma lâmina e de uma lixa.



Figura 77 - Provetes *bulk* com excessos.

Após concluídos todos estes passos, obtiveram-se três provetes *bulk*. Como eram necessários seis corpos de prova, repetiram-se mais uma vez todos os passos referidos a partir do capítulo 3.2.1.2. A Figura 78 ilustra os provetes obtidos.



Figura 78 - Aspeto final dos provetes *bulk*.

3.2.2 Realização dos ensaios à tração

3.2.2.1 Preparação e condições do ensaio

Com os provetes em perfeito estado procedeu-se aos ensaios. Os ensaios de tração de provetes *bulk* foram realizados na máquina de ensaios Instron[®]3367 (Figura 79) do Laboratório de Ligações Adesivas da FEUP. Esta máquina tem uma célula de carga com capacidade de 30 kN e uma velocidade de ensaio até 500 mm min⁻¹. Em anexo segue a sua ficha técnica com mais detalhes.



Figura 79 - Máquina de ensaios universal Instron[®] 3367. Fonte: <http://www.instron.com>.

Os provetes foram devidamente identificados com números de um a seis, de forma a facilitar a sua identificação antes e após o seu ensaio. Primeiramente mediram-se b e w na sua zona útil com recurso a um paquímetro digital, obtendo-se as dimensões médias da Tabela 4. Foram efetuadas três medições em cada provete de forma a obter valores mais aproximados da realidade. Com estas dimensões foi possível calcular a área da secção útil de cada provete.

Tabela 4 - Dimensões dos provetes *bulk*.

Provete	b [mm]		w [mm]		Área secção útil [mm ²]
1	3,45 3,40 3,40	3,42	10,02 10,01 10,00	10,01	34,20
2	3,40 3,30 3,45	3,38	10,12 10,08 10,05	10,08	34,12
3	3,35 3,40 3,36	3,37	10,00 10,10 10,05	10,05	33,87
4	3,30 3,32 3,30	3,31	10,10 10,00 10,00	10,03	33,18
5	3,35 3,45 3,30	3,37	10,03 10,11 10,04	10,06	33,87
6	3,25 3,20 3,20	3,22	10,10 10,02 10,01	10,04	32,31

De seguida, procedeu-se ao ensaio dos corpos de prova. Começou-se por calibrar o equipamento de modo a igualar a zero o valor do deslocamento. Foram utilizadas amarras de cunha para acoplar os provetes à máquina (devidamente apertadas, de maneira a que não houve escorregamentos). Além da fixação, as amarras também tiveram a função de garantir que a rotura se desse na zona útil dos provetes. O *setup* do ensaio de tração é ilustrado na Figura 80. Colocou-se ainda um extensómetro mecânico na zona útil dos provetes de forma a obter as deformações longitudinais. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente a uma velocidade de 1 mm min^{-1} até que ocorresse a rotura dos provetes.



Figura 80 - *Setup* do ensaio de tração.

3.2.2.2 Medição das deformações

Para a medição das deformações longitudinais, recorreu-se a um extensómetro mecânico Instron® (Figura 81-a) com um comprimento-base, l_e , de 25 mm. Colocou-se o extensómetro na zona útil do provete de forma mais centrada possível, como demonstra a Figura 81-b. A principal vantagem deste extensómetro é o facto de não ser necessário removê-lo antes que o provete atinja o seu limite elástico.

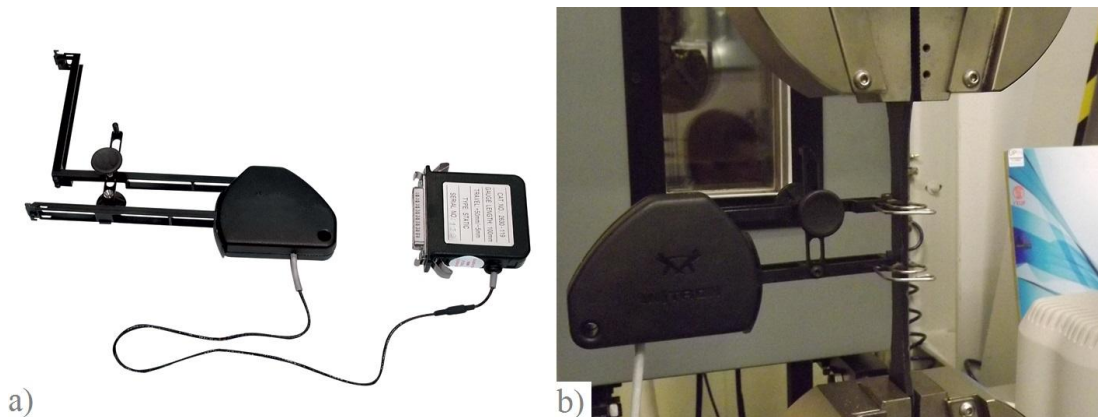


Figura 81 - Extensómetro Instron® utilizado no ensaio (a) e aplicação do extensómetro (b).

3.2.3 Resultados obtidos

3.2.3.1 Curvas P - δ e σ - ε

Durante o decorrer do ensaio de cada provete, o *software* gerou os valores correspondentes de P e δ , construindo ao mesmo tempo as curvas P - δ ilustradas na Figura 82. O eixo das abcissas representa os valores de δ e o das ordenadas os de P .

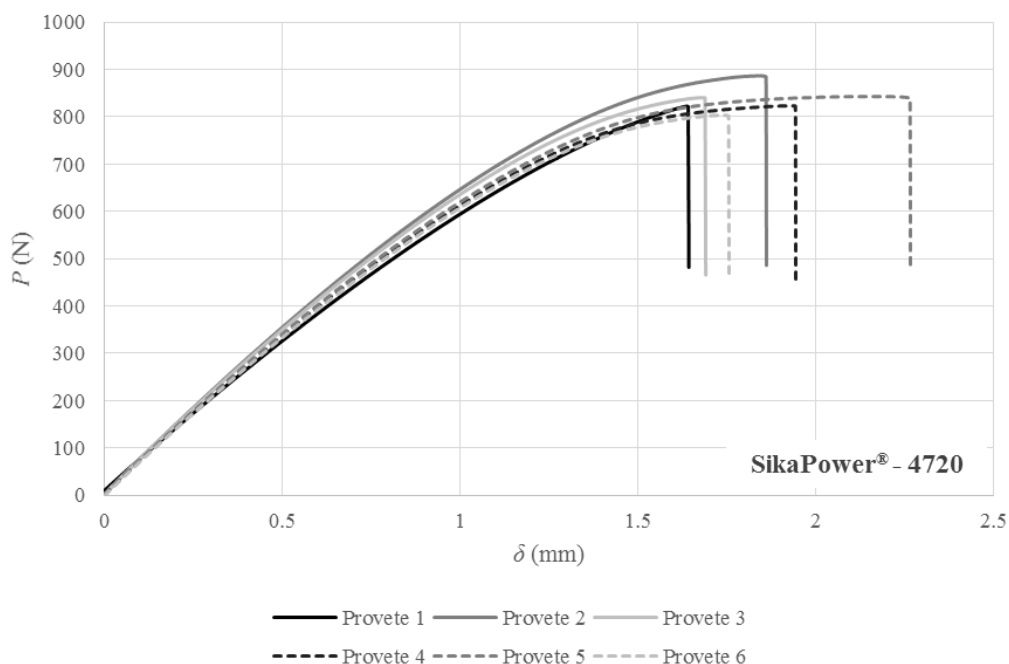


Figura 82 - Curvas P - δ obtidas no ensaio de tração do adesivo SikaPower®-4720.

Todos os provetes aparentam comportamentos idênticos na fase inicial do ensaio. O provete 2 foi o que registou maior valor de P_{\max} , enquanto o 5 obteve maior δ_{\max} . É de notar que o provete mais dúctil foi o 5 e o que o 1 registou uma menor resistência elástica.

Depois de obter as curvas P - δ , foi tempo de tratar os dados fornecidos pelo *software* em Excel. Este tratamento de dados permite calcular ε_r , σ_y , σ_r , e E . Primeiramente, construíram-se as curvas σ - ε (Figura 83). O valor de σ foi calculado a partir do quociente entre P e a área da secção inicial de cada provete.

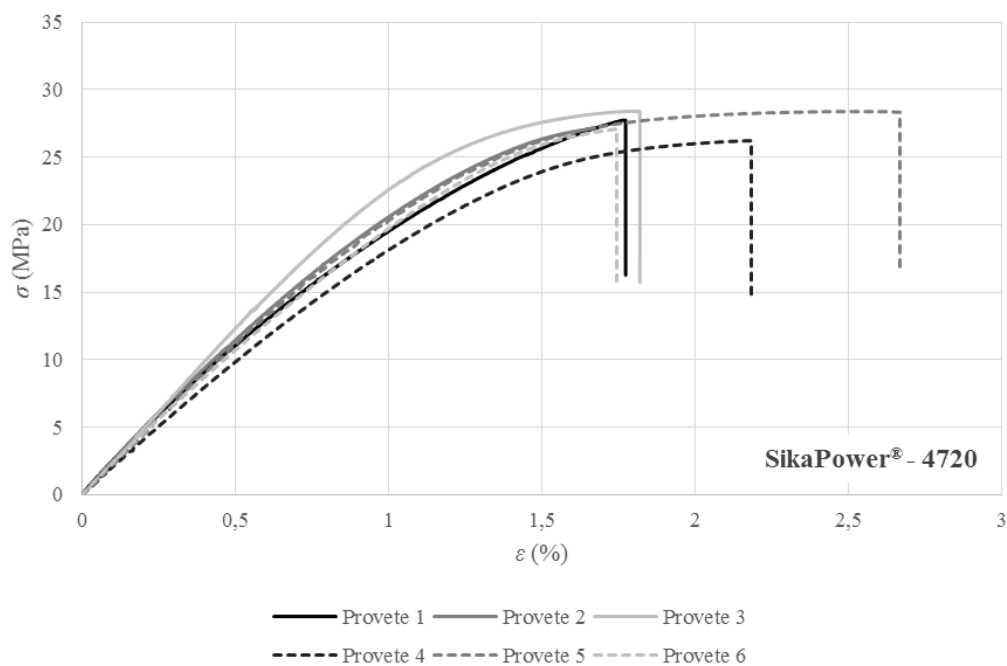


Figura 83 - Curvas σ - ε obtidas no ensaio de tração do adesivo SikaPower®-4720.

Na determinação de E seguiu-se a norma EN ISO 527-2. Para o cálculo desta propriedade, selecionou-se na curva σ - ε dois valores de σ correspondentes a ε de 0,05% e 0,25% e, posteriormente, utilizou-se a equação (2.1). Verificou-se que o valor de E corresponde ao declive da reta tangente à zona elástica da curva σ - ε , como demonstra a Figura 84.

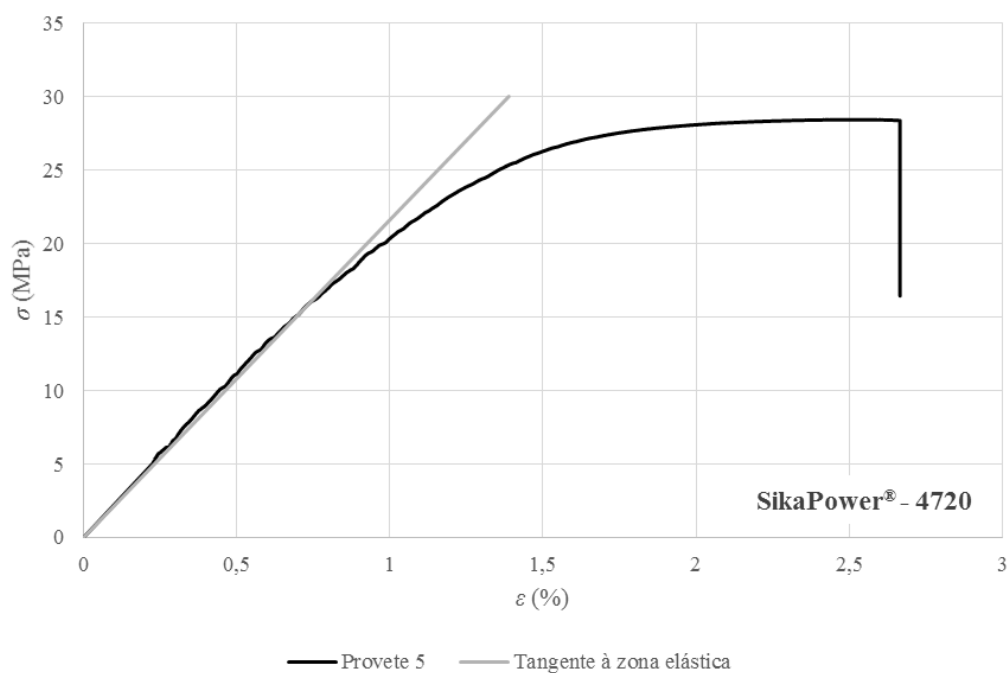


Figura 84 - Curva σ - ε do provete 5 com tangente à zona elástica.

No âmbito de determinar σ_y , traçou-se uma reta paralela à tangente da zona elástica da curva σ - ε (Figura 85) para ε com o valor de 0,2%. A intersecção desta reta com a curva σ - ε resultou assim na obtenção de σ_y .

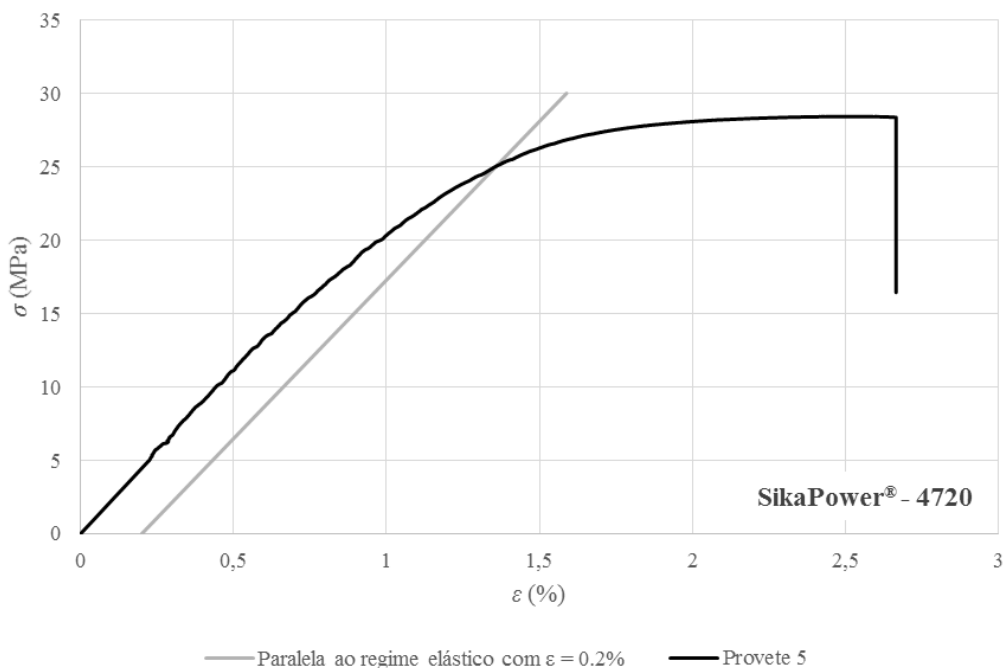


Figura 85 - Curva σ - ε do provete 5 com reta paralela ao regime elástico para $\varepsilon = 0,2\%$.

3.2.3.2 Rotura dos provetes *bulk*

De forma a compreender melhor os resultados obtidos, recolheram-se os provetes e tiraram-se fotografias às suas superfícies de rotura (Figura 86). Em todos os provetes observaram-se defeitos, conhecidos como “bolhas de ar”, sendo que os provetes 2,4 e 5 foram os que obtiveram a superfície de rotura com menor quantidade de vazios. Estes defeitos promoveram a redução da área resistente e, deste modo, a diminuição da resistência ao esforço de tração dos provetes que implicaram a obtenção de uma rotura prematura nessa zona. De notar que apenas nos provetes 1 e 5 ocorreu rotura perto do limite da zona útil, enquanto nos restantes, a rotura foi claramente numa zona intermédia do comprimento útil dos provetes.

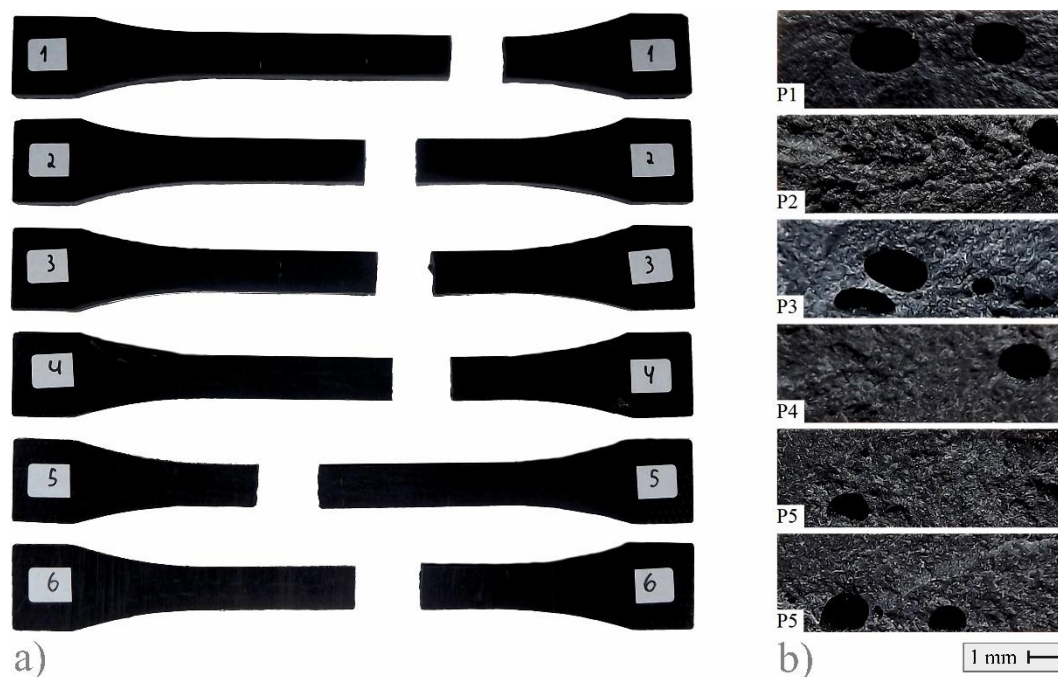


Figura 86 - Rotura dos provetes *bulk*. Rotura na zona do comprimento útil (a) e superfície de rotura (b).

3.2.3.3 Propriedades mecânicas à tração

Após o tratamento dos dados, das curvas P - δ e σ - ϵ , tabelaram-se as propriedades mais relevantes para a caracterização do adesivo SikaPower[®]-4720 (Tabela 5).

Tabela 5 - Propriedades mecânicas obtidas à tração do adesivo SikaPower[®]-4720.

Provete	P_{\max} [N]	δ_{\max} [mm]	σ_y [MPa]	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]	E [MPa]
1	822,512	1,428	22,600	27,746	1,762	2162,285
2	886,882	1,861	20,048	27,212	1,755	2013,104
3	840,769	1,690	26,366	28,399	1,815	1988,688
4	822,810	1,943	21,979	26,228	2,183	1992,987
5	842,490	2,265	25,030	28,420	2,584	2160,623
6	803,614	1,755	23,691	27,109	1,741	1997,173
Média	836,513	1,824	23,286	27,519	1,973	2052,477
Desvio Padrão	28,485	0,279	2,252	0,845	0,343	84,818

Todos os provetes representados na Tabela 5 foram considerados válidos dada a repetibilidade dos valores obtidos e os pequenos desvios nos parâmetros relevantes que foram analisados. No capítulo 3.6.1 propõe-se a realização de uma análise mais detalhada aos resultados obtidos.

3.3 Ensaios mecânicos ao corte

3.3.1 Fabrico dos provetes

Neste capítulo descrevem-se todas as etapas necessárias para se obter os provetes TAST. São referidas as dimensões e geometria dos provetes, indica-se o procedimento de preparação do *gabarit* e substratos, também se descreve o processo de colagem e cura dos provetes e por fim enumeram-se as etapas de preparação para o ensaio a realizar.

3.3.1.1 Provetes TAST

De modo a se determinarem as propriedades ao corte do adesivo, recorreu-se ao ensaio TAST. Utilizaram-se provetes com geometria e dimensões teóricas de acordo com a norma ISO 11003-2, como ilustrado na Figura 87. Os provetes TAST são formados por dois substratos (fabricados em aço DIN C45 E) com furos de carregamento e uma camada adesiva que vai proporcionar a união entre estes. Os substratos utilizados são reutilizáveis, pelo que foi necessário tomar alguns cuidados descritos com mais pormenor no capítulo 3.3.1.2.

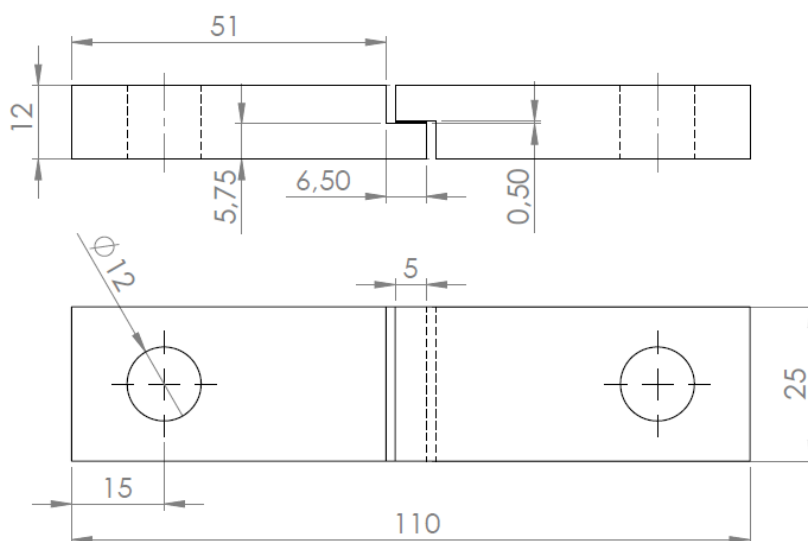


Figura 87 - Dimensões dos Provetes TAST utilizados segundo a norma ISSO 11003-2 (em mm).

3.3.1.2 Preparação do *gabarit* e substratos

Visto que foi necessária a utilização de um *gabarit* para garantir o alinhamento preciso dos substratos, tal como na preparação dos provetes *bulk*, também se teve de preparar todas as superfícies em contacto com o adesivo. O *gabarit* possibilita a capacidade de se fabricar seis provetes TAST ao

mesmo tempo. Para preparar o *gabarit* removeram-se todas as sujidades como poeiras, óleos e óxidos que pudessem existir nas suas superfícies, com recurso a uma abrasão manual com uma lixa, e posteriormente limpam-se todos os componentes do *gabarit* com papel embebido em acetona. Também foi necessário aplicar o desmoldante nas superfícies. Assim, colocou-se o *gabarit* na estufa a cerca de 40 °C durante 15 min. Seguidamente, retirou-se todo o conjunto do *gabarit* da estufa e procedeu-se à aplicação de três camadas do desmoldante Loctite® Frekote® 770-NC em todas as superfícies (Figura 88). Após o término destas etapas, o *gabarit* encontrou-se disponível para a aplicação dos substratos e a sua colagem.



Figura 88 - Aplicação do desmoldante Loctite® Frekote® 770-NC nas superfícies do *gabarit*.

De forma a se melhorar a ligação interfacial dos provetes, teve-se o cuidado de proceder a alguns passos de modo a se preparar as superfícies que iriam estar em contacto com o adesivo. Como referido anteriormente no capítulo 2.3.2.3, durante a preparação dos provetes TAST utilizam-se lâminas de aço (Figura 34) para evitar a adesão do adesivo a outras superfícies dos substratos que não as desejadas. Ao utilizarem-se estas lâminas, foi também necessário aplicar desmoldante de modo a que, durante a remoção dos provetes, não houvesse qualquer dificuldade nem se danificasse a camada adesiva. Para isso, aqueceram-se as doze lâminas de aço com recurso a uma pistola de ar quente (Figura 89-a). Assim que as lâminas se encontravam aquecidas, aplicaram-se três camadas do desmoldante em cada face (Figura 89-b).

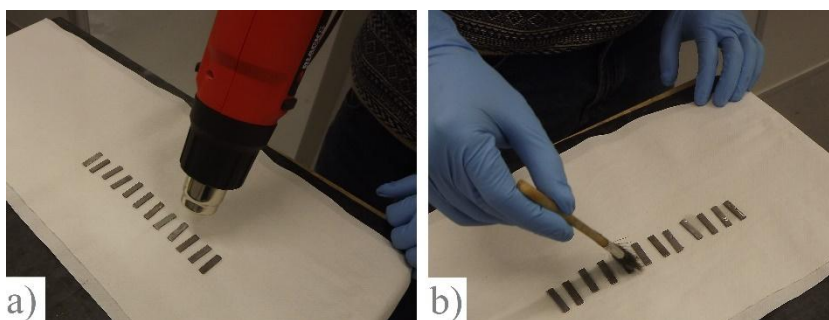


Figura 89 - Preparação das lâminas de aço para provetes TAST. Aquecimento (a) e aplicação do desmoldante (b).

Iniciou-se o processo de preparação dos substratos com o desgorduramento da área de colagem, utilizando acetona, seguindo-se a granalhagem. Foi utilizada a granalhadora disponível no Laboratório de Ligações Adesivas da FEUP (Figura 90-a). Este método consistiu em projetar partículas abrasivas (óxido de alumínio) sobre a superfície de colagem com recurso a uma pistola de ar comprimido (Figura 90-b). A pressão foi regulada para 4 bar de modo a evitar danos nos substratos. Após este processo passivo mecânico, os substratos foram novamente desgordurados com acetona e aparentavam uma rugosidade uniforme indicada para uma boa adesão. Mediram-se ainda as espessuras da zona de colagem dos substratos com recurso a micrómetro, pois estes são reutilizados e com o tempo sofrem desgaste por abrasão da granalhagem. Como tal, este procedimento é fundamental para o cálculo preciso de γ . Todo o conjunto do *gabarit* e dos substratos ficou assim em condições para a colagem dos provetes (Figura 91).

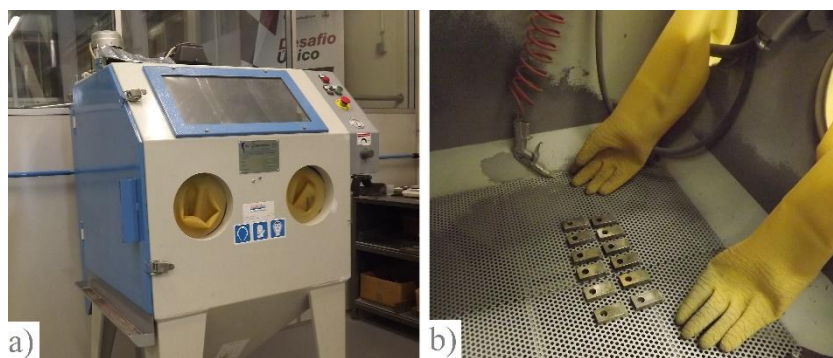


Figura 90 - Granalhadora utilizada (a) e conjunto de substratos posicionados para a granalhagem (b).

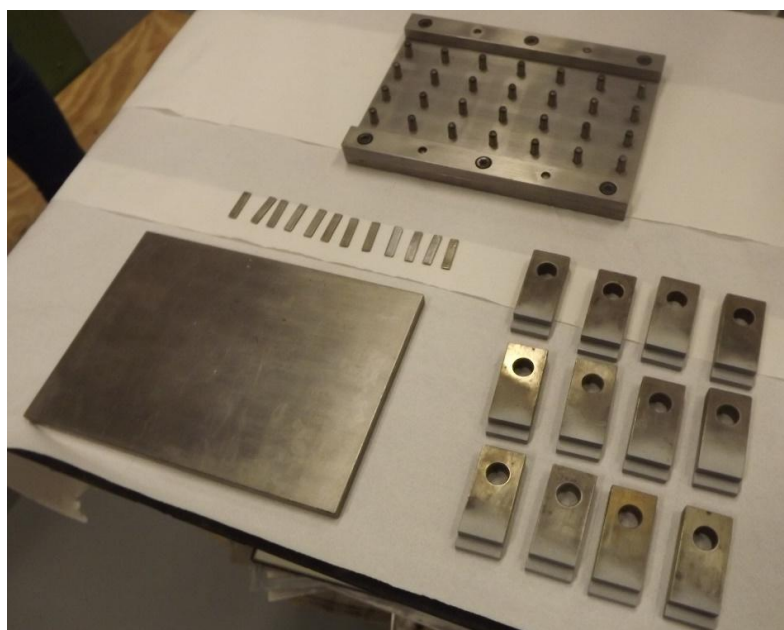


Figura 91 - Conjunto do *gabarit* e substratos TAST.

3.3.1.3 Colagem e cura dos provetes

Para o fabrico dos provetes, posicionaram-se os substratos inferiores no *gabarit* na posição final de colagem (com a face de colagem virada para cima) e os substratos superiores também com a face de colagem virada para cima, para a aplicação do adesivo nos dois substratos. Seguiu-se a aplicação de um cordão de adesivo nas áreas de colagem do substrato inferior e superior (Figura 92-a). Após aplicação da quantidade suficiente de adesivo em cada um dos substratos, colocou-se o substrato superior sobre o inferior já alinhado com o *gabarit*, seguindo-se a aplicação das duas lâminas de aço no conjunto (Figura 92-b).

Após a colagem dos seis provetes, fechou-se o molde e aplicou-se uma pequena pressão manual de modo a uniformizar a camada adesiva dos provetes.

Como na preparação dos provetes *bulk*, a cura dos provetes realizou-se à temperatura ambiente num período de uma semana. Durante este tempo, foram colocados os mesmos pesos referidos no capítulo 3.2.1.4.

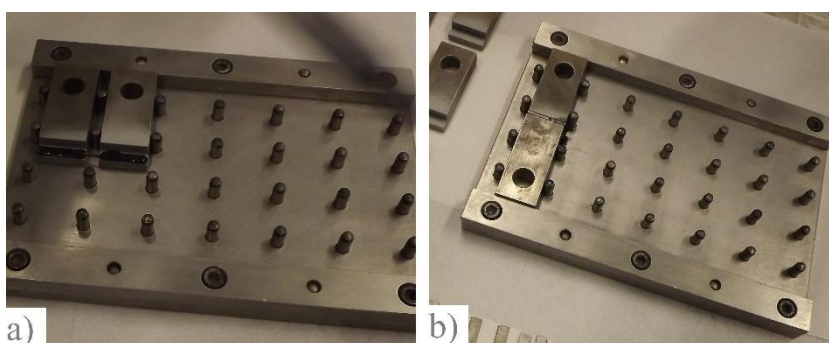


Figura 92 - Processo de colagem dos provetes TAST.



Figura 93 - Conjunto dos seis provetes após aplicação do adesivo.

3.3.1.4 Preparação para ensaio

Finalizada a cura dos provetes, foi necessária a sua preparação para os ensaios. Retiraram-se cuidadosamente os provetes do molde e as suas lâminas de forma a não danificar a camada adesiva. De seguida, o excesso de adesivo foi removido com recurso a um alicate e a uma lixa. A Figura 92 demonstra o aspeto final de um provete TAST. Durante este processo ocorreu a rotura de um dos provetes, pelo que sobraram apenas cinco amostras para teste das propriedades ao corte do adesivo.



Figura 94 - Provete TAST após colagem, remoção das lâminas de aço e do excesso de adesivo.

3.3.2 Realização dos ensaios ao corte

3.3.2.1 Preparação e condições do ensaio

Como referido no capítulo 3.3.1.2, antes da colagem foram efetuadas medições das espessuras dos substratos na zona de sobreposição, o que permitiu determinar w pela diferença da espessura do provete colado na zona de sobreposição e da espessura de cada substrato antes da colagem na mesma zona. Os valores de w são apresentados na Tabela 6 (valores médios de três medições). A área de colagem de todos os provetes tinha um valor teórico de 125 mm^2 , que foi utilizado nos cálculos subsequentes sempre que necessário.

Tabela 6 - Valores de w dos provetes TAST.

Provete	w [mm]
1	0,680
2	0,696
3	0,660
4	0,740
5	0,638

Os ensaios TAST foram realizados na mesma máquina de ensaios utilizada nos provetes *bulk*. Optou-se por um *setup* diferente, utilizando amarras específicas e pinos de fixação apropriados ao tipo de provete utilizado.

Dada a geometria e as dimensões dos provetes TAST, e ainda das amarras, foi imperioso conceber os pinos de fixação. Para tal, realizaram-se as seguintes etapas: a medição rigorosa tanto dos furos de carregamento dos substratos como do diâmetro dos furos das amarras; depois, efetuou-se a medição do diâmetro das amarras e logo de seguida recorreu-se ao programa SolidWorks® a fim de desenhar e cotar os pinos para posterior fabrico (Figura 95); seguidamente, os pinos foram torneados em aço de construção S235J na empresa Metalúrgica M.L. Silva; por fim, o produto final foi cuidadosamente medido com recurso a um paquímetro, verificando-se que reunia todas as condições para a sua aplicação na máquina de ensaios.

O passo seguinte foi a remoção das amarras iniciais da máquina, substituindo-as por outro modelo já acima referido. A partir daí, foi possível colocar o provete na máquina através da fixação dos pinos pelos furos de carregamento, não esquecendo de ajustar a distância das amarras de modo a que os furos das mesmas coincidissem com os furos de carregamento do provete. Teve-se o cuidado de calibrar o equipamento e alinhar transversalmente a junta de forma rigorosa para evitar a existência de desalinhamentos, submetendo-a assim a um estado de corte puro, evitando-se posteriores erros nas medições de deformações.

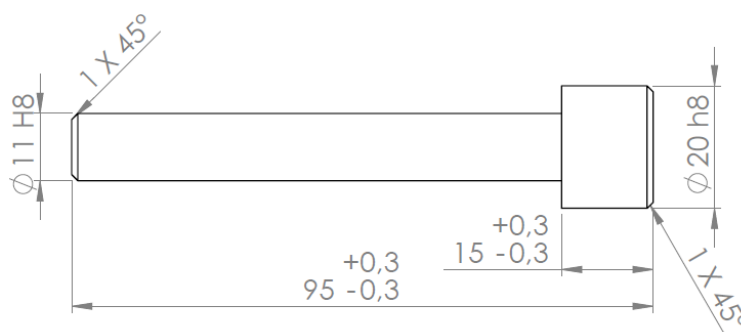


Figura 95 - Dimensões dos pinos de fixação utilizados (em mm).



Figura 96 - *Setup* do ensaio TAST.

Aplicou-se o extensómetro mecânico, já utilizado no ensaio de tração, o mais centrado possível na junta de modo a se obterem valores de deformações fidedignos. Após todas as etapas referidas, obteve-se a configuração do *setup* TAST conforme o ilustrado na Figura 96. Os ensaios foram realizados à temperatura ambiente com uma velocidade de $0,5 \text{ mm min}^{-1}$ para os cinco provetes existentes até à ocorrência da sua rotura.

3.3.2.2 Medição das deformações

Recorreu-se novamente ao extensómetro mecânico Instron[®], utilizado nos ensaios de provetes *bulk*, para a medição das deformações longitudinais. Substituíram-se apenas os grampos de fixação do extensómetro por outros mais adequados ao valor de t dos provetes TAST. Durante o ensaio não foi necessário remover o extensómetro.

3.3.3 Resultados obtidos

3.3.3.1 Curvas P - δ e τ - γ

No decurso do ensaio TAST dos cinco provetes, tal como acontecera no ensaio de tração, o *software* gravou os valores de P e δ , representando-os em forma de curvas P - δ , conforme a Figura 97. Também nestas curvas, no eixo das abcissas estão representados os valores de δ e no das ordenadas os de P .

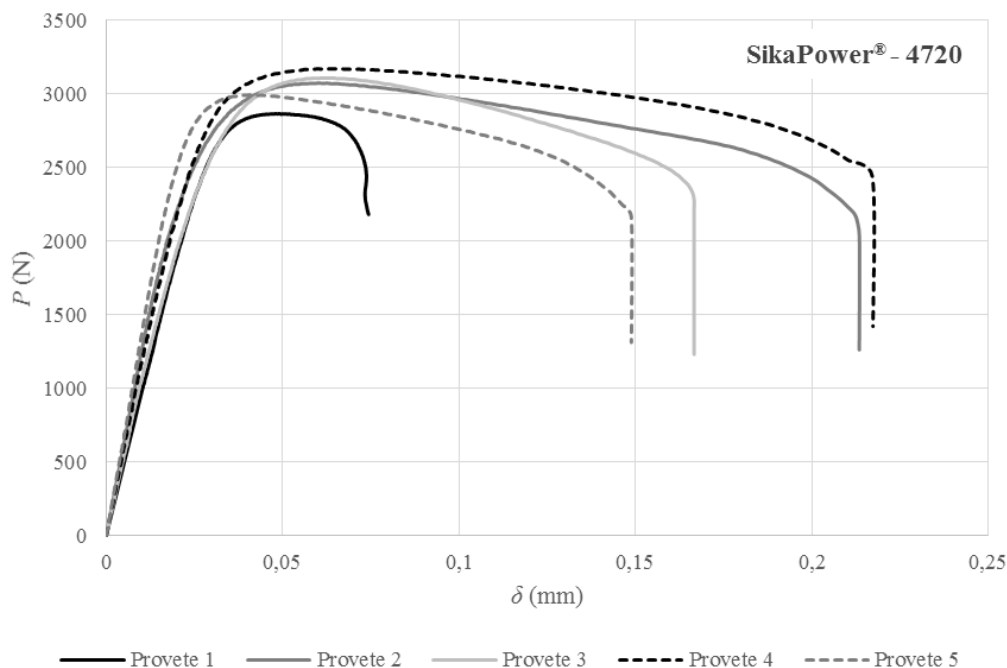


Figura 97 - Curvas P - δ obtidas no ensaio TAST do adesivo SikaPower®-4720.

Da observação das curvas obtidas salienta-se a repetibilidade do comportamento elástico dos provetes, a variação dos valores de δ_{\max} entre o valor mínimo obtido pelo provete 1 e o máximo atingido pelo provete 4, sendo que os provetes 2 e 4 apresentam valores bastante similares. Em relação aos valores de P_{\max} , nota-se que o provete 1 foi aquele que registou menor P_{\max} ao contrário do 4 que alcançou maior P_{\max} . O provete mais dúctil foi o 4.

Como nos ensaios à tração, foi necessário tratar os dados fornecidos pelo *software* de forma a se obterem as propriedades que permitissem caracterizar o adesivo. As propriedades importantes para a caracterização do adesivo selecionado ao corte são P_{\max} , δ_{\max} , G , τ_r , γ_r e ainda a tensão limite elástico ao corte (τ_y). De modo a construir as curvas τ - γ , foi necessário determinar os valores de τ pelo quociente de P e a área teórica da junta (125 mm^2 , como referido anteriormente) e ainda de γ através do quociente entre δ e w . A partir destas duas variáveis, foi possível reproduzir as curvas τ - γ da Figura 98.

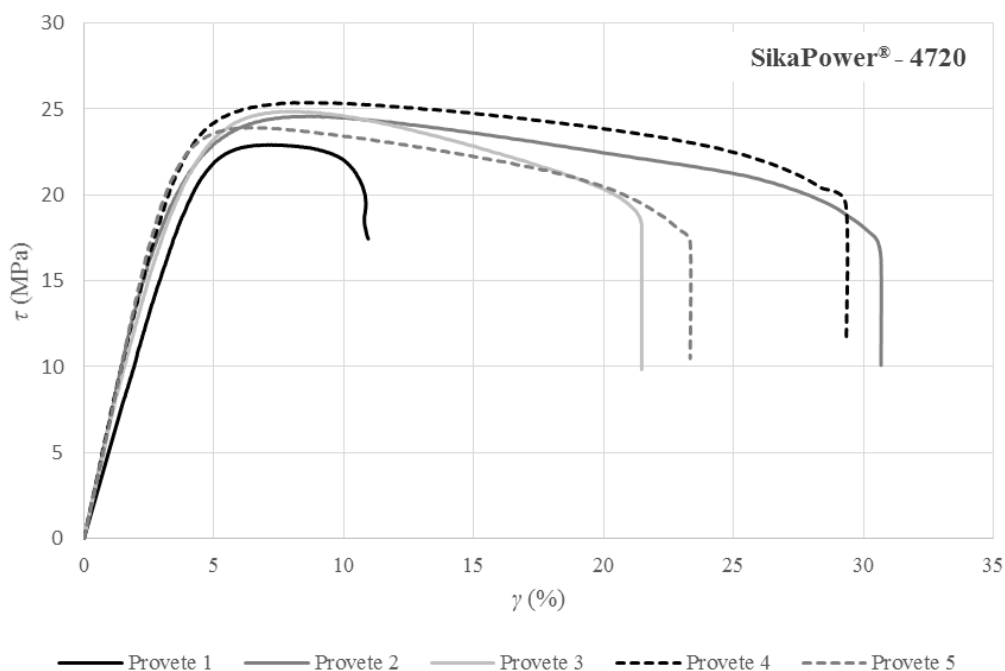


Figura 98 - Curvas τ - γ obtidas no ensaio TAST do adesivo SikaPower[®]-4720.

A Figura 98 evidencia a repetibilidade dos resultados obtidos tanto na rigidez elástica do adesivo como em τ_r . O provete 2 foi aquele que obteve o comportamento mais dúctil; já o que obteve menor ductilidade foi o provete 1. Pode-se verificar que o provete 2 atingiu o valor máximo de γ_r .

Para a determinação de G , recorreu-se novamente a dois pontos de τ correspondentes a γ de 0,05% e 0,25% e utilizou-se a seguinte equação:

$$G = \frac{\tau}{\gamma}. \quad (3.1)$$

O valor de G correspondeu ao declive da reta tangente à zona elástica da curva τ - γ , como ilustrado na Figura 99. De modo a se determinar τ_γ , foi traçada uma reta paralela à tangente da zona elástica da curva τ - γ com γ de 0,2% (Figura 100). A intersecção desta com a curva τ - γ resultou então na propriedade desejada.

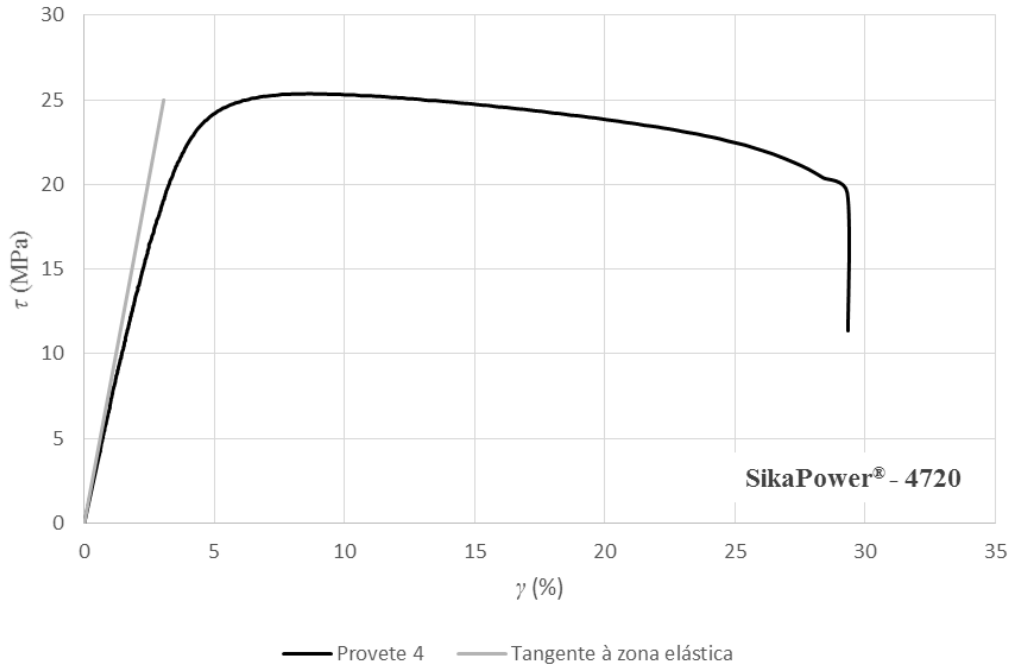


Figura 99 - Curva τ - γ do provete 4 com reta tangente à zona elástica.

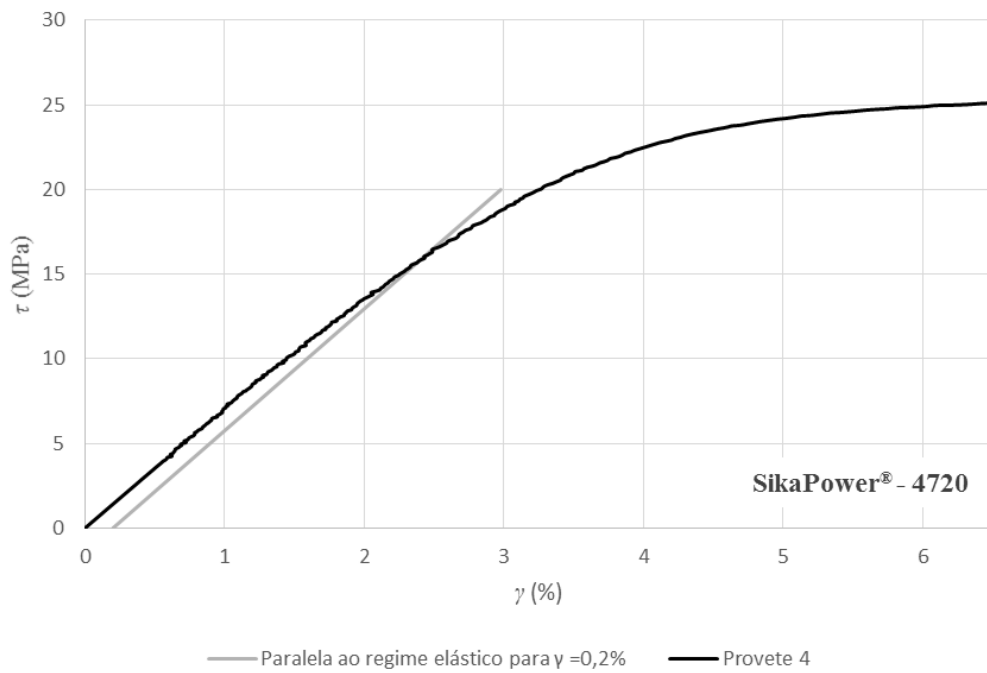


Figura 100 - Curva τ - γ do provete 4 com reta paralela ao regime elástico para $\gamma =0,2\%$.

3.3.3.2 Rotura dos provetes TAST

Foram retiradas fotografias às superfícies de rotura dos provetes TAST de modo a se poder ter uma análise mais pormenorizada dos resultados obtidos (Figura 101). Verificou-se a existência de roturas coesivas em todos os provetes, concluindo-se assim que o processo de granalhagem foi adequado para uma boa preparação das superfícies na zona de colagem. A Figura 102 ilustra de forma mais pormenorizada a superfície de rotura do provete 4.



Figura 101 - Aspeto de rotura dos provetes TAST com adesivo SikaPower®-4720.

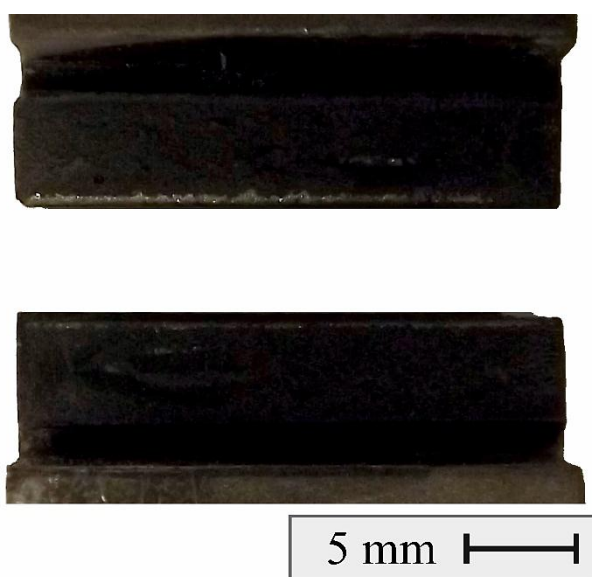


Figura 102 - Aspeto de rotura do provete 4 com adesivo SikaPower®-4720.

3.3.3.3 Propriedades mecânicas ao corte

A Tabela 7 apresenta os valores obtidos das propriedades mais relevantes para a caracterização do adesivo ao corte, considerando ainda os seus valores médios obtidos e respectivos desvios padrão.

Tabela 7 - Propriedades mecânicas obtidas ao corte do adesivo SikaPower®-4720.

Provete	P_{\max} [N]	δ_{\max} [mm]	τ_y [MPa]	τ_r [MPa]	γ_r [%]	G [MPa]
1	2865,967	0,071	15,213	22,928	10,936	697,567
2	3073,479	0,213	14,817	24,588	30,669	727,154
3	3108,062	0,142	13,539	24,864	21,460	770,566
4	3171,353	0,217	14,502	25,371	29,351	819,194
5	2994,543	0,149	16,309	23,956	23,333	739,212
Média	3042,681	0,159	14,876	24,341	23,150	750,738
Desvio Padrão	117,606	0,059	1,012	0,941	7,859	46,356

Analisando a Tabela 7, verifica-se uma repetibilidade das propriedades obtidas com pequenos desvios entre si, sendo por este motivo considerados todos os cinco provetes como válidos. Posteriormente, no capítulo 3.6.2 vai ser feita uma análise mais cuidada dos resultados obtidos.

3.4 Ensaio de fratura à tração

3.4.1 Fabrico dos provetes

Neste capítulo descrevem-se todas as etapas necessárias para o fabrico dos provetes DCB na obtenção das propriedades de fratura à tração. Começa-se por indicar as dimensões e geometria dos provetes DCB, explica-se o modo de preparação dos provetes, o processo de colagem e cura dos provetes e ainda se descrevem as etapas de preparação dos provetes para o ensaio a realizar.

3.4.1.1 Provetes DCB

O trabalho experimental para a determinação das propriedades de fratura à tração do adesivo começou pelo fabrico dos provetes DCB com a configuração da Figura 103. Esta configuração (com dobradiças em aço INOX) foi escolhida por ser mais adaptável às amarras da máquina de ensaios e também devido à reduzida espessura dos substratos. Optou-se por fabricar seis provetes DCB com as dimensões da Figura 104. De referir que o valor de a_0 apresentado é o valor teórico. Após o fabrico

dos provetes, este valor foi medido individualmente e será apresentado posteriormente. Os provetes foram fabricados a partir de substratos de uma liga de alumínio AISI 6082-T651.

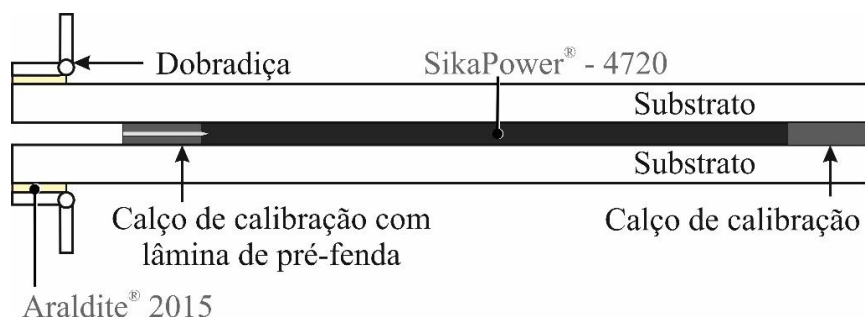


Figura 103 - Configuração dos provetes DCB utilizados.

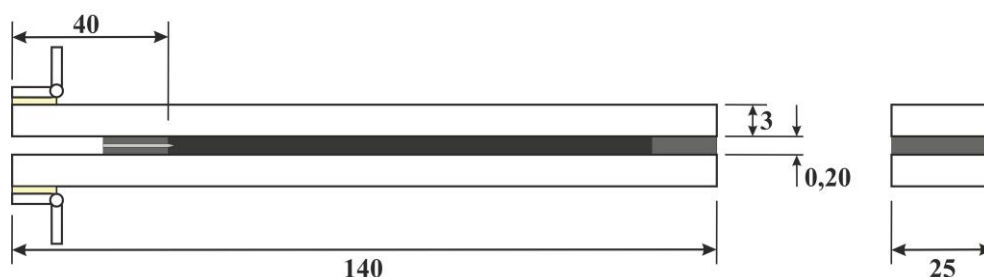


Figura 104 - Dimensões dos provetes DCB (em mm).

3.4.1.2 Preparação dos provetes

Para a preparação dos provetes DCB, começou-se por cortar os substratos. Os substratos utilizados nos seis provetes foram obtidos de chapa de 3 mm de espessura, adquiridos em tiras de 25 mm de largura. Cortaram-se doze tiras com 140 mm de comprimento, utilizando o serrote circular disponível nas Oficinas Mecânicas do Instituto Superior de Engenharia do Porto (ISEP). De seguida, procedeu-se à abrasão como processo passivo mecânico das superfícies a ligar com recurso a uma lixa de média granulação e, posteriormente, ao seu desengorduramento com um lenço embebido em acetona. Obtiveram-se os substratos com a aparência ilustrada na Figura 105.

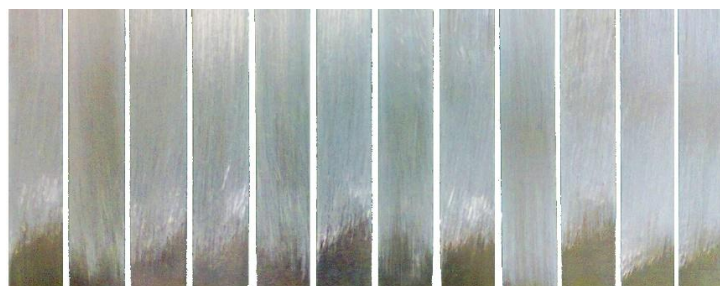


Figura 105 - Substratos DCB após abrasão.

Foi necessária a utilização de calços calibrados em dois locais distintos do provete de forma a garantir a espessura constante da camada adesiva e também a criação da pré-fenda. Em cada provete utilizou-se um calço de calibração constituído por uma fita de aço de 0,20 mm de espessura e outro calço formado por duas fitas de aço com 0,05 mm em ambos os lados de uma lâmina de barbear de 0,10 mm de espessura. Este último calço tem a função de garantir a espessura do adesivo e simular o efeito de um defeito inicial para posterior formação de uma pré-fenda. Nas Figura 106 e Figura 107 estão representados com mais detalhe os calços utilizados.

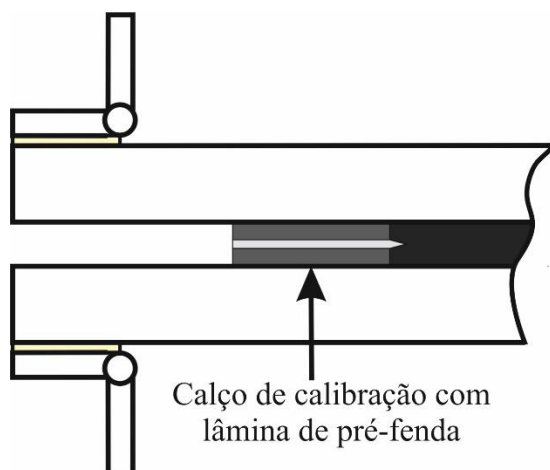


Figura 106 - Pormenor de fitas de aço com lâmina para garantir a espessura do adesivo desejada e simular a pré-fenda.

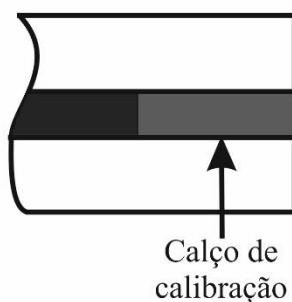


Figura 107 - Pormenor de calço para garantir a espessura do adesivo desejada.

Para o fabrico dos calços, procedeu-se à limpeza e desengorduramento das lâminas e fitas de aço, recorrendo a um papel embebido em acetona. Para fabricar o calço de calibração com lâmina de pré-fenda, utilizou-se um adesivo estrutural cianoacrilato Loctite® Super Cola 3 (Figura 108) a fim de colar as duas fitas de aço à respetiva lâmina de barbear (Figura 109), com aplicação por pincel.



Figura 108 - Loctite® Super Cola 3. Fonte: <http://www.loctitesupercola3.com>.

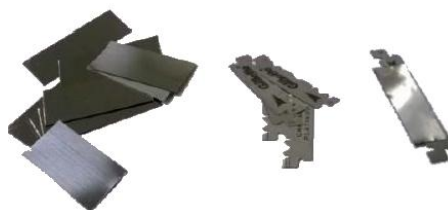


Figura 109 - Conjunto de fitas de aço e lâminas utilizado para fabrico dos provetes DCB.

Posteriormente, desengorduraram-se as superfícies de ambos os calços e estes foram aquecidos no forno a uma temperatura de 40 °C durante 15 min. Este aquecimento vai facilitar a adesão do desmoldante na etapa seguinte. Aplicaram-se três camadas de desmoldante Loctite® Frekote® 770-NC em cada face dos calços de modo a facilitar a remoção destes quando o adesivo estiver completamente curado.

De seguida, recorreu-se novamente ao Loctite® Super Cola 3 para a colagem dos calços em apenas um dos substratos de cada provete, de modo a evitar que estes se deslocassem durante a aplicação do adesivo e colagem do provete. Devido à anterior aplicação do desmoldante nos calços, este procedimento ajuda à sua imobilização durante o fabrico dos provetes, mas sem impedir a sua fácil remoção após a cura do adesivo. Colocaram-se os seis substratos ao longo de uma ripa de madeira para posterior aplicação do adesivo como demonstrado na Figura 110.



Figura 110 - Substrato inferior com calços.

3.4.1.3 Colagem e cura dos provetes

Após estar concluída a etapa da colocação de todos os calços nos substratos, iniciou-se a aplicação do adesivo nas superfícies a colar. Colocaram-se pequenas folhas de Teflon[®] entre os substratos e a superfície da ripa de madeira de modo a evitar a adesão dos excedentários do adesivo. Utilizou-se novamente a pistola como recurso à aplicação do adesivo (Figura 111-a). Foi depositada quantidade de adesivo suficiente para garantir que toda a área de colagem fosse preenchida (Figura 111-b).

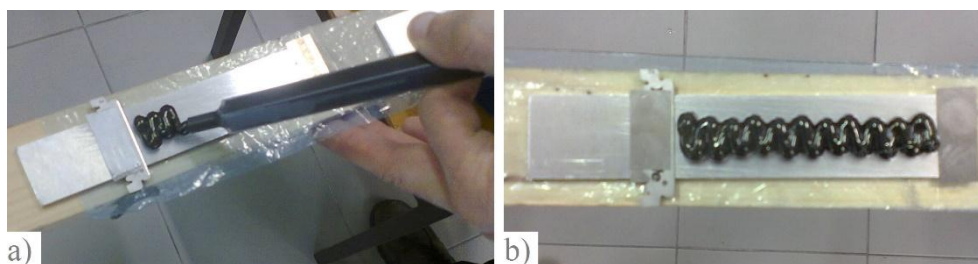


Figura 111 - Aplicação manual do adesivo (a) e substrato DCB após aplicação do adesivo (b).

Colocou-se o substrato superior e aplicou-se uma pequena pressão manual na zona dos calços para garantir que o adesivo se espalhasse em toda a zona de colagem e que o excesso pudesse ser expelido. De seguida, alinharam-se os substratos e verificou-se se o adesivo se encontrava perfeitamente distribuído sem que se sobrepusesse aos calços colados na extremidade do provete, garantindo assim a espessura constante da camada adesiva. Após estes cuidados, finalizou-se esta etapa de fabrico com a aplicação de grampos na zona dos calços (dois em cada provete), como ilustrado na Figura 112. A cura deu-se à temperatura ambiente durante uma semana.



Figura 112 - Provete DCB com grampos.

3.4.1.4 Preparação para ensaio

Antes de se iniciar os ensaios, foi necessário realizar algumas operações de modo a preparar convenientemente todos os provetes DCB. O primeiro passo consistiu na remoção dos grampos dos provetes, seguido da extração de todos os calços com recurso a um alicate. Depois, como os provetes apresentavam excessos de adesivo (como ilustrado na Figura 113), foi necessário proceder à sua remoção. Primeiramente, com recurso a um alicate, removeram-se os excessos de maiores dimensões das partes laterais do provete. Os restantes excessos foram removidos através da abrasão rotativa de uma furadora vertical equipada com uma mó em pedra a 1200 rpm (Figura 114). Obteve-se assim uma superfície lisa na qual o adesivo ficaria à face dos substratos.



Figura 113 - Provete DCB com excessos de adesivo.



Figura 114 - Abrasão dos excessos laterais do provete DCB.

Já com as faces laterais do provete preparadas, procedeu-se à pintura de uma camada de um verniz frágil ao longo da camada do adesivo para facilitar a monitorização de a . Utilizou-se líquido corretor por ter a cor branca e deste modo fazer mais contraste com a fenda. Após a cura deste, propagou-se manualmente a pré-fenda com recurso a uma chave de fendas para garantir a iniciação suave do dano que eventualmente poderia ocorrer devido a algum arredondamento na extremidade da lâmina de barbear. Depois da aplicação da tinta corretora nas faces laterais e da propagação da pré-fenda, colocaram-se as escalas em ambos os substratos com o adesivo Loctite[®] Super Cola 3 como ilustrado na Figura 115. Ambas as escalas devem estar perfeitamente alinhadas entre si e afastadas minimamente da camada de adesivo, para que não dificultem a propagação da fenda, nem a

visualização da mesma, durante a realização do ensaio. Para efeitos do posicionamento da escala considerou-se para cada provete DCB que o valor de 10 mm coincidia com a ponta da pré-fenda.

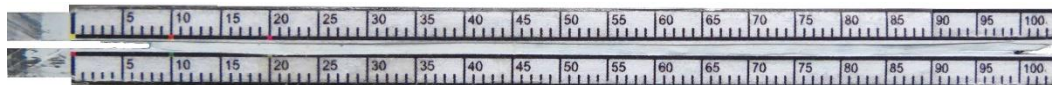


Figura 115 - Provete DCB após aplicação da tinta corretora e escalas.

De seguida, cortaram-se as dobradiças para cada provete com recurso a uma serra manual. Foram necessárias duas dobradiças com 25 mm de comprimento para cada provete, resultando assim num total de doze dobradiças. Desengorduraram-se as superfícies do provete e das dobradiças com acetona para a aplicação de um adesivo. O adesivo selecionado, o Araldite® 2015 (Figura 116), cuja ficha técnica se encontra em anexo, foi aplicado com recurso a uma pistola manual na extremidade com fenda dos provetes, para aplicação da solicitação durante o ensaio. De modo a ser mais fácil a colagem das dobradiças nas superfícies dos provetes, estas foram desmontadas pelo seu eixo de dobragem e montadas a seguir à cura do adesivo. A Figura 117 demonstra os provetes DCB após a aplicação das dobradiças. Reunidas todas estas operações, os provetes ficaram preparados para se proceder à realização do ensaio.



Figura 116 - Cartucho do adesivo Araldite® 2015. Fonte: <http://www.filzring.de>.

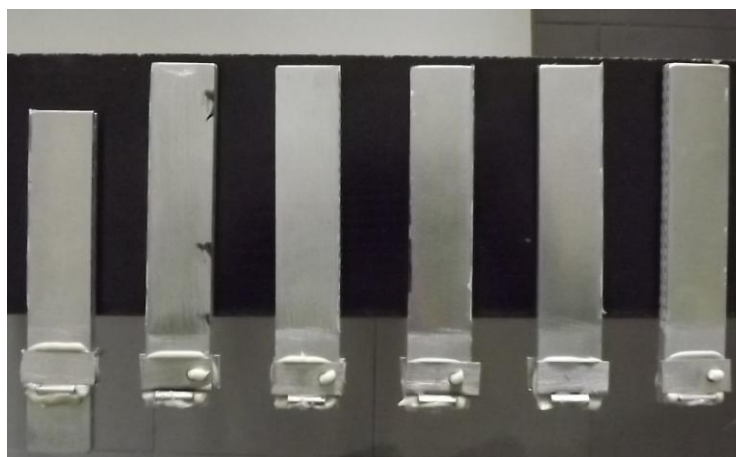


Figura 117 - Provetes DCB após aplicação das dobradiças.

3.4.2 Realização dos ensaios de fratura à tração

3.4.2.1 Preparação e condições do ensaio

Para a realização dos ensaios de caracterização das propriedades de fratura à tração do adesivo selecionado, recorreu-se à máquina de ensaios do Laboratório de Ligações Adesivas da FEUP referida anteriormente, embora desta vez o tipo de ensaio seja diferente. Os testes foram realizados com seis provetes DCB a uma velocidade de $1,75 \text{ mm min}^{-1}$.

Efetuar-se as medições individuais dos valores de a_0 para cada provete, com auxílio de um paquímetro digital, para posterior utilização no tratamento de dados. Os valores registados são apresentados na Tabela 8.

Tabela 8 - Valores obtidos na medição de a_0 para os provetes DCB.

Provete	a_0
1	44,32
2	42,33
3	36,50
4	41,31
5	38,24
6	41,62

Para a fixação dos provetes na máquina de ensaios, primeiramente fixou-se o provete pela dobradiça inferior por intermédio da amarra da máquina de ensaios (Figura 118) e, de seguida, promoveu-se o movimento da amarra basculante com baixa velocidade para posterior fixação da dobradiça superior.

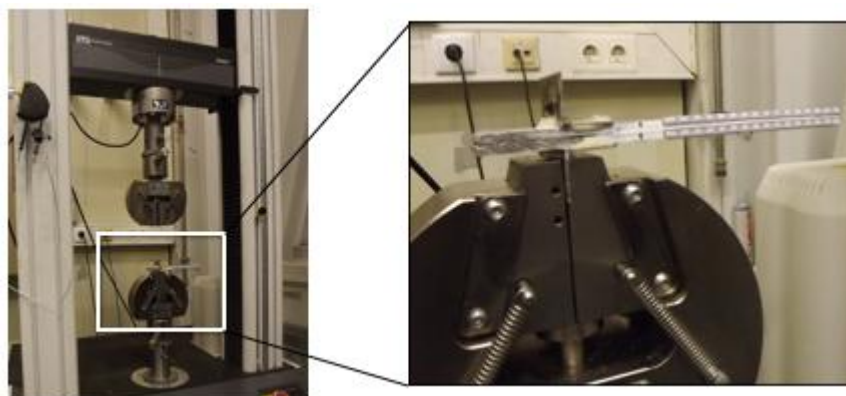


Figura 118 - *Setup* do ensaio DCB.

Depois do provete se encontrar devidamente colocado nas amarras, foi tempo de se colocar a máquina fotográfica para registos de imagens durante o ensaio. Utilizou-se uma máquina fotográfica digital Canon® com resolução de 18 Megapixel devidamente posicionada com um tripé. Teve-se especial cuidado para que a objetiva da câmara capturasse todo o provete, garantindo ainda que as imagens capturadas eram focadas na camada adesiva. Durante a realização do ensaio foram tiradas fotografias com o intervalo de 5 s entre si até que o provete atingisse a rotura. Este procedimento permite determinar o valor de G_{Ic} utilizando os métodos que requerem a medição de a , já descritos no capítulo 2.3.3.4.1. Para o posterior tratamento de dados, deve ser feita uma correlação entre os dados de P e δ com a . Esta correlação é feita conhecendo o instante de tempo correspondente a cada imagem e a velocidade de ensaio de cada provete. A Figura 119 ilustra a captura de uma imagem no início do ensaio e outra momentos antes da rotura do provete 5. Todos os procedimentos foram repetidos para os restantes cinco provetes.

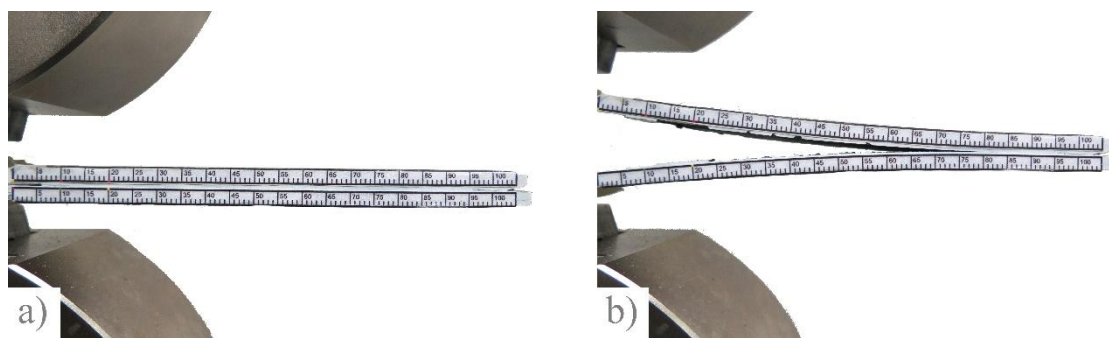


Figura 119 - Registo fotográfico durante o ensaio DCB. Início (a) e momentos antes da rotura (b).

3.4.2.2 Parâmetros medidos durante o ensaio

Os parâmetros medidos durante o ensaio DCB foram P , δ , bem como a . O *software* da máquina de ensaios regista a força exercida das amarras durante o seu deslocamento a uma velocidade de ensaio constante. À medida que a força é exercida no provete, a fenda vai-se propagando até que ocorra a rotura. Esta é registada através de fotografias, como referido anteriormente. Após o ensaio, é analisado o tipo de rotura obtido em cada provete. Espera-se que as roturas sejam completamente coesivas para que o valor medido de G_{Ic} seja representativo da tenacidade do adesivo, permitindo também a obtenção da curva- R mais linear. Assim, com os valores de P , δ e a , consegue-se posteriormente obter as curvas P - δ e R , e também calcular o valor de G_{Ic} .

3.4.3 Resultados obtidos

3.4.3.1 Curvas P - δ e R

Durante o ensaio de cada provete DCB o *software* gerou valores de P e de δ , convertidos em curvas P - δ . Tal como nos ensaios de tração e de TAST, o eixo das abcissas representa os valores de δ e o das ordenadas os de P . A Figura 120 ilustra as seis curvas P - δ obtidas nos ensaios DCB.

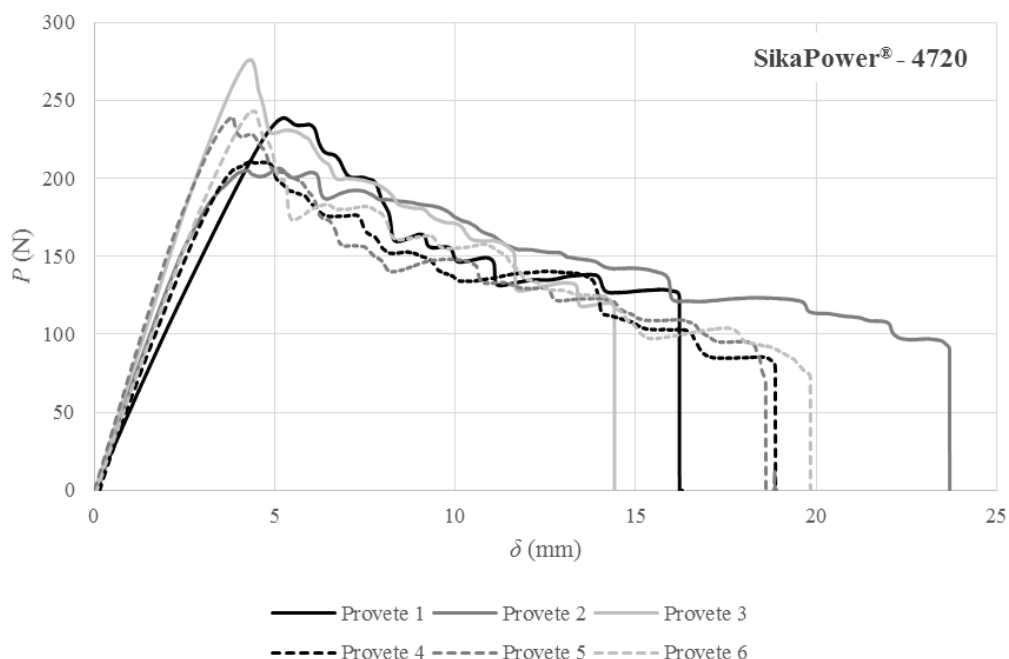


Figura 120 - Curvas P - δ obtidas no ensaio DCB do adesivo SikaPower®-4720.

Observa-se que as curvas apresentam um comportamento inicial, até atingirem o seu máximo, com repetibilidade. Os valores de P_{\max} são aproximados, com exceção do provete 3 que apresenta o valor mais elevado e ao mesmo tempo o menor valor de δ_{\max} . O provete com maior valor registado de δ_{\max} foi o 2. Os provetes 4,5 e 6 apresentam valores δ_{\max} de muito próximos entre si. Os picos de P_{\max} correspondem ao valor crítico que iniciou a progressão da fenda em cada provete. Após a iniciação da fenda, verifica-se que P sofre um relaxamento associado à progressão da fenda a um valor constante de G_{Ic} .

Para a determinação das propriedades de fratura à tração, foram utilizados os métodos de redução de G_{Ic} descritos no capítulo 2.3.3.4. Recorreu-se aos métodos CCM e CBT que requerem a medição de a e ao método CBBM baseado em a_{eq} . Para o cálculo de G_{Ic} pelos métodos CCM e CBT utilizaram-se as equações (2.20) e (2.24), respetivamente. No método CBBM usou-se a equação (2.33).

A partir dos dados já registados pelo *software* da máquina de ensaios e com recurso às equações (2.20), (2.24) e (2.33) construíram-se as curvas-*R*. O eixo das abcissas indica os valores de a_{eq} para o método CBBM ou os valores de a para os métodos CCM e CBT. No eixo das ordenadas estão representados os valores de G_{Ic} para os diferentes métodos. Na Figura 121 apresentam-se as curvas-*R* do provete 5, considerado como representativo dos resultados obtidos pelos seis provetes.

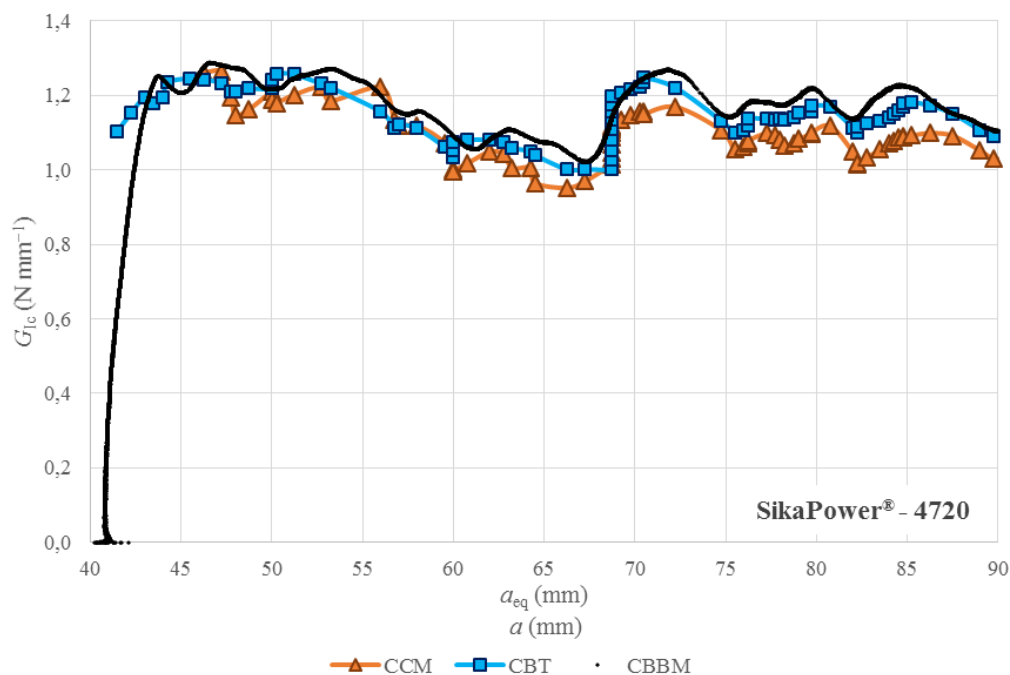


Figura 121 - Curvas-*R* obtidas pelo provete 5 no ensaio DCB do adesivo SikaPower®-4720.

As curvas obtidas pelos três métodos possuem valores muito próximos, não havendo grandes discordâncias associadas aos valores de G_{Ic} e a ou a_{eq} . As curvas-*R* dos métodos CBT e CCM só se iniciam assim que a fenda comece a propagar-se, daí só aparecerem valores gráficos aproximadamente a partir dos 41 mm. Observa-se um decréscimo das curvas-*R* entre os 55 mm e os 70 mm, facto que se deve a possíveis variações de propriedades do adesivo, fenómenos de propagação instável da fenda, diferenças na adesão ou até mesmo na incorreta preparação da superfície dos substratos [45].

3.4.3.2 Roturas dos provetes DCB

Todos os provetes foram ensaiados até que ocorresse a sua rotura. Na Figura 122 é possível observar ambas as superfícies dos substratos de cada provete. Em todos eles ocorreram roturas coesivas, sendo ainda visíveis as marcas dos cordões de adesivo durante a sua aplicação. Estas marcas muito

possivelmente foram resultado de um inadequado processo de preparação das superfícies. Uma forma de ultrapassar este problema seria utilizar o processo passivo mecânico da granalhagem.

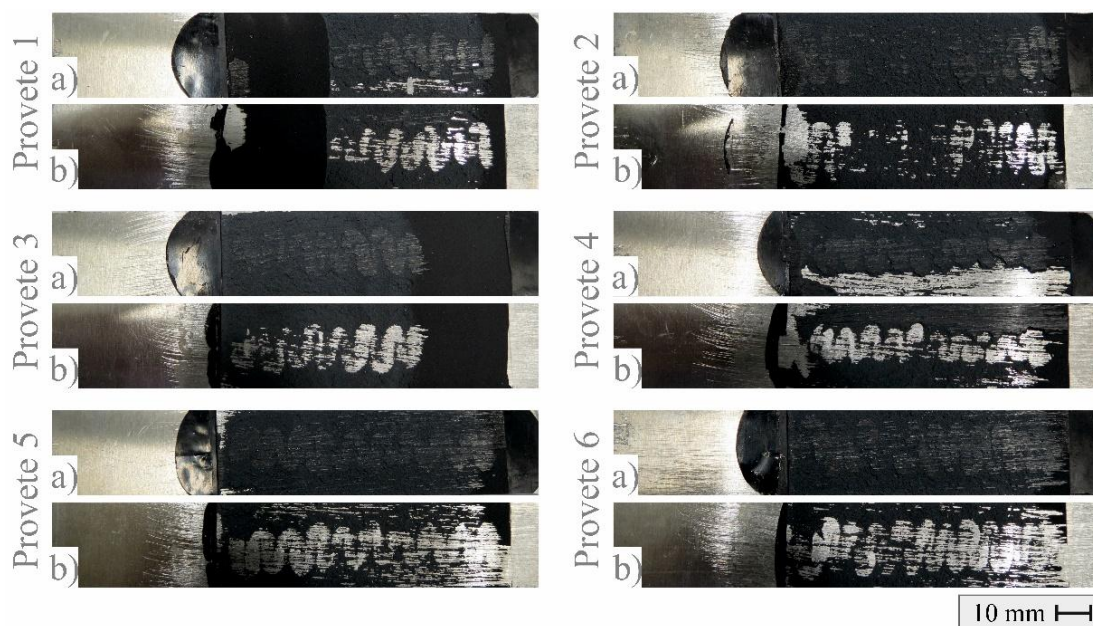


Figura 122 - Aspeto das superfícies de rotura dos provetes DCB. Substrato inferior (a) e substrato superior (b).

3.4.3.3 Propriedades de fratura à tração

Na Tabela 9 são apresentados os valores médios de G_{Ic} e respetivos desvios padrão obtidos pelos três métodos utilizados. Como é possível observar, os valores de G_{Ic} para cada provete pelos diferentes métodos são muito próximos.

Tabela 9 - Valores de G_{Ic} pelos métodos CCM, CBT e CBBM.

Provete	P_{max} [N]	δ_{max} [mm]	G_{Ic} [$N\ mm^{-1}$]		
			CCM	CBT	CBBM
1	238,825	16,287	1,249	1,317	1,363
2	206,584	23,846	1,395	1,443	1,401
3	276,072	14,413	1,350	1,447	1,598
4	210,687	19,150	1,059	1,174	1,186
5	239,236	19,022	1,067	1,120	1,173
6	243,150	19,948	1,084	1,168	1,040
Média	235,759	18,778	1,201	1,278	1,294
Desvio Padrão	23,025	2,958	0,138	0,132	0,182

Consideraram-se todos os provetes patentados na Tabela 9 como válidos, em função da repetibilidade de valores obtidos. No capítulo 3.6.3 vai ser feita uma análise detalhada a estes resultados.

3.5 Ensaios de fratura ao corte

3.5.1 Fabrico dos provetes

O presente capítulo descreve com detalhe o fabrico dos provetes ENF. Todos os processos são idênticos aos do fabrico de provetes DCB, apenas algumas diferenças são apontadas. Indicam-se as dimensões e geometria dos provetes ENF, explica-se o modo de preparação dos mesmos, o seu processo de colagem e a sua cura, e por fim as suas etapas de preparação para o ensaio a efetuar.

3.5.1.1 Provetes ENF

No fabrico dos provetes ENF escolheu-se a mesma liga alumínio AISI 6082-T651 utilizado na obtenção dos provetes DCB. Para a determinação das propriedades de fratura ao corte do adesivo selecionado, começou-se por fabricar os provetes ENF com a configuração apresentada na Figura 123 e dimensões da Figura 124. O valor de a_0 apresentado é o valor teórico, sendo que os valores individuais de cada provete são referidos posteriormente. Foram utilizados oito provetes devido ao facto do ensaio ENF tender a proporcionar problemas de propagação instável da fenda ou ainda dificuldades inerentes à visualização da mesma durante o ensaio.



Figura 123 - Configuração dos provetes ENF utilizados.

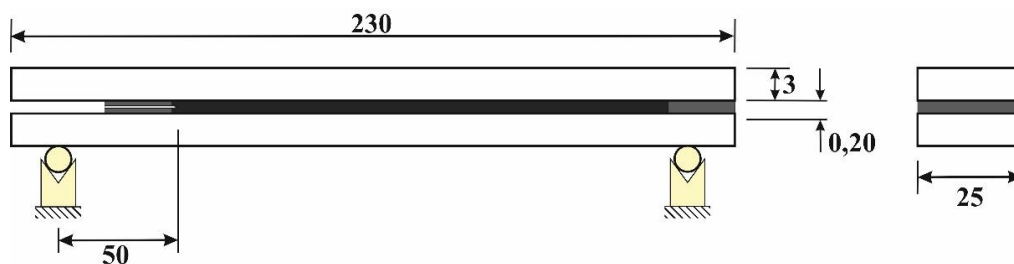


Figura 124 - Dimensões dos provetes ENF (em mm).

3.5.1.2 Preparação dos provetes

Na preparação dos provetes ENF começou-se por cortar os substratos a partir de chapa de 3 mm de espessura e de 25 mm de largura. Cortaram-se as 16 tiras com 230 mm de comprimento com o mesmo serrote circular utilizado na preparação dos provetes DCB. Seguiu-se o tratamento das superfícies dos substratos por abrasão e posterior desengorduramento de forma idêntica ao sucedido com os substratos DCB. Findas estas etapas, as superfícies dos substratos aparentavam o aspeto da Figura 125 e encontravam-se preparadas para a aplicação dos calços de calibração. O processo de colagem e preparação dos calços foi exatamente o mesmo que no fabrico dos provetes DCB. Assim, os calços foram colados apenas com a diferença respeitante à distância entre o calço e a extremidade do provete (Figura 126).



Figura 125 - Aspeto das superfícies dos substratos ENF após abrasão e desengorduramento.

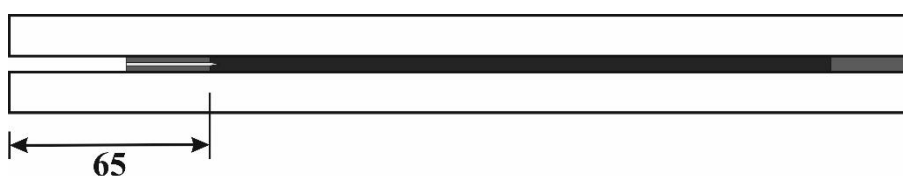


Figura 126 - Posição do calço de calibração com lâmina de pré-fenda.

Posicionaram-se todos os substratos inferiores com os respetivos calços ao longo de uma ripa de madeira com folhas de Teflon[®] para evitar a posterior adesão dos possíveis excessos de adesivo dos provetes. Os substratos encontravam-se em condições para a aplicação do adesivo, como ilustra a Figura 127.

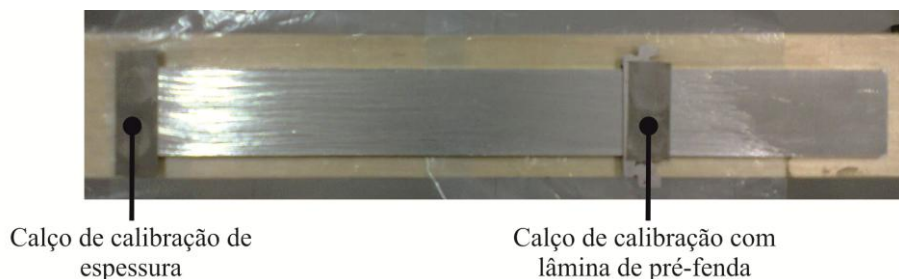


Figura 127 - Substrato ENF após colagem dos calços apropriados.

3.5.1.3 Colagem e cura dos provetes

De forma idêntica à preparação dos provetes DCB procedeu-se à aplicação do adesivo na área de colagem dos substratos (Figura 128-a). De seguida, colocaram-se os substratos superiores e aplicou-se uma pressão manual. Posteriormente, os provetes foram comprimidos com auxílio de grampos na zona dos calços (de modo a garantir que o adesivo se espalhasse de forma uniforme em toda a zona de colagem) e ainda alinhados no seu comprimento e largura, cujo resultado final para um provete pode ser observado na Figura 128-b. O processo de cura deu-se à temperatura ambiente durante uma semana (Figura 129).

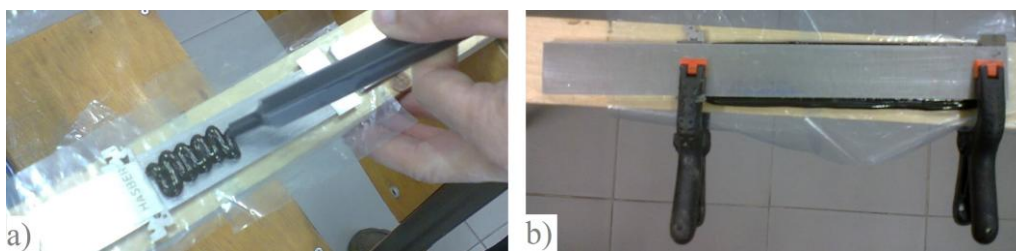


Figura 128 - Aplicação do adesivo (a) e compressão do provete ENF com auxílio de grampos (b).



3.5.1.4 Preparação para ensaio

Após cura dos provetes, foi necessário proceder a todos os procedimentos para preparação do ensaio. Começou-se pela remoção de todos os grampos dos provetes e seguidamente procedeu-se à cuidada extração dos calços com recurso a um alicate. De forma análoga à preparação dos provetes DCB, foi necessário remover os excessos de adesivo presentes nos provetes (Figura 130). Primeiramente, retiraram-se os excessos de maiores volumes com um alicate e depois, para as partes excedentárias mais pequenas, recorreu-se à furadora vertical equipada com uma mó em pedra abrasiva já utilizada nos provetes DCB.



Figura 130 - Provete ENF com excessos de adesivo.

Assim que as faces laterais dos provetes se encontravam sem excessos de adesivo, iniciou-se a pintura de uma camada de verniz frágil (tinta corretora) ao longo da camada adesiva de modo a facilitar a visualização de a . Após a cura da camada de verniz, propagou-se com uma chave de fendas a pré-fenda do provete. Finalizadas as etapas anteriores, colaram-se as escalas em ambos os substratos com o adesivo Loctite® Super Cola 3. Voltou-se a ter o mesmo cuidado, como aconteceu na preparação dos provetes DCB, isto é, garantir que ambas as escalas estavam alinhadas entre si e ainda que não dificultassem a visualização da propagação da fenda durante a realização do ensaio. Considerou-se ainda que, para todos provetes, o valor de 10 mm coincidia com a ponta da pré-fenda. Os provetes ENF foram ainda numerados para devida identificação. Finalmente marcaram-se dois pontos em cada provete para facilitar a correta colocação na mesa de apoio e desta forma garantir que o ponto de aplicação de carga fosse a meio vão dos provetes. Estes encontravam-se deste modo prontos para o seu ensaio (Figura 131).

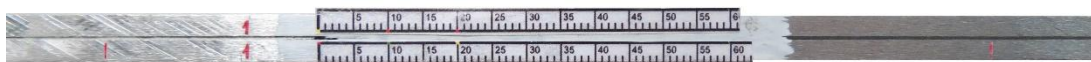


Figura 131 - Provete ENF após preparação para ensaio.

3.5.2 Realização dos ensaios de fratura ao corte

3.5.2.1 Preparação e condições do ensaio

Começou-se por medir os valores individuais de a_0 para cada provete, com auxílio de um paquímetro digital (Figura 132), para posterior utilização em cálculos. Os valores obtidos são apresentados na Tabela 10.



Figura 132 - Medição individual do valor de a_0 .

Tabela 10 - Valores obtidos na medição de a_0 para os provetes ENF.

Provete	a_0
1	65,97
2	64,50
3	66,86
4	68,61
5	67,14
6	75,28
7	68,06
8	65,24

Os ensaios de fratura ao corte foram realizados na máquina de ensaios já utilizada nos três ensaios anteriormente descritos. Alterou-se o tipo de *setup* para um mais apropriado ao ensaio. Este foi constituído por uma mesa composta por dois rolos de apoio (distanciados a 200 mm entre si) e ainda por um dispositivo cilíndrico de solicitação de carga apropriado.

O passo seguinte consistiu em colocar o provete na mesa de apoio, tendo o cuidado de alinhar os pontos de referência do provete com o centro dos rolos de apoio, garantindo deste modo a disposição centrada pelo cilindro de solicitação (Figura 133). Foram ainda inseridas duas folhas de Teflon® (Figura 134) entre os substratos na zona da pré-fenda para que o escorregamento relativo não induzisse o possível atrito entre ambos.

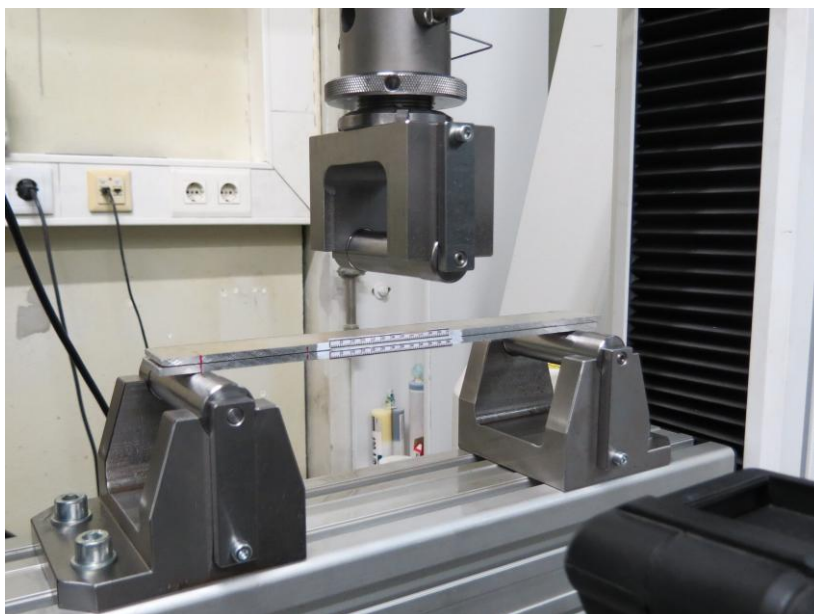


Figura 133 - *Setup* do ensaio ENF.

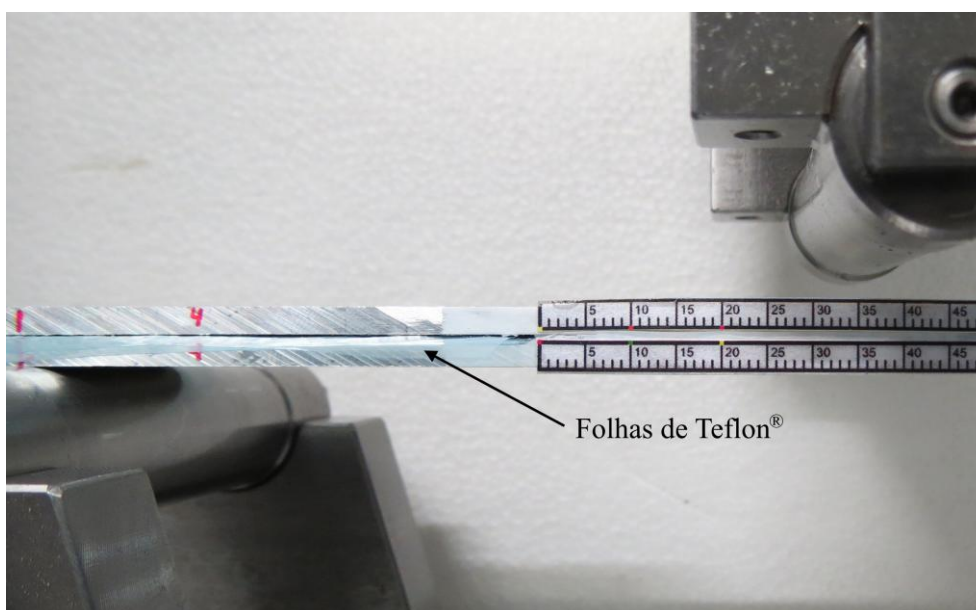


Figura 134 - Provete com folhas de Teflon[®] para evitar atrito durante a realização do ensaio.

Seguidamente, com baixa velocidade, deu-se movimento ao cilindro de carga de modo a ficar em contacto com o provete, e teve-se ainda o cuidado de calibrar o equipamento. Repetiram-se todos os passos indicados para os oito provetes.

Foi utilizada a máquina fotográfica anteriormente referida nos ensaios DCB para registar imagens durante o ensaio com finalidade de auxiliar a determinação de G_{IIc} . Teve-se novamente a atenção para que a objetiva da câmara capturasse toda a zona útil da propagação da fenda. A captura de

imagens realizou-se a cada 5 s desde o início do ensaio até que a fenda ultrapassasse o ponto de solicitação de carga. A Figura 135 ilustra a captura de uma imagem no início do ensaio e outra momentos antes do seu fim.

Os testes foram realizados na máquina de ensaios já utilizada nos três ensaios anteriores à temperatura ambiente e a uma velocidade constante de 2 mm min^{-1} .

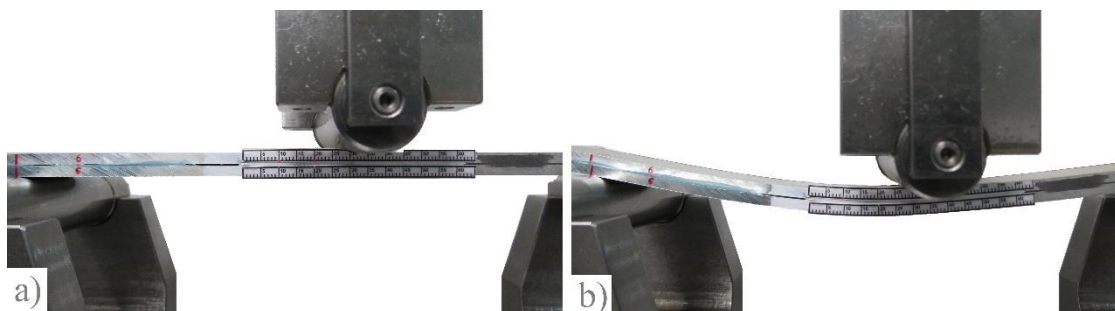


Figura 135 - Registo fotográfico durante o ensaio ENF. Início (a) e momentos antes do fim (b).

3.5.2.2 Parâmetros medidos durante o ensaio

Tal como sucedeu no ensaio DCB, os parâmetros medidos durante o ensaio ENF também foram P , δ e a . O *software* regista a força exercida pelo cilindro de carga durante o seu deslocamento a uma velocidade de ensaio constante já definida. À medida que é exercida a força a meio vão do provete, a fenda vai-se propagando até ultrapassar o ponto de solicitação. A propagação da fenda vai ser monitorizada através da captura de imagens, como referido anteriormente. Com os valores de P , δ e a foi possível obter as curvas P - δ e R e ainda obter o valor de G_{IIc} .

3.5.3 Resultados obtidos

3.5.3.1 Curvas P - δ e R

Foram registados os valores de P e δ durante os ensaios ENF através do *software* da máquina de ensaios, obtendo-se ao mesmo tempo as curvas P - δ ilustradas na Figura 136 para os oito provetes. Igualmente aos ensaios anteriores, os valores de δ são representados no eixo das abcissas e o de P no das ordenadas.

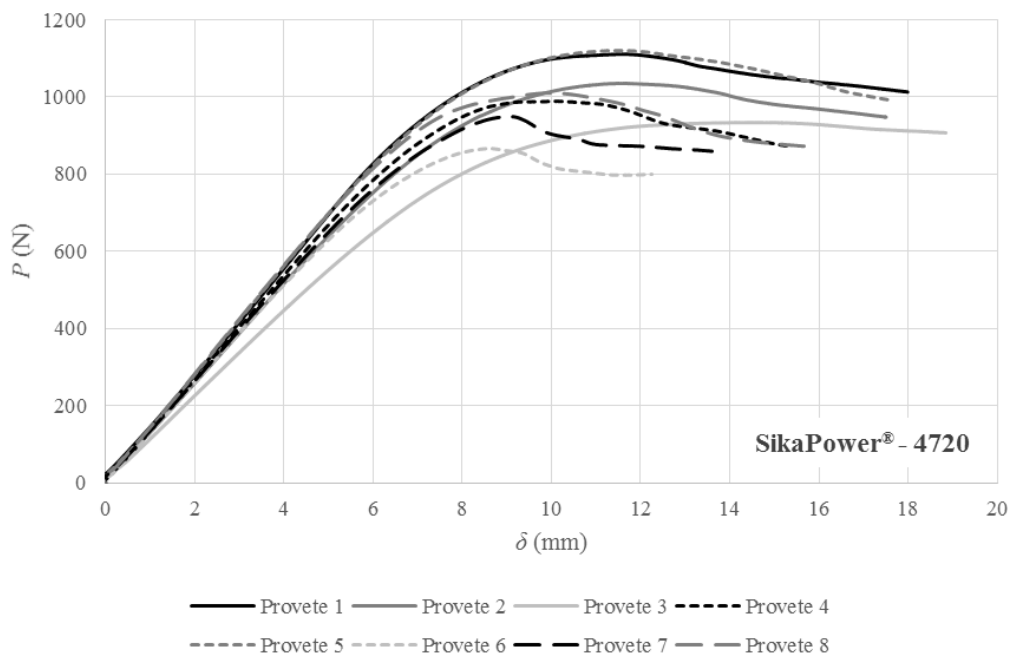


Figura 136 - Curvas P - δ obtidas no ensaio ENF do adesivo SikaPower®-4720.

Analisando as curvas P - δ , observa-se um comportamento idêntico referente ao regime elástico dos provetes, sendo que o único com comportamento um pouco diferente foi o provete 3. Com exceção dos provetes 4,6,7 e 8, é notório um comportamento similar após ser atingido o valor de P_{\max} . Também é possível observar que o provete 1 e 5 atingiram o valor máximo de P_{\max} (valores muito aproximados entre si) e ainda que o provete 6 atingiu o valor mínimo de P_{\max} . No que diz respeito aos valores de δ , existe uma repetibilidade entre os provetes 1,2,3 e 5, sendo que o 3 alcança maior δ_{\max} . Como aconteceu no valor de P_{\max} , o provete 6 obteve também o menor δ_{\max} .

Utilizaram-se os métodos de redução CCM, DBT, CBT e CBBM para determinar G_{IIc} , descritos no capítulo 2.3.4.4. Os métodos CCM, DBT e CBT dependem da medição de a , já o CBBM necessita da medição de a_{eq} . No cálculo de G_{IIc} pelos métodos CCM, DBT e CBT recorreu-se às equações (2.40), (2.42) e (2.43) respetivamente. No CBBM usou-se a (2.48).

A partir dos dados já registados pelo *software* e corretamente tratados, construíram-se as curvas- R . O eixo das ordenadas apresenta o valor de G_{IIc} para os diferentes métodos. No eixo das abcissas estão indicados os valores de a_{eq} para o método CBBM e ainda os de a para os restantes métodos. A Figura 137 demonstra as curvas- R obtidas pelo provete 7, consideradas representativas da totalidade dos ensaios realizados.

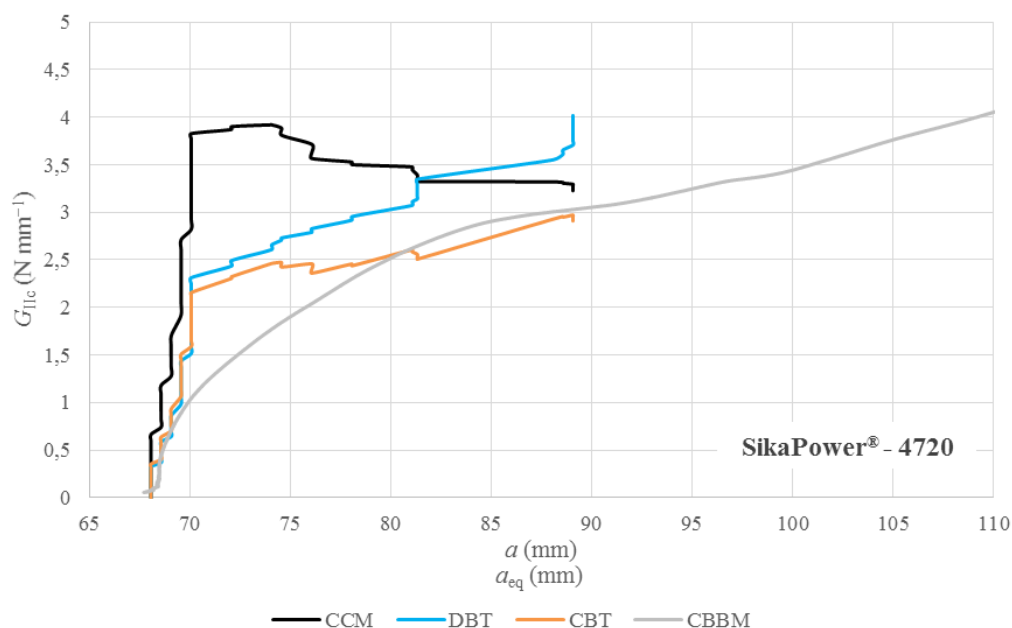


Figura 137 - Curvas-R obtidas pelo provete 7 no ensaio ENF do adesivo SikaPower®-4720.

Os resultados demonstram que não existe um patamar perfeitamente definido para nenhum dos métodos, o que se pressupõe estar relacionado com a existência de uma zona plástica de dimensões significativas. Comparando os valores durante a propagação pelos diferentes métodos, constata-se um acordo razoável, exceto para o CCM, devido às dificuldades de ajuste polinomial que é característico deste método. No entanto, o patamar relativo ao CBBM encontra-se deslocado para a direita relativamente aos restantes métodos, facto que pode ser explicado pela zona plástica do adesivo quando solicitado ao corte, induzindo assim um valor bastante mais elevado de a_{eq} .

3.5.3.2 Roturas dos provetes ENF

Como dito anteriormente, o ensaio termina quando a fenda ultrapassa o ponto de solicitação de carga. Assim, diferentemente aos provetes DCB, os ENF não sofreram rotura total. Desta forma, apenas foi verificada a plastificação dos aderentes e a propagação da fenda. Os provetes foram fotografados de modo a ser possível comparar o valor máximo de a . Na Figura 138 apresenta-se a propagação de final da fenda para cada provete. É possível observar com mais aproximação e detalhe a posição final da ponta da fenda assinalada para cada provete.

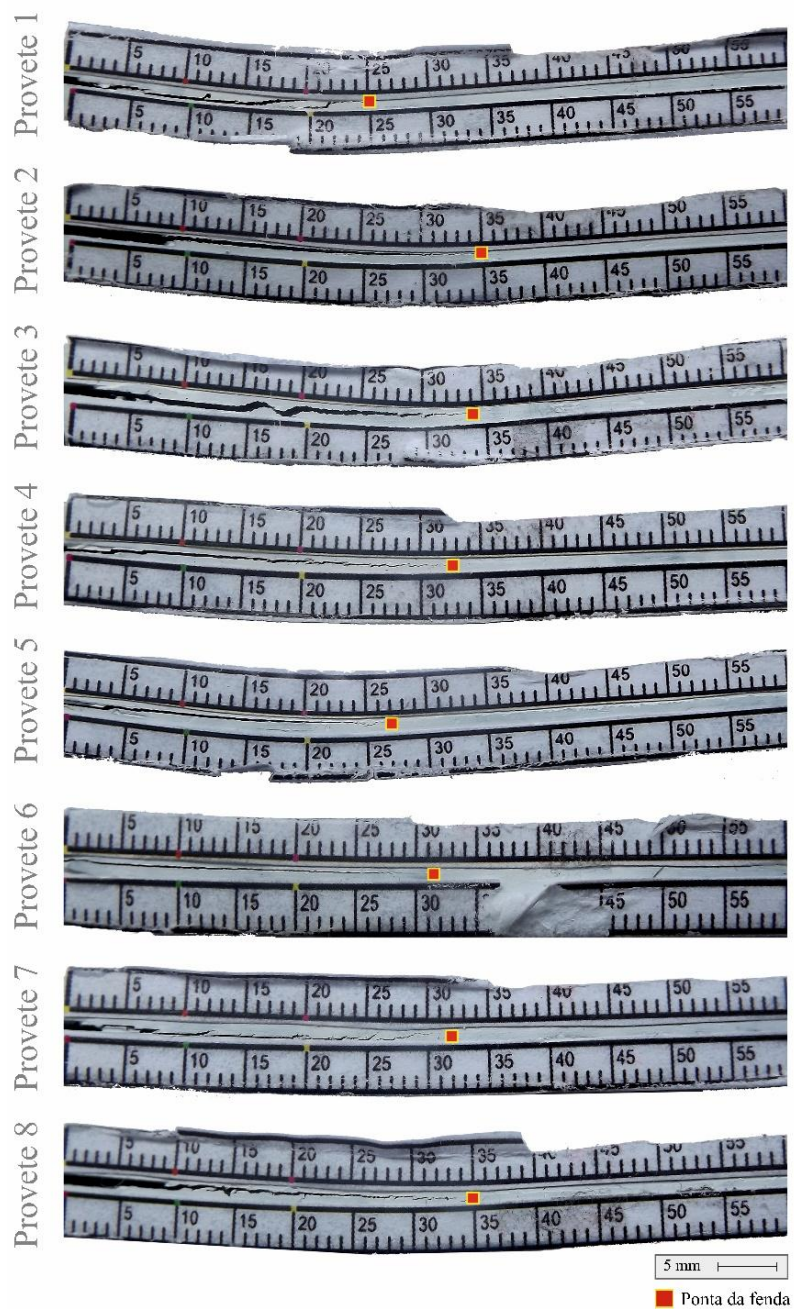


Figura 138 - Propagação da fenda após ensaio.

3.5.3.3 Propriedades de fratura ao corte

A Tabela 11 resume os valores de P_{\max} , δ_{\max} e de G_{IIc} (pelos quatro métodos diferentes) obtidos nos ensaios ENF, bem como as suas médias e desvios padrão.

Tabela 11 - Valores de P_{\max} , δ_{\max} e de G_{IIc} obtidos nos ensaios ENF.

Provete	P_{\max} [N]	δ_{\max} [mm]	G_{IIc} [N mm ⁻¹]			
			CCM	DBT	CBT	CBBM
1	1110,912	17,990	5,183	4,361	3,327	4,467
2	1035,342	17,507	4,473	4,512	3,886	4,544
3	933,773	18,847	3,729	4,335	3,858	4,327
4	989,140	15,350	4,671	4,270	2,824	4,151
5	1119,458	17,650	5,428	4,176	3,195	4,283
6	866,329	12,257	-	-	-	-
7	950,081	13,593	3,317	3,544	2,773	3,503
8	1010,304	15,953	3,843	4,244	2,984	4,367
Média	1001,917	16,143	4,378	4,206	3,264	4,235
Desvio Padrão	86,818	2,303	0,783	0,311	0,459	0,347

Os valores de G_{IIc} do provete 6 não foram contabilizados por apresentarem um desvio assinalável por defeito relativamente aos restantes provetes, o que provavelmente estará relacionado com questões de fabrico. Os restantes foram considerados válidos em função da repetibilidade dos dados obtidos e pequenos desvios nos parâmetros que foram analisados. No capítulo 3.6.4 vai ser apresentada uma análise mais cuidada dos resultados obtidos.

3.6 Discussão dos resultados obtidos

Neste capítulo irão ser abordados os resultados dos ensaios realizados e será feita uma análise crítica de modo a se perceberem melhor os parâmetros obtidos. Também serão efetuadas comparações entre os parâmetros obtidos experimentalmente e os fornecidos pelo fabricante (sempre que existentes na ficha técnica do adesivo). Ainda se comparam as propriedades obtidas com outro adesivo da família dos epóxidos, o Araldite® 2015.

Comparativamente com o Araldite® 2015, o adesivo SikaPower®-4720 possui um maior tempo de manuseamento (à temperatura ambiente). Este último, após mistura dos dois componentes, permanece adequado para utilização durante 60 min, enquanto o Araldite® 2015 possui um tempo de 30-40 min. Enquanto o adesivo SikaPower®-4720 possui um tempo de cura de 24 h, o Araldite® 2015 não possui informação disponível na ficha do fabricante.

3.6.1 Ensaios mecânicos à tração

Os corpos de prova foram ensaiados à tração em condições idênticas no que diz respeito à temperatura, velocidade de ensaio, equipamentos utilizados, fabrico e preparação.

Comparando com resultados propostos pelo fabricante do adesivo, verifica-se que os valores obtidos foram muito próximos, tendo sido atingido um valor médio de σ_r de $27,519 \pm 0,845$ MPa, um pouco superior ao declarado pelo fabricante, com o valor dos 24 MPa. Constata-se a elevada repetibilidade do valor de σ_r com o desvio padrão reduzido de 3,1%, como demonstrado na Figura 139. Os provetes 3 e 5 atingem os valores superiores de σ_r . As causas inerentes à ocorrência de valores superiores aos do fabricante residem, por exemplo, em diferenças do processo cura (tempo e/ou temperatura) ou do protocolo de ensaio.

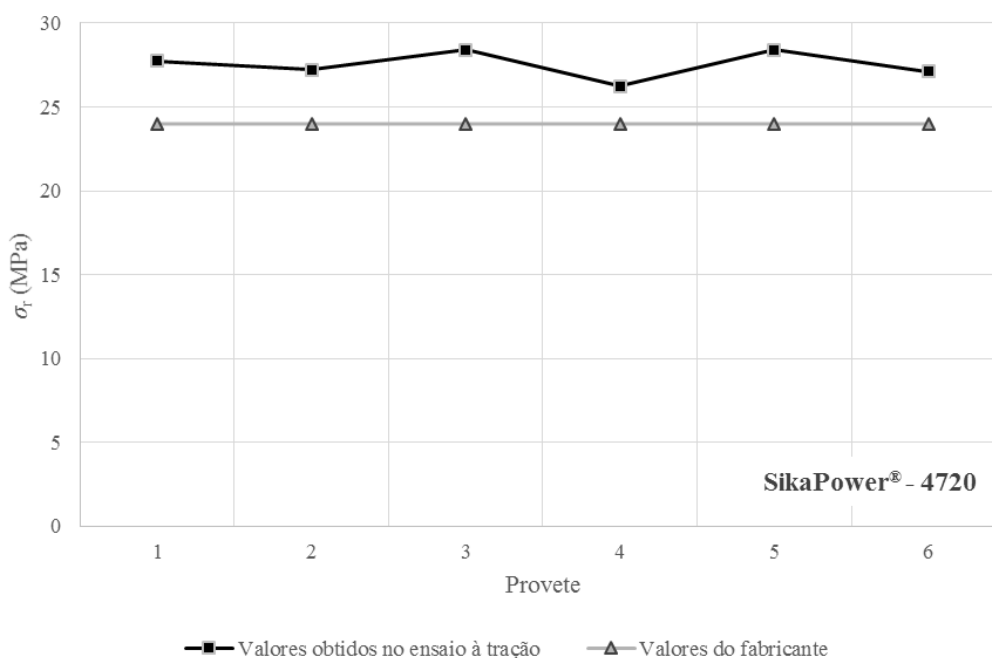


Figura 139 - Comparação de σ_r para o adesivo SikaPower[®]-4720 no ensaio à tração.

Ainda que o valor médio de ϵ_r obtido experimentalmente tenha sido de $1,973 \pm 0,343\%$, o fabricante reclama um valor superior (de 3%). Esta diferença pode ser justificada com o aparecimento dos vazios na zona útil dos provetes (Figura 86-b), isto é, estes induziram uma redução de ϵ_r devido a uma rotura prematura. Na Figura 140 é feita a comparação entre os valores obtidos experimentalmente de ϵ_r e o da ficha técnica do adesivo selecionado. O provete 5 atingiu um valor bastante próximo ao indicado pelo fabricante (2,584%).

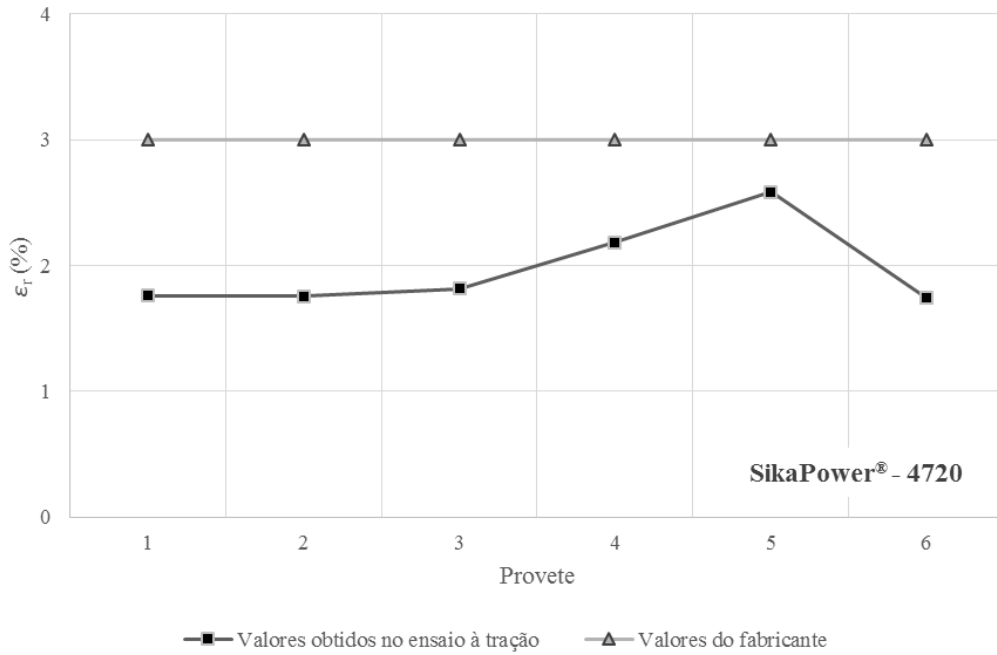


Figura 140 - Comparação de ϵ_r para o adesivo SikaPower®-4720 no ensaio à tração.

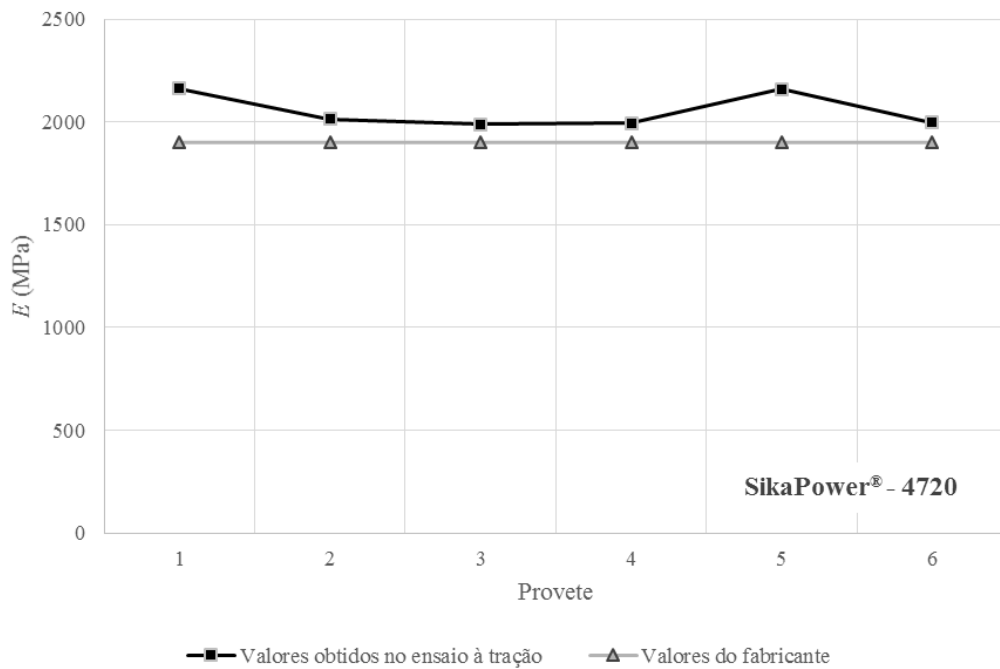


Figura 141 - Comparação de E para o adesivo SikaPower®-4720 no ensaio à tração.

Experimentalmente obteve-se um valor de E superior ao valor indicado na ficha técnica (Figura 141). Enquanto o valor médio obtido foi de $2052,477 \pm 84,818$ MPa com um desvio percentual de 4,1%, o da ficha técnica do adesivo indicava os 1900 MPa. As condições de cura, de teste (temperatura e/ou

humidade) ou ainda o tipo de método de determinação de E podem estar associadas à diferença de valores obtidos observada. Foi atingido um valor de E muito próximo do fabricante pelos provetes 2, 3, 4 e 6.

Outra propriedade obtida experimentalmente foi σ_y , que caracteriza a transição elasto-plástica do adesivo. Nos ensaios conseguiu-se um valor médio de $23,286 \pm 2,252$ MPa (desvio percentual de 9,671%). Não foi possível comparar o valor obtido com o do fabricante, devido à ausência do mesmo na ficha técnica do adesivo. Por outro lado, na Tabela 12 vai ser mencionada esta propriedade.

De forma a conseguir-se melhor avaliação do adesivo ensaiado, na Tabela 12 é feita uma comparação das propriedades mecânicas à tração obtidas com as do trabalho de Campilho et al. [58], para o adesivo estrutural epóxico Araldite® 2015.

Tabela 12 - Comparação das propriedades mecânicas à tração.

Propriedades	σ_r [MPa]	ϵ_r [%]	E [MPa]	σ_y [MPa]
SikaPower®-4720	$27,519 \pm 0,845$	$1,973 \pm 0,343$	$2052,477 \pm 84,818$	$23,286 \pm 2,252$
Araldite® 2015 ^[58]	$21,63 \pm 1,61$	$4,77 \pm 0,15$	1850 ± 210	$12,63 \pm 0,61$

Comparando os valores tabelados, verifica-se que o adesivo SikaPower®-4720 possui valores superiores nas propriedades referentes a σ_r , E e ainda σ_y . Já o Araldite® 2015 possui um valor médio de ϵ_r superior ao adesivo testado.

3.6.2 Ensaios mecânicos ao corte

Os cinco provetes TAST foram testados sob as mesmas condições respeitantes à temperatura, ao *setup*, à velocidade e à medição de deformações. Fabricados de forma idêntica e com uma cura de uma semana, estes provetes ofereceram a vantagem de um ensaio rápido devido ao seu reduzido comprimento de sobreposição.

Os resultados obtidos para τ_r foram ligeiramente superiores aos do fabricante. Nestes ensaios conseguiu-se atingir um valor médio de $24,341 \pm 0,941$ MPa para os cinco provetes, enquanto o valor indicado pelo fabricante é aproximadamente 14 MPa. A elevada repetibilidade dos ensaios (Figura 142) é comprovada com o desvio percentual obtido de apenas 3,9%. A boa preparação das superfícies das áreas de colagem e consequentemente as roturas coesivas obtidas justificam os resultados observados.

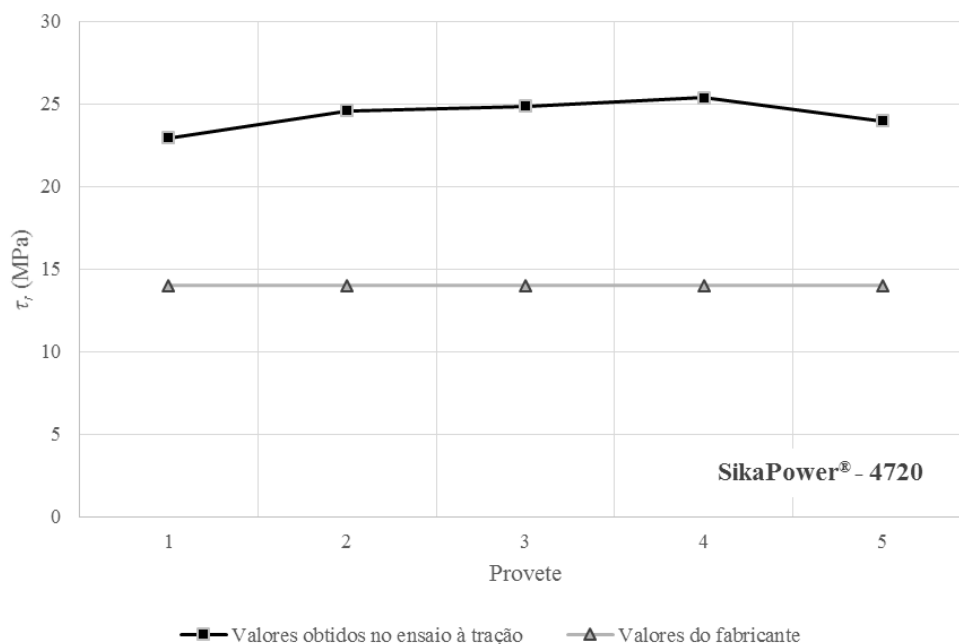


Figura 142 - Comparação de τ_r para o adesivo SikaPower®-4720 no ensaio TAST.

Ainda que tenha resultado o valor obtido de γ_r ($23,150 \pm 7,859\%$) para o adesivo SikaPower®-4720, não foi possível compará-lo com o do fabricante devido à sua ausência na ficha técnica. No entanto, será feita uma comparação com o adesivo Araldite® 2015 na Tabela 13.

Obtiveram-se valores de G com elevada repetibilidade com desvio percentual de 6,2%, tendo sido registado um valor médio de $750,738 \pm 46,356$ MPa. De referir que o provete que atingiu a menor G foi o 1, e o mesmo aconteceu com o seu valor de γ_r . Como o adesivo selecionado é um material isotrópico, o parâmetro de G pode ser correlacionado com o valor de E , já obtido nos ensaios de tração, recorrendo à equação (2.9). Substituindo-os na equação referida, obteve-se ν igual a 0,367. Este valor encontra-se dentro dos valores admissíveis de 0,3 a 0,5, como referido no capítulo 2.3.2.2.

O resultado médio obtido de τ_y , para o qual o adesivo transita do regime elástico para o plástico, foi de $14,876 \pm 1,012$ MPa. O seu desvio percentual é de 6,8%, indiciando uma elevada repetibilidade a nível de resultados.

Analisando a Figura 97, a Figura 98 e ainda os valores da Tabela 7, nota-se que o provete 1 teve um comportamento diferente dos restantes, refletindo-se nos resultados obtidos das propriedades δ_{\max} , G , τ_r , γ_r . Indicam-se assim o defeito de fabrico, a mistura deficiente do adesivo ou a rotura prematura como principais fatores possíveis para esta ocorrência.

Como demonstrado na Figura 101, as roturas ocorridas foram coesivas, o que indica uma boa preparação da superfície da área de colagem.

Na Tabela 13 são comparadas as propriedades mecânicas ao corte obtidas para o adesivo SikaPower®-4720 com as do Araldite® 2015.

Tabela 13 - Comparação das propriedades mecânicas ao corte.

Propriedades	τ_r [MPa]	γ_r [%]	G [MPa]	ν	τ_y [MPa]
SikaPower®-4720	24,341 ± 0,941	23,150 ± 7,859	750,738 ± 46,356	0,367	14,876 ± 1,012
Araldite® 2015 [58]	17,9 ± 1,8	43,9 ± 3,4	560 ± 210	0,33 ^a	14,6 ± 1,3

^a valor do fabricante

Comparando os valores obtidos, nota-se que o SikaPower®-4720 apresenta valores superiores em todas as propriedades exceto em γ_r . Existe uma proximidade elevada entre o parâmetro τ_y para os dois adesivos.

3.6.3 Ensaios de fratura à tração

De forma análoga aos ensaios referidos anteriormente, nos ensaios DCB também foram utilizadas as mesmas condições de ensaio e ainda o mesmo método de fabrico para os 6 provetes. A única diferença incide no valor de a_0 , que difere de provete para provete.

Os valores obtidos de G_{Ic} nos ensaios DCB pelos métodos CCM, CBT e CBBM são bastante aceitáveis (Figura 143). De facto, atingiram-se valores médios de $1,201 \pm 0,138 \text{ N mm}^{-1}$, $1,278 \pm 0,132 \text{ N mm}^{-1}$ e $1,294 \pm 0,182 \text{ N mm}^{-1}$, para os métodos CCM, CBT e CBBM, respetivamente. Em relação ao CBBM, que se considera o método mais robusto por não requerer a medição do valor de a e incluir o efeito da ZPF nos resultados, as diferenças observadas do CCM e CBT são de 7,2% e 1,2%, respetivamente. Analisando a Figura 143, verifica-se a proximidade dos resultados obtidos de cada provete, para os três métodos diferentes de redução. Apenas o provete 3 apresenta valores de G_{Ic} um pouco discrepantes. Não foi possível comparar os resultados obtidos com os do fabricante, devido a inexistência de qualquer dado relativo a G_{Ic} .

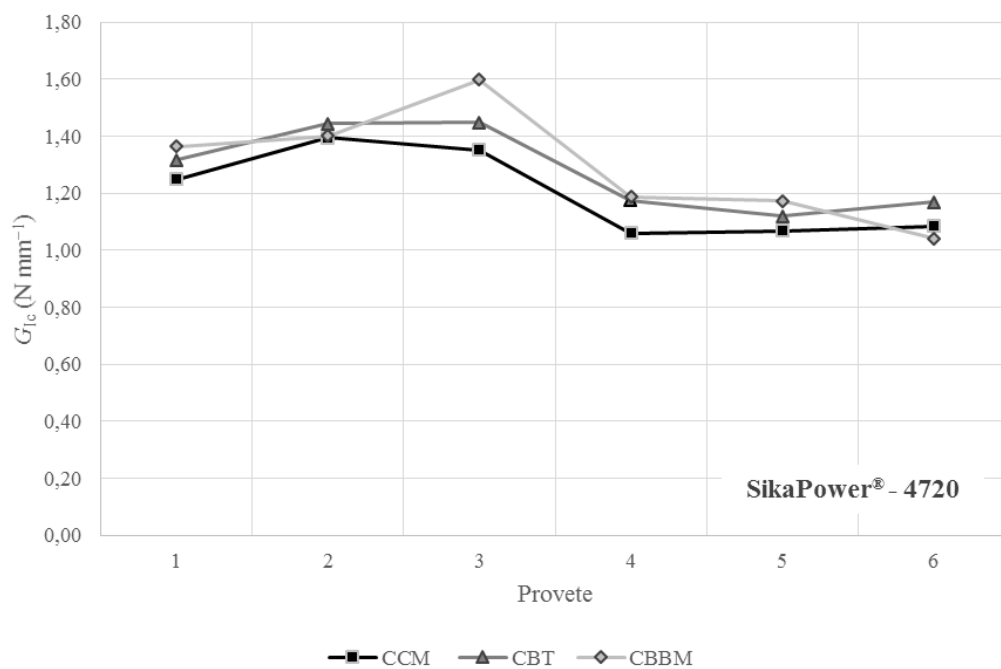


Figura 143 - Valores de G_{Ic} obtidos pelos três métodos para os seis provetes DCB.

A partir dos valores médios de G_{Ic} e seus desvios padrão (Figura 144), nota-se a proximidade de valores obtidos entre os três métodos. Os desvios percentuais obtidos foram de 11,5%, 10,3% e 14,1% para os métodos CCM, CBT e CBBM, respectivamente, e são indício de uma elevada repetibilidade dos ensaios.

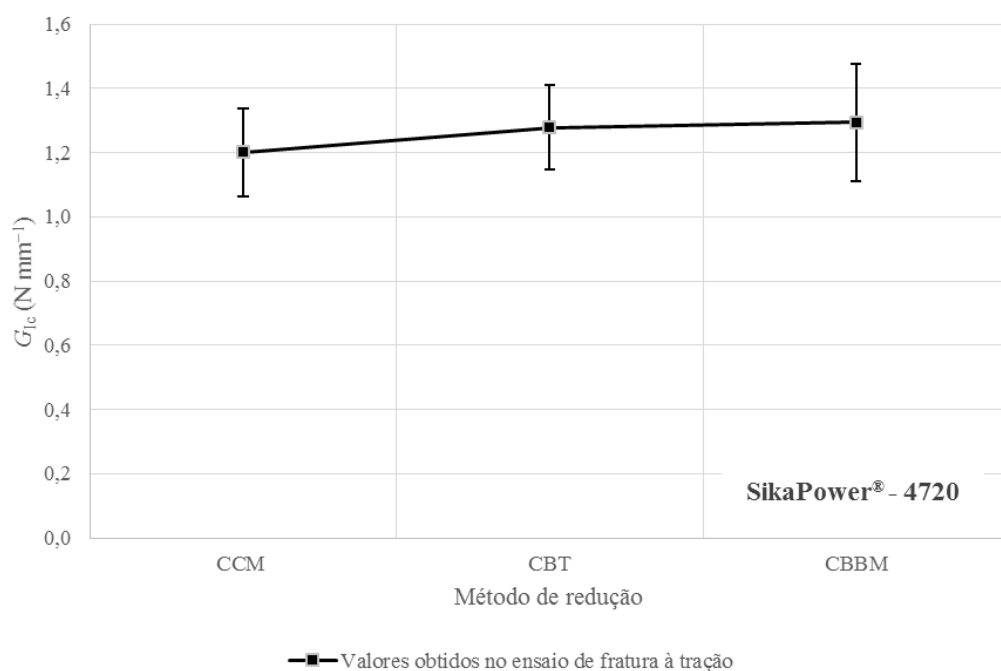


Figura 144 - Valores médios e respectivos desvios padrão de G_{Ic} pelos diferentes métodos.

Na Figura 122 é possível observar os tipos de roturas ocorridos nos seis provetes DCB. Verifica-se que são coesivas, sendo ainda visíveis as marcas dos cordões de adesivo (com cerca de 4 mm de largura) que originam roturas próximas da interface. É ainda de notar no provete 4 uma zona onde também existe uma rotura próxima da interface. Estas marcas devem-se muito provavelmente à inadequada preparação de superfícies, o que originou uma posterior baixa molhabilidade do adesivo. Uma forma de ultrapassar este problema seria utilizar a granalhagem como método de preparação de superfícies.

A Tabela 14 compara os valores obtidos de G_{Ic} do adesivo SikaPower[®]-4720 com o Araldite[®] 2015, ambos pelo método CBBM.

Tabela 14 - Comparação das propriedades de fratura à tração.

Propriedades	G_{Ic} [N mm ⁻¹]
SikaPower [®] -4720	1,294 ± 0,182
Araldite [®] 2015 ^[58]	0,43 ± 0,02

Recorreu-se ao CBBM por ser o método mais eficiente na obtenção de valores de G_{Ic} , uma vez que contabiliza a ZPF, e não depende da medição de a , pelo que não é afetado por eventuais erros de medição associados à mesma (como é o caso dos CCM e CBT).

Analisando a Tabela 14, verifica-se um valor superior de G_{Ic} para o adesivo SikaPower[®]-4720 (cerca três vezes maior) relativamente ao Araldite[®] 2015, concluindo-se deste modo que o primeiro oferece maior resistência à propagação de fenda à tração.

3.6.4 Ensaios de fratura ao corte

Nos ensaios de provetes ENF, foram mantidas as mesmas condições de ensaio para todos os oito provetes. Também a geometria, dimensões e métodos de fabrico dos provetes foram idênticos para todos. Assim, como sucedido nos ensaios de fratura à tração, neste ensaio a diferença entre os provetes foi nos valores de a_0 . Os valores obtidos do provete 6 não foram contabilizados para os cálculos da média e desvio padrão, porque apresentaram um desvio assinalável por defeito relativamente aos restantes provetes.

Também para a caracterização de G_{IIc} não existem dados fornecidos pelo fabricante que permitam fazer uma comparação para o adesivo ensaiado. Os valores médios obtidos de G_{IIc} pelos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM foram 4,378 ± 0,783 N mm⁻¹, 4,206 ± 0,311 N mm⁻¹, 3,264 ± 0,459 N mm⁻¹ e 4,235 ± 0,347 N mm⁻¹, respetivamente. Como referido no capítulo 3.6.3, o método CBBM é o mais fiável por não requerer a medição do valor de a e incluir o efeito da ZPF nos resultados

obtidos. As diferenças observadas do CCM, DBT e CBT, relativamente ao CBBM, são de 3,3%, 3,4% e 22,9%, respetivamente. Na Figura 145 são representados os valores obtidos para os sete provetes.

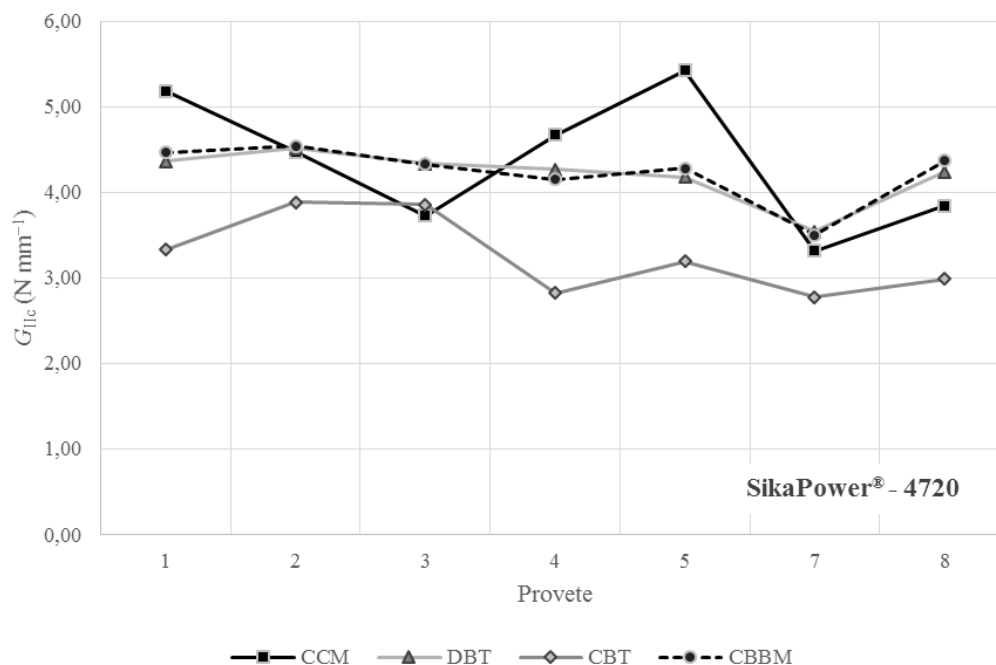


Figura 145 - Valores de G_{IIc} obtidos pelos quatro métodos para os sete provetes ENF.

Observando a Figura 145, verifica-se uma clara tendência de coerência entre os valores obtidos pelos métodos e DBT e CBBM. Já os métodos CCM e CBT registam pequenas discrepâncias quando comparados entre si e os restantes. Os provetes que assinalaram maiores diferenças entre os diferentes métodos, embora não muito acentuáveis, foram o 1,4 e o 5. Os que registaram maior tenacidade à fratura ao corte foram o 1 e 2, tendo em conta o valor médio de G_{IIc} pelos quatro métodos.

Foram ainda registados, sob a forma de gráfico de linhas (Figura 146), os valores médios e respetivos desvios padrão para os diferentes métodos de redução para G_{IIc} utilizados nos ensaios de fratura ao corte. De uma análise da Figura 146 verifica-se que os valores médios de G_{IIc} para os métodos CCM, DBT e CBBM são bastante próximos, enquanto o método CBT indica uma pequena discrepância associada à energia dissipada na ZPF que não é tida em conta nas Teorias das Vigas. A melhor aproximação do método DBT, que também é baseada na Teoria das Vigas, é justificada pela inclusão de P e δ na respetiva expressão de cálculo, ao contrário do observado para o CBT que só inclui o valor de P [59]. Os desvios percentuais obtidos foram de 17,9%, 7,4%, 14,1% e 8,2% para os métodos CCM, DBT, CBT e CBBM, respetivamente.

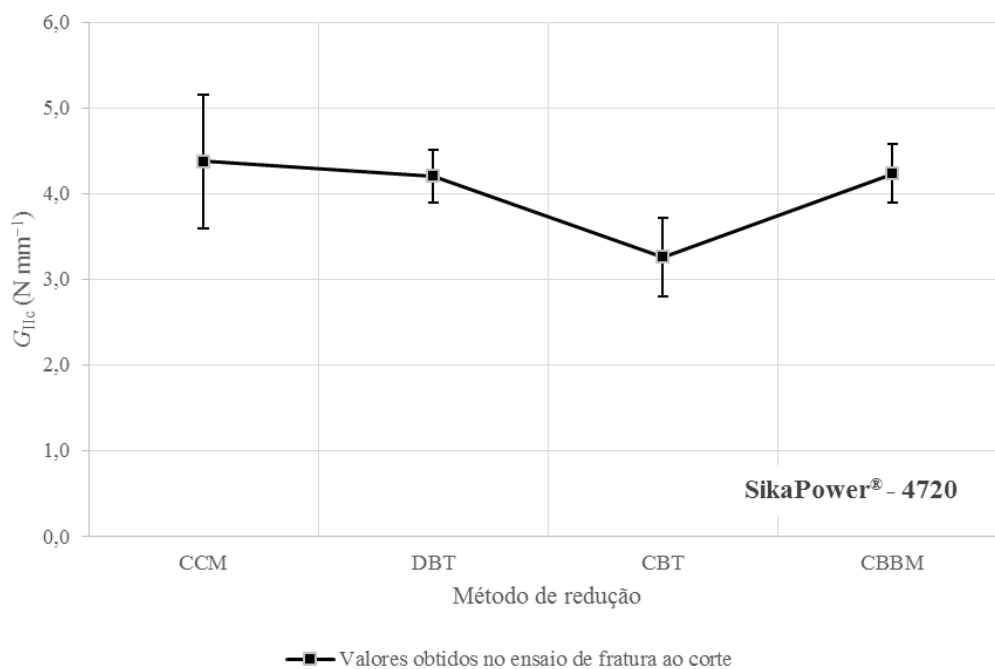


Figura 146 - Valores médios e respectivos desvios padrão de G_{IIc} pelos diferentes métodos.

Como referido anteriormente, foram capturadas fotografias aos provetes após a realização do ensaio. Neste tipo de ensaio, dado que a fenda cresce sem abertura, existiu alguma dificuldade de visualização clara da ponta da mesma, pelo que foi necessário analisar cuidadosamente as fotografias capturadas a cada instante dos ensaios. Na Figura 138 é possível analisar o valor de a de cada provete após o ensaio ter terminado. Os provetes 2 e 8 registaram o maior valor de a (cerca de 35 mm).

Seguindo a mesma forma de comparação das propriedades obtidas entre o adesivo SikaPower®-4720 e o Araldite® 2015, na Tabela 15 estão representados os valores de G_{IIc} obtidos pelo método CBBM.

Tabela 15 - Comparação das propriedades de fratura ao corte.

Propriedades	G_{IIc} [N mm ⁻¹]
SikaPower®-4720	4,235 ± 0,347
Araldite® 2015 ^[58]	4,70 ± 0,34

Comparando os resultados obtidos na Tabela 15, indica-se o superior valor de G_{IIc} obtido pelo adesivo Araldite® 2015, registando-se uma diferença de cerca de 0,465 N mm⁻¹ entre os dois adesivos. Deste modo o adesivo Araldite® 2015 apresenta maior resistência de propagação de fenda ao corte.

4 Conclusões

O principal objetivo desta dissertação foi a caracterização das propriedades mecânicas e de fratura de um adesivo estrutural de alta ductilidade lançado recentemente na indústria. O adesivo selecionado foi o SikaPower[®]-4720, que é um epóxico estrutural de alta ductilidade e boa resistência mecânica. Para a avaliação das propriedades mecânicas e de fratura foram fabricados provetes maciços e em junta apropriados para cada ensaio. As propriedades mecânicas à tração obtiveram-se em provetes maciços (*bulk*), as mecânicas ao corte em juntas adesivas TAST, as de fratura à tração em provetes DCB e, por fim, as de fratura ao corte em provetes ENF. Todos os ensaios foram realizados numa máquina de ensaios universal Instron[®] 5960 à temperatura ambiente e a velocidades específicas.

No ensaio à tração de provetes maciços, as propriedades mecânicas obtidas que permitiram caracterizar o adesivo escolhido à tração foram σ_y , σ_r , E e ε_r . Os valores registados para cada uma das propriedades referidas foram de $23,286 \pm 2,252$ MPa; $27,519 \pm 0,845$ MPa; $2052,477 \pm 84,818$ MPa e $1,973 \pm 0,343\%$, respetivamente. Apenas foram possíveis comparar com a ficha do fabricante os parâmetros σ_r (24 MPa), E (1900 MPa) e ε_r (3%), com desvios padrão percentuais respetivamente de 3,1%, 6,5% e 17,4%. O único inferior ao indicado na ficha foi o de ε_r . Em todos os provetes observaram-se pequenos defeitos na superfície de rotura que afetaram o desempenho dos mesmos.

O ensaio TAST permitiu a caracterização das propriedades mecânicas ao corte através dos parâmetros τ_y , τ_r , G e γ_r . Obtiveram-se respetivamente os valores $14,876 \pm 1,012$ MPa; $24,341 \pm 0,941$; $750,738 \pm 46,356$ MPa e $23,150 \pm 7,859\%$. Foi apenas possível comparar o parâmetro τ_r obtido com o reclamado pelo fabricante (aproximadamente 14 MPa), registando-se um pequeno desvio percentual de 3,9%. As roturas coesivas obtidas foram indício de uma correta preparação da superfície da área de colagem.

Obtidos os valores de E e G com os ensaios mecânicos de tração e corte, respetivamente, e assumindo que o adesivo SikaPower[®]-4720 é um material isotrópico, foi possível determinar ν . O resultado obtido de 0,367 está compreendido entre 0,3 e 0,5, valores indicados no trabalho de da Silva et al. [19] como espectáveis para este tipo de material.

Com o ensaio DCB foi possível caracterizar as propriedades de fratura à tração do adesivo através do parâmetro de G_{Ic} . Utilizaram-se métodos que necessitaram da medição de a , como foi o caso do CCM e CBT, e ainda o método CBBM baseado em a_{eq} . Em modo I resultaram os valores de $1,201 \pm 0,138$ N mm⁻¹ e $1,278 \pm 0,132$ N mm⁻¹ para os métodos CCM e CBT, respetivamente. Para o método CBBM o valor obtido foi de $1,294 \pm 0,182$ N mm⁻¹. Foi notória a proximidade dos resultados obtidos pelos três métodos. Não foi possível comparar o G_{Ic} obtido com o do fabricante devido à inexistência de qualquer dado referente a este parâmetro na ficha do adesivo. Resultaram roturas coesivas nas superfícies dos provetes DCB, indicando a boa preparação das superfícies de colagem.

Para análise das propriedades de fratura ao corte, recorreu-se a ensaios ENF através dos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM de modo a determinar G_{IIc} . Os valores médios de G_{IIc} obtidos pelos métodos CCM, DBT, CBT e CBBM foram de $4,378 \pm 0,783$ N mm⁻¹; $4,206 \pm 0,311$ N mm⁻¹; $3,264 \pm 0,459$ N mm⁻¹ e $4,235 \pm 0,347$ N mm⁻¹, respetivamente. Registou-se um bom acordo entre os métodos exceto para o CBT, que apresentou valores por defeito. Também não existia o valor respeitante a G_{IIc} na ficha do fabricante pelo que não foi possível fazer uma comparação.

De forma a se obter uma melhor análise foram comparadas as propriedades obtidas com um outro adesivo estrutural epóxico. Do trabalho de Campilho et al. [58], o adesivo Araldite® 2015 apenas alcançou valores superiores nos parâmetros ϵ_r , γ_r e G_{IIc} , sendo que o último teve $0,465$ N mm⁻¹ de diferença quando comparado com o valor experimental obtido.

Os baixos desvios percentuais dos diversos parâmetros determinados nesta dissertação são indício de uma elevada repetibilidade a nível de resultados obtidos. Assim, segundo estes resultados, conclui-se que o adesivo selecionado possui tanto boas propriedades mecânicas como de fratura. O SikaPower®-4720 é um adesivo estrutural bicomponente de elevada resistência mecânica e ductilidade, longo *open time* e cura rápida. Estas características são muito apreciadas na indústria automóvel, pelo que o adesivo é adequado para a colagem de painéis de exposição a tensões dinâmicas como é o caso de painéis laterais, tejadilhos, entre outros.

Findada a realização da dissertação seria importante desenvolver alguns trabalhos de modo a dar continuidade ao estudo do adesivo escolhido. Assim seria interessante desenvolver os seguintes trabalhos:

- Estudo comparativo dos resultados obtidos no ensaio TAST com outro ensaio ao corte, como por exemplo o ensaio Arcan;
- Realização de ensaios que permitam avaliar o comportamento a longo prazo, como é o caso dos ensaios à fluência;
- Ensaio TDCB para comparação de G_{Ic} com os valores alcançados no ensaio DCB;

- Execução de ensaios 4ENF e ELS para comparação com os valores de G_{IIC} obtidos no ensaio ENF;
- Estudo da influência da temperatura de cura no ensaio de caracterização das propriedades mecânicas e de fratura estimadas;
- Realização de ensaios para a avaliação do adesivo em solicitações de velocidade de deformação elevada (ensaios de impacto).

Referências

1. **Pinto, A.M.G.**, *Dissertação de Doutorado: Ligações Adesivas entre Materiais Poliméricos com e sem alteração superficial dos substratos*. 2007, FEUP.
2. **da Silva, L.F.M., de Magalhães, A.G. e de Moura, M.F.S.F.**, *Juntas Adesivas Estruturais*. 2007: Publindústria.
3. **de Moura, M.F.S.F., de Moraes, A.B. e de Magalhães, A.G.**, *Materiais Compósitos: Materiais, Fabrico e Comportamento Mecânico*. 2005.
4. **Petrie, E.M.**, *Handbook of Adhesives and Sealants*. 2000: McGraw-Hill.
5. **Silva, P.S.**, *Seminário Juntas Adesivas*. 2014, Sika.
6. **Pereira, A.M.B.**, *Dissertação de Mestrado: Fratura de Juntas Coladas*. 2002, Universidade de Aveiro.
7. **Broughton, B.e.G., M.**, *Preparation and testing of adhesive joints: Measurement Good Practice*. National Physical Laboratory, Teddington U.K., 2001.
8. **Campilho, R.D.S.G.**, *Dissertação de Mestrado: Modelação da Execução de Reparações em Materiais Compósitos*. 2005, FEUP.
9. **Pereira, A.B., de Moraes, A.B.**, *Influência das tensões de Bordo na Resistência de Juntas Colada de Sobreposição*. Revista Iberoamericana de Ingenieria Mecánica : Vol.8, nº3, 2004: p. 69-79.
10. **Gauthier, M.M.**, *Engineered Materials Handbook: Desk Edition*. 1995: ASTM International.
11. **Adams, R.D.e.D., B.W.**, *NDT & E International*. 1997.
12. **Pocius, A.V.**, *Adhesion and Adhesives Technology, An Introduction*. 2ª Edição ed. 2002.
13. **Cope, B.C., Brewis, D., e Comyn, J.**, *Advances in Adhesives*. Warwick Publishing, 1983: p. 42.
14. **Esteves, J.L.S.**, *Estudo do comportamento de adesivos estruturais*. FEUP, 1990: p. 112.
15. **da Cruz, A.C., Carreira, J.**, *Ensaio Mecânicos*. 1992: ISQ-Instituto de Soldadura e Qualidade.
16. **da Silva, L.F.M., Adams, R. D. e Gibbs, M.**, *Manufacture of adhesive joints and bulk specimens with high-temperature adhesives*. International Journal of Adhesion & Adhesives, 2003. **24**: p. 69-83.
17. **da Silva, L.F.M., Dillard, D.A., Blackman, R.K., Adams, R.D.**, *Testing Adhesive Joints: Best Practices*. 2012: WILEY-VCH.
18. **Pinto, S.D.M.**, *Dissertação de Mestrado: Determinação das propriedades mecânicas à tração de adesivos estruturais frágeis e dúcteis*. 2013, ISEP.

19. **da Silva, L.F.M., Öchsner, A. e Adams, R. D.**, *Handbook of Adhesion Technology*. 2011: Verlag Berlin Heidelberg: Springer.
20. **Faneco, T.M.S.**, *Dissertação de Mestrado: Caracterização das propriedades mecânicas de um adesivo estrutural de alta ductilidade*. 2014, ISEP.
21. **Casais, R.C.B.**, *Slides de disciplina: Ciência e Engenharia dos Materiais-Módulo IX, ESEIG*. 2009.
22. **Dean, G.e.D., B.**, *Measurement good practice guide. A Guide preparation and testing of bulk specimens of adhesives*. Teddington: NPL Materials Center, 1998.
23. **Chiaverini, V.**, *Tecnologia Mecânica: Estrutura e Propriedades das Ligas Metálicas*. Vol. I. 1986: McGraw-Hill.
24. **Morais, J.F.A.**, *Dissertação de Mestrado: Desenvolvimento de ferramentas e provetes para o ensaio Thick Adherend Shear Test (TAST)*. 2013, ISEP.
25. **da Silva, L.F.M., Silva,R., Chousal,J., e Ferreira, F.**, *Projecto fim de Curso - Avaliação experimental e numérica do Thick Adherend Shear Test*. ISEP.
26. **Duncan, B.C.e.D., G.D.**, *Test Methods for Determining Shear Property Data for Adhesives Suitable for Design*. 1996: National Physical Laboratory, Teddington.
27. **ISO 11003-2: Adhesives - Determination of Shear Behaviour; Part 2: Thick-Adherend Shear Test Method**. 2005.
28. **Adams, D.e.W., D.**, *Current status of the losipescu shear test method*. Journal of composite materials, vol. 21, 1987: p. 494-507.
29. **Vaughn, L.**, *Dissertação PhD: Measurement of basic mechanical properties of adhesives for design use*. 1998, University of Bristol.
30. **Cardoso, R.F.G.**, *Dissertação de Mestrado: Desenvolvimento de um dispositivo para a determinação da tenacidade de adesivos em modo misto*. 2011, FEUP.
31. **Azevedo, J.C.S.**, *Dissertação de Mestrado: Determinação da tenacidade à fratura em corte (G_{IIc}) de adesivos estruturais pelo ensaio End-Notched Flexure (ENF)*. 2014, ISEP.
32. **Campilho, R.D.S.G.**, *Dissertação de Doutoramento: Repair of Composite and Wood Structures*. 2009, FEUP.
33. **Chaves, F.J.P.**, *Dissertação de Doutoramento: Fracture Mechanics Applied to the Design of Adhesively Bonded Joints*. 2013, FEUP.
34. **Andersson, T.e.S., U.**, *The stress-elongation relation for an adhesive layer loaded in peel using equilibrium of energetic forces*. International Journal of Solids and Structures, 2004: p. 413-434.
35. **Bader, M.G., Hamerton, I., Hay, J.N., Kemp, M. e Winchester, S.**, *Double cantilever beam testing of repaired carbon fibre composites. Composites Part A. Applied Science and Manufacturing*, 2000: p. 603-608.
36. **Ducept, F., Davies, P., e Gamby, D.**, *Mixed mode failure criteria for a glass/epoxy composite and an adhesively bonded composite/composite joint*. International Journal of Adhesion and Adhesives, 2000: p. 233-244.

37. **Ducept, F., Davies, P., e Gamby, D.**, *An experimental study to validate tests used to determine mixed mode failure criteria of glass/epoxy composites. Composites Part A.* Applied Science and Manufacturing, 1997: p. 719-729.
38. **Ducept, F., Gamby, D., e Davies, P.**, *A mixed-mode failure criterion derived from tests on symmetric and asymmetric specimens.* Composites Science and Technology, 1999: p. 609-619.
39. **Nairn, J.A.**, *Energy release rate analysis for adhesive and laminate double cantilever beam specimens emphasizing the effect of residual stresses.* International Journal of Adhesion & Adhesives, 2000.
40. **de Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G. e Gonçalves, J.P.M.**, *Pure mode II fracture characterization of composite bonded joints.* International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**: p. 1589-1595.
41. **de Moura, M.F.S.F., Fernandez, M.V.C. e Campilho, R.D.S.G.**, *Numerical analysis of the Edge Crack Torsion test for mode III interlaminar fracture of composite laminates.* Engineering Fracture Mechanics.
42. **de Moura, M.F.S.F., Campilho, R.D.S.G. e Gonçalves, J.P.M.**, *Crack equivalent concept applied to the fracture characterization of bonded joints under pure mode I loading.* Composites Science and Technology: 68, 2008: p. 2224 - 2230.
43. **Yoshihara, H.**, *Simple estimation of critical stress intensity factors of wood by tests with double cantilever beam and three-point end-notched flexure.* Holzforschung, 2007: p. 182-189.
44. **Constante, C.J.**, *Dissertação de Mestrado: Utilização de métodos ópticos de correlação de imagem para a determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais.* 2014, ISEP.
45. **Campilho, R.D.S.G., Moura, M.F.S.F., Gonçalves, Silva, J.F.M.G., Banea, M.D. e Silva, L.F.M.**, *Fracture toughness determination of adhesive and co-cured joints in natural fibre composites.* Composites: Part B, 2013. **50**: p. 120-126.
46. **Rice, J.R.**, *A Path Independent Integral and the Approximate Analysis of Strain Concentration by Notches and Cracks.* Journal of Applied Mechanics, 1968. **35**: p. 379-386.
47. **Stigh, U., Alfredsson, K.S., Anderson, T., Biel, A., Carlberger, T. e Salomonsson, K.**, *Some aspects of cohesive models and modelling with special application to strength of adhesive layers.* **165**: p. 149-162, 210.
48. **Ji, G., Ouyang, Z., Li, G., Ibekwe, S. e Pang, S.S.**, *Effects of adhesive thickness on global and local mode-I interfacial fracture of bonded joints.* International Journal of Solids and Structures, 2010. **47**: p. 2445-2458.
49. **Soares, A.P.O.A.L.**, *Dissertação de Mestrado: Determinação da tenacidade à fratura de adesivos estruturais em modo misto pelo ensaio Single-Leg Bending.* 2015, ISEP.
50. **Esteves, V.H.C.**, *Dissertação de Mestrado: Determinação da Tenacidade de um Adesivo em Solicitações de Modo Misto (I+II).* 2010, FEUP.
51. **Landrock, A.H.**, *Adhesives Technology Handbook.* Noyes Publications, 1985: p. 15.
52. **Blackman, B.R.K., Brunner, A.J. e Williams, J.G.**, *Mode II fracture testing of composites: a new look at an old problem.* Engineering Fracture Mechanics, 2006. **73**: p. 2443-2455.

53. **Carlsson, L.A., Gillespie, J.W. e Pipes, R.B.**, *On the Analysis and Design of the End Notched Flexure (ENF) Specimen for Mode II Testing*. Journal of Composite Materials, 1986. **20**: p. 594-604.
54. **Zhu, Y., Liechti, K. M. e Ravi-Chandar, K.**, *Direct extraction of rate-dependent tractionseparation laws for polyurea/steel interfaces*. International Journal of Solids and Structures, 2009. **46**: p. 31-51.
55. **Ji, G., Ouyang, Z., Li, G.**, *Effects of bonline thickness on Mode-II interfacial laws of bonded laminated composite plate*. Int J Fract, 2011. **168**: p. 197-207.
56. **Sika®**, *Ficha Técnica Adesivo: SikaPower®-4720*, Sika®, Editor. 2014.
57. **Loctite®**, *Ficha Técnica Desmoldante: Frekote® 770-NC*, Loctite®, Editor. 2003.
58. **Campilho, R.D.S.G., Banea, M.D., Neto, J.A.B.P. e Silva, L.F.M.**, *Modelling adhesive joints with cohesive zone models: effect of the cohesive law shape of the adhesive layer*. Int. J. Adhes, 2013. **50**.
59. **de Moura, M.F.S.F.**, *Numerical Simulation of the ENF Test for the Mode II Fracture Characterization of Bonded Joints*. Journal of Adhesion Science and Technology, 2006. **20**: p. 37-52.

Anexo A. Ficha técnica do adesivo SikaPower[®]-4720.

SikaPower®-4720

Adesivo de dois componentes de elevada resistência para painéis

Dados técnicos do produto

Propriedades	Comp. A	Comp. B
Base química	Époxi	Amina
Cor(CQP ¹ 001-1)	Preto	Bronze
Densidade (CQP 006-4)	1,08 kg/l approx.	1,13 kg/l approx.
Rácio A:B	Volume	2:1
Não escorrimento		Bom
Temperatura de Aplicação		10 – 30 °C
Tempo aberto ² (CQP 580-1, -6)		60 min.
Tempo aberto no misturador ²		30 min.
Tempo de fixação ^{2/3} (CQP 580-1, -6)	tempo p/ atingir 1 MPa	4.5 horas
Tempo de cura ²	80 % da resistência	24 horas
Dureza Shore D (ASTM D-2240)		80 aprox.
Resistência à tracção ² (CQP 580-5)		24 MPa aprox.
Módulo Young (CQP 580-1, -6)		1900 MPa aprox.
Alongamento à ruptura (ASTM D-638)		3 % aprox
Resistência ao corte por tração ^{2/3} (CQP 580-1,-6)		14 MPa aprox.
Resistência ao cisalhamento por impacto (CQP-580-1, -3)		5 N/mm
Temperatura de transição vítrea (ASTM E-1640)		73 °C
Resistência térmica (CQP 513-1)	1 hora	190° C
Temperatura de serviço		-30 °C – 120 °C
Armazenagem (entre 15 - 25°C)		24 meses

¹ CQP = Corporate Quality Procedure² 23°C /50 % HR³ substrato: Aço 0.8 mm - tipo DC04

Descrição

SikaPower®-4720 é um adesivo époxi bicomponente de elevada resistência e excelentes propriedades de adesão a uma grande variedade de substratos. Foi especialmente desenvolvido para colagem de painéis metálicos ou compósitos. As esferas de vidro garantem uma espessura de colagem uniforme de 0,25 mm. O adesivo cura a temperatura ambiente para formar uma linha de colagem rígida.

SikaPower®-4720 é produzido de acordo com as normas de qualidade ISO 9001/14001 e com o programa de actuação responsável.

Vantagens

- Elevada resistência
- Boa aderência a uma grande variedade de substratos sem primário
- Longo tempo aberto
- Cura rápida
- Não escorre nem pinga
- Pode ser soldado por pontos (enquanto fresco)
- Desenvolvido para espessura de colagem ótima
- Cura acelerado com o calor
- Baixo odor
- Excelente protecção contra a corrosão
- Isento de solventes

Campos de aplicação

O SikaPower®-4720 é adequado em colagem de painéis com exposição a tensões dinâmicas, tais como painéis das portas, painéis traseiros, tejadilhos, e painéis laterais. Não é adequado para utilização em partes estruturais dos veículos (pilares, suportes motor, estribos, barras transversais, etc.). Os substratos comuns serão alumínio (incl. anodizado), aço e compósitos (Fibra de vidro). Painéis metálicos montadas com SikaPower®-4720 podem ser soldadas por pontos enquanto o adesivo não está curado. Este produto é recomendado para utilização apenas por profissionais



experientes. Devem ser conduzidos testes com os substratos a colar de modo a assegurar a adesão e compatibilidade dos materiais.

Método de cura

A cura do SikaPower®-4720 ocorre por reacção química entre os 2 componentes. O aumento da resistência a diferentes temperaturas pode ser verificada na seguinte tabela

Tempo [h]	Resistência ao corte [MPa] aprox.			
	10°C	23°C	30°C	60°C
1	-	-	-	13
2	-	0.1	2.7	Força Final 14 MPa
4	-	0.1	12	
4.5	-	1.2		
6	-	3		
8	0.1	6		
24	6	12		
48	12			

Tabela 1: Resistência ao corte por tracção do Sika Power 4720

Método de Aplicação

Preparação de superfície

Lixar as superfícies metálicas até ao metal, limpar e desengordurar com Acetona ou Heptano. Tratamento adicional depende da natureza específica do substrato e do processo de fabrico.

Aplicação

SikaPower®-4720 é dispensado dos cartuchos através de uma pistola adequada. Para obtenção de uma mistura adequada é necessário um bico misturador próprio (*quadro 8.7 24 GT mixer*). A baixas temperaturas (< 10 °C) o cartucho deve ser aquecido para que se obtenha boa extrusão.

Extrudir um pouco de produto sem o bico misturador para encher os espaços do cartucho duplo coaxial. Colocar o bico misturador e extrudir um pouco de produto, rejeitando os primeiros 3 cm de cordão.

Para protecção da corrosão aplicar e espalhar com uma espátula até cobrir a áreas previamente lixadas. Aplicar um cordão nas duas superfícies a cerca de 5 mm do bordo, de modo a reduzir a saída de adesivo após junção Montar as

peças e fixar as mesmas com grampos nos cantos. Fixar as peças com rebites ou através de soldadura por pontos (se necessário) ou colocar grampos a cada 10 cm. A aplicação a uma face poderá reduzir o tempo aberto e resistência final até 50 % e pode diminuir a protecção contra a corrosão. Para a descrição detalhada do trabalho com o cartucho, bico misturador e aplicação, consulte o guia *Panel Replacement Guide*, que estará disponível através dos Serviços Técnicos da Sika, Divisão Indústria.

SikaPower®-4720 pode ser aplicado entre 10 °C e 30 °C. Os substratos produto e equipamento devem estar ao mesmo nível de temperatura.

Cura

SikaPower®-4720 cura a temperatura ambiente. A velocidade de cura depende da temperatura. 10 °C a mais resultam no dobro da velocidade de cura e redução do tempo aberto para metade. A cura pode ser acelerada aumentando a temperatura (85 °C máx.) utilizando estufas ou lâmpadas de infra vermelhos.

Remoção

SikaPower®-4720 não curado pode ser removido das ferramentas ou equipamento com Sika Remove 208 ou outro solvente adequado. Depois de curado só poderá ser removido com meios mecânicos. As mãos ou pele exposta devem ser lavadas imediatamente com Sika Handclean Towel ou um produto de lavagem de mãos profissional e água. Nunca utilizar solventes!

Outras informações

Cópias das seguintes publicações estão disponíveis quando pedidas:

- Ficha de Segurança
- *Panel Replacement Guide*

Embalagem

Cartuchos	195 ml
-----------	--------

Valores Base

Toda a informação desta ficha de dados de produto é baseada em testes laboratoriais. Os valores medidos na realidade pode diferir por circunstância fora do nosso controlo.

Importante

Para informações e aconselhamento sobre segurança no manuseamento, armazenamento e disposição dos produtos químicos, os utilizadores devem ter em conta as folhas de segurança que contém dados, relativos a segurança, físicos, ecológicos, toxicológicos e outros.

Nota

A informação e em particular as recomendações relacionadas com aplicação e utilização final dos produtos Sika, são fornecidas em boa fé e baseadas no conhecimento e experiência dos produtos sempre que devidamente armazenados, manuseados e aplicados em condições normais. Na prática, as diferenças no estado dos materiais, das superfícies, e das condições de aplicação em obra, são de tal forma imprevisíveis que nenhuma garantia a respeito da comercialização ou aptidão para um fim em particular, nem qualquer responsabilidade decorrente de qualquer relacionamento legal, poderão ser inferidas desta informação, ou de qualquer recomendação por escrito, ou de qualquer outra recomendação dada. Os direitos de propriedade de terceiros deverão ser observados. Todas as encomendas aceites estão sujeitas às nossas condições de venda e de entrega vigentes. Os utilizadores deverão sempre consultar as versões mais recentes das fichas técnicas dos respectivos produtos, que serão entregues sempre que perdidas.

Informação adicional disponível em:
www.sika.pt/industria.htm
www.sika-industry.com



Sika Portugal SA
Divisão Indústria
Rua Santarem, 113
4400-292 V.N.Gaia
Portugal
Tel. +351 22 377 69 00
Fax +351 22 370 20 12



Implementado na fábrica de Ovar

Anexo B. Ficha técnica do 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 C. Ficha técnica da máquina de ensaios
Instron[®] 3367.



The difference is measurable®

3360 Series | Dual Column Tabletop Models

The Instron® 3300 Series addresses the needs of standardized and routine testing, providing the user Instron quality at the most affordable price. The 3360 dual column, tabletop, testing systems are suited for tension, compression, peel, flex, and other applications with load requirements ranging from 5 to 50 kN. They are typically used for quality control and production testing. Four models are available in load capacities of 5, 10, 30, and 50 kN.

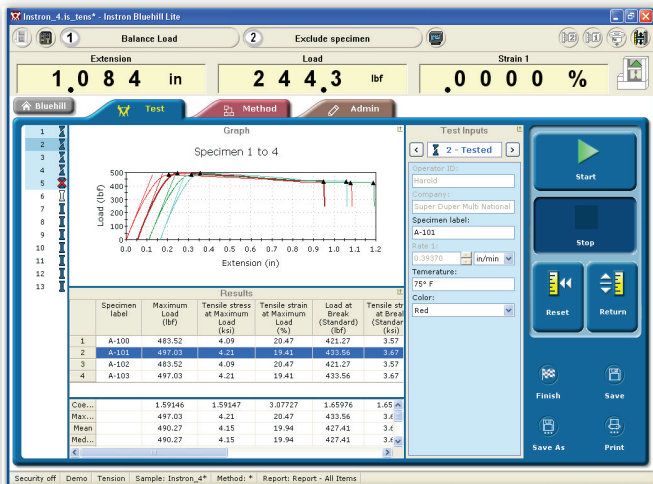
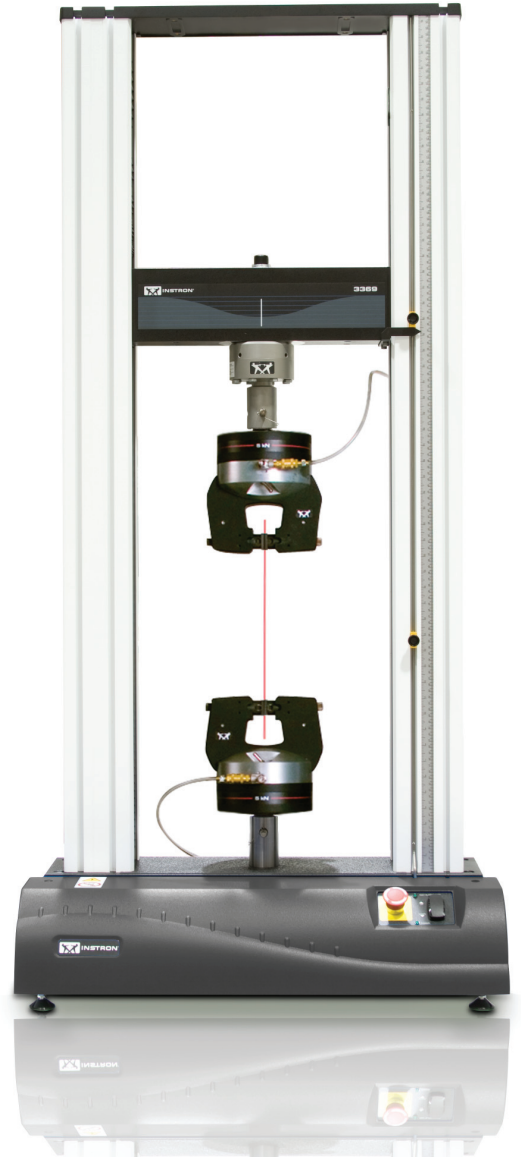
Instron Quality at an Affordable Price

Our attention to every element of the system is what separates Instron from other testing equipment suppliers and allows us to confidently report the accuracy, repeatability, and reproducibility of our results.

- Automatic recognition and calibration of load and strain transducers and verification performed by factory-trained field service engineers
- Preloaded ballscrews, precision guidance columns, and a symmetrical drive system improve frame stiffness and alignment
- Extensive range of accessories to meet test requirements in almost any application or industry: plastics, metals, biomedical, composites, elastomers, components, automotive, aerospace, textiles, and more.
- Self-diagnostics expedite troubleshooting and minimize downtime
- All testing systems include choice of load cell
- Full one-year warranty on parts and labor

Start Testing in Two Steps: Open a Method, Press Start

With multiple operators, varying skill levels, and continuous training needs, you need a user interface that is simple to learn. Instron Bluehill® Lite Software is designed to meet the demands of everyday applications and testing standards used in a wide variety of industries. Bluehill Lite provides all the capabilities you need to handle basic tensile, compression, flexure, peel, tear, friction, and simple cyclic test requirements quickly and efficiently. Tests are started with just two steps, and test control, data acquisition, plotting, calculations, and reporting are performed automatically. To further assist the operator, the Prompted Method guides operators through repetitive test procedures with step-by-step instructions.



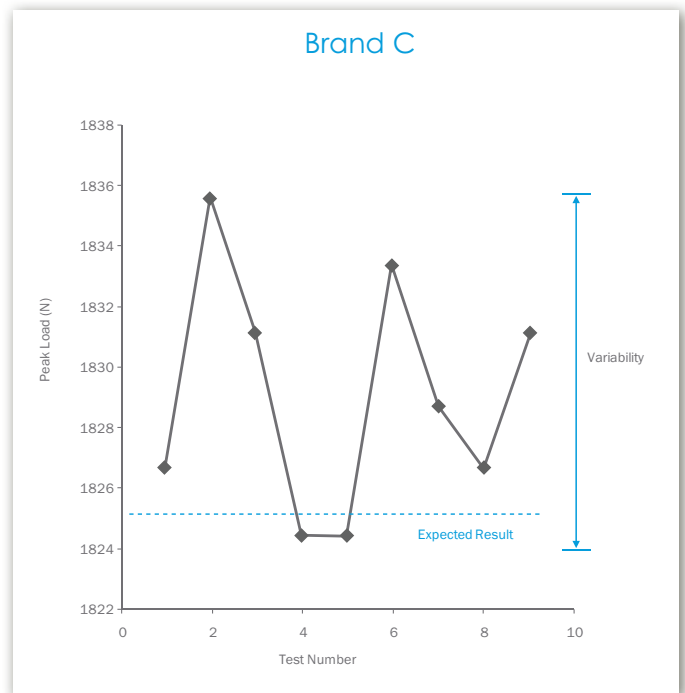
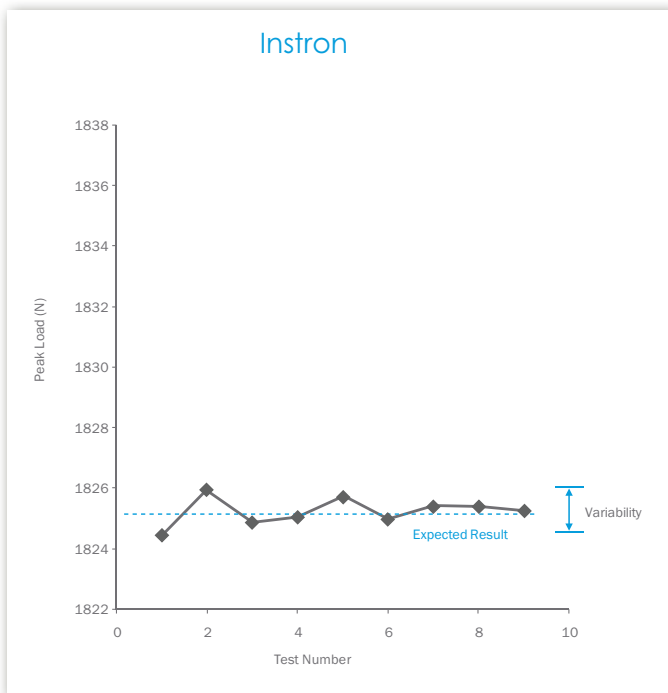
Typical Bluehill® Lite test screen

Confidence in Your Results

Head-to-head comparison reveals the Instron® difference. Notice the difference in variability of measured peak load between the two machines - this is the kind of measurable difference that sets Instron apart.

Case Study

- Same operator
- Same specimen: Coil spring
- Same test conditions: Compression test
- Different machines: Instron vs. Brand C



*Reference paper available upon request or you can visit the literature section of www.instron.com

Why Does Better Repeatability and Reproducibility Matter to You?

- More parts pass your acceptance criteria, less parts rejected
- Less time spent in trouble-shooting data problems
- Long-term cost savings
- Strengthening of your testing lab's reputation
- Increased ability to meet delivery expectations
- More parts ship, increasing your bottom line

Specifications

		3365	3366	3367	3369
Load Capacity	kN	5	10	30	50
	kgf	500	1,000	3,000	5,000
	lbf	1,125	2,250	6,750	11,250
Maximum Speed	mm/min	1,000	500	500	500
	in/min	40	20	20	20
Minimum Speed	mm/min	0.01	0.005	0.005	0.005
	in/min	0.0004	0.0002	0.0002	0.0002
Maximum Force at Full Speed	kN	5	10	15	25
	lb	1,125	2,250	3,375	5,620
Maximum Speed at Full Load	mm/min	1,000	500	250	250
	in/min	40	20	10	10
Return Speed	mm/min	1,200	600	600	500
	in/min	48	24	24	20
Total Crosshead Travel*	mm	1,122	1,122	1,122	1,122
	in	44.2	44.2	44.2	44.2
Total Vertical Test Space	mm	1,193	1,193	1,193	1,193
	in	47	47	47	47
Space Between Columns	mm	420	420	420	420
	in	16.5	16.5	16.5	16.5
Height	mm	1,582	1,582	1,582	1,582
	in	62.3	62.3	62.3	62.3
Width	mm	756	756	756	756
	in	29.8	29.8	29.8	29.8
Depth	mm	707	707	707	707
	in	27.8	27.8	27.8	27.8
Weight with Typical Load Cell	kg	110	110	121	141
	lb	242	242	266	312
Maximum Power Requirement	VA	300	300	600	700

Notes:

1. All systems conform to all relevant European standards and carry a CE mark.
2. Total vertical test space on all systems is the distance from the top surface of the base platen to the bottom surface of the moving crosshead, excluding load cell grips and fixtures.

The above specifications were developed in accordance with Instron's standard procedures and are subject to change without notice.

Common Specifications

Load Measurement Accuracy

±0.5% of reading down to 1/100 of load cell capacity. Meets or exceeds ASTM E4, BS 1610, DIN 51221, ISO 7500/1, EN 10002-2, JIS B7721, JIS B7733, and AFNOR A03-501 standards.

Strain Measurement Accuracy:

±0.5% of reading down to 1/50 of full scale with ASTM E83 class B or ISO 9513 class 0.5 extensometers. Meets or exceeds ASTM E83, BS 3846, ISO 9513, and EN 10002-4 standards.

Crosshead Speed Accuracy (Zero or constant load):

±0.2% of set speed

Power Supply

47 to 63 Hz. Must be free of spikes, surges, or sags exceeding 10% of the nominal voltage.

Operating Temperature:

+10 to +38°C (+50 to +100°F)

Storage Temperature:

-40 to +66°C (-40 to +150°F)

Humidity Range:

+10 to +90%, non-condensing

Atmosphere:

Designed for use under normal laboratory conditions. Protective measures may be required if excessive dust, corrosive fumes, electromagnetic fields, or hazardous conditions are encountered.

www.instron.com



Worldwide Headquarters
825 University Ave, Norwood, MA 02062-2643, USA
Tel: +1 800 564 8378 or +1 781 575 5000

European Headquarters
Coronation Road, High Wycombe, Bucks HP12 3SY, UK
Tel: +44 1494 464646

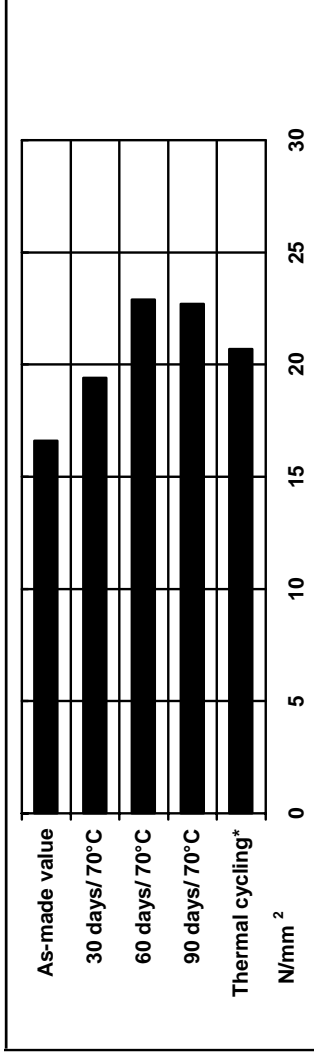
Instron Industrial Products
900 Liberty Street, Grove City, PA 16127, USA
Tel: +1 724 458 9610

Instron is a registered trademark of Illinois Tool Works Inc. (ITW). Other names, logos, icons and marks identifying Instron products and services referenced herein are trademarks of ITW and may not be used without the prior written permission of ITW. Other product and company names listed are trademarks or trade names of their respective companies. Copyright © 2011 Illinois Tool Works Inc. All rights reserved. All of the specifications shown in this document are subject to change without notice.

Anexo D. Ficha técnica do adesivo Araldite® 2015.

Lap shear strength versus heat ageing

Cure: 16 hours at 40°C



*25 cycles -30°C to + 70°C

Shear modulus (DIN 53445)

Cure: 1 hour at 80°C

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

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

tested at 23°C

Flexural Strength 42.7 MPa

Flexural Modulus 1813.6 MPa

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

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

(Static failing load 16 N/mm²)

Storage

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

Handling precautions

Caution
Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from

Structural Adhes

Araldite® 20 Two compo

- Key properties**
- Thixotropic
 - Toughened adhesive
 - Gap filling, non shrink
 - Suitable for SM
 - High shear and peel strength

Description
Araldite 2015 is a two thixotropic and non sa

Typical product data

Property	Value
Colour (visual)	White
Specific gravity	1.25
Viscosity at 25°C (Poise)	1000
Pot Life (100 gm at 25°C)	> 24 hours

Processing

Pretreatment
The strength and durability of the adhesive joint depends on the surface preparation (for plastics) or other factors. For metal surfaces, a low grade alcohol, followed by a degreasing agent (the strongest and most effective) ("pickling") the degree of pickling should be as high as possible.

Mix ratio

1:1 by weight

Mechanical processing

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

Equipment maintenance

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

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

Times to minimum shear strength

Temperature	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	12	7.5	4	1	-	-
LSS > 1N/mm ²	minutes	-	-	-	17	6
Cure time to reach	21	13	6	2	-	-
LSS > 10N/mm ²	minutes	-	-	-	35	7

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

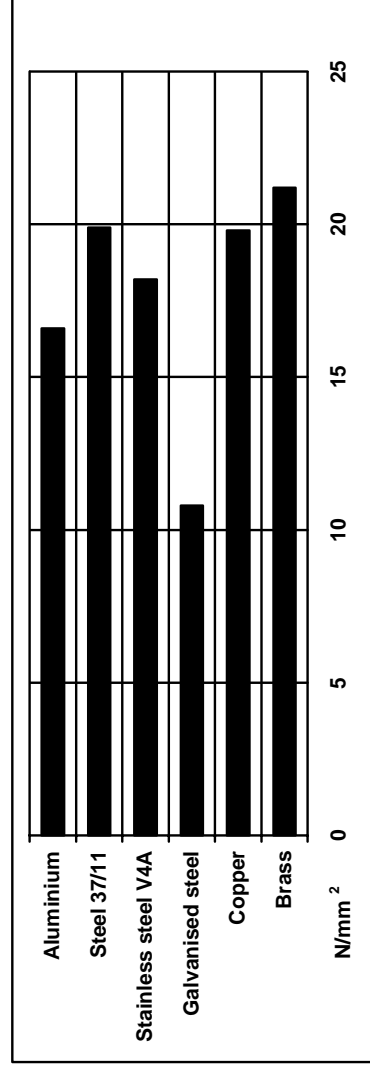
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 170 x 25 x 1.5 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

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

Note: The data in this edition is based on recent retesting of the product.

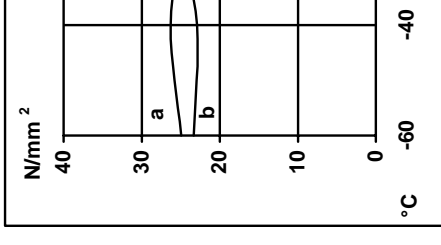
Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



Lap shear strength ver

Cure: (a) = 7 days at 23



Roller peel test (ISO 4587)

Cured 16 hours at 40°C

Glass transition tempe

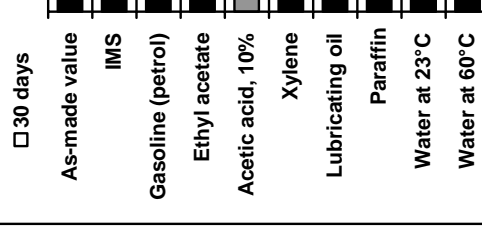
Cured 16 hours at 40°C

Cured 1 hour at 80°C

Dielectric constant (500

Lap shear strength ver

Unless otherwise stated



Mechanical processing

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

Equipment maintenance

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

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

Times to minimum shear strength

Temperature	10	15	23	40	60	100
Cure time to reach	12	7.5	4	1	-	-
LSS > 1N/mm ²	minutes	-	-	-	17	6
Cure time to reach	21	13	6	2	-	-
LSS > 10N/mm ²	minutes	-	-	-	35	7

LSS = Lap shear strength.

Typical cured properties

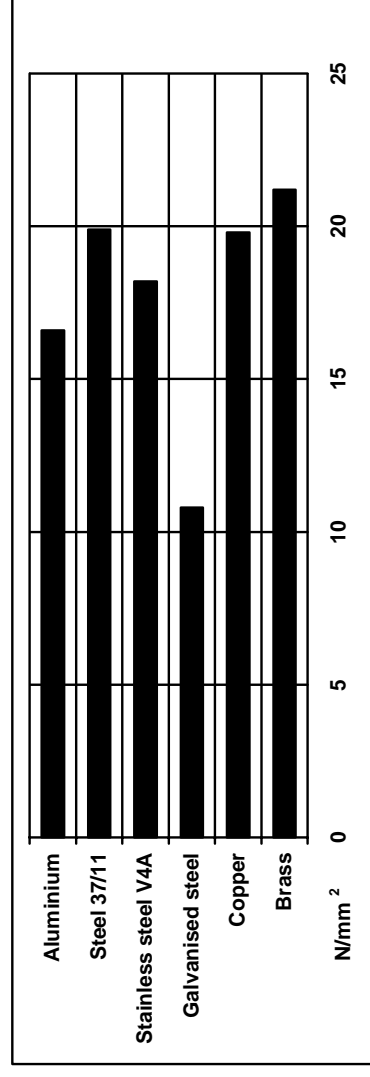
Unless otherwise stated, the figures given below were all determined by testing standard specimens made by lap-jointing 170 x 25 x 1.5 mm strips of aluminium alloy. The joint area was 12.5 x 25 mm in each case.

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

Note: The data in this edition is based on recent retesting of the product.

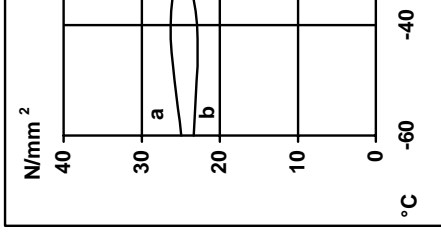
Average lap shear strengths of typical metal-to-metal joints (ISO 4587)

Cured for 16 hours at 40°C and tested at 23°C. Pretreatment - Sand blasting



Lap shear strength ver

Cure: (a) = 7 days at 23



Roller peel test (ISO 4587)

Cured 16 hours at 40°C

Glass transition tempe

Cured 16 hours at 40°C

Cured 1 hour at 80°C

Dielectric constant (500

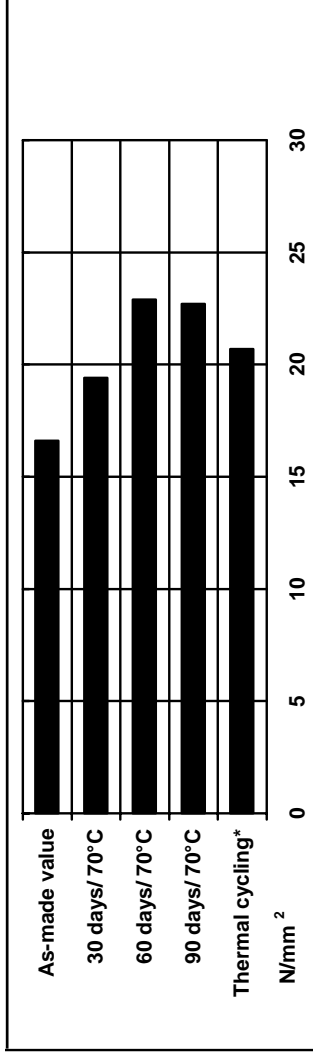
Lap shear strength ver

Unless otherwise stated



Lap shear strength versus heat ageing

Cure: 16 hours at 40°C



*25 cycles -30°C to + 70°C

Shear modulus (DIN 53445)

Cure: 1 hour at 80°C

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

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

tested at 23°C

Flexural Strength 42.7 MPa

Flexural Modulus 1813.6 MPa

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

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

(Static failing load 16 N/mm²)

Storage

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

Handling precautions

Caution
Our products are generally quite harmless to handle provided that certain precautions normally taken when handling chemicals are observed. The uncured materials must not, for instance, be allowed to come into contact with foodstuffs or food utensils, and measures should be taken to prevent the uncured materials from

Structural Adhes

Araldite® 20 Two compo

- Key properties**
- Thixotropic
 - Toughened adhesive
 - Gap filling, non shrink
 - Suitable for SM
 - High shear and peel strength

Description
Araldite 2015 is a two thixotropic and non sa

Typical product data

Property	Value
Colour (visual)	White
Specific gravity	1.25
Viscosity at 25°C (Poise)	1000
Pot Life (100 gm at 25°C)	> 24 hours

Processing

Pretreatment
The strength and durability of the adhesive joint depends on the surface preparation (for plastics) or other factors. For metal surfaces, a low grade alcohol, followed by a phosphoric acid solution (the strongest and most effective) the degree of pickling should be determined by the degree of surface preparation.

Mix ratio

The mix ratio is 1:1 by weight.